



الطرائق المغنطيسية



السنة الثالثة
فرع الجيوفيزياء التطبيقية



منشورات جامعة دمشق
كلية العلوم

الطرائق المغنطيسية

الدكتور

جمال أبوديب

أستاذ في قسم الجيولوجيا

1433 - 1434 هـ

2012 - 2013 م

جامعة دمشق



الفهرس

صفحة	
5	- الفهرس
9	- مقدمة الطبعة الرابعة
11	- الرموز المستخدمة
15	- مقدمة عامة: المغنطيسية الأرضية
16	I- مقدمة تاريخية
16	II- أصل الحقل المغنطيسي الأرضي
21	III- وحدات قياس الشدة المغنطيسية
22	IV- تغيرات الحقل المغنطيسي الأرضي
27	V- انقلاب الحقل المغنطيسي الأرضي
28	VI- الجيوفيزياء التطبيقية
31	الفصل الأول: المبادئ الأساسية للمغنطيسية
32	1-1- مقدمة
33	2-1- قانون كولومب والقوة المغنطيسية
33	3-1- العزم المغنطيسي
34	4-1- الحقل المغنطيسي
34	5-1- شدة المغنطيسية
35	6-1- المتأثرية المغنطيسية
35	7-1- التحريض المغنطيسي
36	8-1- النفوذية المغنطيسية
37	9-1- أنشوط البطاء والمغنطيسية المتبقية (المتخلفة)
38	10-1- درجة حرارة كوري
39	11-1- العناصر والفلازات المغنطيسية
42	12-1- المتأثرية المغنطيسية في الصخور

48	13-1- مغنطيسية الصخور
56	14-1- المراسد المغنطيسية
61	الفصل الثاني: التأثير المغنطيسي للأجسام المغنطيسية هندسية الشكل
62	1-2- مقدمة
62	2-2- علاقة بواصون
	3-2- التأثير المغنطيسي الناتج عن المركبة الشاقولية للحقل
64	المغنطيسي الأرضي
97	4-2- التأثير المغنطيسي الناتج عن الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي
113	الفصل الثالث: مقاييس المغنطيسية
114	1-3- مقدمة
116	2-3- المقاييس المستخدمة في المسح المغنطيسي
145	الفصل الرابع: طرائق المسح المغنطيسي
146	1-4- مقدمة
146	2-4- المسح المغنطيسي القاري
168	3-4- المسح المغنطيسي الجوي
182	4-4- المسح المغنطيسي البحري
183	5-4- أمثلة على الأنواع المختلفة للمسح المغنطيسي
193	الفصل الخامس: تفسير المعطيات المغنطيسية
194	1-5- مقدمة
195	2-5- التفسير الكيفي للمعطيات المغنطيسية
209	3-5- التفسير الكمي للمعطيات المغنطيسية
218	4-5- التفسير الكمي لمعطيات المركبة المغنطيسية الشاقولية
225	5-5- التفسير الكمي لمعطيات الحقل المغنطيسي الكلي
281	6-5- أمثلة على المسح المغنطيسي
	الفصل السادس: المغنطيسية الأثرية، التنقيب المغنطيسي الأثري
307	والمغنطيسية البيئية
308	1-6- مقدمة



308	2-6- المغنطيسية الأثاري
314	3-6- التقيب المغنطيسي الأثاري
331	4-6- المغنطيسية البيئية

349	- المراجع
355	- جدول المصطلحات العلمية مرتبة وفق الأبجدية العربية
367	- جدول المصطلحات العلمية مرتبة وفق الهجائية الإنجليزية



مقدمة الطبعة الرابعة

بدأ تدريس مقرر الطرائق المغناطيسية في التنقيب عام 1980 كاملة، تحولت إلى كتاب منسوخ في العام 1982، وصدرت ككتاب معدل مطبوع عام 1997، والآن وبعد مرور خمس عشرة سنة على تلك الطبعة تم تعديل الكتاب بشكل جذري نظراً لما طرأ على العلم من تطور.

وقد تناولت التعديلات إعادة صياغة فصول الكتاب كلها والتوسع فيها. بدأ الكتاب بمقدمة عامة عن المغناطيسية الأرضية لتكون وسيلة إيضاح للأسس التي تقوم عليها هذه الطرائق وشملت أصل الحقل المغناطيسي الأرضي وتغيراته مع الزمان والمكان وانقلابه خلال التاريخ الجيولوجي. أعيدت صياغة الفصل الأول بشكل جذري وأضيف إليه موضوع المراسد المغناطيسية ودورها في هذا النوع من الدراسات وأهميتها للعديد من فروع العلوم. تم التوسع بالفصل الثاني ليشمل العديد من الأفكار الجديدة عن التأثير المغناطيسي للأجسام المغناطيسية المختلفة.

كما تم تعديل الفصل الثالث والتوسع بفقرة أجهزة المسح الجوي والمسح البحري. تم تعديل الفصل الرابع وأدخلت خرائط خطوط تساوي شدة المركبات المغناطيسية الأرضية في سورية لبدائية عام 2008، بحيث تعطي فكرة واضحة عن تغيرات الحقل المغناطيسي الأرضي في سورية. كما تم التوسع في الطرائق الإلكترونية المستخدمة في المسح المغناطيسي الجوي والبحري.

أعيد تنسيق الفصل الخامس بخاصة التفسير الكيفي والكمي للمعطيات المغناطيسية وأضيفت بعض طرائق التفسير الأخرى. ثم تم التوسع بفقرة الأمثلة على المسح المغناطيسي بحيث شملت كل أنواع المسح المختلفة.

تم تعديل الفصل السادس بحيث شمل المغناطيسية الآثارية والتنقيب المغناطيسي الآثاري، وأضيفت فقرة ثالثة جديدة هي المغناطيسية البيئية بسبب تزايد استخدام الطرائق المغناطيسية في الكشف عن المواقع المسببة لتلوث البيئة.

راجياً أن تكون هذه الطبعة المعدلة قد قدمت عملاً متكاملًا، شمل كل ما يمكن أن تقدمه الطرائق المغناطيسية للتنقيب الفلزي والهيدروكربوني والاستكشاف الآثاري، وسلامة البيئة التي أصبحت هاجساً للإنسان المعاصر.

وأن أكون قد وفقت في تحقيق الهدف من الكتاب، ليفيد الطالب، والمنقب، والباحث، في مجال المغناطيسية التطبيقية، فقد حرصت على الدقة، لكن جلّ من لا يخطئ.

والله ولي التوفيق

المؤلف

حزيران 2012

الرموز المستخدمة

نظراً لتعدد المراجع التي اعتمدت في إعداد هذا الكتاب، واختلاف رموز المصطلحات بين مرجع وآخر، تم توحيد الرموز ماعدا القليل منها الذي بقي كما ورد في المنشورات الأصلية. سنورد فيما يلي الرموز مرتبة وفق الأبجدية العربية للمصطلحات.

الرمز	المصطلح
r	البعد بين جسمين أو بين جسم والمقياس
L	البعد بين قطبي ثنائي القطب
V	الحجم
ω, Ω	الزاوية المجسمة
ω_1	الزاوية المجسمة للسطح العلوي للجسم
ω_2	الزاوية المجسمة للسطح السفلي للجسم
X	المركبة الشمالية للحقل المغناطيسي الأرضي
Y	المركبة الشرقية للحقل المغناطيسي الأرضي
Z	المركبة الشاقولية للحقل المغناطيسي الأرضي
H	المركبة الأفقية للحقل المغناطيسي الأرضي
x	المسافة الأفقية
γ_p	النسبة الجيومغناطيسية للبروتون
D	انحراف مغناطيسي
O_e	أورستد
B	تحريرض مغناطيسي
f	تردد حركة دورانية
g	تسارع الجاذبية الأرضية
T	تسلا
G	ثابت الجاذبية العالمي
h	ثابت بلانك
ω	سرعة زاوية
t	سمائة صفيحة أفقية (وشريحة أفقية)
b	سمائة أو عرض صفيحة شاقولية
I	شدة المغناطيسية

I_r	شدة المغنطيسية المتبقية
I_i	شدة المغنطيسية المتحرضة
I_l	شدة المغنطيسية الكلية
H	شدة حقل مغنطيسي بدون تحديد
T	شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي
H_x	شدة المركبة المغنطيسية الشمالية
H_y	شدة المركبة المغنطيسية الشرقية
H_z	شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية
H_h	شدة المركبة المغنطيسية الأفقية
H_T	شدة الحقل المغنطيسي الكلي
$H_{z,max}$	شدة المركبة الشاقولية العظمى
$H_{z,min}$	شدة المركبة الشاقولية الصغرى
$H_{T,max}$	شدة الحقل الكلي العظمى
$H_{T,min}$	شدة الحقل الكلي الصغرى
L	طول اتجاه الجسم
λ	طول الموجة اللاسلكية
M	عزم مغنطيسي
z	عمق سطح ما
z_1	عمق السطح العلوي لجسم
z_2	عمق السطح السفلي لجسم
z_c	عمق مركز جسم كروي أو محور أسطوانة أفقية
γ	غاما
G	غاوص
P	قوة القطب
$-P$	قوة القطب السالب
$+P$	قوة القطب الموجب
F	قوة المغنطيسية
m	كتلة الجسم
λ	كتلة واحدة الطول
ρ	كثافة الجسم
V	كمون جاذبي

U	كمون مغناطيسي
k	متأثرية مغناطيسية
O	مركز سطحي
S	مسافة شبكية لشبكة قياسات
A	مساحة مقطع عرضي
f	معامل حساب عمق جسم
I	ميل مغناطيسي
nT	نانوتسلا
$\chi_{1/2}$	نصف عرض الشواذ
R	نصف قطر كرة أو أسطوانة
μ	نفوذية مغناطيسية
γ	تردد الإشعاع



مقدمة عامة
المغناطيسية الأرضية

General Introduction
Geomagnetism

I- مقدمة تاريخية:

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 جيلبرت (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.

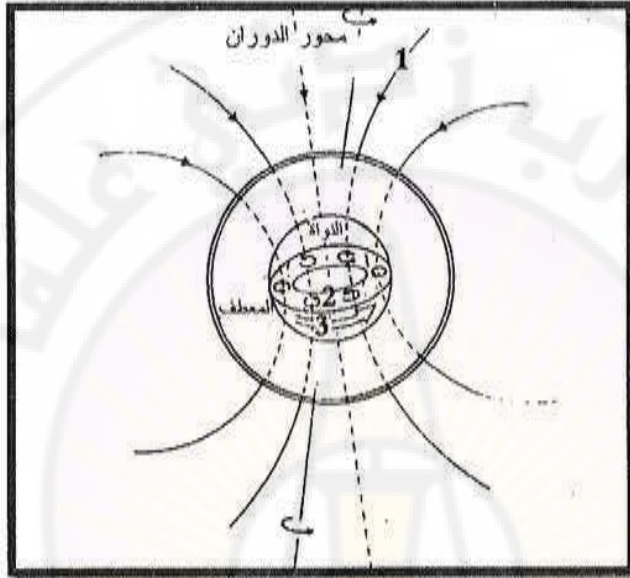
في القرنين السابع عشر والثامن عشر تم، خلال رحلات الاستكشاف الأوروبي للعالم، قياس تغيرات الانحراف المغنطيسي (Magnetic Declination) والميل المغنطيسي (Magnetic Inclination) في العالم مما أدى إلى وضع خريطة خطوط تساوي الانحراف المغنطيسي (Isogonic map) في المحيط الأطلسي عام 1701 بواسطة هالي (Halley)، وتبع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

قام كارل فريدريك غاوس (Karl Frederick Gauss) بدراسات مكثفة للحقل المغنطيسي الأرضي بين عامي 1830 و 1840 ومازال العديد من نتائجه صالحاً حتى الآن. وبين من تحليلاته الرياضية أن 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 غاوس 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.

II- 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 I). 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 (I): الحقل المغناطيسي الأرضي والتيارات الحلقية.
 1- خطوط الحقل المغناطيسي 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، ويبعد عن مركز الأرض 300 كم باتجاه إندونيسيا، وإحداثيات أقطابه هي 78.5°S , 110°E و 78.5°N , 70°W ، أما القطبين المغناطيسيين حيث $I = 90^\circ$ وما يسمى أقطاب الغطس Dip poles فإحداثياتهما هي 67°S , 143°E و 101°W , 75°N (Telford et al., 1976) (الشكل II).



الشكل (II): بيان أماكن الأقطاب: الجغرافي والمغنطيسي والغطس.

(حسب ماكلهني 1973 McElhinny)

يعطي الشكل (III) 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 فتتمثل 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 I) عناصر الحقل المختلفة:

$$X = H \cos D$$

$$Y = H \sin D$$

$$Z = T \sin I = H \tan I$$

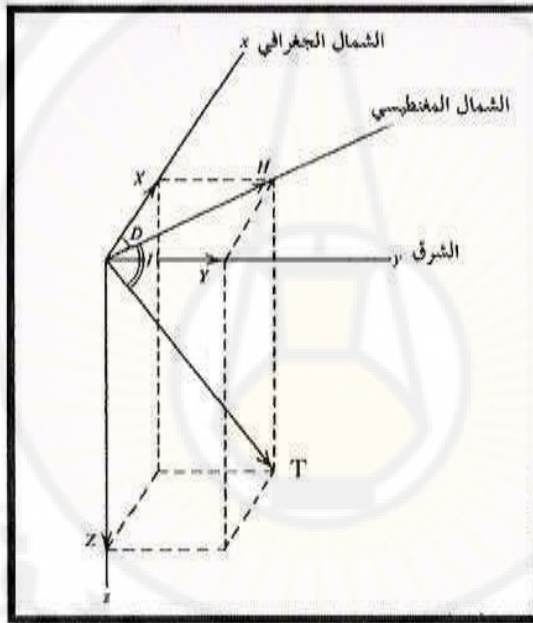
$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} = T \cos I$$

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2}$$

$$\tan I = \frac{Z}{H}$$

$$\tan D = \frac{Y}{X}$$

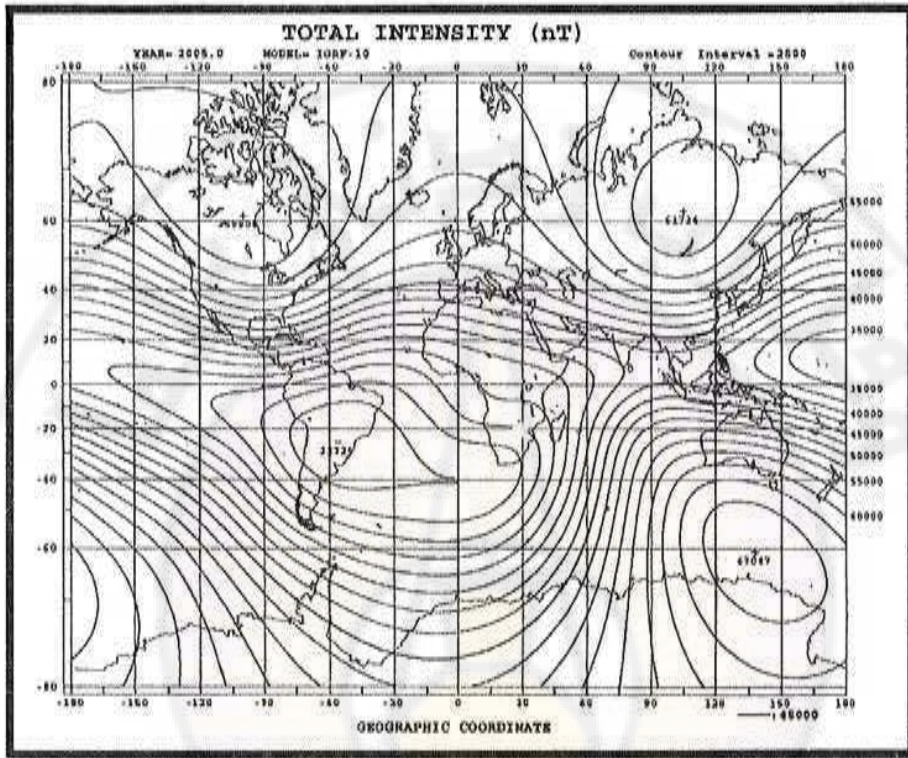
(I)



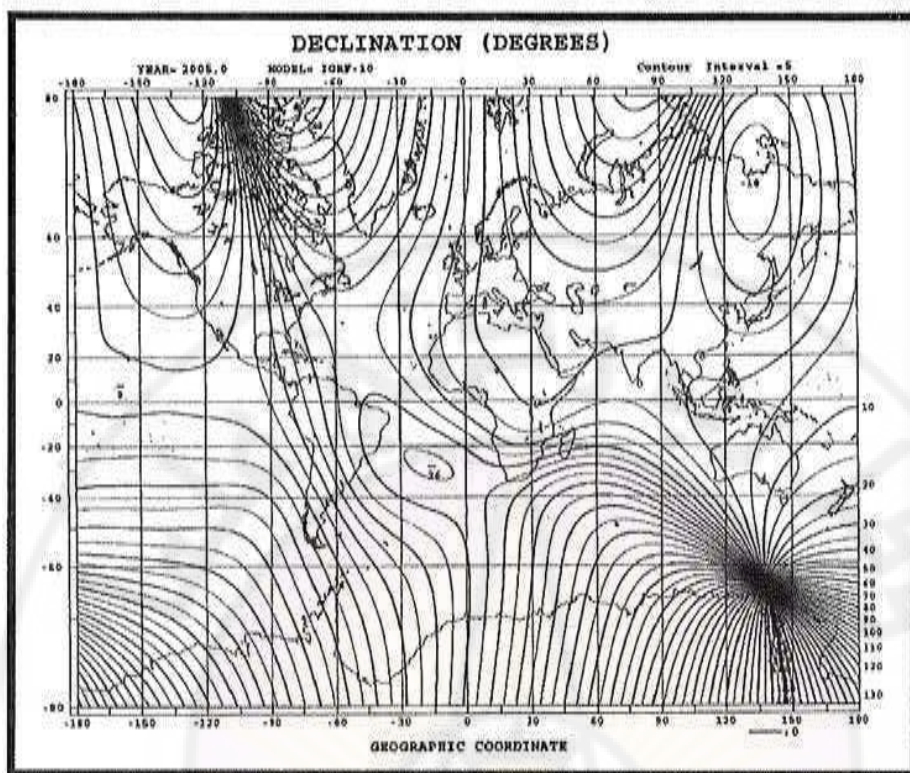
الشكل (III): عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي.

أصدر "المركز العالمي للمغنطيسية الأرضية" (World Data Center for Geomagnetism) (WDC, 2008) التابع "مركز تحليل معلومات المغنطيسية الأرضية والمغنطيسية الفضائية في كلية خريجي العلوم بجامعة كيوتو اليابانية" (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism of the Graduate School

of Science , Kyoto University , Japan) خرائط خطوط تساوي مركبات الحقل المغنطيسي الأرضي للعام 2005. نورد فيما يلي خرائط خطوط تساوي الحقل الكلي والانحراف (الشكل IV والشكل V).



الشكل (IV): خريطة خطوط تساوي الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي لعام 2005.
(حسب المركز العالمي للمغنطيسية الأرضية (WDC, 2008)



الشكل (V): خريطة خطوط تساوي انحراف الحقل المغنطيسي الأرضي لعام 2005.
(حسب المركز العالمي للمغنطيسية الأرضية (WDC, 2008)

III- 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 بالغاма Gamma، ويرمز لها بـ γ ، وتساوي جزءاً من مئة ألف من الأورستد:

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

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

$$1T = 10^4 \text{Oe}$$

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

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

وبما أن

إذن

تساوي شدة الحقل المغناطيسي الكلي 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 عالٍ لمواد مغناطيسية.

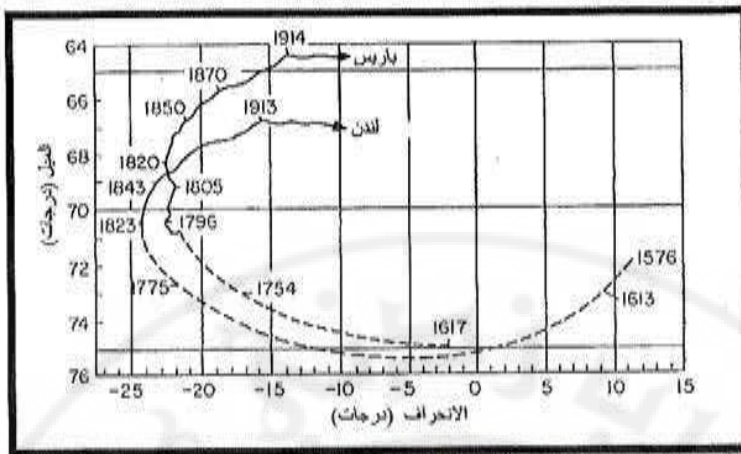
IV- تغيرات الحقل المغناطيسي الأرضي:

يتألف الحقل المغناطيسي الأرضي من جزأين هما الحقل الرئيسي والحقل الشاذ، أو التغيرات القارية، وهو يتغير مع الزمان والمكان والارتفاع عن سطح الأرض. تلخص التغيرات الحاصلة في الحقل المغناطيسي الأرضي بما يلي:

- | | |
|--------------------------|---|
| Secular Variations | أ - التغيرات القارية |
| Lunar diurnal Variations | ب - التغيرات اليومية القمرية |
| Solar diurnal Variations | ج - التغيرات اليومية الشمسية |
| Magnetic storms | د - التغيرات الناتجة عن العواصف المغناطيسية |

1- التغيرات القارية:

إن التغيرات القارية هي تغيرات بطيئة في الحقل المغناطيسي الأرضي، تتم خلال عقود وقرون من الزمن وبمعدل متغير مع الزمن ويمكن ملاحظتها في كل المراصد العالمية (الشكل VI).



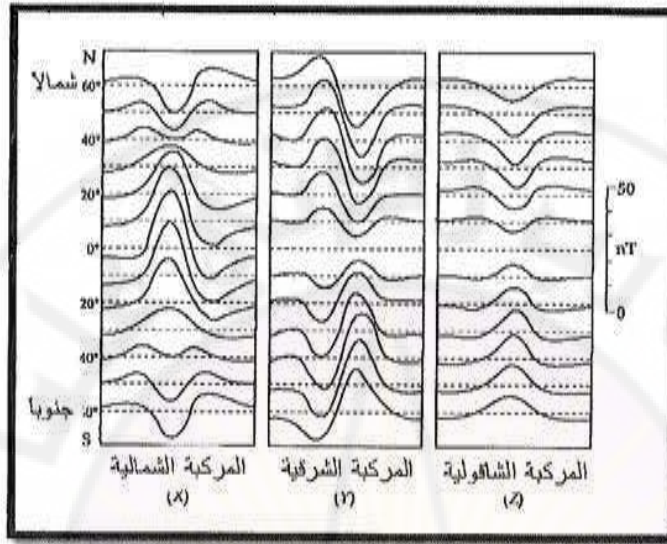
الشكل (VI): التغيرات القارية في لندن وباريس من تسجيلات المراصد.
(حسب ماكلهني 1973, McElhinny)

2- التغيرات اليومية:

إن للتغيرات اليومية (diurnal variations)، برغم صغرهما، أهمية كبرى نظراً للسرعة التي تتم بها، إذ يكون لها دورة مقدارها يوم واحد ومتوسط سعتها (25 نانوتسلا)، ويتم تسجيلها في المراصد المغناطيسية وتظهر هذه التسجيلات نوعين من التغيرات، التغيرات الهادئة (الشكل VIII) والتغيرات المضطربة (الشكل IX)، تكون التغيرات الهادئة ناعمة ومنتظمة ومنخفضة السعة ويمكن فصلها إلى مركبات لها دورات قمرية تسمى التغيرات اليومية القمرية، ومركبات لها دورات شمسية تسمى التغيرات اليومية الشمسية.

تظهر تحاليل التغيرات اليومية الهادئة على نطاق كبير أن لها دورية مقدارها 24 ساعة، وتعتمد على التوقيت المحلي للمنطقة وخط عرضها نظراً لاعتمادها على وضع الأرض بالنسبة للشمس، لذا سميت التغيرات الشمسية اليومية وتبلغ سعتها أو شدتها بحدود (40 نانوتسلا)، وتستمر في أثناء الصيف، وقد عزى تشكلها لتأثير الشمس في الغلاف المتأين (Ionosphere) للأرض. وبالتالي يتغير الحقل المغناطيسي الأرضي يومياً خاصة في

أثناء فصل الصيف. تتغير عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي في آن واحد، ولكن بطور متعاكس في نصف الكرة الشمالي ونصف الكرة الجنوبي (الشكل VII).

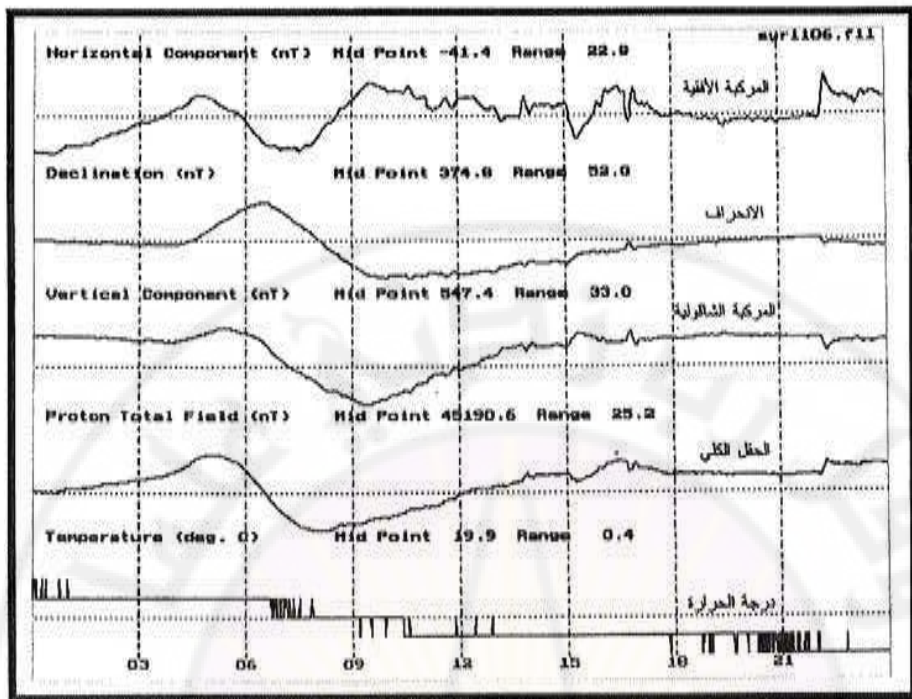


الشكل (VII): تغير عناصر الحقل المغناطيسي الأرضي في آن واحد في نصف الكرة الشمالي ونصف الكرة الجنوبي.

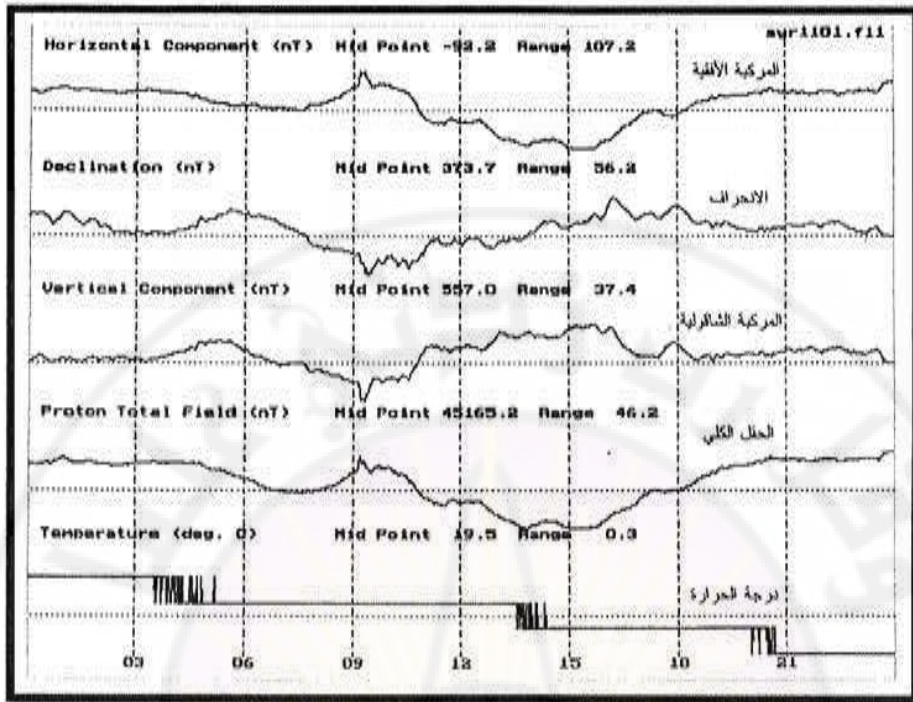
(حسب لوري 2007 Lowrie)

هنالك أيضا التغيرات اليومية القمرية التي يبلغ متوسط سعتها (2) نانوتسلا ولها دورية مقدارها 25 ساعة، وقد عُرِي تشكيلها لتأثير القمر على الغلاف المتأين للأرض أثناء دوران القمر حول الأرض. لكن هذه التغيرات أقل أهمية من التغيرات الشمسية نظراً لانخفاض سعتها.

يظهر الشكل (VIII) التغيرات اليومية الهادئة في المرصد المغناطيسي السوري في يوم 6 كانون الأول 2011، بينما يظهر الشكل (IX) التغيرات اليومية الهادئة في المرصد المغناطيسي السوري في يوم 1 كانون الأول 2011، كما يظهر من الأرقام المسجلة في العمود الثالث من يمين الشكلين.



الشكل (VIII): التغيرات اليومية الهائلة في المرصد المغناطيسي السوري في 6 كانون الأول 2011.



الشكل (IX): التغيرات اليومية المضطربة في المرصد المغنطيسي السوري في 1 كانون الأول 2011.

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°)، وتزداد سعتها كثيراً في المناطق القطبية، حوالي 1000 نانوتسلا، حيث تترافق مع حدوث الشفق القطبي.

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



الشكل (X): تغيرات المركبة الشاقولية في المرصد المغنطيسي السوري في أثناء عاصفة مغنطيسية في تشرين الثاني عام 2003.
(حسب أبوديب وزملاءه 2009 (Abou-Deeb et al., 2009))

V- انقلاب الحقل المغنطيسي الأرضي:

ثبت، بنتيجة دراسات المغنطيسية القديمة palaeomagnetism، أن الحقل المغنطيسي الأرضي قادر على الانقلاب بمقدار 180 درجة، بحيث يتبادل القطبان الشمالي والجنوبي أماكنهما. وقد أثبت التوافق والتزامن في حدوث هذا الانقلاب في صخور رسوبية واندفاعية من مناطق مختلفة من القارات وأحزمة الصخور الاندفاعية المتناظرة حول العرف المحيطي oceanic ridge هذه الفرضية، مما ساعد على وضع سلم زمني لانقلاب الحقل المغنطيسي الأرضي، يستعمل حالياً لتأريخ الصخور. يعطي الشكل (XI) سلم الانقلاب لمئة وأربعين مليون سنة مضت (Tarling, 1971).

تطبيق الطريقة حتى طبع البروفيسور روبرت ثالين Robert Thalen عام 1879 كتاباً بعنوان "فحص التوضعات الفلزية الحديدية بالقياسات المغناطيسية":

The examination of iron deposits by magnetic measurements

ثم مهد صنع مقياس المغناطيسية في السويد بواسطة Thalen-Tiberg، ثم مقياس Thomson-Thalen الطريق لتحديد اتجاه الجدران القاطعة المغناطيسية وميلها وعمقها عن سطح الأرض.

تستخدم الطرائق المغناطيسية للتنقيب عن البترول والمعادن. ففي التنقيب عن البترول تهدف إلى معرفة عمق صخور الركيزة (Basement rocks) وبالتالي معرفة سماكة الصخور الرسوبية، وللمعطيات المغناطيسية قيمة خاصة عند التنقيب في مناطق غير مدروسة سابقاً مثل الرصيف القاري (Continental Shelf)، وكثيراً ما تلجأ في تقديم المعلومات الكافية لرسم طبوغرافية صخور الركيزة وإبراز مظاهرها القادرة على التأثير في الرسوبيات المتوضعة فوقها.

أما عند التنقيب عن المعادن فيستخدم مقياس المغناطيسية (Magnetometer) للتحري عن الفلزات المغناطيسية مباشرة. كما أن هذه الطرائق فعالة عند البحث عن الفلزات غير المغناطيسية بحد ذاتها إنما المختلطة مع فلزات مغناطيسية موجودة بكمية كافية لقياس تأثيرها على سطح الأرض.

لقد انحصر استخدام الطرائق المغناطيسية حتى منتصف الأربعينيات من القرن العشرين بالطرائق الأرضية المشابهة لطرائق المسح الجاذبي. أما حالياً فتستخدم الطرائق الأرضية والجوية والبحرية كما في معظم طرائق المسح الجيوفيزيائي.



الفصل الأول

المبادئ الأساسية للمغناطيسية

Fundamental Principles of
Magnetism

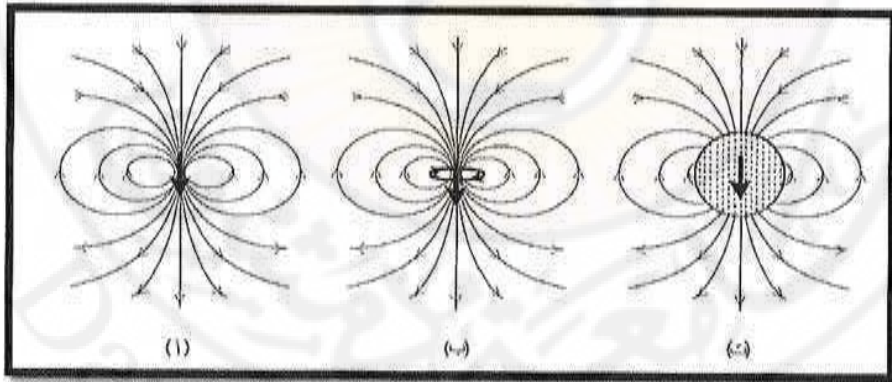
1-1- مقدمة:

وضع الفيزيائيون الأوائل مفهوم: (أن لقوى الجاذبية والكهربائية والمغناطيسية المتبادلة بين المواد تأثير أني يتم بالتأثير عن بعد)، ثم أدخل فارادي (Faraday) مفهوم حقل القوة (force-field) الذي اعتبره الفراغ الذي تعمل فيه القوة. أي أن حقل القوة يُعدّ وسيطاً في تفاعل الأشياء. ويمثل الحقل بخطوط الحقل (field lines)، بحيث يكون اتجاه القوة هو المماس لخط الحقل في أية نقطة، وشدة القوة متناسبة مع عدد خطوط القوة في واحدة المساحة.

إن الأمر أكثر تعقيداً في المغناطيسية من الكهربائية أو الجاذبية، حيث يكون اتجاه القوة نحو مركز القوة، وتتغير عكساً مع مربع المسافة، بينما الحقل المغناطيسي لا مركزياً ويتغير مع زاوية الاتجاه. وكذلك تتغير شدة الحقل عكساً مع مكعب المسافة.

بين غاوص (Gauss) بأن القطب المغناطيسي (magnetic pole) الوحيد غير موجود، فكل قطب موجب يجب أن يقابله قطب سالب، بشكل ثنائي قطب مغناطيسي (magnetic dipole)، كما في الشكل (1-1-أ). كما أن للوشعة الكهربائية الصغيرة (الشكل 1-1-ب) وللكرة متجانسة المغنطة (الشكل 1-1-ت) حقل ثنائي القطب.

فالقُطب المغناطيسي هو النقطة التي تتلاقى فيها خطوط الحقل أو القوة، وتبعد قليلاً عن طرف المغناطيس باتجاه وسطه.



الشكل (1-1): خطوط القوة المغناطيسية حول: (أ) - ثنائي قطب، (ب) - وشعة كهربائية، (ت) - كرة متجانسة المغناطيسية.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

1-2- قانون كولومب والقوة المغناطيسية Coulomb's Law and

:Magnetic force

بينت تجارب كولومب في عام 1785 أن القوة بين نهايتي مغنطيس رفيع وطويل متناسبة عكساً مع المسافة بينهما. ثم طور غاوص ملاحظات كولومب وعزى قوى التنافر والتجاذب بين المغناط إلى الأقطاب المغناطيسية. تكون القوة (F) بين قطبين مغناطيسيين قوتهما p_1 و p_2 وتفصل بينهما مسافة r :

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

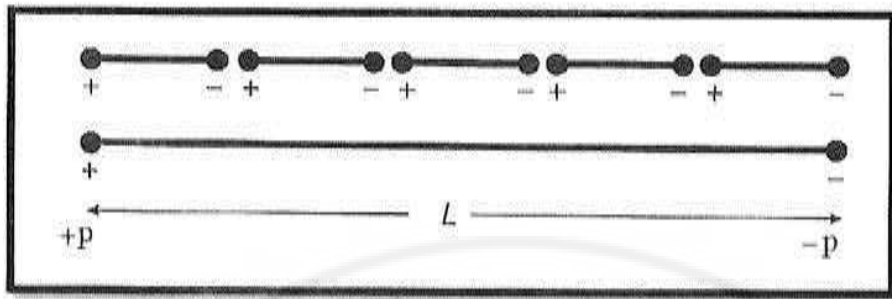
حيث ثابت التناسب μ هو النفوذية المغناطيسية (magnetic permeability) وتعتمد على الخواص المغناطيسية للوسط المحيط بالقطبين.

1-3- العزم المغناطيسي Magnetic moment

عند وضع ثنائي قطب في حقل مغناطيسي يدور ليأخذ اتجاه الحقل المغناطيسي، لذا يقال بأن لثنائي القطب عزم مغناطيسي. يؤدي وضع ثنائيات أقطاب متعاكسة (الشكل 1-2) على استقامة واحدة إلى تشكل مغنطيس طويل ثنائي القطب مؤلف من قطبين متساويين قوة ومختلفين إشارة $+p$ و $-p$ وتفصل بينهما مسافة L . بالتعريف يكون العزم المغناطيسي M للمغنطيس مساوياً لجداء قوة القطب في المسافة الفاصلة بين القطبين:

$$M = p \cdot L \quad (1-2)$$

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



الشكل (1-2): وصل ثنائيات أقطاب لتشكيل مغناطيسي طويل طوله L وعزمه المغناطيسي M .

(حسب ملسوم 2004 Milsom)

1-4- الحقل المغناطيسي Magnetic field:

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

$$H = \frac{F}{p_0} = \frac{pp_0}{\mu r^2 p_0} = \frac{p}{\mu r^2} \quad (1-3)$$

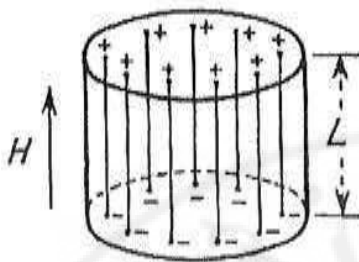
تقاس شدة الحقل المغناطيسي في نظام cgs بالأورستد وبالنظام الدولي SI بالتسلا.

1-5- شدة المغنطيسية Intensity of magnetization:

يؤدي وضع مادة مغنطيسية في حقل مغناطيسي خارجي شدته (H) إلى تحريض أقطاب مغنطيسية (الشكل 1-3) على طرفي المادة. تدعى هذه العملية الاستقطاب المغناطيسي magnetic polarization وتكون شدته (I) متناسبة مع شدة الحقل المغناطيسي الخارجي (H) . هذه الشدة مساوية لقوة القطب بوحدة مساحة السطح العمودي A على الحقل المغناطيسي الخارجي، أو بالعزم المغناطيسي بوحدة الحجم V ، أي:

$$I = \frac{p}{A} = \frac{pL}{AL} = \frac{M}{V} \quad (1-4)$$

الأقطاب الموجبة على السطح العلوي



A مساحة السطح

L طول الجسم

H شدة الحقل المقطب

اتجاه الحقل المقطب

من الأسفل للأعلى

الأقطاب السالبة على السطح السفلي

الشكل (1-3): الاستقطاب المغنطيسي في حقل خارجي.

(حسب دوبرين 1976 Dobren)

1-6- المتأثرية المغنطيسية Magnetic susceptibility:

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

$$I = k \cdot H \quad (1-5)$$

ومنه

$$k = \frac{I}{H} \quad (1-6)$$

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

1-7- التحريض المغنطيسي Magnetic induction:

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

$$H' = 4 \pi I \quad (1-7)$$

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

$$B = H + H' = H + 4\pi I = H + 4\pi kH = H(1 + 4\pi k) \quad (1-8)$$

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

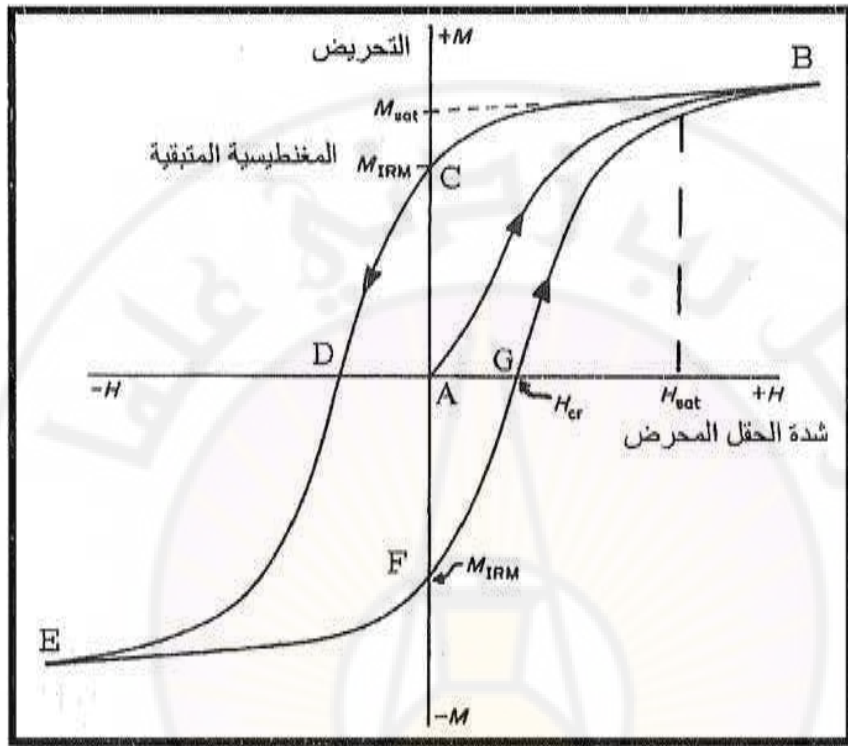
1-8- النفوذية المغنطيسية Magnetic permeability:

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

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{H(1 + 4\pi k)}{H} = 1 + 4\pi k \quad (1-9)$$

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 دون واحدة.

9-1- أنشودة البطاء والمغنطيسية المتبقية (المتخلفة) Hysteresis
:loop & residual magnetization



الشكل (4-1): أنشودة البطاء المغنطيسي في مادة حديدية المغنطة.
(حسب تارلنغ 1971 Tarling)

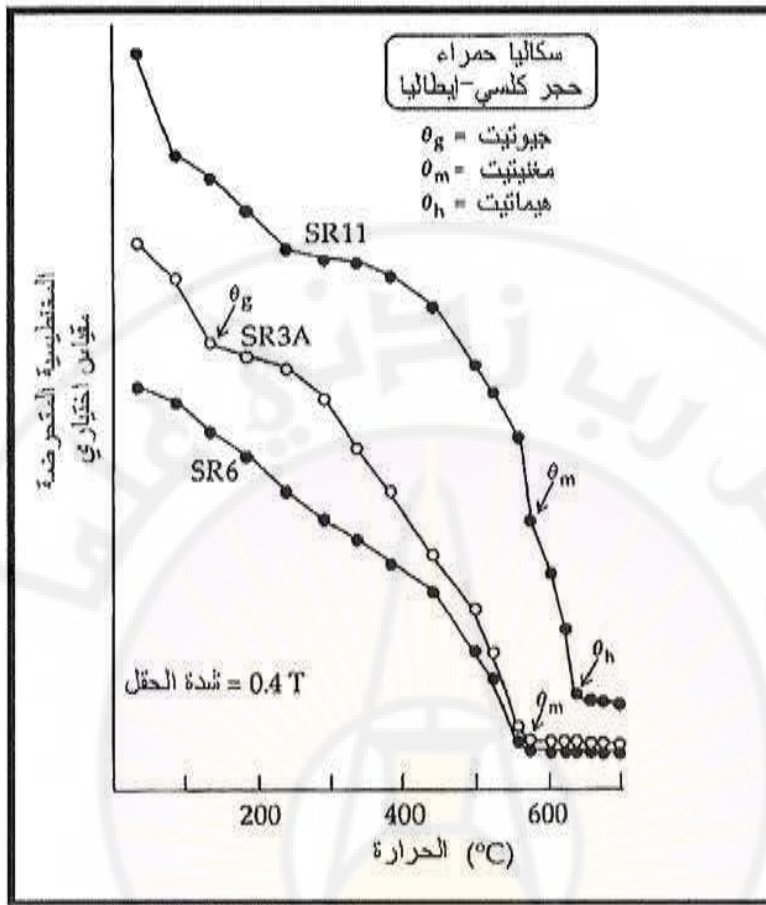
إذا وضعنا قطعة من مادة حديدية المغنطة بين قطبي مغنطيس كهربائي ينتج حقل مغنطيسي شدته (H)، ويمكن زيادته وإنقصاه وعكسه بزيادة أو إنقاص أو عكس التيار الكهربائي المار في الوشعة، ثم مررنا تياراً كهربائياً بحيث تزداد شدة الحقل المغنطيسي من الصفر (A) (الشكل 4-1)، فيزداد التحريض وتكون قيمة التحريض متناسبة مع شدة الحقل (H)، لتحقيق العلاقة $B = \mu H$ (9-1) في المرحلة الأولى إلى أن يصل التحريض إلى الإشباع (Saturation) في نقطة (B) بحيث أنه مهما زادت شدة الحقل (H) يبقى التحريض

ثابتاً، ولو خفضنا شدة الحقل المغناطيسي تدريجياً حتى يصل إلى الصفر في نقطة (C) نجد أن التحريض لا يعود إلى الصفر في نقطة (A) بل يعود إلى نقطة (C)، بمعنى أن المادة المغناطيسية تحتفظ ببعض التحريض ومقداره (M_{IRM})، وهي ما ندعوه بالمغناطيسية المتبقية Residual magnetization. لو عكسنا التيار الكهربائي وزدناه فبتناقص التحريض حتى يصل إلى الصفر في نقطة (D)، ثم يبدأ بعدها بالازدياد في الاتجاه المعاكس إلى أن يصل إلى الإشباع في الاتجاه المعاكس في نقطة (E)، لو أنقصنا الحقل إلى الصفر نلاحظ أن التحريض يعود إلى نقطة (F) أي أن هنالك مغناطيسية متبقية قيمتها (-M_{IRM}). ثم نزيد شدة الحقل بالاتجاه الأول حتى نقطة (G) فنزول المغناطيسية المتبقية، لو تابعنا بعدها زيادة الحقل نجد أن التحريض يصل إلى حالة الإشباع في نقطة (B). ندعو هذه السلسلة من التطورات أنشودة البطاء (Hysteresis loop).

تظهر أنشودة البطاء المغناطيسي كيفية اكتساب مادة حديدية المغنطة لمغناطيسية متبقية حتى بعد زوال الحقل المغناطيسي الخارجي، والتي يمكن أن تستمر لفترة طويلة من الزمن قد تبلغ آلاف الملايين من السنين.

10-1- درجة حرارة كوري Curie temperature:

يصعب أحياناً تمييز الفلزات المغناطيسية بسبب نسبتها المنخفضة في الصخر، لذا يتم اللجوء لقياس درجة حرارة كوري للفلز التي تعتبر عاملاً مميزاً لكثير من الفلزات المغناطيسية. تقاس درجة حرارة كوري بمقياس خاص حيث ترفع درجة حرارة عينة من المادة وتقاس شدة مغناطيسيتها المتناقصه خلال ذلك، وتعتبر درجة كوري هي درجة الحرارة التي تزول فيها مغناطيسية العينة (الشكل 1-5). وبالاتجاه المعاكس فإن درجة حرارة كوري هي الدرجة التي تكتسب فيها الصخور الاندفاعية أو المسخنة معظم مغناطيسيتها أثناء تبردها.



الشكل (5-1): تحديد درجة حرارة كوري لعينات صخرية.
(حسب لوري 2007, Lowrie)

يعطي الشكل (5-1) تحديد درجات حرارة كوري لعينات من السكاليا الحمراء الكلسية من إيطاليا. تبين أن العينة SR3A تحتوي على جيوثيت ودرجة حرارة كوري θ_g له حوالي 100 درجة مئوية، بينما تحتوي العينات الثلاثة على مغنيتيت الذي درجة حرارة كوري θ_m له حوالي 570 درجة مئوية، أما العينة SR11 فتحتوي فقط على هيماتيت الذي درجة حرارة كوري θ_h له حوالي 650 درجة مئوية.

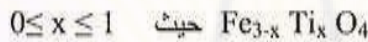
1-11- العناصر والفلزات المغناطيسية:

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

أهم الفلزات المغنطيسية هي أكاسيد الحديد- تيتانيوم كما يبدو من الشكل (1-6) الذي يعطي المخطط الثلاثي لسلسلة مركبات أكاسيد الحديد-التيتانيوم المغنطيسية. تشغل زوايا هذا المخطط فلزات الويستيت والهيماتيت والروتيل (wustite, haematite, rutile). أكثر الفلزات المغنطيسية أهمية هي التي تعود لسلسلة: (أ) التيتانومغنيتيت (titanomagnetite)، و (ب) التيتانوهيماتيت (titanohaematite). أما السلسلة الثالثة: الإلمينوروتيل-بسيديبروكيت (ilmeno-rutile-pseudobrookite) فهي ذات مغنطيسية طردية في درجات الحرارة العادية وهي نادرة، وبالتالي دورها غير مهم من الناحية المغنطيسية.

أ- سلسلة التيتانومغنيتيت:

يصف هذا الاسم الصيغة الكيميائية التالية:



يشغل طرفي هذه السلسلة: (أ) المغنيتيت ذو المغنطيسية العالية و (ب) الإلفوسبينيل (ulvospinel) ذو المغنطيسية الطردية في درجة الحرارة العادية. يعد المغنيتيت من أهم الفلزات المغنطيسية وأشدّها مغنطة ودرجة حرارة كوري له 578 درجة مئوية. ومتأثرته المغنطيسية أعلى من أي فلز طبيعي النشأة. وتعدّ المتأثرية المغنطيسية لكثير من الصخور الرسوبية والانداغية، وخاصة بازلت القيعان المحيطية، إلى نسبة المغنيتيت فيها.

ب- سلسلة التيتانوهيماتيت:

يصف هذا الاسم الصيغة الكيميائية التالية:



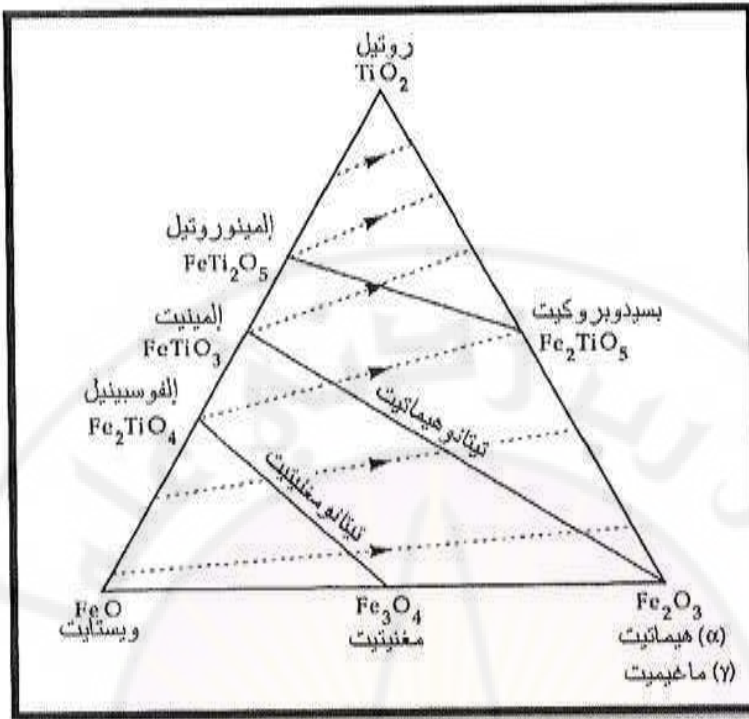
يشغل طرفي هذه السلسلة: (أ) الهيماتيت ذو المغنطيسية العالية و (ب) الإلمينيت (ilmenite) ذو المغنطيسية الطردية في درجة الحرارة العادية.

بعد الهيماتيت من الفلزات المغنطيسية الهامة لكن مغنطيسيته منخفضة ودرجة حرارة كوري له 675 درجة مئوية. وتأثيراته المغنطيسية منخفضة. وتعزى المتأثرية المغنطيسية لكثير من الصخور الرسوبية إليه. وتأتي أهميته من كونه طبيعي النشأة وثابت كيميائياً، مع إنه قد ينتج عن أكسدة فلزات أخرى مثل المغنيتيت أو من الترسيب من السوائل المارة في الصخور.

ينتج الماغهميت (maghemite) ذو المغنطيسية العالية من أكسدة المغنيتيت بدرجات الحرارة المنخفضة، ودرجة حرارة كوري له 675 درجة مئوية. لكنه شبه مستقر ويتحول إلى هيماتيت عند تسخينه إلى درجة حرارة أعلى 300-350 درجة مئوية.

من الفلزات الحاملة للمغنطيسية الضعيفة الغوثيت 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.

والـ————بيروثيت Pyrrhotite فلز كبريتي شائع، يتشكل أثناء عملية الدياجينيز للصخر الرسوبي (رمزه الكيميائي Fe S_{1+x}) حيث $0 \leq x \leq 1$ ، وعندما $x=1$ يتشكل البيريت Pyrite (FeS_2) اللامغنطيسي، وعندما $x=0$ يتشكل الترولايت Trolite (FeS) اللامغنطيسي أيضاً، لكن عندما $x=0.14$ يتشكل البيروثيت المغنطيسي. هنالك أيضاً العديد من مركبات الحديد التي تكون مغنطيسية بدرجة حرارة الغرفة لكنها قليلة الكمية مما يقلل من أهميتها.



الشكل (1-6): المخطط الثلاثي لسلسلة مركبات أكاسيد الحديد-التيتانيوم المغنطيسية.
(حسب ماكلهني 1973 MacElhinny)

12-1- المتأثرية المغنطيسية في الصخور:

تُعد المتأثرية المغنطيسية العامل المميز للصخر من الناحية المغنطيسية، وتعبّر عن كمية الفلزات المغنطيسية الموجودة في الصخر، ونوعية هذه الفلزات. يمكن قياسها في الحقل مباشرة، أو في المخبر بعد اقتطاع عينة من الصخر، إنما يفضل قياسها في الحقل أي في الشروط الفيزيائية نفسها التي توجد بها عند إجراء المسح المغنطيسي الحقلية. تقسم المواد حسب متأثريةها المغنطيسية إلى ثلاثة أنواع:

أ- المواد عكسية المغنطة (Diamagnetic materials): هي المواد التي لها متأثرية مغنطيسية سالبة وضعيفة، إذ تتجه المغنطيسية المتحرضة بوجود حقل مغنطيسي خارجي H بعكس اتجاه هذا الحقل وتزول بزواله. تتراوح قيمتها حول 10^{-6} SI. من هذه المواد: الغرافيت والجص والرخام والكوارتز والملح الصخري.

ب- المواد طردية المغنطة (Paramagnetic materials): هي المواد التي لها متأثرية مغناطيسية موجبة وضعيفة، بوجود حقل خارجي H وتتجه باتجاه هذا الحقل وتزول بزواله. تتراوح قيمتها حول 10^{-4} - 10^{-5} SI. من هذه المواد: العديد من فلزات الغضار والعديد من الفلزات المكونة للصخور مثل: البيروكسين والأوليفين والغارنت والبيوتيت والأمفيبول.

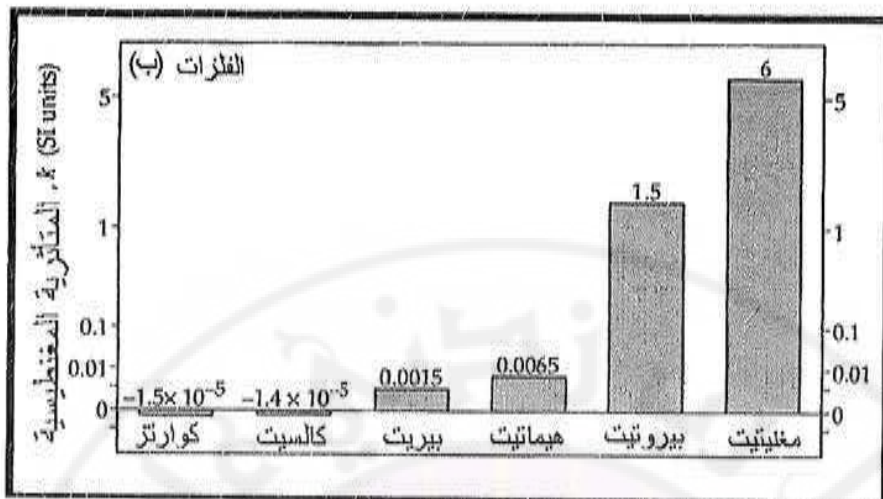
ج- المواد حديدية المغنطة (Ferromagnetic materials): هي المواد التي لها متأثرية مغناطيسية موجبة وعالية وتحتفظ بالمغناطيسية المتحرضة حتى بغياب الحقل الخارجي المحرض للمغناطيسية، أي تنصف بوجود دورة البطء المغناطيسي فيها، كما تتناسب هذه المغناطيسية المتحرضة عكساً مع درجة الحرارة وتزول عند درجة حرارة كوري للفلز الموجود في المادة. من هذه المواد: الحديد والنيكل والكوبالت.

يعطي الجدول (1-1) قيم المتأثرية المغناطيسية لبعض الفلزات، كما يعطي الشكل (1-1) متوسط المتأثرية المغناطيسية لبعض الفلزات. يلاحظ وجود مجال واسع لقيم المتأثرية في كل الجداول التالية:

الجدول (1-1): قيم المتأثرية المغناطيسية لبعض الفلزات.

(حسب تelford et al., 2004 وآخرين)

الفلز	مجال المتأثرية	تغير متوسط $\times 10^3$	تغير المتأثرية SI
غرافيت		0.1	
كوارتز		-0.01	
الملح الصخري		-0.01	
انهيدريت وجص		-0.01	
كالسيت	-0.001 - -0.01		
فحم		0.02	
غضاريات		0.2	
كالكوبيريت		0.4	
سفاليريت		0.7	
كاسثيريت		0.9	
سبيدريت	1 - 4		
بيريت	0.05 - 5		
ليمونيت		2.5	
ارسينوبيريت		3	
هيماتيت	0.5 - 35		
كروميت	3 - 110		
فرانكلينيت		430	
بيروثيت	1 - 6000		
إلمينيت	300 - 3500		
مغنيتيت	1200 - 19200		



الشكل (7-1): متوسط المناثريّة المغنطيسيّة لبعض الفلزات.
(حسب لوري 2007 Lowrie)

ويعطي الجدول (2-1) قيم المناثريّة المغنطيسيّة لبعض الصخور الرسوبيّة، والجدول (3-1) قيم المناثريّة المغنطيسيّة لبعض الصخور الاستحاليّة، بينما يعطي الجدول (4-1) قيم المناثريّة المغنطيسيّة لبعض الصخور الاندفاعيّة.

الجدول (2-1): قيم المناثريّة المغنطيسيّة لبعض الصخور الرسوبيّة.
(حسب تelford وآخرون 2004 Telford et al.)

الصخر	مجال تغيّر المناثريّة	متوسط تغيّر المناثريّة $\times 10^3$ SI
دولوميت	0 - 0.9	0.1
حجر كلسي	0 - 3	0.3
حجر رملي	0 - 20	0.4
الغضار الصفيّ	0.01 - 15	0.6
متوسط الصخور الرسوبيّة	0 - 18	0.9

الجدول (3-1): قيم المتأثرية المغنطيسية لبعض الصخور الاستحالية.

(حسب تelford et al., 2004 وآخرين)

الصخر	مجال تغير المتأثرية	متوسط تغير المتأثرية $\times 10^3$ SI
امفيبوليت		0.7
شبيست	0.3 - 3	1.4
فاباليت		1.5
غنيس	0.1 - 25	
كوارتزيت		4
سيربنتين	3 - 17	
سليت	0 - 35	6
متوسط الصخور الاستحالية	0 - 70	4.2

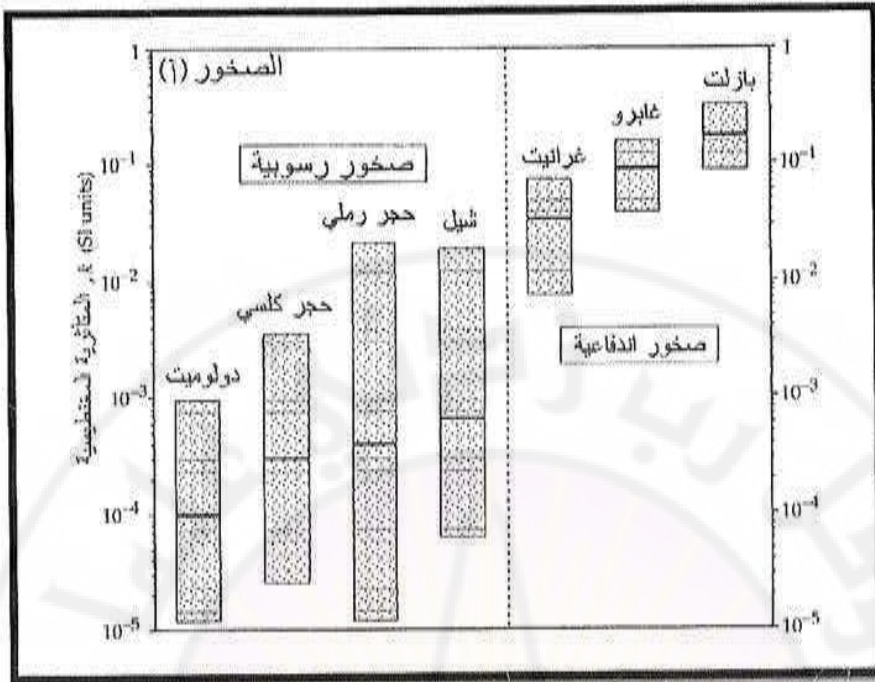
يعطي الشكل (8-1) مجال تغير المتأثرية المغنطيسية ومتوسطها (الخط الغامق) لبعض الصخور الرسوبية والانفعاية، وتبدو قيم متأثرية الصخور الانفعاية أعلى من متأثرية الصخور الرسوبية، ولكن نظراً لسعة مجال التغير يصعب تمييز نوعية الصخر من هذه القيم وحدها.

هنالك حالات خاصة تحتوي فيها الصخور الرسوبية على كمية كبيرة من الهيماتيت أو المغنيتيت بحيث تعطي متأثرية عالية، فيخلط بينها وبين الصخور الانفعاية أو الاستحالية.

الجدول (1-4): قيم المتأثرية المغناطيسية لبعض الصخور الاندفاعية.

(حسب تelford et al., 2004 وآخرين)

الصخر	مجال تغير المتأثرية	متوسط تغير المتأثرية $\times 10^3$ SI
غرانيت	0 - 50	2.5
ريوليت	0.2 - 35	
دولوريت	1 - 35	17
أوجيت - سيانيت	30 - 40	
أوليفين - دياباز		25
دياباز	1 - 160	55
بورفير	0.3 - 200	60
غابرو	1 - 90	70
بازلت	0.2 - 175	70
ديوريت	0.6 - 120	85
بيروكسينيت		125
بيريدوتيت	90 - 200	150
أنديزيت		160
متوسط الصخور الحامضية	0 - 80	8
متوسط الصخور الأساسية	0.5 - 97	25



الشكل (1-8): مجال تغير المتأثرية المغناطيسية ومتوسطها (الخط الغامق) لبعض الصخور الرسوبية والاندفاعية.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

13-1- مغناطيسية الصخور:

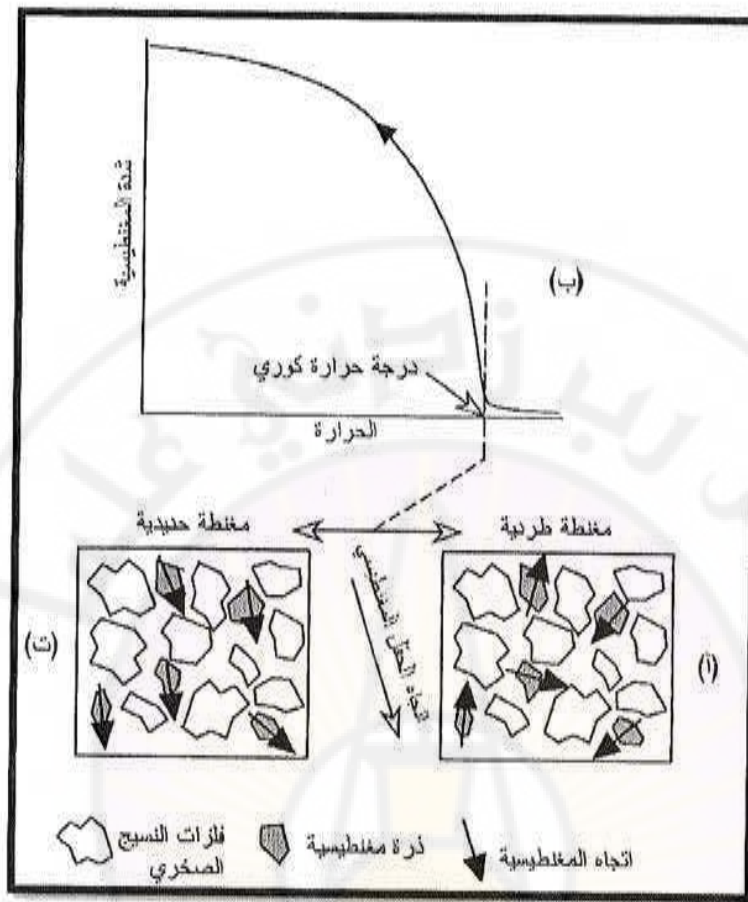
تكتسب الصخور المغناطيسية مغناطيسيتها في الحقل المغناطيسي الأرضي، وتكون هذه المغناطيسية متحرضة بوجود الحقل المغناطيسي الحالي، وتتغير شدتها مع تغير شدة الحقل المغناطيسي المسيطر. بينما اكتسبت معظم الصخور مغناطيسية متبقية دائمة، تتناسب شدتها مع متأثرتها المغناطيسية ومع شدة الحقل المغناطيسي الأرضي الذي سيطر في أثناء اكتساب الصخر لمغناطيسيته، وبسائر اتجاه هذه المغناطيسية المتبقية اتجاه ذلك الحقل المغناطيسي الأرضي المسيطر. هكذا نجد أن مغناطيسية الصخور مؤلفة من مركبتين: المغناطيسية المتحرضة في الصخور بوجود حقل مغناطيسي خارجي، والثانية: المغنطة المتبقية الطبيعية Natural remnant magnetization التي نتجت من سيطرة حقل مغناطيسي أثناء تشكل

الصخر (تصخر) الرسوبي أو تبرّد الصخر الاندفاعي. لقد تمّ التوصل خلال العقود الأخيرة إلى معرفة كامل العمليات التي تؤدي إلى حدوث المغنطة المتبقية الطبيعية (NRM). قد تتألف هذه المغنطة المتبقية من عدة مركبات تشكلت بطرائق مختلفة وفي أزمنة مختلفة. تدعى المغنطة التي تشكلت في أثناء أو مباشرة بعد تشكل الصخر بالمغنطة الأولية primary magnetization، في حين تدعى المغنطة التي تشكلت فيما بعد تشكل الصخر بالمغنطة الثانوية secondary magnetization. فيما يلي نلخص عمليات المغنطة الأكثر أهمية في حدوث المغنطة المتبقية الطبيعية (NRM):

1-13-1- المغنطة المتبقية الحرارية

Thermo-remnant magnetization (TRM):

هي المغنطة الأولية التي يكتسبها الصخر الاندفاعي في أثناء تبرده عبر درجة حرارة كوري إلى درجة الحرارة العادية بوجود حقل مغناطيسي خارجي، وهي أهم العمليات التي تكتسب الصخر الاندفاعي مغنطيسيته العالية والثابتة. ففي درجات الحرارة العالية يكون الصخر طردي المغنطة paramagnetic، حيث تتوجه العزوم المغناطيسية للذرات المغناطيسية (الشكل 1-9-أ) بشكل عشوائي، وأثناء تبرّد الصخر والمرور عبر درجة حرارة كوري (الشكل 1-9-ب) يتحول إلى حديدي المغنطة ferromagnetic (الشكل 1-9-ت)، ويكتسب معظم مغنطيسيته في مجال 50-100 درجة مئوية تحت درجة حرارة كوري بدعى حرارة الحجز blocking temperature. يكون اتجاه المغنطيسية المتشكلة بهذه الطريقة موازياً للحقل المغناطيسي المسيطر، ولديها القدرة على الثبات في الصخر لملايين السنين، وهي في الواقع المغنطيسية التي يُبحث عنها وتجرى المحاولات لعزلها، حين دراسة المغنطيسية القديمة للصخور الاندفاعية.



الشكل (9-1): اكتساب الصخر الاندفاعي للمغنطة المتبقية الحرارية.

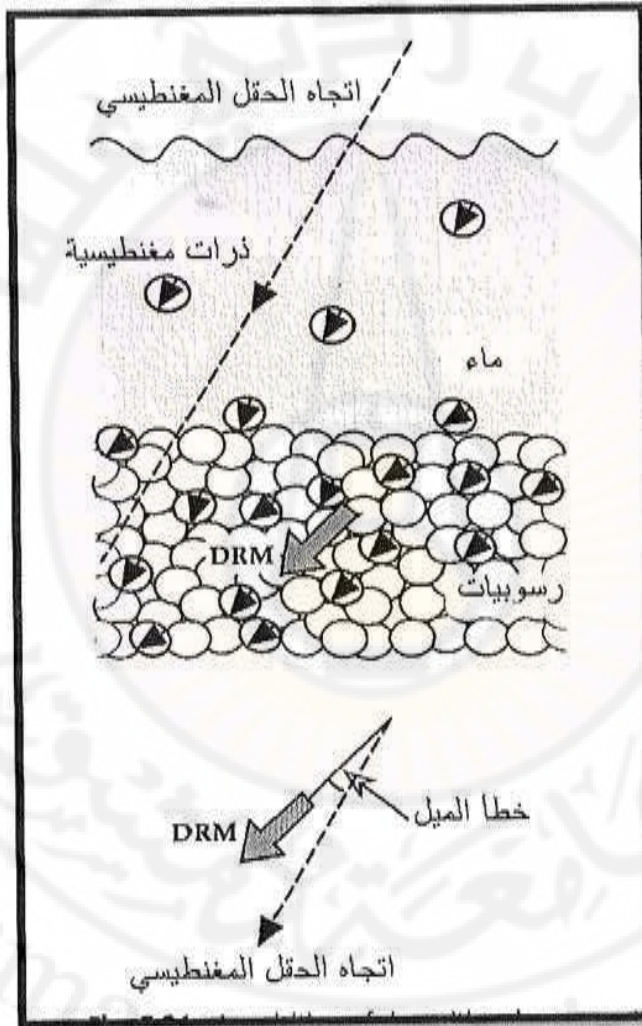
(حسب لوري 2007 Lowrie)

1-13-2- المغنطة المتبقية الترسيبية

Depositional remnant magnetization (DRM):

تعتبر هذه المغنطة أولية نظراً لتشكلها في أثناء تشكل الصخر، ونحدث نتيجة توجه الذرات المغناطيسية باتجاه الحقل المغناطيسي المسيطر في أثناء ترسيبها في حوض ترسيب (الشكل 10-1)، وخاصة الحوض ذو المياه الهادئة، وقد يستمر هذا التوجه حتى بعد عمليات تصلب الصخر. وتستمر لملايين من السنين محافظة على الاتجاه نفسه الذي اكتسبته عند

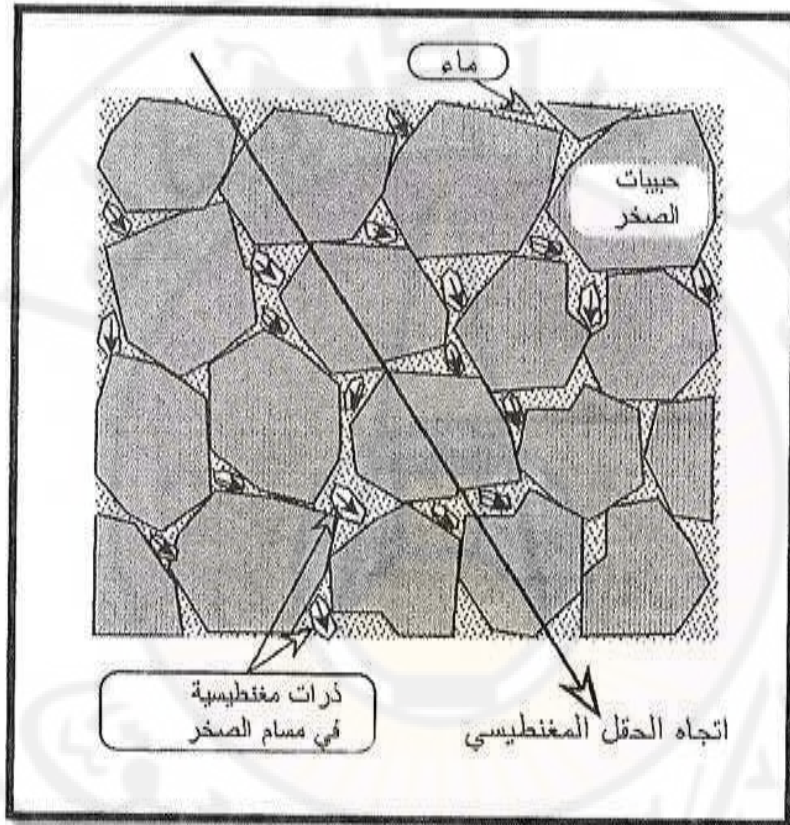
عملية تصلب الصخر. يزداد ثبات هذه المغنطة واستقرارها كلما ازدادت نعومة ذرات المواد المغنطيسية حتى عدة ميكرونات طولاً. قد تؤدي حركة التيارات المائية في الحوض إلى دوران الذرات مؤدية إلى ما يسمى خطأ الاتجاه declination error، كما قد يحدث خطأ الميل inclination error عند هبوط الذرات المغنطيسية المتطاولة واستقرارها على قاع الحوض (الشكل 10-1). هذه هي المغنطة التي يُبحث عنها وتجرى محاولات لعزلها، حين دراسة المغنطيسية القديمة للصخور الرسوبية.



الشكل (10-1): اكتساب الصخر الرسوبي للمغنطة المتبقية الترسيبية.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

قد يتشكل في الصخر مغنطة ترسيبية، لكن بعد تشكل الصخر الرسوبي تدعى المغنطة المتبقية بعد الترسيب (pDRM) post-depositional remnant magnetization، إذ تتوضع الذرات المغناطيسية المحمولة بالمياه التي ترشح عبر شقوق الصخر الرسوبي ومسامه في هذه المسام والشقوق، وتأخذ اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي (الشكل 1-11)، مما يؤدي إلى تغير اتجاه المغناطيسية في الصخر الرسوبي.



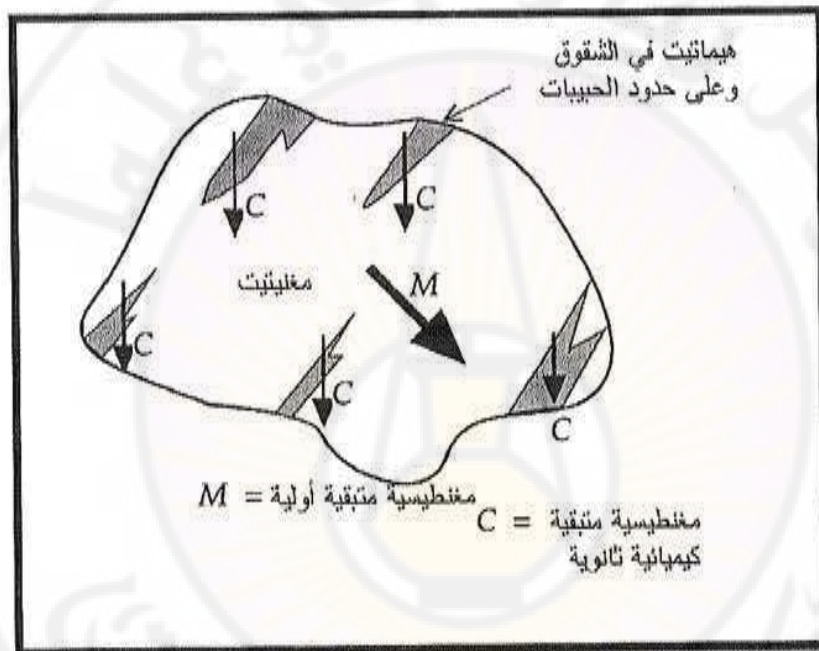
الشكل (1-11): اكتساب الصخر الرسوبي للمغنطة المتبقية الترسيبية بعد الترسيب.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

1-13-3- المغنطة المتبقية الكيميائية أو البلورية

Chemical or crystallization remnant magnetization (CRM):

تعتبر هذه المغنطة ثانوية، إذ تحدث في أثناء نمو أو إعادة تبلور بعض الحبيبات المغناطيسية الصغيرة في أثناء بعض التفاعلات الكيميائية بدرجة حرارة أكثر انخفاضاً من درجة حرارة كوري وبوجود حقل مغناطيسي خارجي. مثلاً: في أثناء ترسب الهيماتيت Haematite من الغونيت Goethite أو سوائل مشبعة بالحديد ترشح خلال الصخر (الشكل 12-1). تكتسب هذه المغنطة اتجاه الحقل المغناطيسي المسيطر أثناء التغير الكيميائي، وبالتالي فهي أحدث عمراً من الصخر المضيف، وتتصف بثباتها بشكل مماثل لـ TRM، ولكنها أقل شدة منها.



الشكل (12-1): اكتساب الصخر للمغنطة المتبقية الكيميائية.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

1-13-4- المغنطة المتبقية متساوية الحرارة

Isothermal remnant magnetization (IRM):

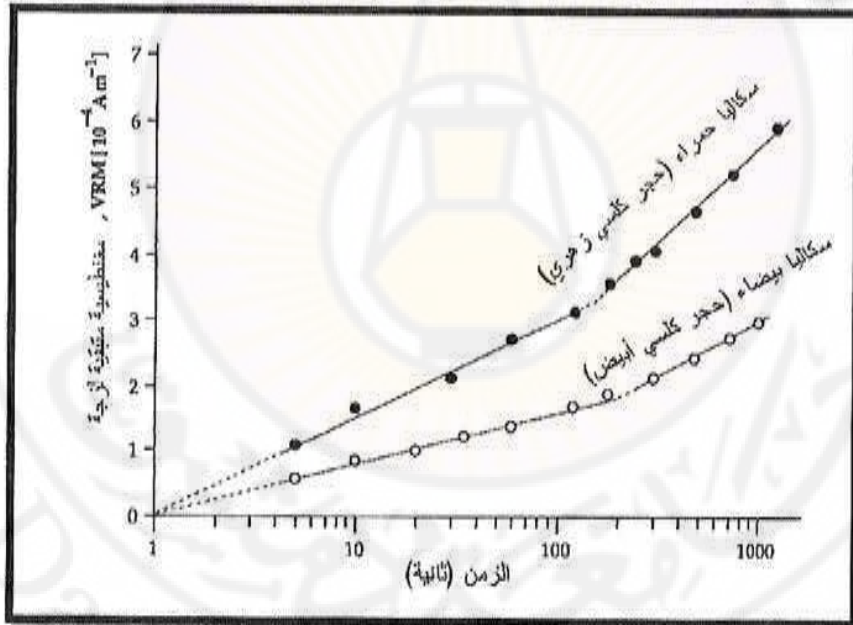
هي المغنطة المتشكلة في الصخر الموجود في حقل مغناطيسي خارجي لفترة زمنية قصيرة، (مثل تعرض العينات الصخرية للحقل المغناطيسي الناتج عن جهاز أخذ العينات، أو الحقول المغناطيسية في أثناء نقل العينات من الحقل إلى المخبر). تتناسب شدة هذه المغنطة مع

شدة الحقل المغنطيسي المسيطر، وقد تكون عالية جداً عند حدوثها في حقل مغنطيسي شديد (مثل الحقل الناتج عن ضرب صاعقة للصخر).

1-13-5- المغنطة المتبقية اللزجة

Viscous remnant magnetization (VRM):

هي مغنطة ثانوية تراكمية للمغنطة المتبقية متساوية الحرارة، يكتسبها الصخر نتيجة تعرضه لفترة زمنية طويلة لحقل خارجي، (مثل الحقل المغنطيسي الأرضي). وتزداد شدة هذه المغنطة بشكل لوغاريتمي مع الزمن وتزداد قساوتها (أي صعوبة إزالتها) طردياً مع الزمن (الشكل 1-13) وتعتبر الصخور القابلة لاكتساب هذه المغنطة غير صالحة للقياس بالمغنطيسية القديمة، لأنها قد تكتسب مغنطيسية بحدود 20% من شدة المغنطة الأولية، مما يؤدي إلى إعطاء اتجاه مغنطيسي مخالف لاتجاه المغنطة الأولية، فيما لو كان اتجاه الحقل المسيطر قد اختلف عن اتجاه الحقل المغنطيسي الذي حرض المغنطيسية الأولية.



الشكل (1-13): اكتساب الصخر للمغنطة المتبقية اللزجة.

(حسب لوري 2007 (Lowrie, 2007))

1-13-6- المغنطة المتبقية الضغطية

Piezo- remnant magnetization (PRM):

تنتج هذه المغنطة عن تعرض الصخر لضغط موجه بوجود حقل مغناطيسي خارجي وفي درجة معينة من الحرارة، وقد تؤدي هذه المغنطة إلى تغيير اتجاه المغنطة الأولية في الصخر، مما يعطي تأثيراً ضاراً عند دراسة مغناطيسية الصخر. ويجري الآن استخدام هذه المغناطيسية للتنبؤ بالزلازل، نظراً لأن الإجهاد المتولد في الصخور قبل حدوث الزلازل يؤدي إلى حدوث شواذ مغناطيسية محلية يمكن قياسها بواسطة أجهزة حساسة.

1-13-7- المغنطة المتبقية ذاتية الانعكاس

Self-reversed remnant magnetization (SRM):

هي المغنطة التي تتشكل في الصخر باتجاه معاكس لاتجاه الحقل المغناطيسي المسيطر وتحدث في بعض المواد، ويجب دوماً محاولة تمييز هذه المغنطة عن المغنطة المنعكسة الناتجة عن انقلاب الحقل المغناطيسي الأرضي.

1-13-8- المغنطة المتبقية الصدمية

Shock remnant magnetization (SRM):

لوحظت هذه المغنطة في الصخور الأرضية والقمرية التي صُدمت بنيزك، إذ أن الاصطدام يسبب ضغطاً شديداً لفترة زمنية قصيرة فتتشكل هذه المغنطة بشكل مماثل للمغنطة المتبقية الضغطية. وقد تكون هذه المغنطة سبباً في تشكل المغنطة الشاذة في قشرة القمر، والمريخ والأجسام الكونية الأخرى التي تعرضت لصدمات نيزكية عديدة.

وتقدم دراسة المغنطة المتبقية الطبيعية فائدة كبرى عند دراسة تاريخ الحقل المغناطيسي الأرضي. ويدعى العلم الذي يدرسها بالمغناطيسية القديمة Palaeomagnetism، ولها الفضل الأكبر في ظهور الكثير من الأفكار الجيوتكتونية الحديثة مثل تمدد قاع البحر Sea floor spreading وانزياح القارات Continental drift وتكتونيك الصفائح Plate tectonics.

وتعد هذه المغنطة المتبقية مصدر خطأ في الدراسات التنبؤية، نظراً لصعوبة أو لاستحالة تحديد شدتها واتجاهها في الصخور أو بسبب صعوبة أو استحالة أخذ عينات من الصخور المدروسة المعطومة، لذا فإنها تهمل أو تعد موازية للحقل المغناطيسي المسيطر في أثناء القياس.

1-14- المرصد المغنطيسية Magnetic observatories:

1-14-1- أهمية المرصد المغنطيسي:

يحيط الحقل المغنطيسي الأرضي بالأرض ويتولد على الأغلب في داخلها، ويبدو كأنه ناتج عن مغنطيس ثنائي القطب يمتد من الشمال للجنوب، ويميل بزاوية مقدارها 11.5 درجة على محور دوران الأرض.

وينطوي هذا الحقل على تأثير كبير على الحياة على سطح الأرض، إذ يحميها من تأثير الأشعة الكونية المدمرة، وله أيضاً تأثير كبير على نمو الأحياء، وتستخدمه الحيوانات وخاصة الطيور في تنقلها وهجرتها.

لقد تعرف الإنسان على هذا الحقل من تأثيره على البوصلة التي استخدمت منذ زمن بعيد في الملاحة والتوجه، ثم بنيت المراصد المغنطيسية، وأقيمت المحطات المغنطيسية المتحركة لقياس مركبات هذا الحقل بشكل أفضل (Jankowski and Sucksdorff, 1996). وقد عمدت الدول المتقدمة إلى تغطية أراضيها بعدد من المراصد (6 في إنجلترا، 6 في أستراليا، 12 في القارة المتجمدة الجنوبية و 9 في الولايات المتحدة الأمريكية، حسب إحصائيات عام 2000)، كما تقاس مركبات هذا الحقل بشكل دوري (مرة كل سنة تقريباً) في محطات حقلية، على عقد شبكة قد تبلغ مسافتها الشبكية عشرات الكيلومترات.

تشمل القياسات المغنطيسية التي تنجز في المرصد والمحطات الحقلية مركبات الحقل المغنطيسي الأرضي الحالي:

شدة الحقل الكلي (T)، المركبة الشمالية (X)، المركبة الشرقية (Y)، المركبة الأفقية (H)، المركبة الشاقولية (Z)، الانحراف المغنطيسي (D)، الميل المغنطيسي (I).

1-14-2- استخدام مركبات الحقل المغنطيسي الأرضي:

تستخدم مركبات الحقل المقاس في ما يلي:

- 1- حساب مسارات القذائف والصواريخ.
- 2- حساب مسارات الجزيئات المشحونة في الغلاف المغنطيسي.
- 3- الملاحة الجوية والبحرية، حيث تستخدم خرائط خطوط تساوي الانحراف المغنطيسي في الملاحة.

4- التوجه القاري.

4- المسح الجيوفيزيائي والجيولوجي.

وفيما يلي سنفصل قليلاً في بعض هذه الاستخدامات:

أ- في التوجه القاري:

تؤدي المعرفة الدقيقة لقيم الانحراف المغنطيسي إلى إمكانية استخدام البوصلة في التوجه القاري في المناطق الخالية من المعالم الطبيعية كالصحاري أو الغابات.

ب- في التطبيقات الجيوفيزيائية والجيولوجية والفيزيائية:

1- يحتاج تفسير معطيات المسح المغنطيسي الجوي أو القاري إلى معرفة قيمة الحقل الكلي، أو المركبة الشاقولية والانحراف والميل، وذلك لاستخدامها في برامج الحاسوب لحساب أشكال الأجسام المغنطيسية تحت السطحية.

2- يتم توجيه التشكيلات الجيولوجية على الخرائط الجيولوجية بالنسبة للشمال الجغرافي، بينما يتم القياس الحقل لاتجاه هذه التشكيلات واتجاه الميل بواسطة البوصلة. وهذا يتطلب معرفة الانحراف المغنطيسي في المنطقة المدروسة، وما لم يؤخذ هذا الانحراف بعين الاعتبار يحدث خطأ بتوجيه الطبقات مقداره هذا الانحراف (يبلغ متوسط هذا الانحراف في سورية 3.5 درجة). من المألوف تزويد الخرائط الطبوغرافية والجيولوجية بشكل صغير يعطي قيمة الانحراف، ومقدار تغيره السنوي في مركز الخريطة في وقت إنجاز الخريطة، ومن المؤسف أن الخرائط السورية كافة تفتقر إلى هذا الشكل، مما يشير إلى أن خطأ قد حدث في رسم كل الطبقات والمعالم الجيولوجية على الخرائط الجيولوجية السورية.

3- تحتاج شركات التنقيب عن النفط إلى تفسير أي شاذ مغنطيسي مرافق للمكانن النفطية، وهذا يحتاج إلى معرفة شدة الحقل الكلي وميله واتجاهه. تستخدم هذه الشركات أيضاً، اتجاه الحقل المغنطيسي في توجيه حفر الآبار النفطية المائلة والأفقية.

4- تحتاج الدراسات الفيزيائية للغلاف المغنطيسي للأرض، أو حركة الجزيئات المشحونة في الغلاف المغنطيسي إلى هذه القيم.

5- يجب تحديد الاتجاه المغنطيسي لمدرجات المطارات المدنية.

6- يحتاج تشغيل الأجهزة ذات أشعة الجزيئات المشحونة (مثل المجهر الإلكتروني) إلى شدة الحقل المغنطيسي الأرضي وميله واتجاهه.

ت- في الاستخدامات العسكرية:

يجب معرفة انحراف الشمال المغنطيسي عن الشمال الجغرافي بدقة لتحقيق نتائج جيدة كما يلي:

- 1- التوجه القاري باستخدام البوصلة في المناطق الخالية من المعالم الطبوغرافية كالصحاري والغابات.
- 2- توجيه رمي الأسلحة بعيدة المدى بما فيها الصواريخ والمدفعية بمختلف أنواعها.
- 3- توجيه الطيران الحربي.
- 4- كما يجب معرفة الاتجاه المغنطيسي بدقة لمدركات المطارات العسكرية.

ج- الجهات المستفيدة من هذه المعلومات:

- 1- الجامعات ومراكز البحوث العاملة بمجال المغنطيسية التطبيقية والنظرية.
- 2- الشركات العاملة في التنقيب عن الفلزات المغنطيسية.
- 3- الشركات العاملة في التنقيب عن النفط.
- 4- الجهات المشرفة على المطارات المدنية التي تحتاج لتحديد الاتجاه المغنطيسي لمدركات المطارات المدنية.
- 5- المؤسسات التي تستخدم أجهزة ذات أشعة جزيئات مشحونة (مثل المجهر الإلكتروني).
- 6- وزارة الدفاع.

د- متطلبات إنشاء المرصد المغنطيسي:

يتطلب إنشاء المرصد المغنطيسي تحقيق الأمور التالية:

- 1- اختيار الموقع المناسب للمرصد من وجهة نظر جيولوجية ومغنطيسية.
- 2- إقامة البناء المناسب المتلائم مع المتطلبات العالمية من ناحية الدقة، والخلو من المواد المغنطيسية التي تعيق التسجيل الدقيق، وتأمين عزل من الرطوبة وعزل حراري عالٍ، بحيث يقلل التغيرات الحرارية السنوية.
- 3- اختيار أجهزة الرصد المغنطيسية، وانتقاء الحواسيب الآلية والبرمجيات المناسبة لمعالجة التسجيلات وتفسيرها.

بناءً على ما ذكر تم اختيار موقع المرصد المغنطيسي السوري في مكان يحقق الشروط المطلوبة، في قطعة فسيحة من الأرض وعلى سفح هضبة، وتم عزل منطقة حول المرصد أبعادها 310×130 متراً، بحيث يمنع اقتراب السيارات وغيرها من موقع المرصد. اتخذت كافة الإجراءات اللازمة في تصميم المبنى بحيث استخدمت مواد لا مغنطيسية كالإسمنت الأبيض والحصى والرمل والخشب. وتم تغيير كافة الأجزاء الفولاذية والحديدية في الأجهزة بأجزاء من النحاس والألمنيوم، لمنع أي تأثير مغنطيسي دخل على أجهزة القياس الحساسة جداً. كما نفذت إجراءات عزل صارمة لمنع حدوث أي رطوبة داخل المبنى ولتخفيف التغيرات الحرارية إلى الحد الأدنى في منطقة تتغير فيها الحرارة بين -5 و 40 درجة مئوية.

ووضع لاقط الـ GPS على سارية من الألمنيوم على سطح المبنى، ليستقبل الزمن العالمي الوارد من الأقمار الصناعية، لتوحيد زمن التسجيل مع التسجيلات العالمية. ثم أقيم على بعد 30 متراً إلى الغرب من المبنى عموداً بأبعاد $60 \times 60 \times 140$ سنتمتراً على قاعدة إسمنتية أبعادها $3 \times 3 \times 0.40$ متراً. ويعتبر هذا العمود مركز المرصد، إذ يوضع عليه ثيودوليت ركب عليه مقياس تدفق مغنطيسي لإجراء القياسات الأسبوعية المطلقة لشدة الحقل المغنطيسي الأرضي وميله وانحرافه، ولترجع تسجيلات مقياس البروتون والتدفق المغنطيسي الموجودة في المبنى إلى موقع العمود.

ل- تسجيلات المرصد:

تستخدم تسجيلات الدقيقة الواحدة لـ H و D و Z و T (درجة الحرارة) لحساب قيم متوسطات ساعية. ويمكن طباعة هذه القيم بجداول لقيم 23 ساعة، وترسم كسجل مغنطيسي لمنحنيات تغير هذه المركبات. وتستخدم قيم المتوسطات الساعية لحساب قيم المتوسطات اليومية. ثم تستخدم قيم المتوسطات اليومية لحساب قيم المتوسطات الشهرية، ومنها يتم حساب قيم المتوسطات السنوية. ويمكن في كل مرحلة من الحساب حساب المركبات الأخرى أي X و Y و I من قيم H و D و Z و T .

تقاس قيم D و I و T المطلقة على العمود، المعتبر مركز المرصد والمقام على بعد 30 متراً من مبنى المرصد، بالنسبة لعلامتين تم اختيار الأول في الشمال الشرقي وعلى بعد 280 متراً من العمود، والثاني في الشمال الغربي وعلى بعد 550 متراً. وترجع كافة

تسجيلات المرصد إلى موقع العمود، بحيث يمكن اعتبار أن كافة تسجيلات المرصد مأخوذة على العمود.

1-14-3- شبكة المحطات المغنطيسية الحقلية:

تقدم المراصد المغنطيسية معطيات دقيقة عن الحقل المغنطيسي الأرضي وتغيراته، لكن الشبكات الحالية للمراصد لا تكفي لتغطية كوكبنا، إضافة إلى أنها مكلفة مالياً، لذا تقدم المحطات المغنطيسية الحقلية وسيلة فعالة وغير مكلفة لتكملة معطيات المراصد بمعطيات عن المناطق النائية للدول (Newitt et al, 1996).

وتتألف المحطة الحقلية من قاعدة مركزية من الأسمنت مغروسة في الأرض، ويوجد على بعد لا يتجاوز الـ 500 متراً قاعدة أخرى أو قاعدتين، يتم وضع علام فيها ويتم رصد العلام أو العلامين من القاعدة المركزية، ليعرف اتجاه سمت العلام أو العلامين بالنسبة للشمال الجغرافي والشمال المغنطيسي، ويمثل الفرق بينهما الانحراف المغنطيسي، كما يتم قياس شدة الحقل المغنطيسي الأرضي واتجاهه وميله، كي يمكن حساب كافة مركبات الحقل في القاعدة المركزية.

إن الهدف من إقامة المحطات الحقلية هو التخلص من المؤثرات المكانية التي تنجم عن تغيير المكان، واستحالة إقامة المراصد في كل مكان بسبب كلفتها العالية، مما يحتم إقامة هذه المحطات في مواقع لن تتعرض لتغيرات مثل إقامة الأبنية والمجمعات السكنية. ويتم أخذ القراءات في المحطات الحقلية بشكل دوري. يمكن أن تؤخذ المسافة بين محطة وأخرى بحدود 200 كم. لكن يمكن تكثيفها في حالات خاصة، مثل الضرورات العسكرية أو المناطق ذات الأهمية الاقتصادية إذ من الضروري معرفة الانحراف المغنطيسي بدقة، مثل حقول النفط أو مواقع المكامن المعدنية أو الفلزية. كذلك الأماكن النشطة تكتونياً حيث يمكن أن تنتشر المحطات الحقلية لمراقبة المغنطيسية الضغطية، وبالتالي مراقبة الضغوط الأرضية الناتجة عن النشاط التكتوني، وهو ما تم عمله في منطقة الغاب، حيث أقيمت تسع محطات تحيط بمنخفض الغاب في محاولة لكشف الضغوط التكتونية المرافقة للحركة على الفالق المشرقي الذي يعتبر مصدر النشاط الزلزالي في منطقتنا.

الفصل الثاني
التأثير المغنطيسي للأجسام المغنطيسية
هندسية الشكل

The magnetic effect of
magnetic geometrical bodies

2-1- مقدمة:

يمكن بسهولة حساب التأثير المغنطيسي الناتج عن قطب مغنطيسي معزول، أو عن ثنائي قطب، أو الناتج عن أجسام منتظمة الشكل من نظرية الكمون بطرائق مشابهة لتلك المستعملة لتعيين التأثير الجاذبي الناتج عن فروق في الكثافة، لأن الحقل المغنطيسي والحقل الجاذبي حقلًا كمون (Potential field)، لكن حسابات المغنطيسية أكثر تعقيداً للأسباب التالية:

1- تعتمد المغنطيسية المقاسة على قدر المغنطيسية (Magnitude) وعلى اتجاه المغنطيسية (Direction)، بينما تعتمد الجاذبية المقاسة على قدر الجذب (magnitude) بأي اتجاه كان.

2- تتميز المغنطيسية بقوة جذب وقوى نبذ، بينما تتميز الجاذبية بقوة جذب فقط.

3- تنتج مغنطيسية الصخور عن كمية صغيرة من الفلزات المغنطيسية، بينما تنتج قوى الجاذبية من الكتلة الكلية للصخور.

في الواقع، يمكن من أجل الأجسام منتظمة الشكل، تطبيق العلاقات المستخدمة في طرائق الجاذبية على طرائق المغنطيسية باستخدام علاقة بواصون التالية. تزداد صعوبة حساب التأثير المغنطيسي بازدياد تعقيد شكل الجسم، ولهذا تستخدم طرائق حسابية أكثر تعقيداً من أجل تحليل النتائج، كذلك يزداد التعقيد عند تحليل شدة الحقل المغنطيسي الكلي الناتج عن الأجسام المطمورة.

2-2- علاقة بواصون Poisson's relation:

تسمح علاقة بواصون بحساب الكمون المغنطيسي (U) ثم الحقل المغنطيسي (H)، الناتجين عن جسم ممغنط في أي نقطة حول الجسم من الكمون الجاذبي (V) Gravitational Potential، لأن حساب الكمون المغنطيسي للأجسام المغنطيسية المطمورة حتى الأجسام هندسية الشكل أصعب من حساب الكمون الجاذبي لتلك الأجسام. وتعطي هذه العلاقة الكمون المغنطيسي بدلالة الكمون الجاذبي وكثافة الجسم بالشكل التالي:

$$U(i) = -\frac{I}{G\rho} \frac{\partial V}{\partial i} = \frac{-I}{G\rho} g(i) \quad (2-1)$$

حيث:

- i اتجاه المغنطيسية أو اتجاه الاستقطاب المغنطيسي.
 I شدة المغنطيسية أو شدة الاستقطاب.
 ρ كثافة الجسم.
 $g(i)$ مركبة الجاذبية بالاتجاه i .
 G ثابت الجاذبية العالمي Universal Gravitational constant ويساوي:

$$6.67 \times 10^{-8} \frac{\text{dyne} - \text{cm}^2}{\text{g}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{Kgs}^2}$$

وبما أن الحقل المغنطيسي هو مشتق الكمون المغنطيسي، تكون مركبة الحقل المغنطيسي في اتجاه ما (s مثلاً):

$$H_s = \frac{-dU(i)}{ds} = \frac{I}{G\rho} \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{\partial V}{\partial i} \right) \quad (2-2)$$

إذا كان الجسم مستقطباً بالاتجاه الشاقولي (z) تكون المركبة الأفقية بالاتجاه (x) كما يلي:

$$H_x = \frac{-\partial U(z)}{\partial x} = \frac{I}{G\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (2-3)$$

بينما تكون المركبة الشاقولية H_z كما يلي:

$$H_z = \frac{-\partial U(z)}{\partial z} = \frac{I}{G\rho} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (2-4)$$

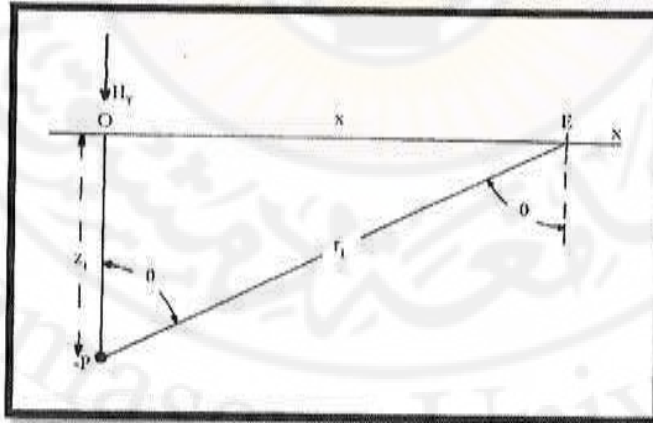
تستخدم هذه العلاقة لاستنباط معادلات الحقل المغنطيسي لأجسام مغنطيسية هندسية الشكل وبسيطة كما سنرى لاحقاً.

3-2- التأثير المغنطيسي الناتج عن المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي:

3-2-1- التأثير المغنطيسي الناتج عن قطب مغنطيسي معزول:

يظهر الشكل (1-2) قطباً مغنطيسياً سالباً قوته $(-P)$ واقع على عمق (z_1) من سطح الأرض. من العلاقة (3-1) نجد أن شدة الحقل المغنطيسي الكلي (H_T) في نقطة E التي تبعد مسافة x عن المركز السطحي O ومسافة r_1 عن القطب، تساوي:

$$H_T = \frac{1}{\mu} \frac{P}{r_1^2} \quad (2-5)$$



الشكل (1-2): وضع قطب مغنطيسي معزول واقع على عمق z_1

تُعطي شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية H_z في نقطة E كما يلي:

$$H_z = H_T \cos \Theta = \frac{P}{\mu r_1^2} \cdot \frac{z_1}{r_1} = \frac{P \cdot z_1}{\mu r_1^3} \quad (2-6)$$

وبما أن $r_1 = (x^2 + z_1^2)^{\frac{1}{2}}$ نجد:

$$H_z = \frac{P \cdot z_1}{\mu (x^2 + z_1^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2-7)$$

وتكون شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية أعظمية ($H_{z,max}$) في المركز السطحي O، أي عندما $x=0$ ، وبالتبديل في العلاقة (2-7) نجد:

$$H_{z,max} = \frac{P \cdot z_1}{\mu z_1^3} = \frac{P}{\mu z_1^2} \quad (2-8)$$

وبقسمة العلاقة (2-7) على العلاقة (2-8)، أي المعايرة بالنسبة لـ $H_{z,max}$ نجد:

$$\frac{H_z}{H_{z,max}} = \frac{\frac{P \cdot z_1}{\mu (x^2 + z_1^2)^{\frac{3}{2}}}}{\frac{P \cdot z_1}{\mu z_1^3}} = \frac{z_1^3}{(x^2 + z_1^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$= \frac{z_1^3}{z_1^3 \left(\frac{x^2}{z_1^2} + 1 \right)^{3/2}} = \frac{1}{\left(\frac{x^2}{z_1^2} + 1 \right)^{3/2}} \quad (2-9)$$

وتعطي شدة المركبة المغناطيسية الأفقية في نقطة E كما يلي:

$$H_h = H_T \sin \Theta = \frac{P}{\mu r_1^2} \cdot \frac{x}{r_1} = \frac{P \cdot x}{\mu r_1^3}$$

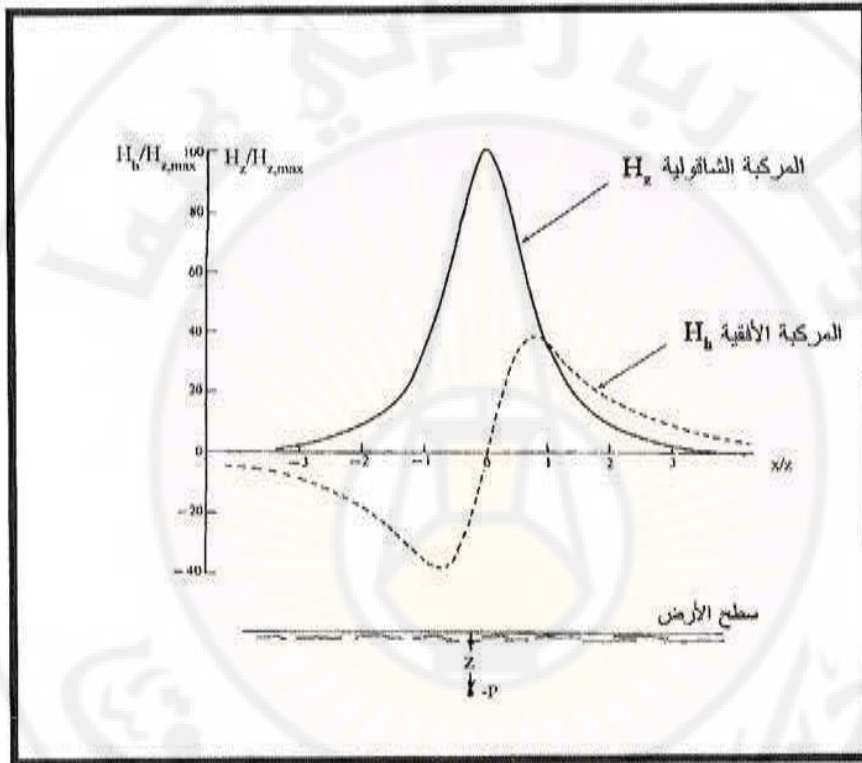
$$= \frac{P \cdot x}{\mu (x^2 + z_1^2)^{3/2}} \quad (2-10)$$

وبقسمة العلاقة (2-10) على العلاقة (2-8)، أي المعادلة بالنسبة لـ $H_{z,\max}$ نجد:

$$\frac{H_h}{H_{z,\max}} = \frac{\frac{P \cdot x}{\mu (x^2 + z_1^2)^{3/2}}}{\frac{P}{\mu z_1^2}} = \frac{x \cdot z_1^2}{(x^2 + z_1^2)^{3/2}}$$

$$= \frac{x \cdot z_1^2}{z_1^3 \left(\frac{x^2}{z_1^2} + 1 \right)^{3/2}} = \frac{\frac{x}{z_1}}{\left(\frac{x^2}{z_1^2} + 1 \right)^{3/2}} \quad (2-11)$$

يمكن استخدام العلاقتين (9-2) و (11-2) لحساب شواذ المغنطيسية الناتجة عن قطب معزول على أي عمق بعد التعبير عن المسافة الأفقية (x) بوحدة العمق (z_1). يعطي الشكل (2-2) منحنى تغير شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية H_z (المنحنى المستمر) ومنحنى تغير شدة المركبة المغنطيسية الأفقية H_H (المنحنى المتقطع) لقطب معزول قوته (-P) وواقع على عمق (z_1) من سطح الأرض. لقد استخدمت قيم H_z و H_H المعاييرة بالنسبة لـ $H_{z,max}$ ، وأخذت المسافة الأفقية (x) بوحدة العمق إلى القطب (z_1).



الشكل (2-2): منحنى تغير شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية H_z ومنحنى تغير شدة المركبة الأفقية H_H فوق قطب سالب معزول.

(حسب تelford وآخرين 1976, Telford et al.)

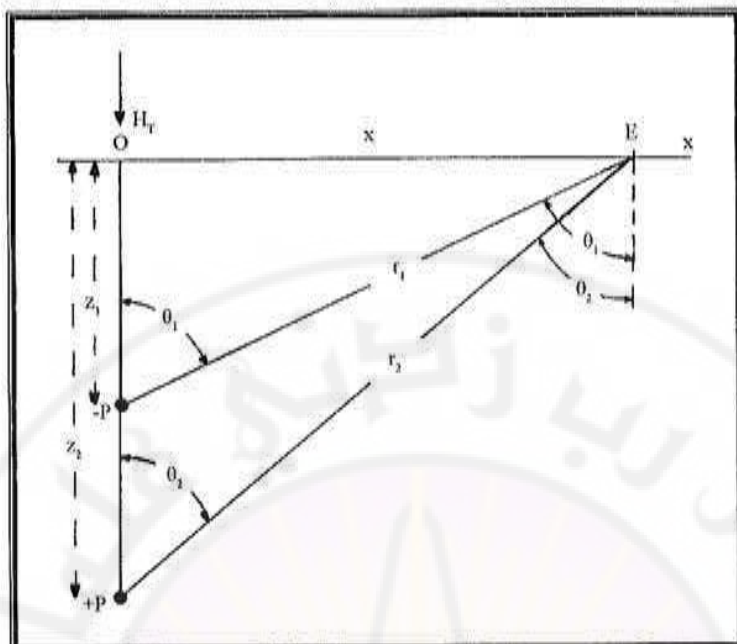
2-3-2- التأثير المغنطيسي الناتج عن ثنائي قطب:

تطبق المعادلة (2-7) على القطب العلوي السالب الذي قوته (-P) الواقع على عمق z_1 من سطح الأرض، وعلى القطب السفلي الموجب الذي قوته (+P) الواقع على عمق z_2 من سطح الأرض، لحساب المركبة الشاقولية H_z في نقطة E (الشكل 2-3). نظراً لتعاكس تأثير القطبين تكون المركبة الشاقولية كما يلي:

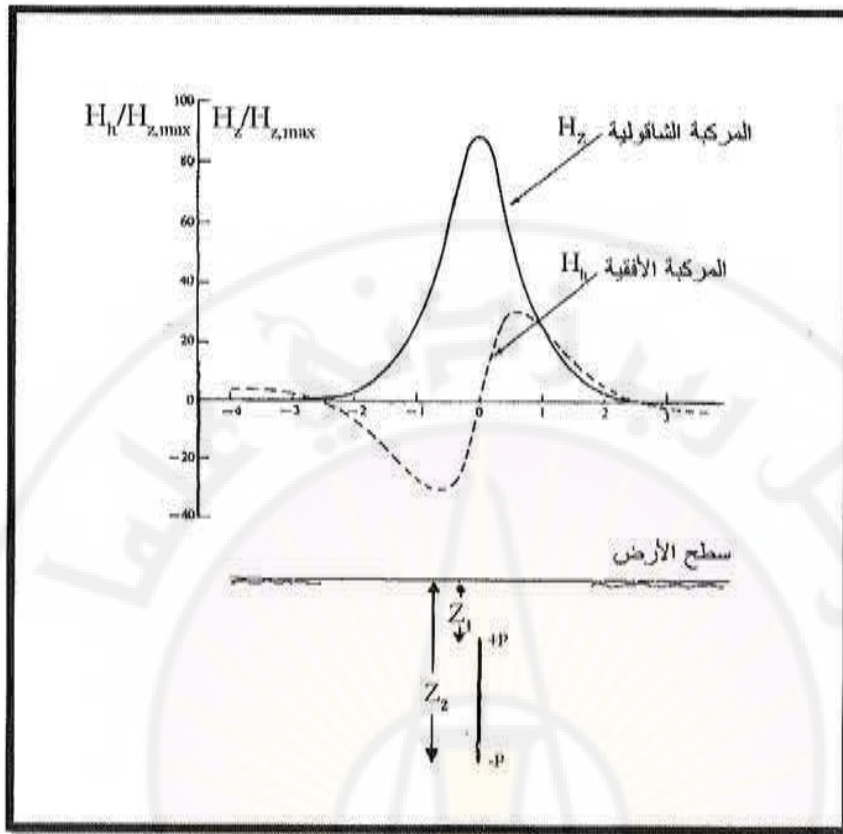
$$H_z = \frac{P.z_1}{\mu(x^2 + z_1^2)^{3/2}} - \frac{P.z_2}{\mu(x^2 + z_2^2)^{3/2}} \quad (2-12)$$

تطبق المعادلة (2-10) على القطبين لحساب المركبة الأفقية H_h في نقطة E (الشكل 2-3). نظراً لتعاكس تأثير القطبين تكون المركبة الأفقية كما يلي:

$$H_h = \frac{P.x}{\mu(x^2 + z_1^2)^{3/2}} - \frac{P.x}{\mu(x^2 + z_2^2)^{3/2}} \quad (2-13)$$



الشكل (3-2): وضع ثنائي قطب مغناطيسي يقع قطبه العلوي السالب على عمق z_1 وقطبه السفلي الموجب على عمق z_2 .

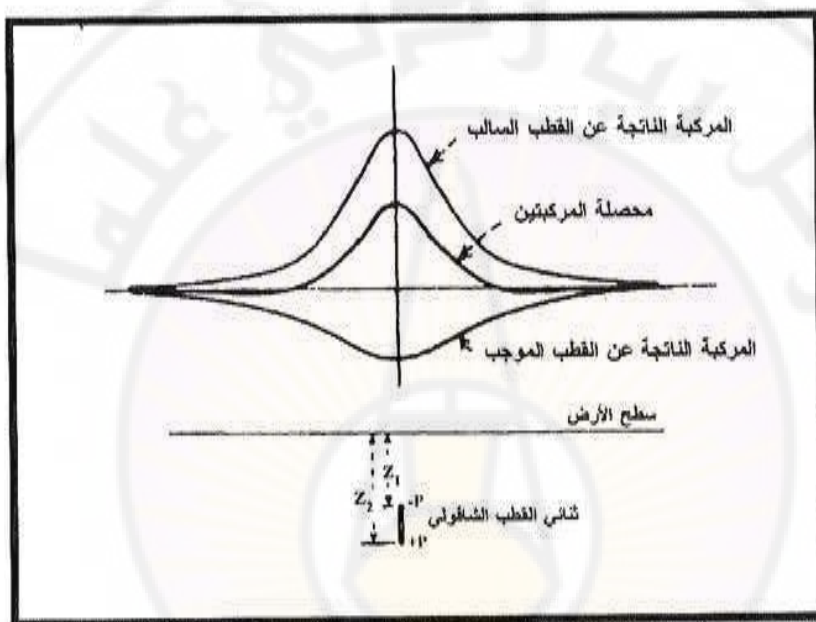


الشكل (2-4): منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية H_z ومنحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الأفقية H_H فوق ثنائي قطب.

(حسب تelford وآخرين 1976)

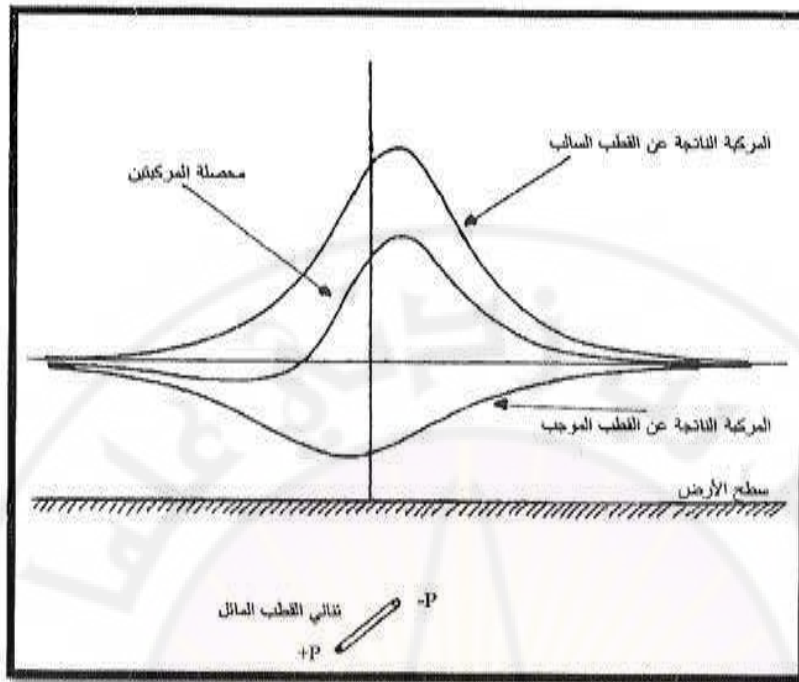
يعطي الشكل (2-4) منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية H_z (المنحنى المستمر) ومنحنى تغير شدة المركبة الأفقية H_H (المنحنى المنقطع) لثنائي القطب. يلاحظ التشابه بين منحنيات القطب المعزول ومنحنيات ثنائي القطب، إنما يلاحظ هبوط شدة المركبة الشاقولية لثنائي القطب إلى الصفر بسرعة أكبر من تلك التي للقطب المعزول، بينما تمر شدة المركبة الأفقية بالصفر قبل المركز السطحي وبعده وذلك نتيجة التأثير المعاكس للقطب السفلي الموجب.

يسهل حساب المركبة المغنطيسية الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب مائل حيث تساوي هذه المركبة محصلة المركبتين الناتجتين عن كلا القطبين، كما في الشكل (2-6) الذي يظهر منحني شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية الناتجة عن كل من القطبين ومنحني محصلتهما، ومن المقارنة مع منحنى شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية الناتجة عن كل من القطبين ومحصلتهما في حال كون ثنائي القطب شاقولياً (الشكل 2-5)، يلاحظ اللاتناظر الذي طرأ على المركبة المغنطيسية الشاقولية.



الشكل (2-5): شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب شاقولي مستقطب شاقولياً.

(حسب دوبرين Dobrin, 1976)

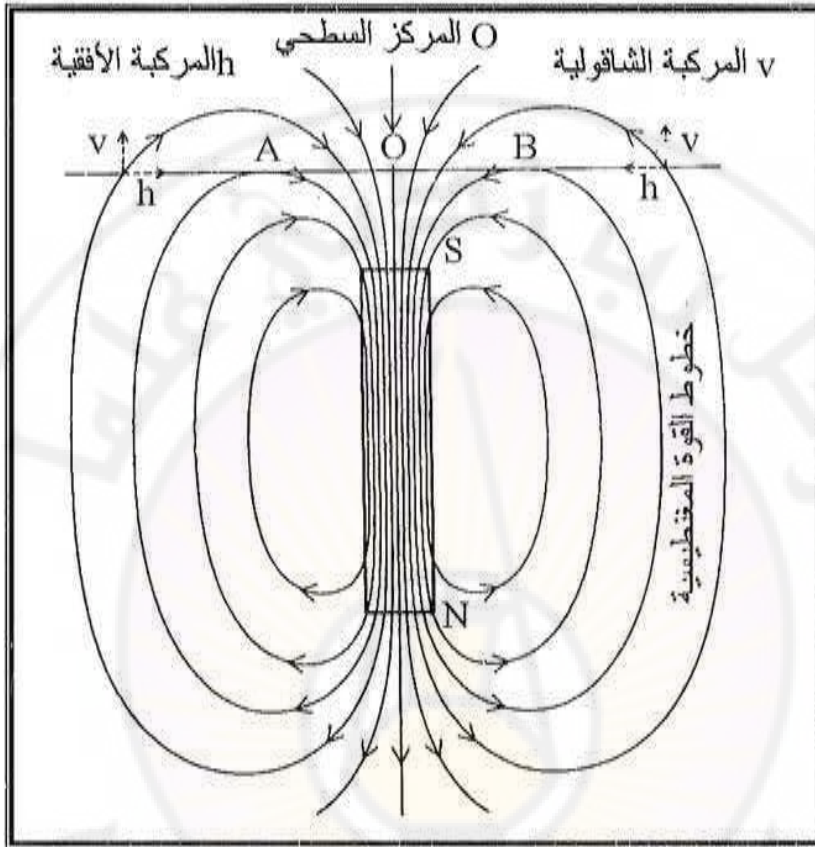


الشكل (2-6): شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب مائل مستقطب شاقولياً.
(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

2-3-3- التأثير المغناطيسي الناتج عن جسم مغناطيسي هندسي الشكل:

يؤخذ جسم مغناطيسي أسطواناني شاقولي مطمور تحت سطح الأرض، يقع سطحه العلوي على عمق (z_1) وسطحه السفلي على عمق (z_2) عن سطح الأرض (الشكل 2-7)، واقع في النصف الشمالي من الكرة الأرضية. نظراً لكون الجسم مغناطيسياً وواقعاً تحت تأثير الحقل المغناطيسي الأرضي تحرض المركبة الشاقولية للحقل المغناطيسي الأرضي مغناطيسية بالاتجاه الشاقولي، فإذا كانت المركبة الشاقولية موجهة نحو الأسفل ومتأثرة الجسم المغناطيسية حديدية، يتشكل قطب شمالي (موجب) على السطح السفلي للجسم وقطب جنوبي (سالب) على السطح

العلوي، وبصيح هذا الجسم المغنطيسي ممثلاً لمغنطيس مستقيم ضخيم، ويولد خطوط قوة مغنطيسية مماثلة لتلك الظاهرة في الشكل (7-2).



الشكل (7-2): خطوط القوة المغنطيسية الناتجة عن جسم أسطواني شاقولي مستقطب شاقولياً.

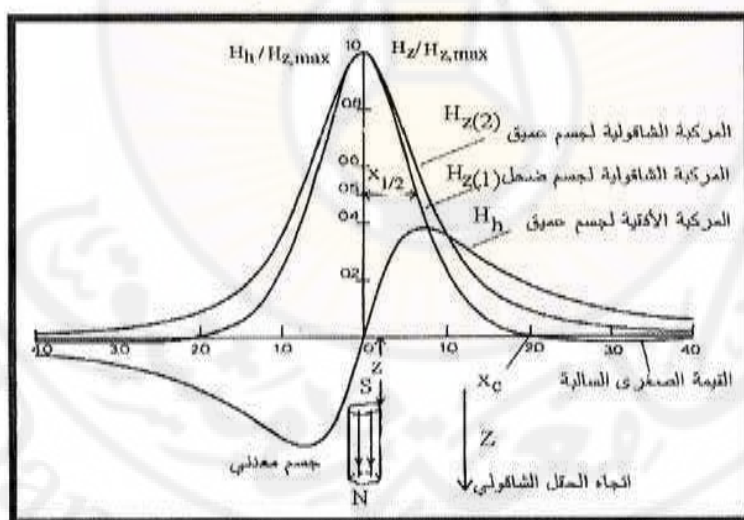
(حسب باراسنيس 1975, Parasnis)

لو فرضنا أن الخط الأفقي في الشكل (7-2) يمثل سطح الأرض، نجد أن هذا السطح يقطع خطوط القوة المغنطيسية حيث يكون الحقل المغنطيسي موجهاً نحو الأسفل وبالتالي موجهاً على سطح الأرض فوق مركز سطح الجسم مباشرة، (نطلق على النقطة الواقعة فوق مركز سطح الجسم مباشرة اسم المركز السطحي O)، وبالتالي ليس هناك مركبة مغنطيسية أفقية في المركز السطحي، نلاحظ أن هذا الحقل المغنطيسي يبقى موجهاً نحو الأسفل بين المركز السطحي (O)

ونقطة (A) من جهة ونقطة (B) من جهة أخرى، إنما يمكن تحليل هذا الحقل المغنطيسي إلى مركبة شاقولية متجهة نحو الأسفل، ومركبة أفقية متجهة نحو المركز السطحي (O). نجد في نقطتي (A) و (B) بالذات أن المركبة الشاقولية تختفي وتبقى المركبة الأفقية، بينما تعود المركبة الشاقولية إلى الظهور بعد نقطتي (A) و (B) بعيداً عن المركز السطحي، إنما تكون موجهة نحو الأعلى، وبالتالي سالبة وتبقى المركبة الأفقية موجهة نحو المركز السطحي.

يظهر الشكل (8-2) المركبة الشاقولية H_z والمركبة الأفقية H_h لشواذ المغنطيسية الناتجة عن الجسم المطمور، وذلك على طول مسار (profile) يمر من المركز السطحي للجسم، وقد عدت المركبة الأفقية موجبة عندما تكون موجهة نحو يسار القارئ وسالبة عندما تكون موجهة نحو يمين القارئ. تؤخذ المسافات الأفقية عادة بوحدة العمق إلى السطح العلوي للجسم، بينما تؤخذ الشواذ بوحدة القيمة العظمى للمركبة المغنطيسية الشاقولية $H_{z,max}$ ، أي كما يلي:

$$\frac{H_h}{H_{z,max}} \quad \frac{H_z}{H_{z,max}}$$



الشكل (8-2): جسم مغنطيسي أسطوانى شاقولي ومنحنيات تغير المركبات الشاقولية والأفقية.

(حسب باراسنيس 1975 Pararnis)

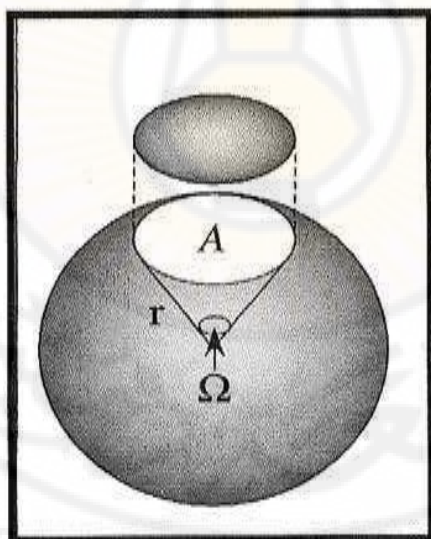
لتوضيح كيفية تشكل هذه المنحنيات لا بد من إدخال مفهوم الزاوية المجسمة (solid angle) التي ستستخدم في حساب الشواذ المغناطيسية لاحقاً:
تُعرف الزاوية المجسمة بأنها نسبة مساحة عنصر سطح من كرة إلى مربع نصف قطر الكرة (الشكل 2-9)، فإذا كانت مساحة السطح A ونصف قطر الكرة r تكون الزاوية المجسمة كالتالي:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (2-14)$$

إذا كان عنصر السطح A مائلاً بزاوية α على نصف القطر يكون مسقط السطح المعامد لنصف القطر مساوياً لـ $A \cos \alpha$ ، وتكون الزاوية المجسمة في هذه الحالة مساوية لـ:

$$\Omega = \frac{A \cos \alpha}{r^2} \quad (2-15)$$

تقاس الزاوية المجسمة بالراديان وتكون أصغر قيمة لها هي الصفر، عندما يكون السطح مساوياً للصفر، وعندما يصبح السطح مساوياً لسطح الكرة أي $A = 4\pi r^2$ تأخذ الزاوية المجسمة قيمتها العظمى أي $\Omega = 4\pi$.



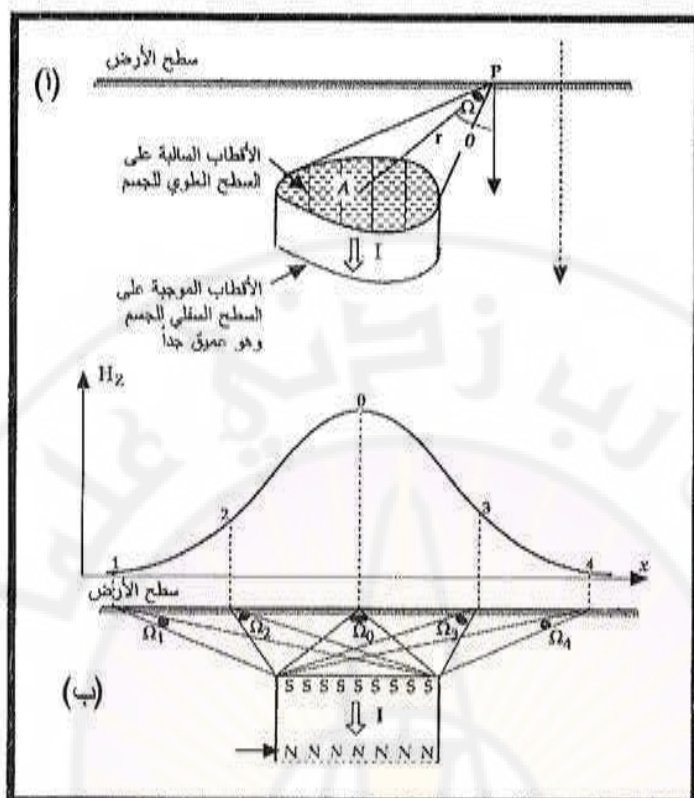
الشكل (2-9): الزاوية المجسمة على سطح كرة.

(حسب لوري 2007, Lowrie)

يساعد مفهوم الزاوية المجسمة على فهم الشواذ المغناطيسية الناتجة عن توزيع الأقطاب المغناطيسية الموزعة على سطح الجسم. إذا اعتبرنا أن توزيع الأقطاب المغناطيسية على السطح العلوي للجسم الذي مساحته A وشدة مغناطيسيته I ، قد تحرّضت بالحقل المغناطيسي الذي شدته H (الشكل 2-10-1). تكون شدة شواذ الحقل في نقطة على سطح الأرض تبعد مسافة r عن مركز توزيع الأقطاب متناسبة مع عدد الأقطاب الكلي على السطح، الذي يساوي جداء مساحة السطح A بكثافة توزيع الأقطاب σ على السطح أي σA . إذا كان اتجاه r يصنع زاوية θ مع اتجاه المغناطيسية I ، تكون شدة المركبة الشاقولية للحقل في P مساوية لجداء عدد الأقطاب بـ $\cos\theta$ وتكون شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن توزيع الأقطاب كما يلي:

$$\Delta H \propto \frac{(\sigma A) \cos \theta}{r^2} \propto (I/\Omega) \Omega \quad (2-16)$$

يمكن القول أن شواذ المغناطيسية الناتجة عن توزيع الأقطاب، في نقطة على طول مسار القياس متناسبة مع الزاوية المجسمة Ω التي تحصر التوزيع. لتوضيح شكل المنحني $H_{Z(2)}$ في الشكل (2-8)، الذي يعطي الشواذ المغناطيسية الناتجة عن جسم سطحه السفلي عميق جداً، نلاحظ في شكل (2-10-ب) تأثير الجسم الوارد فوق المنحني، وأن الزاوية المجسمة تساوي الصفر في اللانهاية وتأخذ القيمة Ω_1 في الموقع (1) ثم تتزايد إلى القيمة العظمى Ω_0 في الموقع (0) وتتناقص إلى القيمة Ω_4 في الموقع (4) وتتناهي إلى الصفر في اللانهاية.

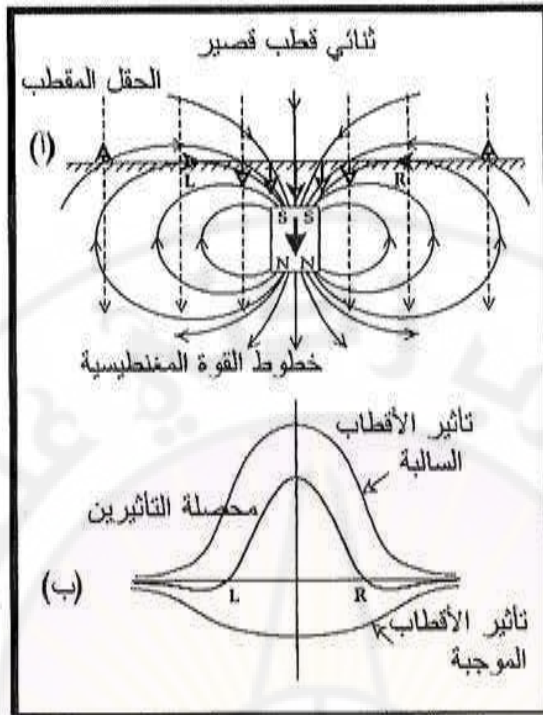


الشكل (10-2): استخدام مفهوم الزاوية المجسمة لتوضيح شكل منحنى مركبة الشواذ المغناطيسية الناتجة عن جسم مغناطيسي سطحه السفلي عميق جداً.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

لتوضيح شكل المنحني $H_z(1)$ في الشكل (2-8) الذي يعطي الشواذ المغناطيسية الناتجة عن جسم سطحه السفلي ضحل (الشكل 2-11) نورد ما يلي:

نظراً لقصر الجسم تنتج خطوط القوة المغناطيسية حول الجسم (الشكل 2-11-أ) وتنتج الأقطاب السالبة الموجودة على السطح العلوي للجسم المنحني H_s الموجب كلياً، بينما تنتج الأقطاب الموجبة الموجودة على السطح السفلي للجسم المنحني H_N السالب كلياً. وتعطي محصلة قيم الحقلين السالب والموجب في كل نقطة على المسار المنحني H_R ، الذي يظهر القيم الصغرى السالبة على جانبي المنطقة الموجبة الوسطى.



الشكل (2-11): توضيح شكل منحنى مركبة الشواذ المغناطيسية الناتجة عن جسم مغناطيسي سطحه السفلي ضحل.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

عندما ترسم المسافات الحقيقية مع الشواذ المقاسة نلاحظ بأن منحنى الشواذ يزداد عرضاً كلما ازداد عمق السطح العلوي للجسم المغمور (المنحنى $H_z(2)$ في الشكل (2-8)). بالمقابل تعطي الأجسام الضحلة شواذاً أكثر حدة (ارتفاعاً) (المنحنى $H_z(1)$ في الشكل (2-8)). كذلك كلما ازداد طول الجسم المغمور نحو الأسفل يخف تأثير الأقطاب الموجبة للسطح السفلي للجسم، فنلاحظ أن قيمة المركبة الشاقولية للشواذ المغناطيسية (H_z) تنخفض ببطء من قيمتها العظمى، كما نرى من المنحنى $H_z(2)$ في الشكل (2-8)، ونتيجة لذلك تتباعد نقطتا تقاطع منحنى الشواذ المغناطيسية مع محور السينات، أي عندما تكون $H_z = 0$ نتيجة لتعادل تأثير الأقطاب العلوية السالبة مع تأثير الأقطاب السفلية الموجبة، كذلك تتحرك، بعيداً عن المركز السطحي، نقاط القيم الصغرى السالبة عندما تتناقص مقادير هذه القيم الصغرى.

تكون منحنيات تساوي المغنطيسية على سطح الأرض الناتجة عن جسم مغنطيسي شاقولي كما في الحالة المذكورة دوائر متركزة حول المركز السطحي (O)، لكن بشكل عام تكون هذه المنحنيات متطاولة، مما يدل على وجود خط من الأقطاب بدلا من وجود قطبين نقطيين على السطح العلوي والسطح السفلي، أي أن الجسم متطاول.

2-3-4- شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية الناتجة عن أجسام مستقطبة شاقولياً:

2-3-4-1- كرة:

تعد الكرة متجانسة ونصف قطرها (R) ومستقطبة شاقولياً في الحقل المغنطيسي الأرضي وعمق مركزها (z_0) عن سطح الأرض، بحيث يكون $z_0 > R$. لحساب المركبة المغنطيسية الشاقولية يمكن تطبيق العلاقة (2-17) التي تعطي المركبة المغنطيسية الشاقولية بدلالة الكمون الجاذبي، أي علاقة بواصون (2-4):

$$H_Z = \frac{I}{G \cdot \rho} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (2-17)$$

علماً أن: ρ كثافة الكرة و m كتلتها. وبذلك يكون الكمون الجاذبي في نقطة تبعد بمقدار x عن المركز السطحي O وبمقدار r عن مركز الكرة، كما يلي:

$$V = \frac{Gm}{r} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho G}{r} \quad (2-18)$$

$$m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \quad \text{لأن}$$

$$r = (x^2 + z^2)^{\frac{1}{2}} \quad \text{وبما أن}$$

إذن:

$$V = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho G}{(x^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2-19)$$

بأخذ المشتق الأول للكمون الجاذبي بالنسبة لـ z ، نجد:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{-4}{3}\pi R^3 \rho G \frac{z}{(x^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2-20)$$

وبأخذ المشتق الثاني للكمون الجاذبي بالنسبة لـ z ، نجد:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho G \frac{2z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (2-21)$$

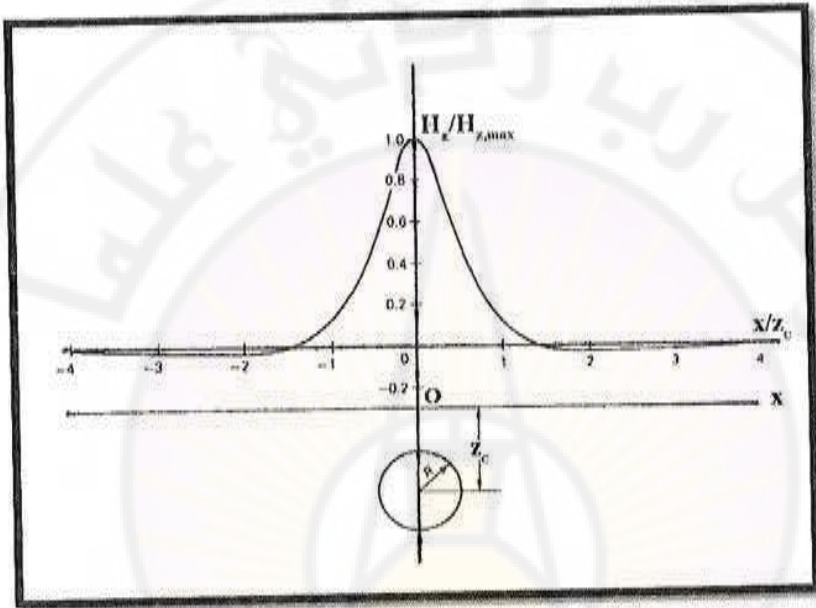
بالتبديل بالعلاقة (2-17) نجد:

$$H_z = \frac{I}{G \cdot \rho} \cdot \frac{4}{3}\pi R^3 \rho G \frac{2z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

وبالمعاصرة بالنسبة للعمق z ، وتبديل z بـ z_c عمق مركز الكرة، نجد:

$$H_z = \frac{4}{3}\pi R^3 I \frac{z_c^2 \left[2 - \left(\frac{x}{z_c} \right)^2 \right]}{z_c^5 \left[1 + \left(\frac{x}{z_c} \right)^2 \right]^{\frac{5}{2}}}$$

$$= \frac{4}{3} \frac{\pi R^3 I}{z_c^3} \frac{2 - \left(\frac{x}{z_c}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{x}{z_c}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (2-22)$$



الشكل (2-12): منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق كرة مستقطبة شاقولياً ونصف قطرها R .
(حسب دوبرين 1976, Dobrin)

يظهر الشكل (2-12) منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق كرة مستقطبة شاقولياً ونصف قطرها R وعمق مركزها z_c عن سطح الأرض. استخدمت قيم H_z المعبرة بالنسبة لـ $H_{z,max}$ ، كما أخذت المسافة الأفقية (x) بوحدة العمق إلى مركز الكرة. تكون قيمة المركبة الشاقولية مساوية للصفر في $(-\infty)$ ، ثم تصبح سالبة بعيداً عن الكرة، وتساوي الصفر عندما $x = -\sqrt{2} \cdot z_c$ ، ثم تصبح موجبة حتى تبلغ قيمتها

العظمى في المركز السطحي ($x=0$)، ثم تتناقص تدريجياً حتى تساوي الصفر عندما $x = \sqrt{2} \cdot z_c$ ، ثم تصبح سالبة بعد $x = \sqrt{2} \cdot z_c$ ، إلى أن تصل إلى الصفر في $(+\infty)$.

2-4-3-2 أسطوانة أفقية:

تطبق علاقة بواصون (4-2) لحساب المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق أسطوانة أفقية مستقطبة شاقولياً ونصف قطرها R ويقع محورها على عمق (z_c) من سطح الأرض. تسهياً للحساب يؤخذ سلك مستقيم لا نهائي الطول كتلة واحدة الطول منه (λ)، يمتد موازياً للمحور (y)، ومطموراً على عمق (z) من سطح الأرض، ومنزاحاً أفقياً بمقدار (x) عن نقطة القياس، وتحسب المركبة الشاقولية الناتجة عن هذا السلك، ثم يحول هذا السلك إلى أسطوانة أفقية نصف قطرها (R) ويقع محورها على عمق (z_c) من سطح الأرض. يحسب الكمون الجاذبي للسلك بأخذ تكامل الكمون الجاذبي لعنصر صغير من السلك طوله (dl). يعطى الكمون الجاذبي الجزئي للسلك بالعلاقة التالية:

$$dv = \frac{G \, dm}{r} = G \, \lambda \frac{dl}{r} \quad (2-23)$$

حيث $dm = \lambda dl$ كتلة العنصر الصغير dl ومنه بالتكامل، نجد :

$$V = \int_{-\infty}^{+\infty} dv = \int_{-\infty}^{+\infty} G \frac{dm}{r} = \int_{-\infty}^{+\infty} G \lambda \frac{dl}{r}$$

$$V = 2G\lambda \ln \frac{1}{r}$$

$$= 2G\lambda \ln \frac{1}{(x^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (2-24)$$

لحساب المركبة المغناطيسية الشاقولية للسلك نطبق علاقة بواصون (2-4)، بعد أخذ المشتق الأول للكمون الجاذبي بالنسبة لـ (z) :

$$\frac{dV}{dz} = -2G\lambda \frac{z}{x^2 + z^2} \quad (2-25)$$

وأخذ المشتق الثاني للكمون الجاذبي بالنسبة لـ (z) :

$$\frac{\partial^2 V}{dz^2} = 2G\lambda \frac{z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^2}$$

وبتطبيق علاقة بواصون نجد:

$$\begin{aligned} H_z &= \frac{I}{G\rho} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{I}{G\rho} 2G\lambda \frac{z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^2} \\ &= \frac{2\lambda I}{\rho} \frac{z^2 - x^2}{(x^2 + z^2)^2} \end{aligned} \quad (2-26)$$

يتم تحويل السلك إلى أسطوانة نصف قطرها R أصغر من عمق محور الاسطوانة (z_c) باستبدال كتلة واحدة الطول λ بما يساويها:

$$\lambda = \pi R^2 \rho$$

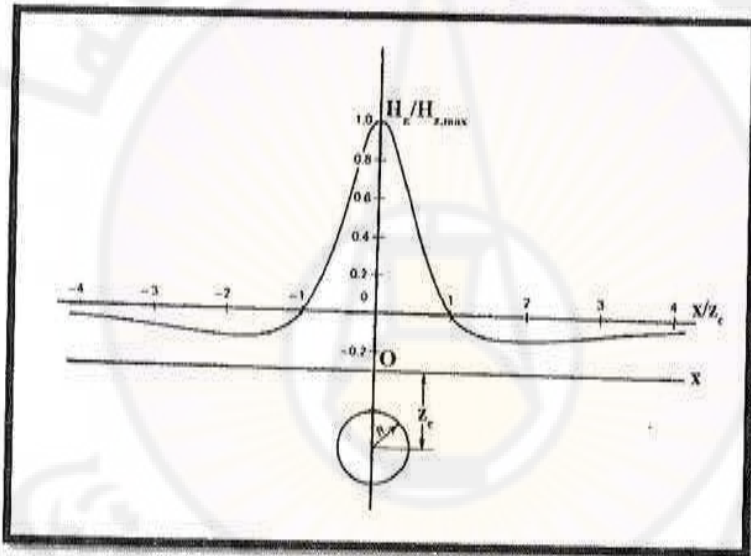
حيث ρ كثافة الأسطوانة.

ومنه تصبح شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية للأسطوانة الأفقية كالتالي:

$$H_z = 2\pi R^2 I \cdot \frac{z_c^2 - x^2}{(x^2 + z_c^2)^2} \quad (2-27)$$

وبالمعبرة بالنسبة للعمق z_c نجد:

$$H_z = \frac{2\pi R^2 I}{z_c^2} \cdot \frac{1 - \left(\frac{x}{z_c}\right)^2}{\left[1 + \left(\frac{x}{z_c}\right)^2\right]^2} \quad (2-28)$$



الشكل (13-2): منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق أسطوانة أفقية مستقطبة شاقولياً نصف قطرها R وعمق محورها (z_c) من سطح الأرض.

(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

يظهر الشكل (13-2) منحنى تغير شدة المركبة الشاقولية فوق الأسطوانة الأفقية. استخدمت قيم H_z المعبرة بالنسبة لـ $H_{z,max}$ كما أخذت المسافة الأفقية (x) بوحدة العمق إلى محور الأسطوانة. ولاحظ أن المركبة الشاقولية الكلية سالبة عندما تكون $x > +z$ و $x < -z$.

$z < -z$ ، وتصبح موجبة بين $z > -z$ و $x < +z$ وتبلغ قيمتها العظمى عندما $x = 0$ ، بينما تساوي الصفر عندما $x = \pm z$.

2-3-4-3 أسطوانة شاقولية:

تعتبر شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية للأسطوانة الشاقولية متناسبة مع جداء شدة مغناطيسية السطح والزاوية المجسمة (solid angle) التي رأسها نقطة القياس وتحصر سطح الأسطوانة.

يعالج التأثير المغناطيسي للسطح العلوي وللسطح السفلي للأسطوانة بشكل منفصل، نظراً لاختلاف قيمة الزاوية المجسمة التي رأسها في المركز السطحي (O) وتحصر السطح العلوي ω_{s1} عن تلك التي رأسها في المركز السطحي (O) وتحصر السطح السفلي ω_{s2} ، فعندما يكون مكان القياس فوق الأسطوانة مباشرة تكون الزاوية المجسمة العظمى هي الزاوية التي تحصر السطح العلوي المؤلف من أقطاب سالبة، مما يجعل التأثير المغناطيسي الشاقولي موجباً، بينما لو كان مكان القياس بعيداً جداً تكون الزاوية الكبرى هي التي تحصر السطح السفلي المؤلف من أقطاب موجبة، ويكون التأثير المغناطيسي الشاقولي سالباً. وعندما تتساوى الزاويتان المجسمتان يكون التأثير المغناطيسي الشاقولي الكلي مساوياً للصفر، أي تكون شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية مساوية للصفر.

يمكن حساب شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية H_z في نقطة القياس (P) من العلاقة التالية :

$$H_z = I(\omega_1 - \omega_2) \quad (2-29)$$

$$\omega_1 = \omega_{s1} \cos \Theta_1 \quad \text{حيث}$$

$$\omega_2 = \omega_{s2} \cos \Theta_2$$

$$\omega_1 = \omega_{s1} \cos \Theta_1 = \omega_{s1} \frac{z_1}{r_1}$$

$$\omega_2 = \omega_{s2} \cos \Theta_2 = \omega_{s2} \frac{z_2}{r_2}$$

ومنه

$$H_z = I \left(\frac{\pi R^2 \cos \Theta_1}{r_1^2} - \frac{\pi R^2 \cos \Theta_2}{r_2^2} \right) \quad (2-30)$$

$$= I \pi R^2 \left(\frac{\cos \Theta_1}{r_1^2} - \frac{\cos \Theta_2}{r_2^2} \right)$$

حيث I شدة مغناطيسية السطح.

r_1 المسافة الفاصلة بين نقطة القياس (P) ومركز السطح العلوي.

r_2 المسافة الفاصلة بين نقطة القياس (P) ومركز السطح السفلي.

R نصف قطر الأسطوانة

ω_1 الزاوية المجسمة التي تحصر السطح العلوي.

ω_2 الزاوية المجسمة التي تحصر السطح السفلي.

Θ_1 هي الزاوية التي رأسها نقطة القياس (P) وتقع بين الشاقول والمحور r_1

الواصل بين (P) ومركز السطح العلوي للأسطوانة.

Θ_2 هي الزاوية التي رأسها نقطة القياس (P) وتقع بين الشاقول والمحور r_2

الواصل بين (P) ومركز السطح السفلي للأسطوانة.

إذا ازداد طول الأسطوانة كثيراً تقترب الزاوية المجسمة، التي تحصر السطح السفلي

من الصفر ($\omega_2=0$)، وتصبح العلاقة (2-29) بالشكل التالي:

$$H_z = I(\omega_1) \quad (2-31)$$

أن ω_{K1} تساوي مساحة السطح العلوي للأسطوانة مقسومة على مربع البعد بين نقطة

القياس (P) ومركز السطح العلوي، أي:

$$\omega_{s1} = \frac{\pi R^2}{r_1^2}$$

ومنه :

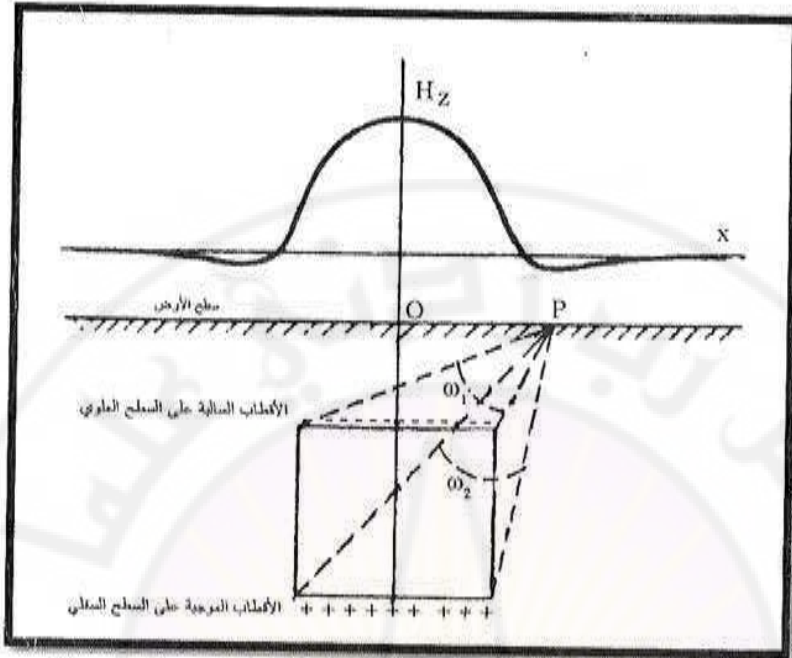
$$\begin{aligned}\omega_1 &= \frac{\pi R^2}{r_1^2} \cdot \cos \Theta_1 = \frac{\pi R^2}{r_1^2} \cdot \frac{z_1}{r_1} \\ &= \frac{\pi R^2 z_1}{r_1^3} = \frac{\pi R^2 z_1}{(x^2 + z_1^2)^{3/2}}\end{aligned}\quad (2-32)$$

وبالتبديل في العلاقة (2-31) نجد:

$$H_z = \frac{\pi R^2 z_1 I}{(x^2 + z_1^2)^{3/2}} \quad (2-33)$$

z_1 عمق سطح الأسطوانة العلوي من سطح الأرض.
x بعد نقطة القياس (P) عن المركز السطحي للأسطوانة.

يبدو في الشكل (2-14) وضع صفيحة رقيقة من الأسطوانة الشاقولية والزائتين المجسمتين اللتين تحصران السطح العلوي والسطح السفلي ومنحني تغير شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية. يلاحظ تغير هذه المركبة من الصفر في $(-\infty)$ ، إلى قيمة صغرى سالبة قبل المركز السطحي للأسطوانة، ثم تصبح موجبة فوق الأسطوانة، وتصل إلى قيمة عظمى فوق المركز السطحي، ثم تتناقص إلى قيمة صغرى سالبة بعد الأسطوانة، وتنتهي إلى الصفر في $(+\infty)$.



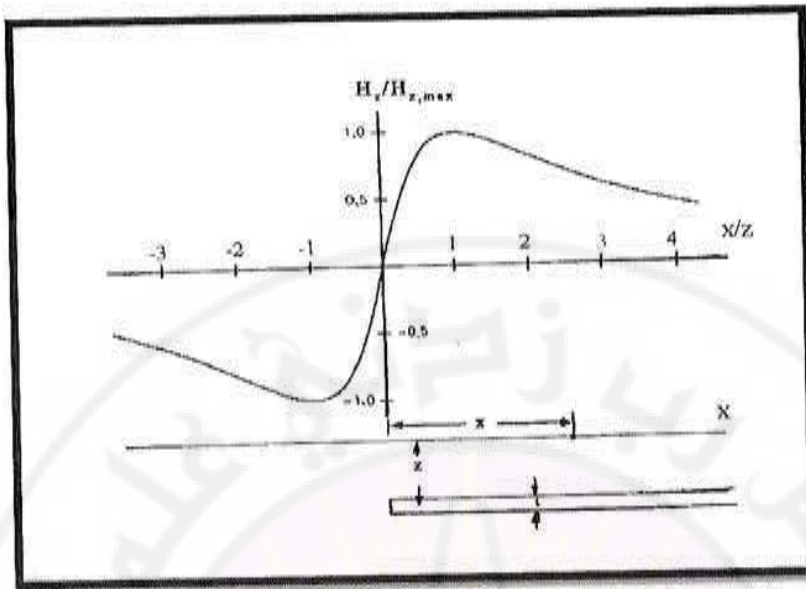
الشكل (2-14): منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية الناتجة عن السطحين العلوي والسفلي لأسطوانة شاقولية مستقطبة طولياً.

(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

2-3-4-4- صفيحة أفقية مضروبة بفالق:

لو فرضنا وجود صفيحة أفقية مضروبة بفالق شاقولي سماكتها (t) ومطمورة على عمق (z)، فتكون شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية في نقطة (P)، التي تقع على بعد (x) من المركز السطحي الواقع فوق نهاية الصفيحة (أي على صفيحة الفالق) (الشكل 2-15)، كالتالي:

$$H_z = I.t \frac{x}{x^2 + z^2} \quad (2-34)$$



الشكل (15-2): منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق صفيحة مغناطيسية أفقية رقيقة مستقطبة شاقولياً ومضروبة بفالق شاقولي.

(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

يعطي الشكل (15-2) منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق هذه الصفيحة المغناطيسية. يلاحظ أن المركبة المغناطيسية الشاقولية تكون سالبة بين $(-\infty)$ ومبدأ الإحداثيات، وتصل إلى قيمة صغرى سالبة قبل مبدأ الإحداثيات (صفحة الفالق) بقليل، ثم تساوي الصفر عندما $x = 0$ ، وتصبح موجبة عندما $(x > 0)$ ، حتى تصل إلى قيمة عظمى موجبة بعد مبدأ الإحداثيات بقليل، ثم تتلاشى تدريجياً وبيبطء مع ازدياد البعد عن مبدأ الإحداثيات إلى أن تصل إلى الصفر في $(+\infty)$.

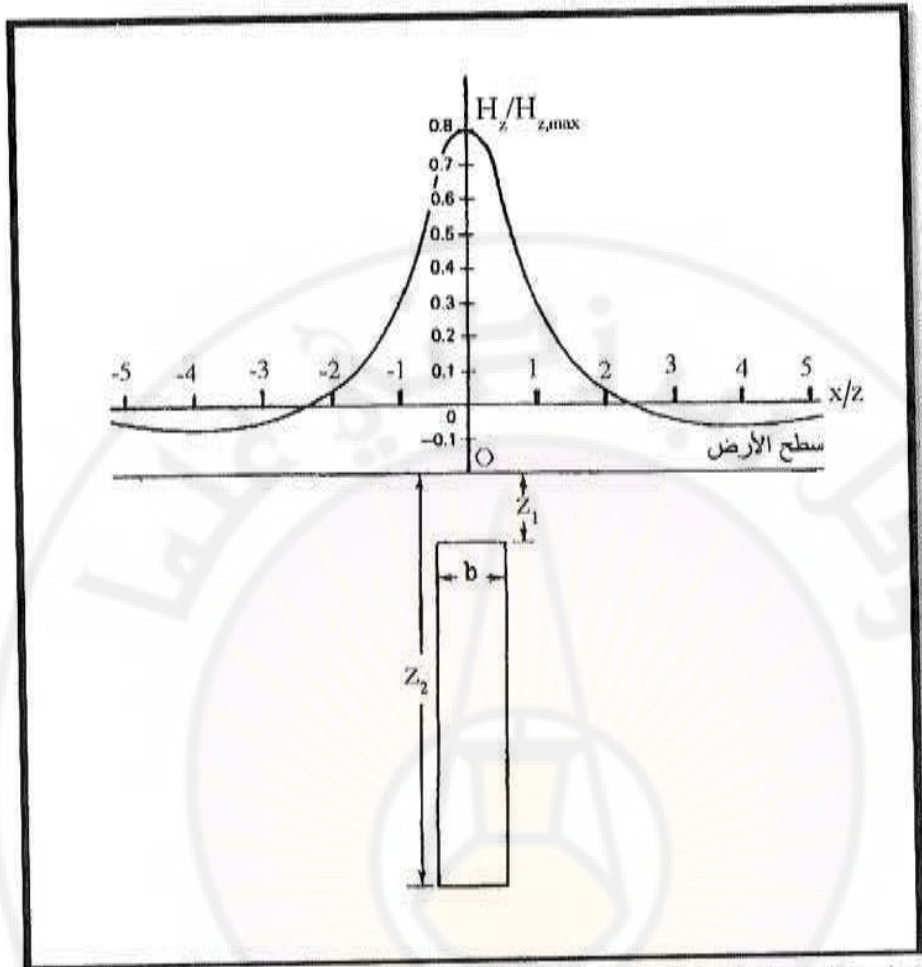
2-3-4-5 صفيحة شاقولية:

من السهل حساب المركبة المغناطيسية الشاقولية لصفيحة مغناطيسية شاقولية ومستقطبة شاقولياً يقع سطحها العلوي على عمق (z_1) وسطحها السفلي عميق جداً $(z_2 = \infty)$ ، وذلك لتشابه هذا الوضع مع الأسطوانة الشاقولية الطويلة جداً نحو الأسفل، إذ يبدو التأثير المغناطيسي كأنه ناتج عن الأقطاب السالبة الموزعة على سطحها العلوي فقط، وذلك لإمكان إهمال تأثير الأقطاب

الموجبة الموزعة على سطحها السفلي العميق جداً. لذا يكون التأثير المغنطيسي موجباً
دوماً ويكون مساوياً للصفر في اللانهاية، ثم يبدأ بالازدياد إلى أن يصل إلى قيمة عظمى في
المركز السطحي للصفحة.

أما عندما يقل عمق السطح السفلي بحيث لا يجوز إهمال تأثير الأقطاب الموجبة
الموزعة عليه، فيمكن حساب شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية بفرض أن الصفحة شاقولية
وعرضها أو (سماكتها) b و سطحها العلوي أفقي يقع على عمق (z_1) ، بينما يقع سطحها
السفلي على عمق (z_2) فنكون المركبة الشاقولية على بعد x من المركز السطحي للصفحة
كما يلي:

$$H_z = 2I.b \left(\frac{z_1}{z_1^2 + x^2} - \frac{z_2}{z_2^2 + x^2} \right) \quad (2-35)$$



الشكل (16-2): منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق صفيحة مغناطيسية شاقولية عرضها (b) ومستقطبة شاقولياً.

(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

يظهر الشكل (16-2) منحنى تغير شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية فوق صفيحة مغناطيسية مستقطبة شاقولياً عرضها (b) وعمق سطحها العلوي (z_1) وسطحها السفلي (z_2)، ويلاحظ ظهور قيمة صغيرة سالبة بعيداً عن المركز السطحي بسبب تأثير الأقطاب الموجبة المتوضعة على السطح السفلي الضحل، وتزداد هذه القيمة الصغيرة السالبة كلما قل عمق السطح السفلي.

2-3-5- التأثير المغنطيسي الناتج عن الجدران القاطعة:

نظراً لأهمية الجدران القاطعة، التي يمكن اعتبار الصفيحة الشاقولية حالة منها، وإمكانية تقطيع الأجسام الطويلة إلى صفائح شاقولية تمتد بشكل متعامد مع مسار القياس، سيتم فيما يلي الإسهاب في دراسة التأثير المغنطيسي على جدران قاطعة في أوضاع مختلفة.

نظراً لكون الحقل مائلاً بعيداً عن القطب المغنطيسي، ويتراوح ميله $0^\circ < I < 90^\circ$ ويقل هذا الميل إلى أن يساوي الصفر ($I=0^\circ$) في خط الاستواء المغنطيسي، وبما أن اتجاه الاستقطاب يتبع دوماً اتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي، لذا فإن استقطاب الأجسام المغنطيسية يكون شاقولياً في القطب المغنطيسي وأفقياً في خط الاستواء ومائلاً في غيرها من المواقع على سطح الأرض، وهي السائدة في العالم. لذا من الضروري معرفة تأثير الحقل المائل على مغنطيسية الأجسام الهندسية.

يصعب تمييز المغنطيسية اللامتناظرة الناتجة عن ميل حقيقي للجسم المغنطيسي الممتد عن الشواذ المغنطيسية اللامتناظرة الناتجة عن استقطاب مائل بسبب ميل الحقل المغنطيسي الأرضي. هذا ما يتوقع حدوثه عند القيام بمسح مغنطيسي في سورية، نظراً لأن الحقل المغنطيسي الأرضي المسيطر في سورية يتراوح بين 48 درجة في الجنوب الغربي و 55 درجة في الشمال الشرقي.

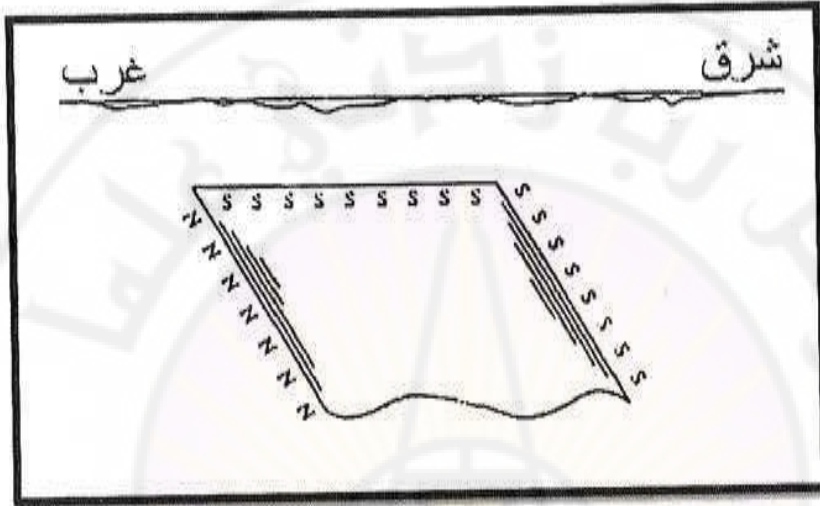
من السهل حساب التأثير المغنطيسي لجدار قاطع شاقولي يمتد باتجاه شمال-جنوب كما هو الوضع في الشكل (2-16)، إذ يدخل في الحساب تأثير الأقطاب السالبة على السطح العلوي والأقطاب الموجبة على السطح السفلي للجدار. لكن تغير اتجاه الجدار وميله يؤديان إلى تعقيد المنحني الناتج بسبب تأثير الأقطاب السالبة والموجبة على سطوح الجدار الجانبية، أو ما يسمى تأثير المغنطة المعترضة Transverse magnetization التي تتشكل على جوانب هذه الأجسام كما في الحالات التالية:

1- حالة جدار قاطع يتجه شمالاً-جنوباً ويميل نحو الشرق (شكل 2-

17):

سيؤدي ذلك إلى تشكل أقطاب سالبة على السطح العلوي الأفقي وأقطاب موجبة على السطح السفلي الأفقي وإلى أقطاب سالبة على الجانب الشرقي العلوي المائل وأقطاب موجبة على الجانب الغربي السفلي المائل.

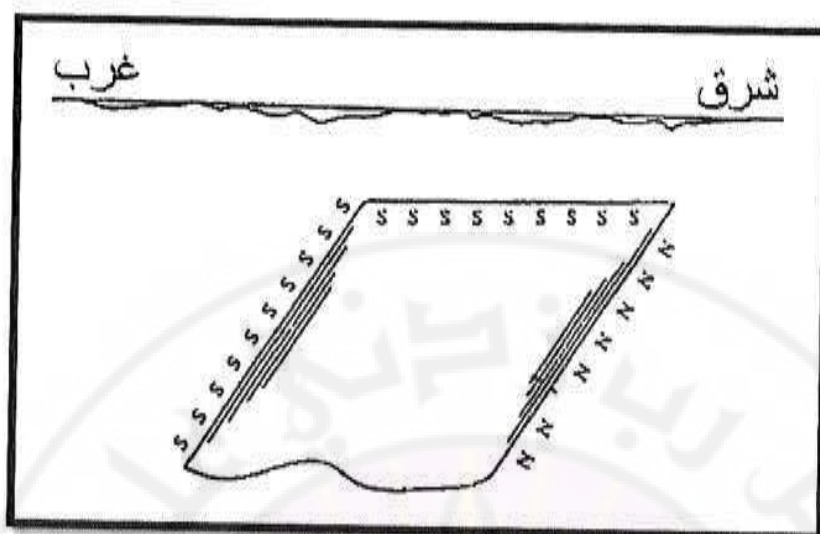
تؤدي الأقطاب الموجبة على الجانب الغربي السفلي إلى تأثير سالب في المركبة المغنطيسية الشاقولية الموجبة، مما يؤدي إلى انخفاض قيمتها. وبالمقابل تؤدي الأقطاب السالبة على الجانب الشرقي العلوي إلى تأثير موجب في المركبة المغنطيسية الشاقولية، مما يؤدي إلى ازدياد قيمتها.



الشكل (2-17): توزع الأقطاب على سطوح جدار قاطع يتجه شمالاً- جنوباً ويميل نحو الشرق.
(معدل من تelford وآخرون 1976)

أ- حالة جدار قاطع يتجه شمالاً- جنوباً ويميل نحو الغرب (شكل 2-18):
سيؤدي ذلك إلى تشكل أقطاب سالبة على السطح العلوي الأفقي وأقطاب موجبة على السطح السفلي الأفقي وإلى أقطاب سالبة على الجانب الغربي العلوي المائل وأقطاب موجبة على الجانب الشرقي السفلي المائل.

تؤدي الأقطاب الموجبة على الجانب الشرقي السفلي إلى تأثير سالب في المركبة المغنطيسية الشاقولية الموجبة، مما يؤدي إلى انخفاض قيمتها. وبالمقابل تؤدي الأقطاب السالبة على الجانب الغربي العلوي إلى تأثير موجب في المركبة المغنطيسية الشاقولية، مما يؤدي إلى ازدياد قيمتها.

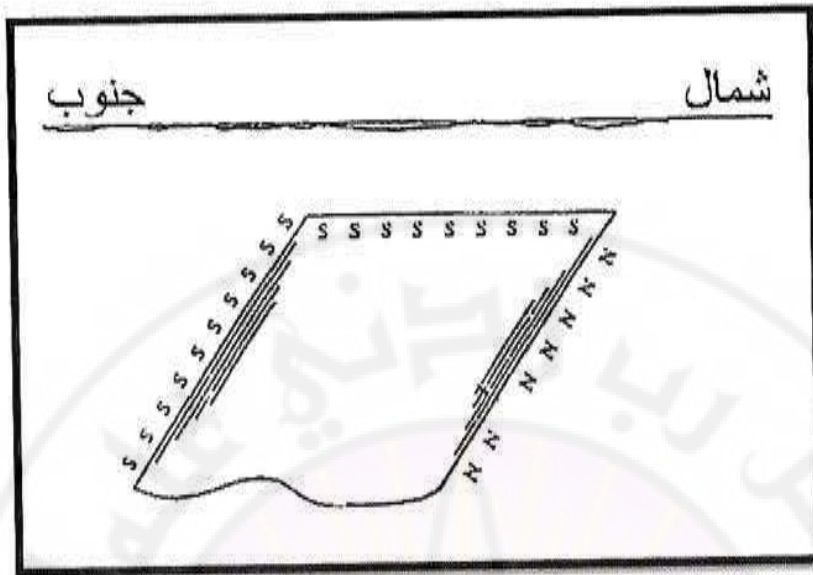


الشكل (2-18): توزيع الأقطاب على سطوح جدار قاطع يتجه شمالاً- جنوباً ويميل نحو الغرب.
(معدل من تelford وآخرين 1976, Telford et al.)

3- حالة جدار قاطع يتجه شرقاً- غرباً ويميل نحو الجنوب (شكل 2-19):

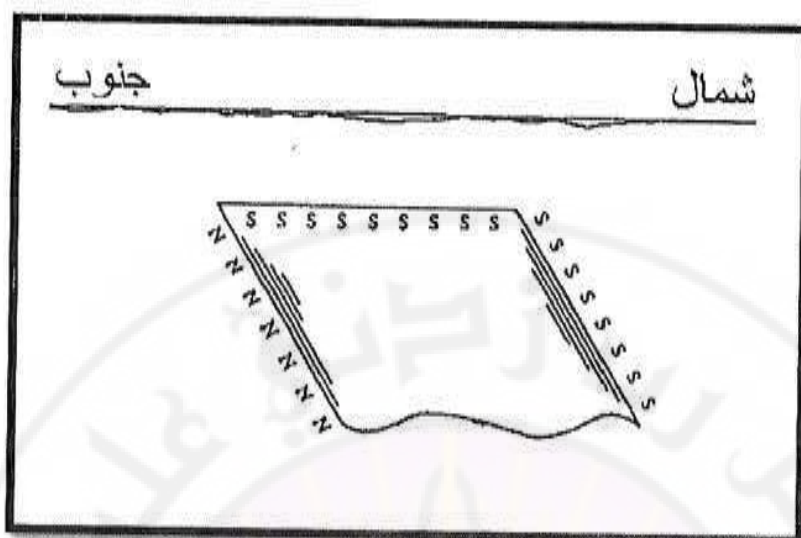
سيؤدي ذلك إلى تشكل أقطاب سالبة على السطح العلوي الأفقي وأقطاب موجبة على السطح السفلي الأفقي وإلى أقطاب سالبة على الجانب الجنوبي العلوي المائل وأقطاب موجبة على الجانب الشمالي السفلي المائل.

تؤدي الأقطاب الموجبة على الجانب الشمالي السفلي إلى تأثير سالب في المركبة المغنطيسية الشاقولية الموجبة، مما يؤدي إلى انخفاض قيمتها. وبالمقابل تؤدي الأقطاب السالبة على الجانب الجنوبي العلوي إلى تأثير موجب في المركبة المغنطيسية الشاقولية، مما يؤدي إلى ازدياد قيمتها.



الشكل (2-19): توزع الأقطاب على سطوح جدار قاطع يتجه شرقاً-غرباً ويميل نحو الجنوب.
(معدل من تلفورد وآخرين 1976 Telford et al., 1976)

4- حالة جدار قاطع يتجه شرقاً-غرباً ويميل نحو الشمال (شكل 2-20):
سيؤدي ذلك إلى تشكل أقطاب سالبة على السطح العلوي الأفقي وأقطاب موجبة على السطح السفلي الأفقي وإلى أقطاب سالبة على الجانب الشمالي العلوي المائل وأقطاب موجبة على الجانب الجنوبي السفلي المائل.
تؤدي الأقطاب الموجبة على الجانب الجنوبي السفلي إلى تأثير سالب في المركبة المغنطيسية الشاقولية الموجبة، مما يؤدي إلى انخفاض قيمتها. وبالمقابل تؤدي الأقطاب السالبة على الجانب الشمالي العلوي إلى تأثير موجب في المركبة المغنطيسية الشاقولية، مما يؤدي إلى ازدياد قيمتها.

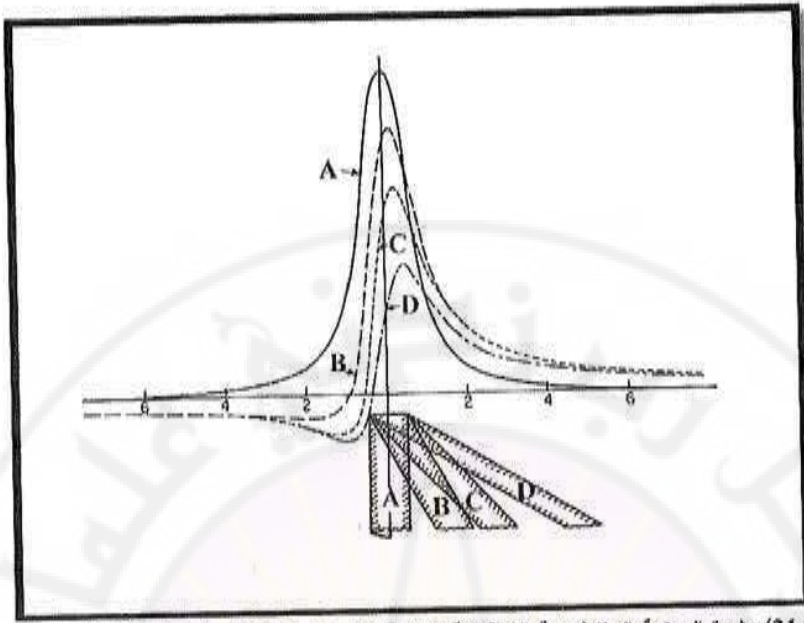


الشكل (2-20): توزيع الأقطاب على سطوح جدار قاطع يتجه شرقاً-غرباً ويميل نحو الشمال.
(معدل من تelford وآخرون 1976, Telford et al.)

يصعب تمييز المغنطيسية اللامتناظرة الناتجة عن استقطاب مائل بسبب ميل الحقل المغنطيسي الأرضي عن الشواذ المغنطيسية اللامتناظرة الناتجة عن ميل حقيقي للجسم المغنطيسي الممتد.

إذ يسبب ميل الحقل المغنطيسي الأرضي ظهور مغنطيسية معترضة على الجدران الجانبية، تؤدي بدورها إلى انزياح مسقط الشدة العظمى لشواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية، على المحور x، عن المركز السطحي للجسم المغنطيسي.

كما يؤدي تغير زاوية ميل الجدار إلى تغير مكان مسقط الشدة العظمى لشواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية (الشكل 2-21)، وكذلك إلى تغير في شكل منحنى شواذ هذه المركبة، إذ يكون متناظراً حول محور العينات والقيمة العظمى فوق المركز السطحي للجدار (الشكل 2-21A)، ويتغير تدريجياً مع ميل الجدار (الشكل 2-21B, C, D) إلى أن يظهر قيمة صغرى سالبة بعيداً عن الجدار وقيمة عظمى موجبة فوق الجدار عندما يصبح الجدار أفقياً، أي يصبح صفيحة أفقية مضروبة بفالق شاقولي (الشكل 2-15).



الشكل (2-21): شدة المركبة المغناطيسية الشاقولية الناتجة عن جدار قاطع في أوضاع مختلفة:

- A- جدار قاطع شاقولي يتجه نحو الشمال .
 - B- جدار قاطع يميل (60°) شرقاً ويتجه نحو الشمال .
 - C- جدار قاطع يميل (45°) شرقاً ويتجه نحو الشمال .
 - D- جدار قاطع يميل (30°) شرقاً ويتجه نحو الشمال .
- (حسب دوبرين 1976, Dobrin)

2-4- التأثير المغناطيسي الناتج عن الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي:

لقد رأينا حتى الآن كيفية حساب المركبة المغناطيسية الشاقولية الناتجة عن أجسام مغناطيسية متنوعة لكنها بشكل عام منتظمة الشكل ومطمورة على عمق معين من سطح الأرض. أما حالياً فيتم قياس شدة المركبة الشاقولية للتنقيب عن معادن معينة لكن بشكل قليل جداً بالنسبة لقياس شدة الحقل الكلي، الذي يجري على القارة كما يجري وحده فقط في المسح الجوي والبحري، حيث أن مقاييس الحقل الكلي لا تحتاج للتوجيه الذي تتطلبه مقاييس المركبة الشاقولية أو الأفقية.

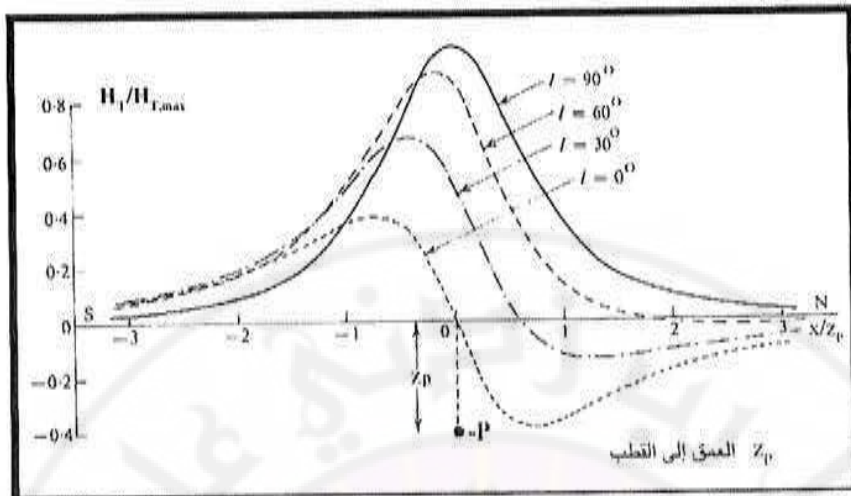
إن حساب شدة الحقل الكلي وتفسير معطياته الناتجة عن أجسام مطمورة أكثر تعقيداً من حساب شدة المركبة الشاقولية وتفسير معطياتها، وذلك لكون الحقل الكلي هو المحصلة الشعاعية للحقل المغنطيسي الأرضي والحقل المغنطيسي الناتج عن الأجسام المغنطيسية والمتحرض عن وجود الأجسام نفسها في الحقل المغنطيسي الأرضي.

2-4-1- التأثير المغنطيسي الكلي الناتج عن قطب مغنطيسي

معزول:

تتجه المغنطيسية المتحرضة في جسم مغنطيسي باتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي، فمن أجل جسم رفيع ميله كبير تكون المغنطيسية المتحرضة على طول المحور الطويل للجسم ما عدا في منطقة خط الاستواء المغنطيسي. إذا كان الجسم طويلاً جداً يشبه الحقل المتحرض حوله الحقل الناتج عن قطب معزول قوته $(-P)$ ، نظراً لأن الحقل المغنطيسي المتحرض (H_p) الناتج عن القطب أصغر بكثير من الحقل المغنطيسي الأرضي (T) ، وتكون مركبة الحقل (H_p) المعامدة للحقل (T) مهملة، وهكذا تكون شواذ الحقل المغنطيسي الكلي الناتجة عن قطب معزول هي مركبة الحقل (H_p) الموازية للحقل المغنطيسي الأرضي (T) .

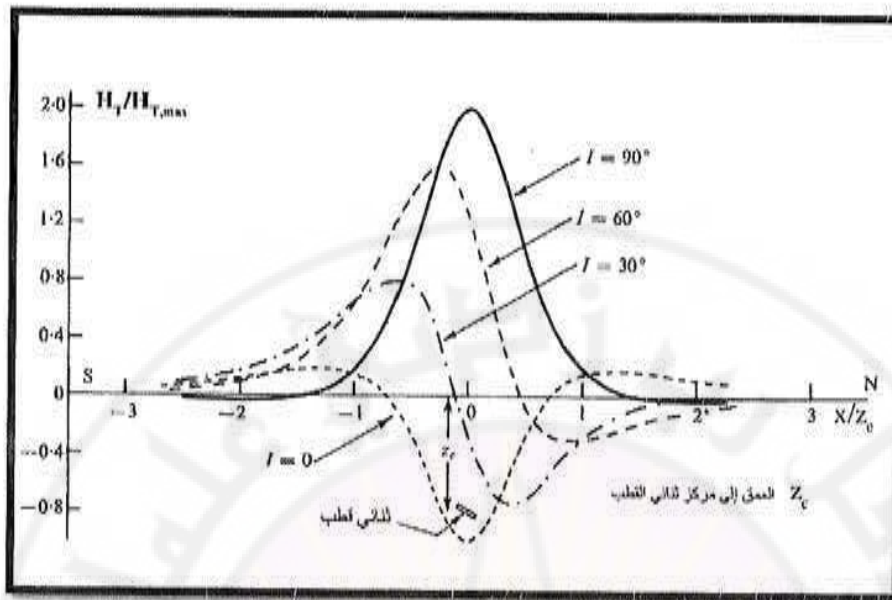
يعطي الشكل (2-22) مجموعة من منحنيات تغير شدة الحقل المغنطيسي الكلي لقيم مختلفة لـ I ، ويظهر بأنه كلما قل ميل الحقل المغنطيسي الأرضي (أي كلما اقتربنا من خط الاستواء المغنطيسي) يزداد لا تناظر المنحنى، كما تقل $(H_{T,max})$ وتزداد $(H_{T,min})$ ويلاحظ كذلك تحرك القيمتين $(H_{T,max})$ و $(H_{T,min})$ نحو الجنوب مع نقصان الميل.



الشكل (22-2): منحنيات تغير شدة الحقل المغنطيسي الكلي لقيم مختلفة لميل الحقل المغنطيسي الأرضي (I) فوق قطب معزول واقع على عمق (z_p) .
(حسب تلفورد وآخرين 1976 Telford et al., 1976)

2-4-2- التأثير المغنطيسي الكلي الناتج عن ثنائي قطب:

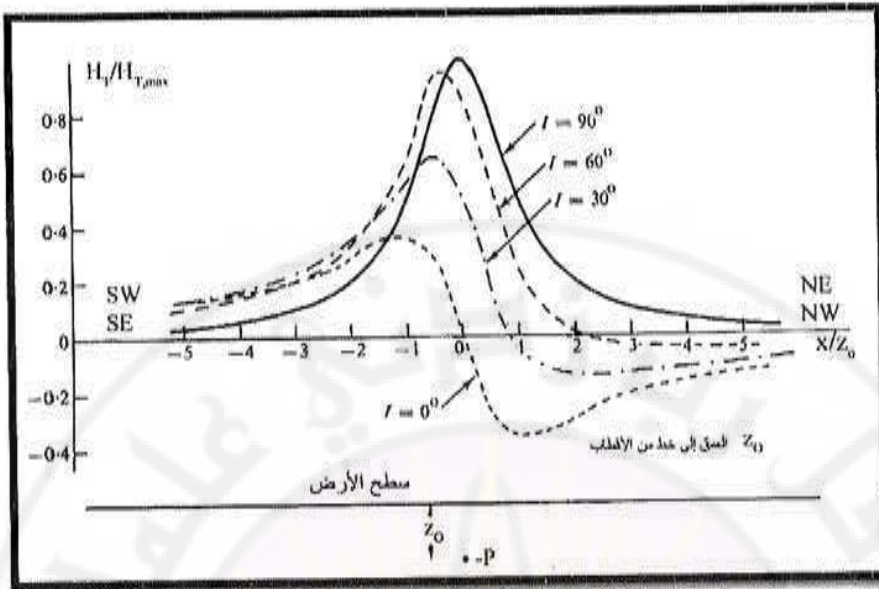
بؤخذ جسم مغنطيسي صغير بشكل قضيب طوله صغير بالنسبة لعمقه كي يمكن عده ثنائي قطب ممغنط باتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي المطبق وعمق مركزه (z_c) من سطح الأرض وبتغيير ميل الحقل المغنطيسي الأرضي يتم الحصول على المنحنيات الظاهرة في الشكل (23-2) ويظهر اللاتناظر واضحاً عندما يكون ميل الحقل كبيراً إلى أن يصبح متناظراً عندما $(I=0^\circ)$ كما يلاحظ أيضاً تحرك $H_{T,max}$ و $H_{T,min}$ نحو الجنوب مع نقصان الميل.



الشكل (2-23): منحنيات تغير شدة الحقل المغنطيسي الكلي لقيم مختلفة لميل الحقل المغنطيسي الأرضي (I) فوق ثنائي قطب يقع مركزه على عمق (z_c).
(حسب تelford et al., 1976 وآخرين)

2-4-3- التأثير المغنطيسي الكلي الناتج عن خط من الأقطاب:

يمكن عد خط من الأقطاب كشكل مبسط لأثر فائق أو جدار رقيق يمتد كثيراً نحو الأسفل وذو تباين عالٍ بالمناثورية المغنطيسية عن الوسط المحيط. ويعطي الشكل (2-24) مجموعة من منحنيات تغير شدة الحقل المغنطيسي الكلي فوق خط من الأقطاب تتجه NE-SW أو NW-SE، بحيث يكون المسار متعامداً مع الاتجاه وذلك لقيم متغيره للميل (I). ونعد قيم (x) موجبة في نفس المستوى الذي يقع إلى الشمال من التقاطع مع خط الأقطاب وسالبة في النصف الآخر من المستوى. كما يلاحظ التشابه بين هذه المنحنيات وتلك الناتجة عن قطب معزول.

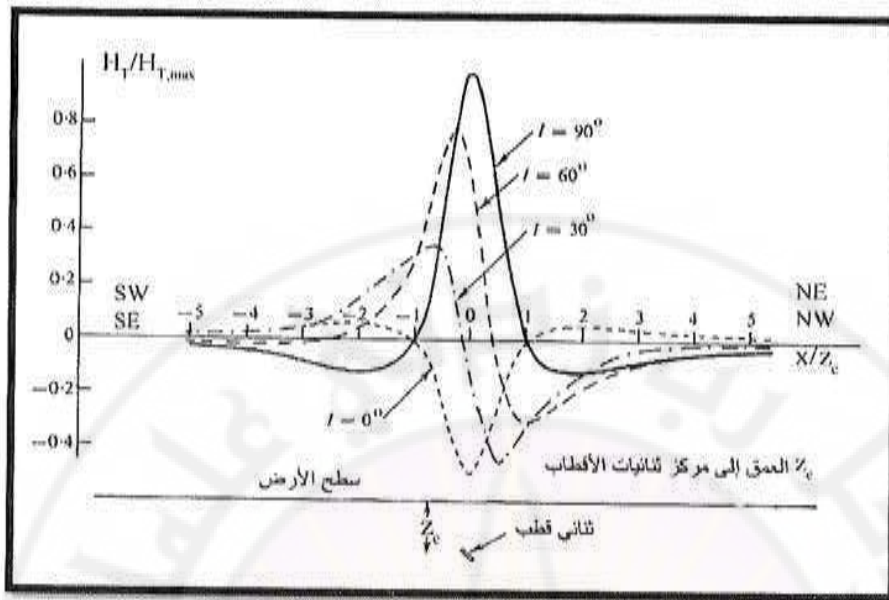


الشكل (2-24): منحنيات تغير شدة الحقل المغناطيسي الكلي لقيم مختلفة لميل الحقل المغناطيسي الأرضي (I) فوق خط من الأقطاب معامد للمسار ويقع على عمق (z_0).
(حسب تيلفورد وآخرين 1976 Telford et al., 1976)

2-4-4- التأثير المغناطيسي الكلي الناتج عن خط من ثنائيات

الأقطاب:

يمكن عد خط من ثنائيات الأقطاب كشكل مبسط لأثر فائق أو جدار قاطع رقيق قليل الامتداد نحو الأسفل، يمثل الخط العلوي والخط السفلي خطين من الأقطاب السالبة والموجبة على التوالي. بينما يعطي الشكل (2-25) مجموعة من منحنيات تغير شدة الحقل المغناطيسي الكلي فوق خط من ثنائيات الأقطاب التي تنتجها NE-SW أو NW-SE، حيث يكون المسار متعامداً مع الاتجاه دوماً، وذلك لقيم متغيرة لـ (I). تعد ثنائيات الأقطاب ممغنطة باتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي المطبق. يلاحظ هنا ظهور القيم الصغرى السالبة حتى عندما يكون الحقل المغناطيسي الأرضي شاقولياً ($I=90^\circ$)، بسبب تأثير الأقطاب الموجبة الدنيا التي تمثل خط الأقطاب السفلي.



الشكل (2-25): منحنيات تغير شدة الحقل المغناطيسي الكلي لقيم مختلفة لميل الحقل المغناطيسي الأرضي (I) فوق خط من ثنائيات الأقطاب معامد للمسار ويقع مركزه على عمق (z_c) .
(حسب تelford et al., 1976 وآخرين)

2-4-5- التأثير المغناطيسي الكلي الناتج عن أجسام ثنائية البعد:

تطبق حالة القطب المعزول أو ثنائي القطب بشكل رئيس في حالة الشواذ المغناطيسية الناتجة عن المسح الجوي لمناطق التمدينات، نظراً لإمكان إهمال سماكة أو عرض الأجسام المغناطيسية بالنسبة لارتفاع الطائرة. إذا زاد عدد خطوط الأقطاب أو ثنائيات الأقطاب المتقاربة يمكن عد الشواذ ناتجة عن موشور أو صفيحة. لهذا فقد استخدم الموشور كثيراً في تفسير الشواذ المغناطيسية الجوية.

تعتبر طريقة تالواني (Talwani and Heirtzler, 1964, Talwani, 1965) الطريقة الأكثر استخداماً في تفسير شواذ الحقول الكهربية، إذ تحسب الشواذ الناتجة عن موشور أو مقاطع عرضية لمجموعة من الموشير متعددة الأضلاع ولانهائية الامتداد باتجاه اتجاهها. فيتم تقريب المصادر المغناطيسية إلى أشكال موشورية، ثم تقارن منحنيات الشواذ المحسوبة مع

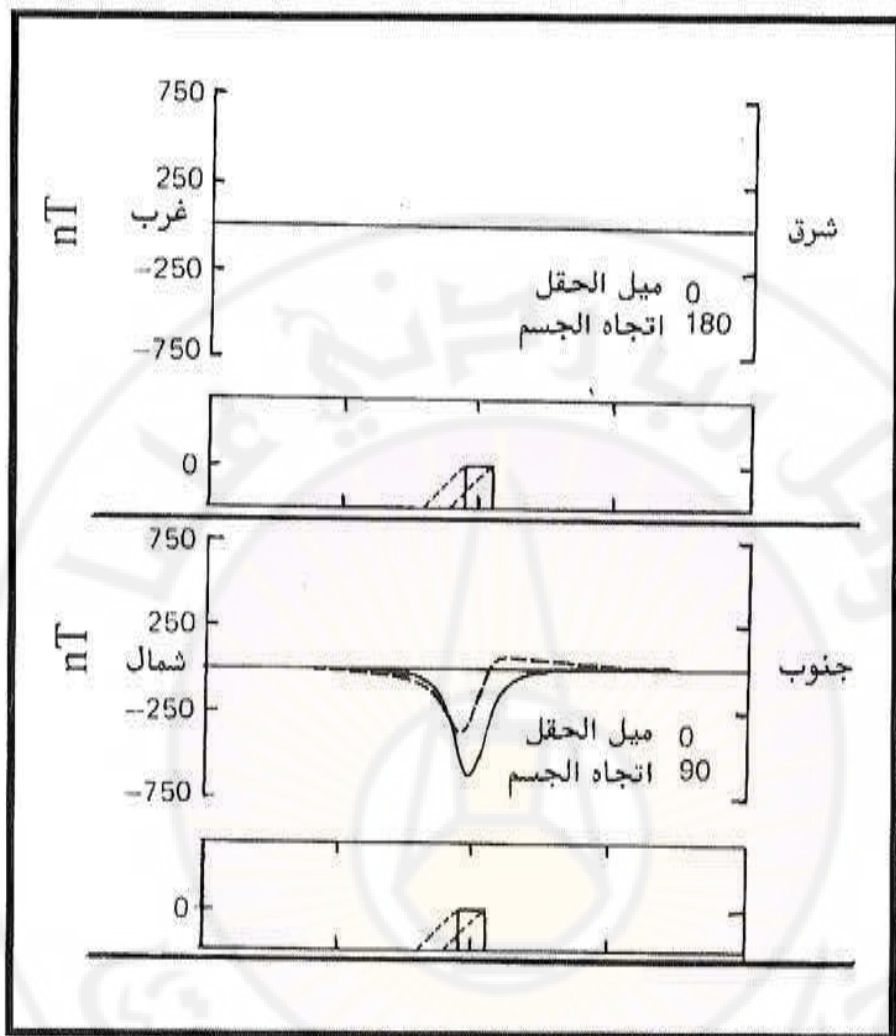
منحنيات الشواذ المقاسة، وفي حال عدم التطابق بينهما يتم تعديل الأشكال الموشورية بطريقة التجريب والخطأ (trial and error method) إلى أن يتم الوصول إلى أفضل تطابق بين المنحنيات المحسوبة والمقاسة.

2-4-5-1- التأثير المغنطيسي الكلي الناتج عن موشور في أوضاع

مختلفة:

يُقرب العديد من الأجسام المغنطيسية إلى موشور شاقولي أو مائل مثل الجدران القاطعة اندفاعية الأصل، لذا يكتسب الموشور أهمية خاصة في تفسير الشواذ المغنطيسية. وتقدم الأشكال التالية منحنيات شواذ الحقل المغنطيسي الكلي فوق جدار قاطع شاقولي (الخط المستمر)، وجدار قاطع يميل بزاوية مقدارها 45° (الخط المنقطع) موجودة في حقل مغنطيسي أرضي ميله 0° (خط الاستواء المغنطيسي) (الشكل 2-26)، وحقل مغنطيسي أرضي ميله 60° (الشكل 2-27) وحقل مغنطيسي أرضي ميله 90° (القطب المغنطيسي الشمالي) (الشكل 2-28).

يقصد بكلمة "اتجاه الجسم" في الأشكال التالية اتجاه البعد اللانهائي للجدار القاطع البارز دوماً من الصفحة. فمثلاً يشير الاتجاه 180 إلى أن الناظر ينظر باتجاه الشمال ويمتد المنحني المغنطيسي من الغرب إلى الشرق أو من اليسار إلى اليمين.

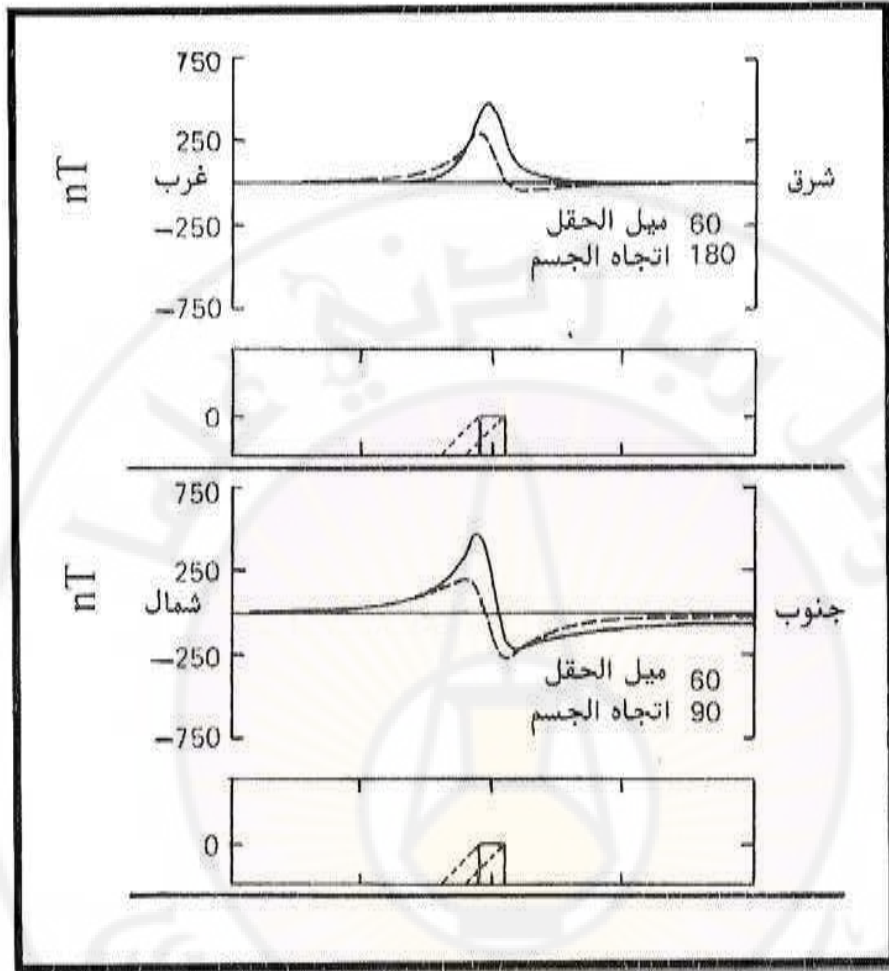


الشكل (2-26): منحنيات تغير شواذ الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي فوق جدار قاطع شاقولي (الخط المستمر) وجدار قاطع مائل (الخط المتقطع) واقعان في حقل مغناطيسي أرضي أفقي (خط الاستواء المغناطيسي) في الوضعين:

الشكل العلوي: يتجه الجداران جنوباً-شمالاً ويميل الجدار المائل نحو الغرب بينما يتم القياس باتجاه غرب-شرق.

الشكل السفلي: يتجه الجداران شرقاً-غرباً ويميل الجدار المائل نحو الشمال ويتم القياس باتجاه شمال-جنوب.

(حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit)

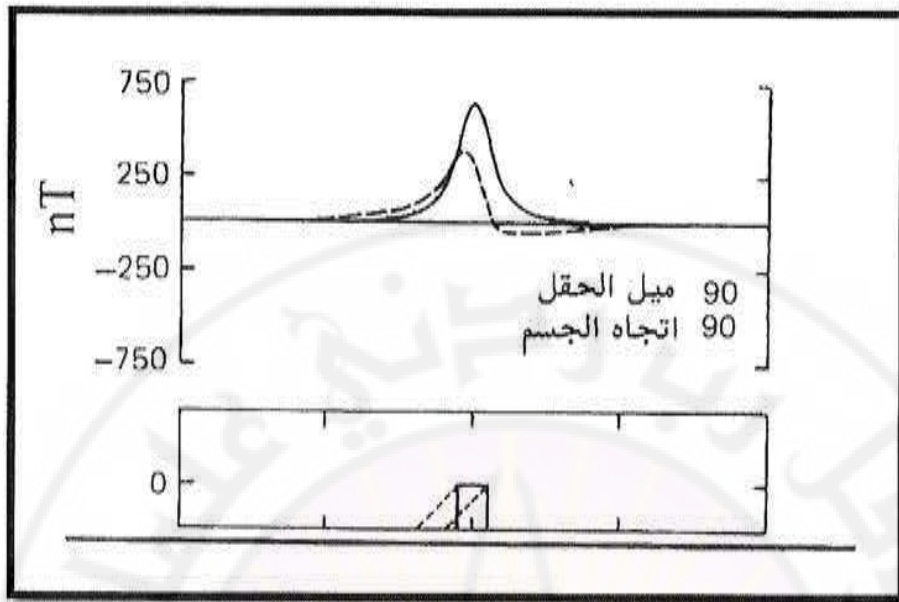


الشكل (27-2): منحنيات تغير شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق جدار قاطع شاقولي (الخط المستمر) وجدار قاطع مائل (الخط المتقطع) واقعان في حقل مغنطيسي أرضي بميل بزاوية مقدارها 60° في الوضعين:

الشكل العلوي: يتجه الجداران جنوباً-شمالاً ويميل الجدار المائل نحو الغرب بينما يتم القياس باتجاه غرب-شرق.

الشكل السفلي: يتجه الجداران شرقاً-غرباً ويميل الجدار المائل نحو الشمال ويتم القياس باتجاه شمال-جنوب.

(حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit, 1988)



الشكل (28-2): منحنيات تغير شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق جدار قاطع شاقولي (الخط المستمر) وجدار قاطع يميل نحو الجنوب (الخط المتقطع) يتجهان غرباً-شرقاً، واقعان في حقل مغنطيسي أرضي شاقولي (القطب المغنطيسي الشمالي)، بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب.

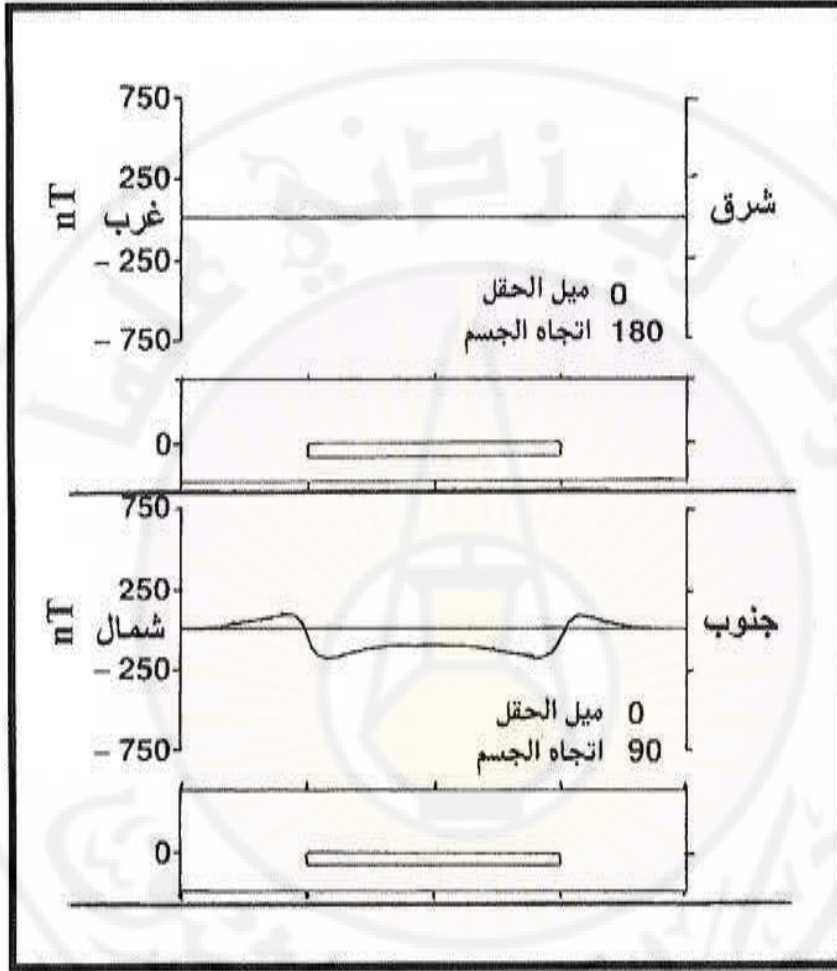
(حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit)

2-5-4-2- التأثير المغنطيسي الكلي الناتج عن صفيحة أفقية في أوضاع

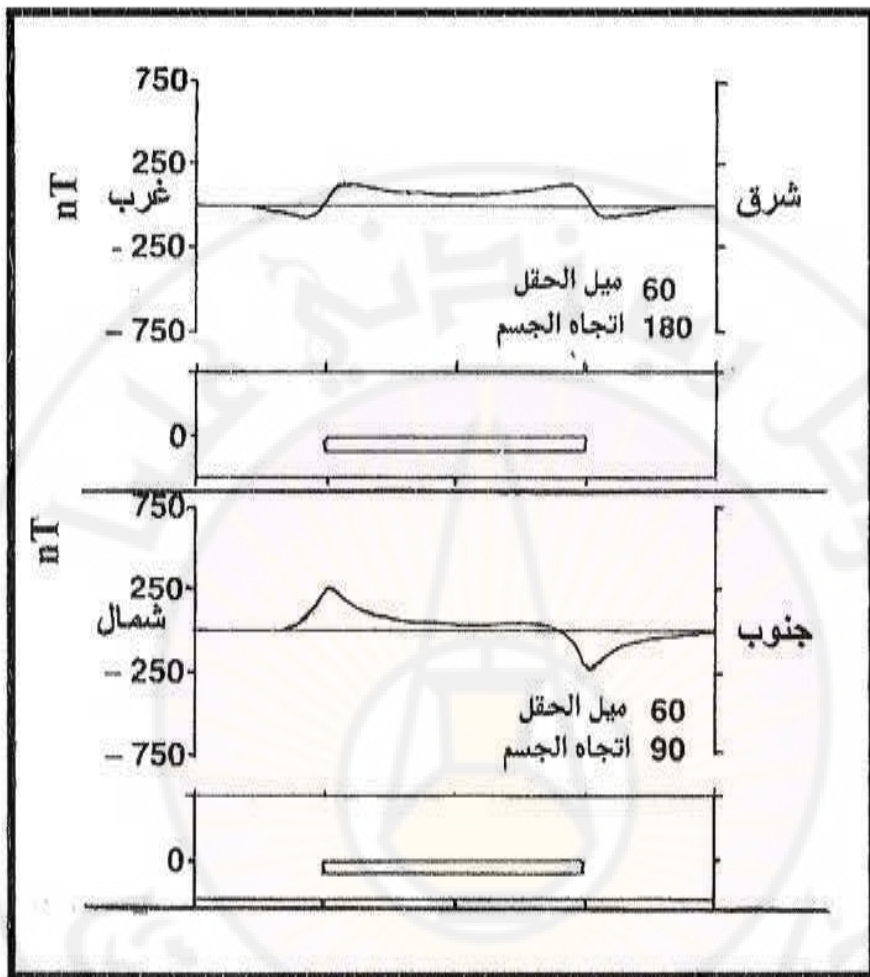
مختلفة:

يُقرب أيضاً العديد من الأجسام المغنطيسية إلى صفيحة أفقية مثل دسيصة بيئية (sill) اندفاعية الأصل أو طبقة رسوبية محدودة الامتداد جانبياً وعالية المتأثرية المغنطيسية بالنسبة للوسط المحيط، لذا تكتسب الصفيحة الأفقية أهمية خاصة في تفسير الشواذ المغنطيسية. تقدم الأشكال التالية منحنيات شواذ الحقل المغنطيسي الكلي فوق صفيحة أفقية موجودة في حقل مغنطيسي أرضي ميله 0° (خط الاستواء المغنطيسي) (الشكل 2-29) وحقل مغنطيسي أرضي ميله 60° (الشكل 2-30) وحقل مغنطيسي أرضي ميله 90° (القطب المغنطيسي الشمالي) (الشكل 2-31).

يقصد بكلمة "اتجاه الجسم" في الأشكال التالية اتجاه البعد اللانهائي للصفحة والبارز دوماً من الصفحة، فمثلاً يشير الاتجاه 180° إلى أن الناظر ينظر باتجاه الشمال ويمتد المنحني المغنطيسي من الغرب إلى الشرق أو من اليسار إلى اليمين.



الشكل (2-29): منحنيات تغير شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق صفحة أفقية واقعة في حقل مغنطيسي أرضي أفقي (خط الاستواء المغنطيسي) في الوضعين:
 الشكل العلوي: تتجه الصفحة جنوباً-شمالاً بينما يتم القياس باتجاه غرب-شرق.
 الشكل السفلي: تتجه الصفحة شرقاً-غرباً بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب.
 (حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit)



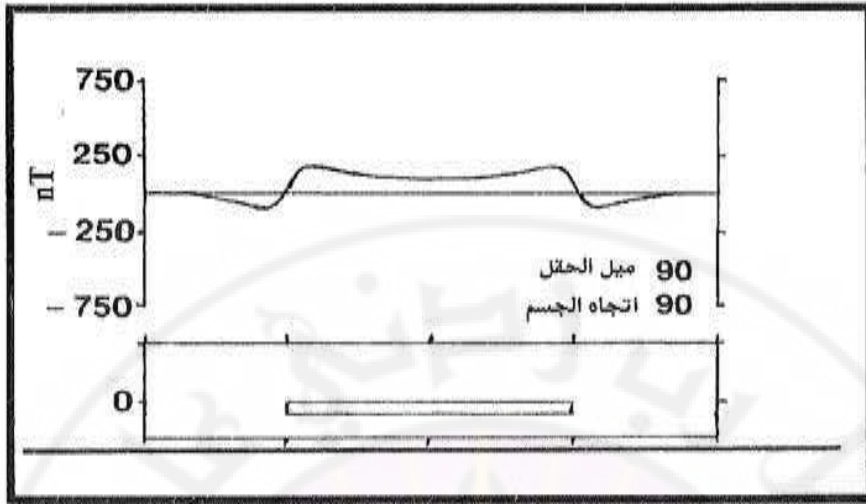
الشكل (2-30): منحنيات تغير شواذ الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي فوق صفيحة أفقية واقعة في حقل

مغناطيسي أرضي يميل بزاوية مقدارها 60° في الوضعين:

الشكل العلوي: تتجه الصفيحة جنوباً-شمالاً بينما يتم القياس باتجاه غرب-شرق.

الشكل السفلي: تتجه الصفيحة شرقاً-غرباً بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب.

(حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit, 1988)



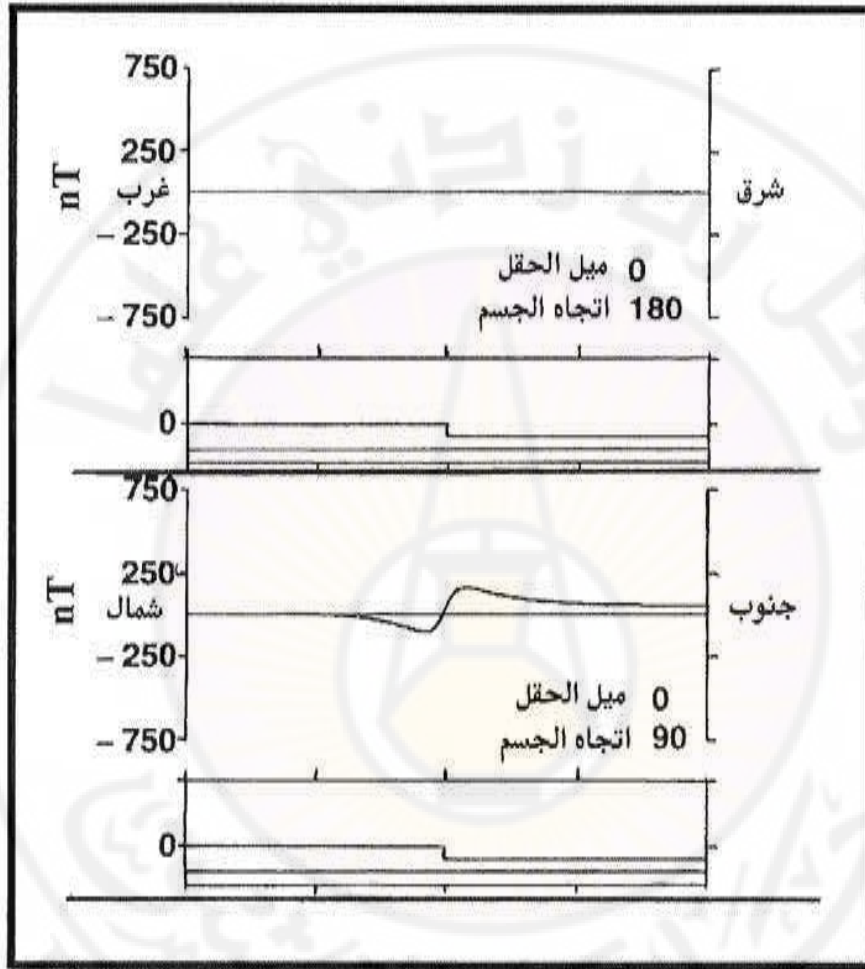
الشكل (2-31): منحنيات تغير شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق صفيحة أفقية تتجه غرباً-شرقاً، واقعة في حقل مغنطيسي أرضي شاقولي (القطب المغنطيسي الشمالي)، بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب.

(حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit)

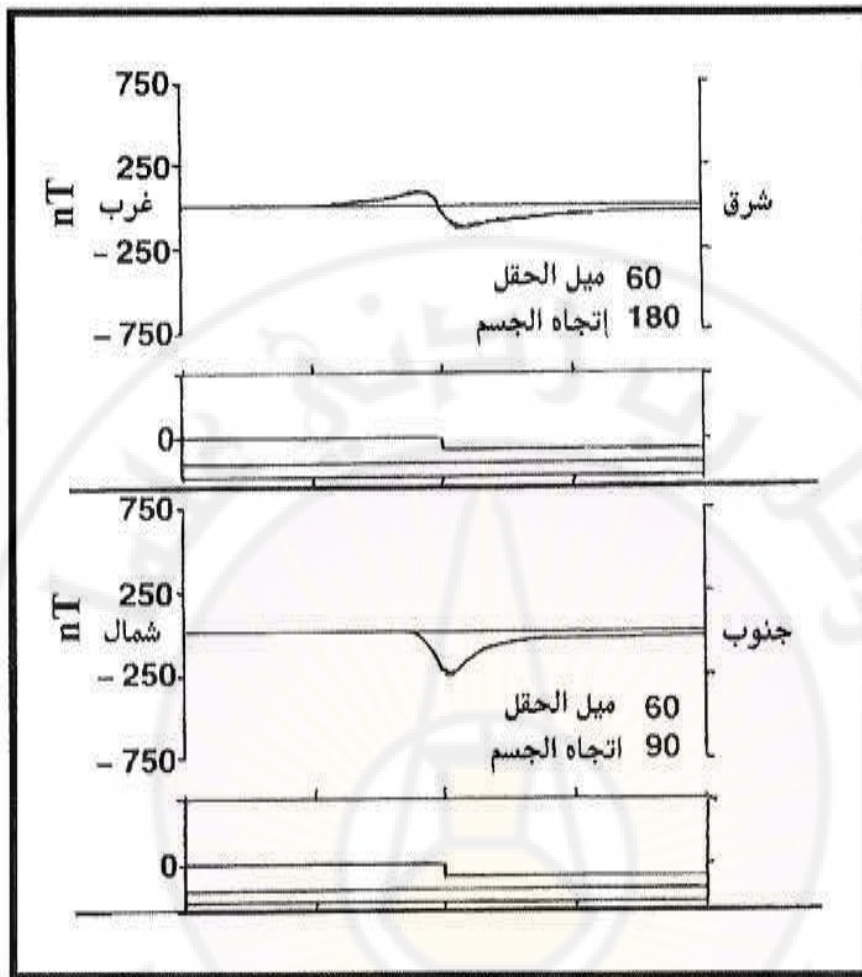
2-4-5-3- التأثير المغنطيسي الكلي الناتج عن فالق في الركيزة البلورية:

تؤدي الضغوط القارية إلى الالتواء والتصدع في الركيزة البلورية بحيث تتشكل الفوالق بكل الاتجاهات، لكن أهم الفوالق التي تنتج شواذاً مغنطيسية هي تلك التي تؤدي إلى رميات شاقولية مثل الفالق الانزلاقي الميلي (dip-slip fault) أو القريبة من الشاقولية، بحيث تؤدي إلى صعود جزء من الركيزة عالية المتأثرية المغنطيسية ضمن الطبقات الرسوبية المغطية منخفضة المتأثرية المغنطيسية. تكتسب هذه الفوالق أهمية خاصة لكونها قادرة على تشكيل البنيات الرسوبية الملائمة لتشكل المصائد الهيدروكربونية. تقدم الأشكال التالية منحنيات شواذ الحقل المغنطيسي الكلي فوق منطقة ضربها فالق شاقولي، موجودة في حقل مغنطيسي أرضي ميله 0° (خط الاستواء المغنطيسي) (الشكل 2-32) وحقل مغنطيسي أرضي ميله 60° (الشكل 2-33) وحقل مغنطيسي أرضي ميله 90° (القطب المغنطيسي الشمالي) (الشكل 2-34).

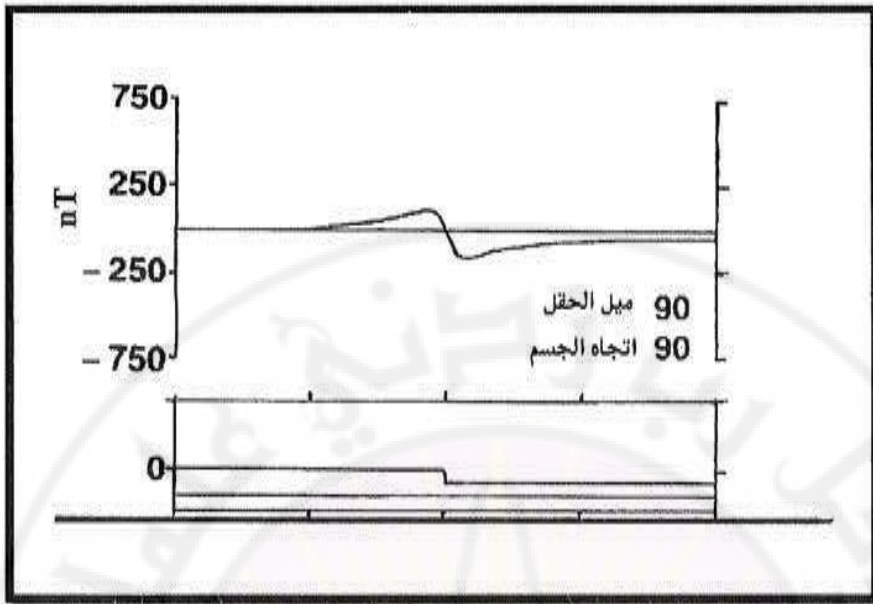
يقصد بكلمة "اتجاه الجسم" في الأشكال التالية اتجاه الفالق والبارز دوماً من الصفحة. فمثلاً يشير الاتجاه 180° إلى أن الناظر ينظر باتجاه الشمال ويمتد المنحني المغنطيسي من الغرب إلى الشرق أو من اليسار إلى اليمين.



الشكل (2-32): منحنيات تغير شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق فالق شاقولي في الركيزة البلورية وواقع في حقل مغنطيسي أرضي أفقي (خط الاستواء المغنطيسي) في الوضعين:
 الشكل العلوي: يتجه الفالق جنوباً-شمالاً بينما يتم القياس باتجاه غرب-شرق.
 الشكل السفلي: يتجه الفالق شرقاً-غرباً بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب.
 (حسب دوهرين وسافيت، 1988, Dobrin & Savit)



الشكل (2-33): منحنيات تغير شواذ الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي فوق هالق شاقولي في الركيزة البلورية وواقع في حقل مغناطيسي أرضي يميل بزاوية مقدارها 60° في الوضعين:
 الشكل العلوي: يتجه الهالق جنوباً-شمالاً بينما يتم القياس باتجاه غرب-شرق.
 الشكل السفلي: يتجه الهالق شرقاً-غرباً بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب،
 (حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit, 1988)



الشكل (2-34): منحنيات تغير شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق فالحق شاقولي في الركيزة البلورية
 يتجه غرباً-شرقاً، واقعاً في حقل مغنطيسي أرضي شاقولي (القطب المغنطيسي الشمالي)،
 بينما يتم القياس باتجاه شمال-جنوب.

(حسب دوبرين وسافيت، 1988، Dobrin & Savit)

الفصل الثالث

مقاييس المغنطيسية

Magnetometers

3-1- مقدمة:

تتألف شدة المغنطيسية المقاسة بالحقل (I_t) فوق جسم مغنطيسي من ثلاث مركبات؛ شدة الحقل المغنطيسي الأرضي المسيطر (T) والمغنطيسية المتحرضة في الجسم (I_i)، الذي متأثرته المغنطيسية (k)، والمغنطيسية المتبقية في الصخر (I_r)، أي أن:

$$I_t = T + I_i + I_r \quad (3-1)$$

من الواضح بأن شدة هذه المغنطيسية هي شدة المحصلة الشعاعية لهذه المركبات المختلفة، كما أن اتجاهها هو اتجاه شعاع المحصلة. لذا يقتضي العمل على تحديد كل من هذه المركبات للتمكن من الحصول على المركبة المطلوب تحديدها بدقة والناجمة عن الجسم المغنطيسي وهي (I_i).

لو نظرنا إلى هذه المركبات لتحديدها لوجدنا ما يلي:

I_t هي الشدة المقاسة بواسطة المقياس الحقلي.

T هي شدة الحقل المغنطيسي الأرضي المسيطر في المنطقة والتي يمكن الحصول عليها من أي مرصد مغنطيسي قريب، أو من الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع (International Geomagnetic Reference Field (IGRF)).

I_i هي شدة المغنطيسية المتحرضة في الصخر المغنطيسي نتيجة لتأثير الحقل المغنطيسي المسيطر T ، وفق المعادلة التالية:

$$I_i = k \cdot T \quad (3-2)$$

بما أنه يمكن معرفة قيمة T بدقة إذن يتطلب إنجاز الحساب تحديد قيمة k التي تعبر عن نوع الفلز الموجود في الصخر وكميته. فإذا أمكن الحصول على عينة من الصخر المسبب للشواذ المغنطيسي، يمكن تحديد هذه الشدة بقياس متأثرية هذه العينة. يتطلب قياس متأثرية العينة وجود مقياس المتأثرية المغنطيسية (magnetic susceptibility meter) وهو ما سنلصفه في الفقرة (2-3).

تتطلب معرفة شدة المغنطيسية المتبقية I_r الحصول على عينة موجهة من الصخر (الشكل 3-1)، وهذا ممكن إذا كان الصخر مكتشفاً على السطح، أما إذا كان الصخر غير مكتشف فلا يمكن قياس هذه المركبة، وبالتالي إهمالها واعتبار أن المغنطيسية المقاسة هي بمجملها متحيزة. يؤدي إهمال هذه المركبة إلى خطأ في تحديد نوع الجسم المغنطيسي، لكن بما أنه يستحيل تحديدها عندما يكون الصخر غير مكتشف على السطح فيجب القبول بالنتيجة. يتطلب قياس المغنطيسية المتبقية توفر الأجهزة المستخدمة في المغنطيسية القديمة وهو ما سنصفه في الفقرة (3-2-2).



الشكل (3-1): طاولة توجيه العينات الصخرية؛

أ- طاولة توجيه عينة صخرية كبيرة.

ب- طاولة توجيه عينة لبابية صخرية.

(حسب تارلنغ 1983 Tarling)

3-2- المقاييس المستخدمة في المسح المغنطيسي:

3-2-1- مقاييس المتأثرية المغنطيسية:

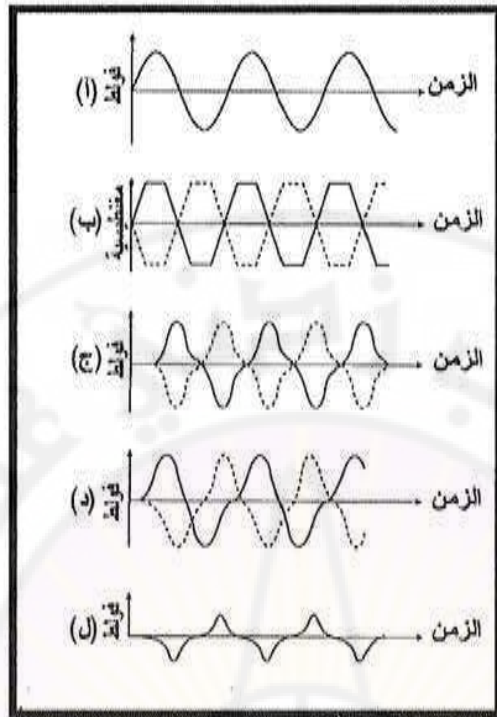
يوجد عدد من مقاييس المتأثرية، وسنصف فيما يلي أحدها (Collinson and Molyneux, 1967). يتألف المقياس من حلقتين غير كاملتين من الفيريت (Ferrite) (الشكل 3-2)، ويلتف حول كل منهما وشيعة أولية تولد حقلاً مغنطيسياً عبر الفجوة الموجودة في الحلقة، وتحيط بالفجوة وشيعة ثانوية وصل في دارتها مقياس الفولط (Voltmeter). توضع عينة عيارية معلومة المتأثرية في إحدى الفجوتين، للمقارنة حين إدخال عينة مجهولة المتأثرية في الفجوة الثانية. يتم قياس المتأثرية المغنطيسية لعينة صخرية بإمرار تيار كهربائي معلوم الشدة في الوشائع الأولية، لا يمر أي تيار في دائرة الوشيعة الثانوية بغياب العينة الصخرية، بينما يمر تيار كهربائي شدته متناسبة طردياً مع متأثرية العينة المعيارية، مما يؤدي إلى انحراف مؤشر مقياس الفولت باتجاه ما، ولكن عند وضع عينة صخرية تحتوي على مواد مغنطيسية يمر تيار كهربائي في دائرة الوشيعة الثانوية، تتناسب شدته مع كمية المواد المغنطيسية ونوعيتها في العينة ومع شدة التيار المار في الوشيعة الأولية، فينحرف مؤشر مقياس الفولط باتجاه معاكس لاتجاه الانحراف الأول الناتج عن وجود العينة المعيارية، نظراً لتعاكس تباري الوشيعتين الثانويتين وبناء على الانحراف النهائي للمؤشر، يتم حساب متأثرية العينة الصخرية بالمقارنة مع متأثرية العينة المعيارية.

يوجد كذلك نوع آخر من المقاييس التي تعابير في المصنع بواسطة عينة معيارية، ويتم رسم منحنى معايرة نموذجي بين القيمة المقروءة والمتأثرية، بحيث يتم إسقاط القيمة المقروءة للعينة الصخرية على المنحنى النموذجي لتحديد متأثريتها.

هذا المقياس هو الأكثر استخداماً في المسح المغنطيسي القاري والجوي والبحري وفي قياس الحقل المغنطيسي الأرضي في المراصد المغنطيسية الموزعة في كل العالم. يقوم مبدأ هذا المقياس على خاصية التجاوب (المبادرة) النووي المغنطيسي Nuclear magnetic resonance التي تم اكتشافها عام 1938 من قبل بلوخ (Bloch)، وقد طوّر ووضع في الخدمة عام 1954 (Packard & Varian, 1954)، ونشر أول تقرير عن استخداماته في عام 1956 (Water and Phillips, 1956).

يملك ثلثا نوى الذرات عزماً مغنطيسياً، ويمكن النظر إلى هذه النوى كمغانط صغيرة بشكل كرات صغيرة تدور حول محاورها المغنطيسية. بناء على الميكانيك الكوانتي فإن هذه المغانط الصغيرة عشوائية التوجه ستحاول التراصف بشكل مواز أو معاكس لأي حقل مغنطيسي خارجي يطبق عليها، فأي مجموعة من النوى عشوائية التوجه ستنفصل إلى مجموعتين، إحداها متراصفة باتجاه الحقل الخارجي والأخرى باتجاه معاكس له. تكون طاقة المجموعة الأخيرة عادة أعلى من طاقة المجموعة الأولى، لهذا فإن عدداً أكبر من النوى ستتوجه باتجاه معاكس للحقل الخارجي، وبالتالي تشكل قوة مغنطيسية في هذا الاتجاه. وإن أبسط النوى التي تمتاز بهذه الخاصية هي البروتون أو نواة الهيدروجين، وبما أن الأوكسجين لا يحتوي على عزم مغنطيسي فيمكن عد الماء كتجمع للبروتونات، اعتماداً على خاصية التجاوب النووي. يمكن كذلك استخدام بعض المواد العضوية الغنية بالهيدروجين مثل الميثانول أو الكحول الإيثيلي أو البنزين . . . الخ.

يتم العمل بهذا المقياس بوضع زجاجة من الماء في الحقل المغنطيسي الأرضي، ويمرر نيار كهربائي في وشيعة مقببة أولية (polarizing coil) ملفوفة حول الزجاجة، بحيث يتولد حقل مغنطيسي مُقَبَّب متعامد تقريباً مع اتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي، شدته أعلى بكثير من شدة الحقل المغنطيسي الأرضي (50 أوستد مثلاً) فتتوجه العزوم المغنطيسية للبروتونات باتجاه محصلة الحقلين، ونظراً لكون الحقل المغنطيسي الخارجي أكبر بحدود مائة مرة من شدة الحقل الأرضي، يمكن قبول أن العزوم المغنطيسية للبروتونات موجهة باتجاه الحقل الخارجي، ويتطلب توجه هذه العزوم كلها فترة زمنية معينة قد تصل إلى ثلاث ثوان. لو أزيل الحقل الخارجي فجأة فإن هذه العزوم تدور للعودة إلى وضعها الأصلي باتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي، كما يدور البلبل (الخرزوف) (top)، إذ يقدم الحقل المغنطيسي



الشكل (3-8): مبدأ عمل مقياس التدفق المغناطيسي.

(معدل من كيري وآخرين، 2002، Kearey et al.)

صممت مقاييس التدفق المغناطيسي المستخدمة في المسح القاري على سهولة الحمل والسرعة في أخذ القياسات، وتحمل باليد مع وجود حزام لتعليقها بالرقبة بدلاً من استخدام حامل ثلاثي الأرجل. صمم نوع منها لقياس المركبة الشاقولية للحقل المغناطيسي الأرضي، ويمكن استخدامها لقياس أي من المركبات الأخرى (X و Y) بتوجيه المجموعة المغناطيسية في الاتجاه المطلوب. تتراوح دقة المقاييس الأرضية بين (0.5) إلى (12.5) نانوتسلا بوسطي مقداره (5) نانوتسلا.

هناك نوعان من مقاييس التدفق المغناطيسي المستخدمة في القياسات الجوية، ويعتمد كل منهما على آلية مختلفة في قياس الحقل المغناطيسي الكلي وتصل حساسية هذه المقاييس حتى واحد نانوتسلا.

3-2-3-5- مقاييس الترنح النووي المغناطيسي

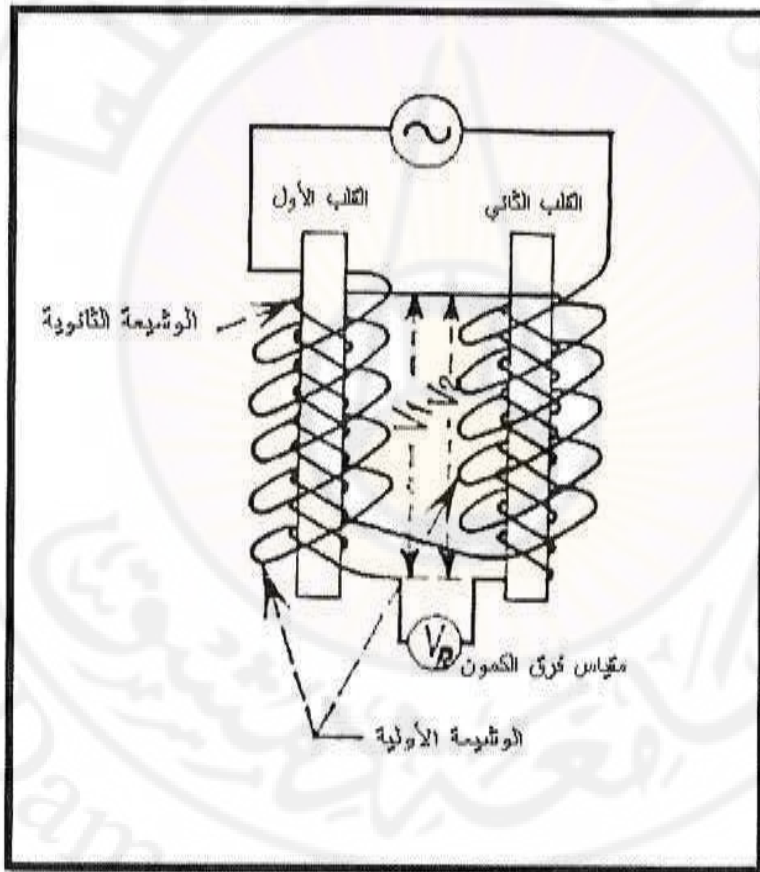
Nuclear precession (proton) magnetometer:

يؤدي إمرار تيار كهربائي جيبي ودوري (50-1000 هرتز) له منحني متغير مع الزمن في الوشائع الأولية (الشكل 3-8-أ) وبغياب الحقل المغنطيسي الأرضي إلى توليد حقل مغنطيسي دوري ووصول القلب حديدي المغنطة لكل وشيعة إلى الإشباع في أعلى وأسفل الموجه الكهربائية (الشكل 3-8-ب). يكون الحقل المغنطيسي الدوري المتولد في كل وشيعة ثانوية أعظمياً، عندما يكون تغير الحقل أسرع ما يمكن (الشكل 3-8-ج). ونظراً لارتباط الوشيعتين الثانويتين على التسلسل واتجاه التيارين فيهما متعاكسين فإن فرقي الكمون الناتجين في الوشيعتين متساويان ومتعاكسان لذا تكون محصلتهما مساوية للصفر.

لو طبق حقل مغنطيسي خارجي، مثل الحقل المغنطيسي الأرضي الذي له مركبة موازية لمحاور الوشيعتين، فيصل القلب في الوشيعة الأولى التي يكون الحقل الأولي فيها مسابراً للحقل المغنطيسي الأرضي إلى حالة الإشباع في وقت مبكر عما هو عليه في حال غياب هذا الحقل الخارجي، ويصل القلب في الوشيعة الثانية التي يكون الحقل الأولي فيها معاكساً للحقل المغنطيسي الأرضي إلى حالة الإشباع في وقت متأخر عما هو عليه في حال غياب الحقل الخارجي (الشكل 3-8-د)، ونظراً لارتباط الوشيعتين الثانويتين على التسلسل واتجاه التيارين فيهما متعاكسين فإن فرق الكمون الناتج يتألف من زوج من النبضات الكهربائية ويكون ارتفاع هذه النبضات متناسباً ، ضمن حدود معينة مع الحقل المغنطيسي الأرضي المطبق (الشكل 3-8-ل).

ناتج عن تيار متناوب عالي الشدة في وشيعة ملفوفة حول المادة حديدية المغنطة، يؤدي هذا إلى إشباع هذه المادة الممثلة للقلب المغنطيسي، ويمكن من مراقبة حالة الإشباع الوصول إلى قياس شدة الحقل المغنطيسي المبسط.

هكذا فإن الحقل المغنطيسي الأرضي يعزز الحقل المغنطيسي لإحدى الوشائع، بينما يعاكس الحقل المغنطيسي للأخرى. ويرافق كل من الوشائع الأولية وشيعة ثانوية تلتف حول القلب نفسه وترتبط الوشائع الثانوية مع بعضها على التسلسل أيضاً ويوضع في طرفيها مقياس فولت (V_R)، كما في الشكل (3-7)، ويقرأ الفرق الناتج عن تعزيز الحقل الأرضي لحقل إحدى الوشائع ومعاكسته لحقل الأخرى.



الشكل (3-7): رسم مبسط لدائرة مقياس التدفق المغنطيسي.
(معدل من دوبرين 1976 (Dobrin, 1976))

تعكس المرآة الموجودة على أعلى المجموعة المغناطيسية الشعاع الضوئي الوارد من الخارج عبر المجموعة الضوئية (الشكل 3-6-ب) بحيث يتم تضخيم زاوية دوران المجموعة المغناطيسية. يمكن حساب الانحراف النهائي بقراءة التدريج (الشكل 3-6-ج)، ثم تحول قيمة التدريجات إلى شدة المركبة الشاقولية بعد معرفة حساسية المقياس التي قد تبلغ 10 nT/division. وتحدث معادلة ذاتية للتغيرات الناتجة عن تغير درجة الحرارة التي تتعرض لها المجموعة المغناطيسية في أثناء القياس، وذلك بتمدد الذراع الحامل لوزن معادلة الحرارة أو بتقلصه.

3-2-3-3-3 مقياس شملت للمركبة الأفقية

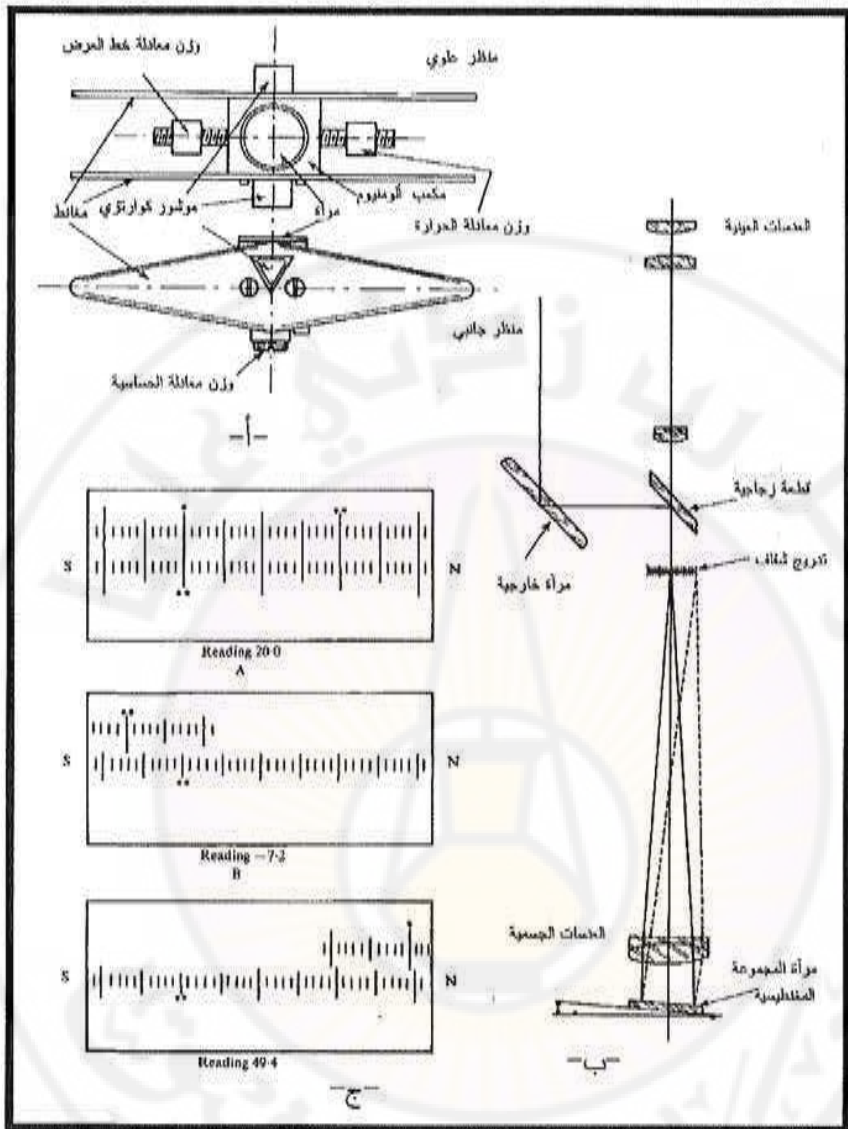
:Schmidt Horizontal Balance

صمم هذا المقياس بحيث يكون محور دوران المجموعة المغناطيسية شاقولياً ومعامداً لخط الطول المغناطيسي، فتدور المجموعة المغناطيسية تحت تأثير المركبة الأفقية (H) للحقل المغناطيسي الأرضي. أي أنه مشابه لبوصلة عادية، لكن القياس به يتطلب معرفة شدة المركبة الشاقولية (Z) للحقل المغناطيسي الأرضي، لأنها تدخل في معادلة حساسية المقياس، وهذا يتطلب استخدام مقياس المركبة الشاقولية بالتوازي مع مقياس المركبة الأفقية مع كل قياس.

3-2-3-4 مقياس التدفق المغناطيسي Fluxgate magnetometer

طور منذ الأربعينيات من القرن الماضي جيل جديد من الأجهزة المغناطيسية سريعة القراءة، وتتطلب توجيهه تقريبي نحو الشمال، بحيث يمكن القياس على القارة وفوق البحر ومن الجو. كان أول هذه الأجهزة مقياس التدفق المغناطيسي، وكان أول التطبيقات له في الحرب العالمية الثانية لكشف الغواصات من الجو.

يعتمد هذا المقياس على وجود مادة حديدية المغنطة (Mu-metal, Permalloy or ferrite) لها نفوذية عالية، فيؤدي وجود حقل مغناطيسي خارجي، (الحقل المغناطيسي الأرضي مثلاً)، إلى تحريض مغناطيسية عالية تمثل جزءاً كبيراً من حالة الإشباع المغناطيسي للمادة حديدية المغنطة، تتألف المجموعة المغناطيسية (الشكل 3-7) من قضيبين من مادة حديدية المغنطة موجهين باتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي، ويتم مغنطة القضيبين بوساطة وشيعتين أوليتين مرتبطتين على التسلسل، ولكل منهما التدفق المغناطيسي نفسه إنما باتجاهين متعاكسين، لأنهما ملتفتان باتجاهين متعاكسين. فعندما يطبق الحقل المغناطيسي الأرضي على حقل دوري



الشكل (3-6): مقياس شميت: أ- المجموعة المغنطيسية،

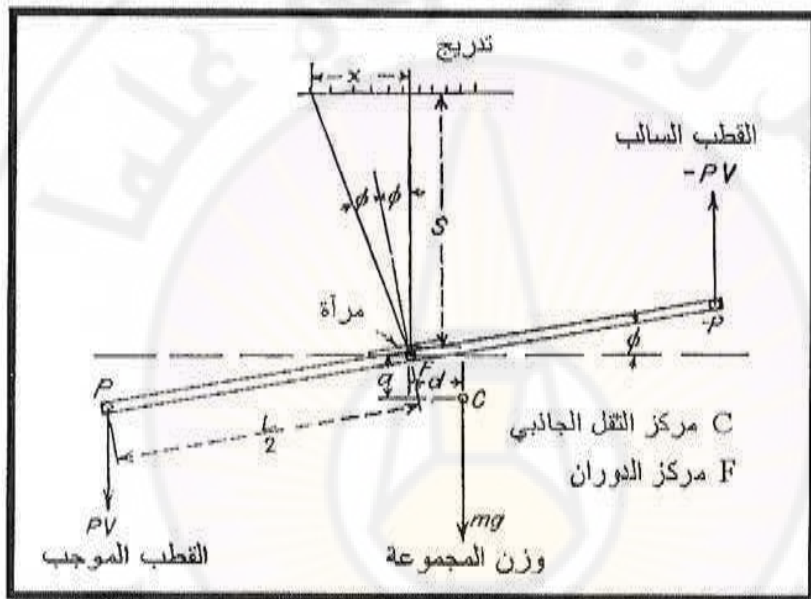
ب- المجموعة الضوئية،

ج- أمثلة على قياس التدرج

(حسب تelford وآخرين 1976 Telford et al., 1976)

لإجراء القياس يضبط المقياس بتحريك وزن معادلة خط العرض المغنطيسي الشكل (3-6-1) بحيث تصبح المجموعة المغنطيسية أفقية، ثم تدار لتكون متعامدة مع خط الطول المغنطيسي لإلغاء تأثير المركبة الأفقية. إذا تغير الحقل المغنطيسي المسيطر لسبب ما مثل الانتقال من مكان ما، (مثل المحطة المرجع)، إلى مكان آخر تتغير زاوية التوازن وتتحرف المجموعة بدورائها حول مركز الدوران، ويعطي مقدار الانحراف على التدريج الفرق في شدة المركبة الشاقولية، ويقابل التدريج الواحد شدة معينة قد تصل إلى (10) نانوتسلا، وتختلف باختلاف حساسية المقياس التي يمكن تغييرها بتحريك وزن معادلة الحساسية (الشكل 3-6-1).

استخدم هذا المقياس لسنوات طويلة لقياس المركبة الشاقولية، وقد صنع على نطاق واسع في أوروبا وأمريكا. ويتألف من مغنطيس قابل للدوران حول مسند بالقرب من مركز ثقله، وليس به تماماً (الشكل 5-3). يصنع المسند عادةً من الكوارتز ويكون حاداً مصقولاً بشكل جيد ويبعد عن مركز الثقل (C) بمسافة أفقية مقدارها (d) وبمسافة شاقولية مقدارها (a) (الشكل 5-3).

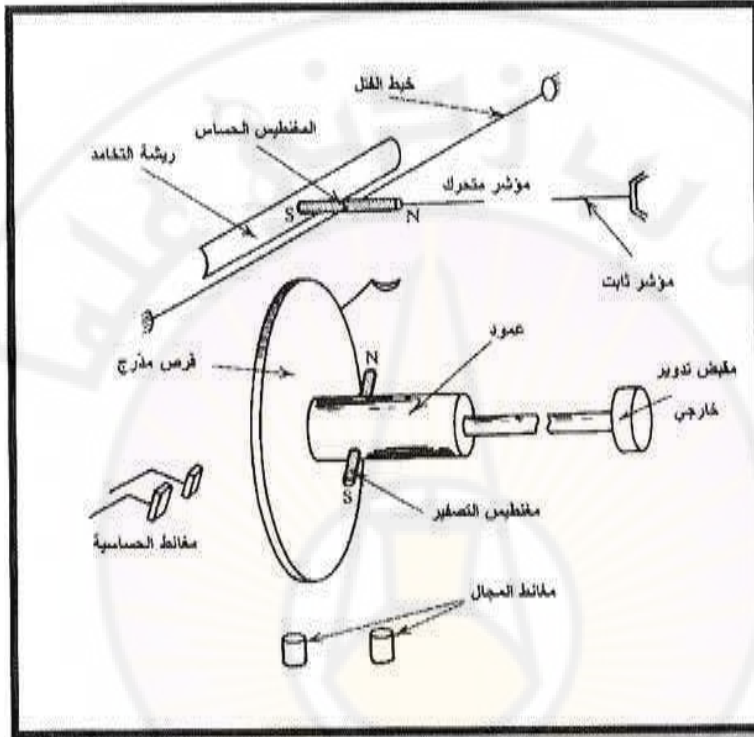


الشكل (5-3): رسم توضيحي لمبدأ عمل مقياس شميت.

(حسب دوبرين 1976, Dobrin).

يولد الحقل المغنطيسي المسيطر عزم فتل في مركز الدوران المطابق لحد المسند ويعاكسه عزم فتل ناتج عن تأثير قوى الجاذبية على مركز الثقل، نظراً لعدم تطابق مركز الثقل (C) ومركز الدوران (F)، تعمل المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي على إدارة المجموعة المغنطيسية بعكس دوران عقارب الساعة، ويعين مكان التوازن على تدريج نتيجة انعكاس شعاع ضوئي على مرآة مرتبطة مع المجموعة المغنطيسية.

يقوم مبدأ القياس على تصفير زاوية دوران المغنطيس الصغير التي نشأت عن تغير في الحقل المغنطيسي الخارجي، ثم نقرأ زاوية دوران القرص التي أدت إلى تصفير زاوية دوران المغنطيس الصغير.



الشكل (3-4): مخطط لقياس الحقل المغنطيسي.

(حسب تelford وآخرين 1976)

يصل مجال القياس بهذا المقياس إلى 10000 نانوتسلا وقد يعادل التدرج الواحد 20 نانوتسلا، يمكن تغيير حساسية المقياس بواسطة زوج من المغانط تدعى مغانط الحساسية، بحيث يمكن تمديد مجال القياس إلى 30000 نانوتسلا. بوضع المقياس على حامل ثلاثي الأرجل (Tripod) ويوجه شمالاً جنوباً على الرغم من قلة تأثيره بالاتجاه.

ميكانيكية متحركة، كما في مقياس الترنح النووي البروتوني (البروتون) Nuclear
 Flax-gate precession magnetometer، أو مقياس التدفق المغنطيسي
 magnetometer أو مقياس الضخ البصري Optical pumping
 magnetometer.

3-2-1-2-2 تقسيم المقاييس حسب المركبة المغنطيسية المقاسة:

نقسم هذه المقاييس المغنطيسية إلى:

أ- مقاييس القيمة النسبية.

ب- مقاييس القيمة المطلقة.

أ- مقاييس القيمة النسبية:

نقيس هذه المقاييس القيمة النسبية للتغيرات التي تحدث في المركبة المقاسة بين محطة
 القياس والمحطة المرجع ($\Delta F, \Delta Z, \Delta H, \Delta I, \Delta D$)، كما في مقياس شميت ومقياس
 الفتل، إذ يوجد من كل من هذين المقياسين مقياس لقياس تغيرات المركبة المغنطيسية
 الشاقولية (ΔZ)، أو مقياس يقيس تغيرات المركبة المغنطيسية الأفقية (ΔH).

ب- مقاييس القيمة المطلقة:

نقيس مقاييس القيمة المطلقة القيمة الكلية للمركبة المقاسة في مكان ما، كما في مقياس
 الترنح النووي البروتوني ومقياس الضخ البصري، اللذان يقيسان الحقل المغنطيسي
 الكلي، أو مقياس التدفق المغنطيسي الذي يقيس القيمة المطلقة للحقل المغنطيسي الكلي،
 أو لإحدى المركبات المغنطيسية الأخرى مثل المركبة الأفقية (H) أو المركبة الشمالية
 (X) أو المركبة الشرقية (Y) أو المركبة الشاقولية (Z) حسب توجيه الحساس.

3-2-3-2-3 وصف بعض مقاييس المغنطيسية:

3-2-3-2-3-1 مقياس الفتل المغنطيسي:

لقد استخدم هذا المقياس لمدة تزيد عن أربعين عاماً لقياس المركبة الشاقولية للحقل
 المغنطيسي الأرضي. ويعتمد على قياس زاوية الدوران التي يخضع لها مغنطيس صغير
 معلق بخيط فتل (Torsion fiber) مصنوع عادةً من الكوارتز تحت تأثير حقل مغنطيسي
 خارجي كما في الشكل (3-4).

3-2-3- مقاييس المغنطيسية:

تطورت مقاييس المغنطيسية تطوراً كبيراً منذ بدايتها، خاصةً بعد الأربعينيات من القرن الماضي. كانت الأنواع الأولى ميكانيكية تعتمد على حركة قضيب أو إبرة مغنطيسية، وقد استعاض عنها بالأنواع الكهربائية التي تعتمد على تأثير المواد بالحقول المغنطيسية. وقد صمم كل مقياس لقياس عنصر من عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي مثل الحقل الكلي أو المركبة الأفقية أو المركبة الشاقولية أو الانحراف المغنطيسي أو الميل المغنطيسي. نظراً للدور الهام الذي لعبته الأجهزة الميكانيكية في المسح المغنطيسي على مستوى الكرة الأرضية سنأتي على ذكر تقسيماتها ونورد بعض الأمثلة عليها، في حين سنورد شرح المبدأ الفيزيائي لكل الأجهزة الكهربائية وطريقة عملها، لأنها الأجهزة المستخدمة حالياً بغض النظر عن شكل الجهاز الخارجي أو الهدف من استخدامه.

3-2-3-1- تقسيمات المقاييس المغنطيسية:

يمكن تقسيم المقاييس المغنطيسية إلى نوعين:

1 - حسب آلية القياس.

2 - حسب المركبة المغنطيسية المقاسة.

3-2-3-1-1- تقسيم المقاييس حسب آلية القياس:

تقسم هذه المقاييس المغنطيسية إلى:

أ- ميكانيكية.

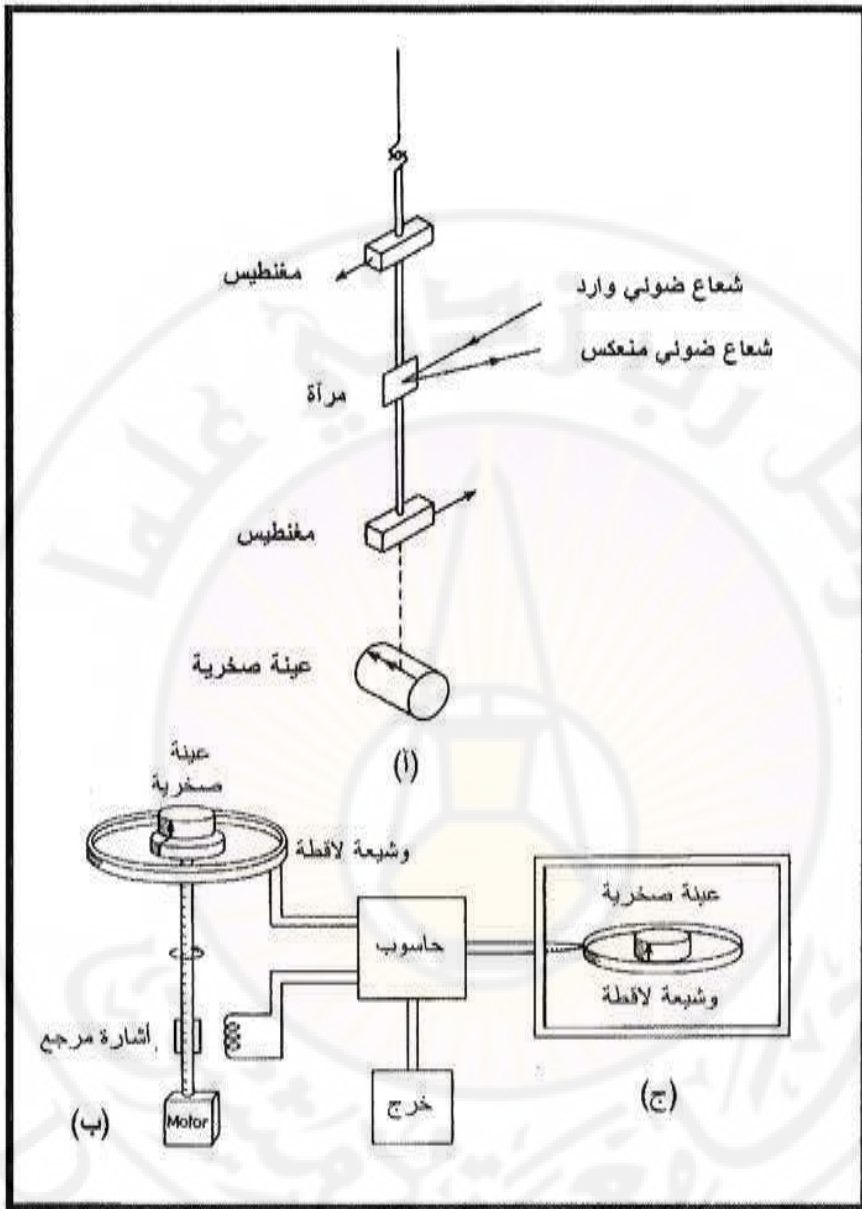
ب- كهربائية.

أ- المقاييس الميكانيكية:

تعتمد هذه المقاييس على وجود إبرة مغنطيسية تتركز بحرف حاد knife edge على وسادة مصقولة، كما في مقياس شميت Schmidt magnetometer، أو تتعلق بخيط فتل كما في مقياس الفتل Torsion fiber magnetometer.

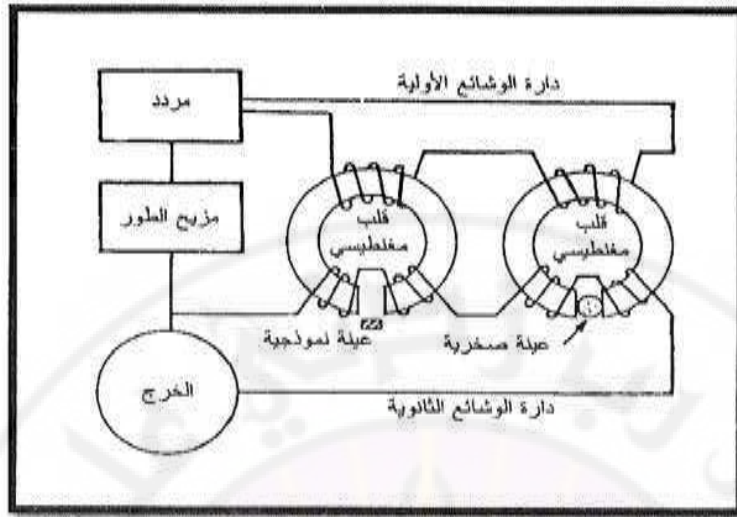
ب- المقاييس الكهربائية:

تعتمد المقاييس الكهربائية على استخدام الخواص المغنطيسية للمواد، وقياس تأثيرها بالحقول المغنطيسية الخارجية بواسطة دارات إلكترونية معقدة، ودون وجود أجزاء



الشكل (3-3): تمثيل مبسط لمقاييس المغناطيسية المتبقية؛
 أ- المقياس السكوني، ب- المقياس الدوار، ج- المقياس الكريوجيني.
 (حسب تارلنغ 1983, Tarling)

5- مقياس المغنطيسية الدوار: هو المقياس الأكثر انتشاراً والأسرع والأعلى حساسية حالياً (Larochelle, 1965). توضع العينة الصخرية بالقرب من وشيعة لاقطة (الشكل 3-3-ب)، حيث تدور بسرعة عالية، فتعرض المغنطيسية الدوارة تياراً كهربائياً متناوباً في الوشيعة اللاقطة المرتبطة بحاسوب صغير يقوم بحساب شدة المغنطيسية واتجاهها في العينة (Molyneux, 1971, Collinson, 1983). صُمم من هذا المقياس نموذج قادر على قياس المغنطيسية المتبقية في عينات أثرية قطرها 5.5 سم وارتفاعها 5.1 سم، وكذلك نموذج آخر لقياس المغنطيسية المتبقية في عينات رسوبية بطول عدة أمتار لقياس شدة المغنطيسية واتجاهها في العينات الرسوبية البحرية.



الشكل (2-3): تمثيل مبسط لدائرة مقياس المتأثرية المغناطيسية.
(حسب تارلنغ 1983, Tarling)

3-2-2- مقاييس المغناطيسية المتبقية في الصخور:

هنالك عدد من مقاييس المغناطيسية المتبقية متوفرة حالياً (Collinson, 1983) لقياس شدة المغناطيسية المتبقية واتجاهها، ومعظمها مصمم لقياس عينة معيارية 2.5 سم قطراً و 2.1-2.2 سم ارتفاعاً، أو بشكل مكعب طول ضلعه 2.1 أو 2.5 سم. من هذه المقاييس؛ 1- مقياس المغناطيسية السكوني astatic magnetometer، 2- ومقياس المغناطيسية الدوار spinner magnetometer، 3- ومقياس المغناطيسية شبه السكوني parastatic magnetometer و 4- ومقياس المغناطيسية الكريوجيني cryogenic magnetometer. سنستعرض هنا المقياسين الأولين لاستخدامهما في عمليات المسح المغناطيسي.

4- مقياس المغناطيسية السكوني: من أقدم المقاييس الموجودة (Blackett, 1952)، وتتألف مجموعته المغناطيسية من زوج من المغناط المتماثلة والمتعاكسة الأقطاب، معلقين بخيط فنل في مستوى واحد (الشكل 3-3-أ). تدور المجموعة المغناطيسية تحت تأثير مغناطيسية العينة الصخرية الموضوعة تحت المجموعة المغناطيسية، بحيث يتم تحديد شدة مغناطيسيتها واتجاهها.

4-1- مقدمة:

نظراً لسهولة المسح المغنطيسي وإمكانية القيام به من الطائرة يعد المدخل إلى الدراسات الجيوفيزيائية في أية دولة، يليه في ذلك المسح الجاذبي القاري، ويتبعه المسح السيسمي أو أي نوع آخر من المسوح الجيوفيزيائية. لقد ساهم المسح المغنطيسي والدراسات المغنطيسية في تمديد الدراسات الجيوفيزيائية إلى البحار والمحيطات والمناطق النائية من غابات وصحاري على القارة. يمكن إجراء هذا المسح على القارة أو من الطائرة أو من الباخرة وتستخدم في ذلك وسائل مختلفة. يتطلب المسح القاري الثبات في أثناء القياس، بينما تجرى القياسات الجوية والبحرية بشكل مستمر في أثناء حركة الطائرة أو السفينة. ويتم تعيين المسح المطلوب بناء على المساحة المطلوب دراستها، فمثلاً يطبق المسح الجوي فوق القارة على مدى دولة بأكملها أو فوق مناطق يصعب العمل فيها كالغابات والصحاري والجبال. كما تختلف أبعاد عملية المسح المغنطيسي حسب الهدف من المسح. فعند التنقيب عن المعادن المغنطيسية القارية تكون المسافة بين محطة أرضية وأخرى صغيرة في حين تزداد هذه المسافة حين التنقيب عن النفط، نظراً لتوقع كون المكنن النفطي على عمق أكبر من عمق المكنن المعدني.

وكما في بقية الدراسات يبدأ المسح المغنطيسي (القاري، الجوي أو البحري) بوضع خطة عمل متكاملة بناء على نوع المسح ومساحة المنطقة المدروسة وعلى الهدف من الدراسة (تنقيب عن النفط أو المعادن المغنطيسية أو تحديد التراكيب والأجسام المغنطيسية تحت السطحية)، وعلى عدد المقاييس المتوفرة (مقياس أو مقياسين أو مقياس حثلي ومحطة مغنطيسية ثابتة أو مرصد مغنطيسي قريب)، ويتم تحديد عدد المسارات (profiles) الرئيسية ومسارات الربط المعترضة والبعد بين محطة قياس وأخرى (نصف متر في حال المسح الأثاري أو عدة أمتار إلى عشرات الأمتار في المسح القاري أو نصف كيلومتر إلى كيلومتر في المسح الجوي).

سنستعرض خلال هذا الفصل كافة متطلبات المسح المغنطيسي القاري ثم الجوي ثم

البحري:

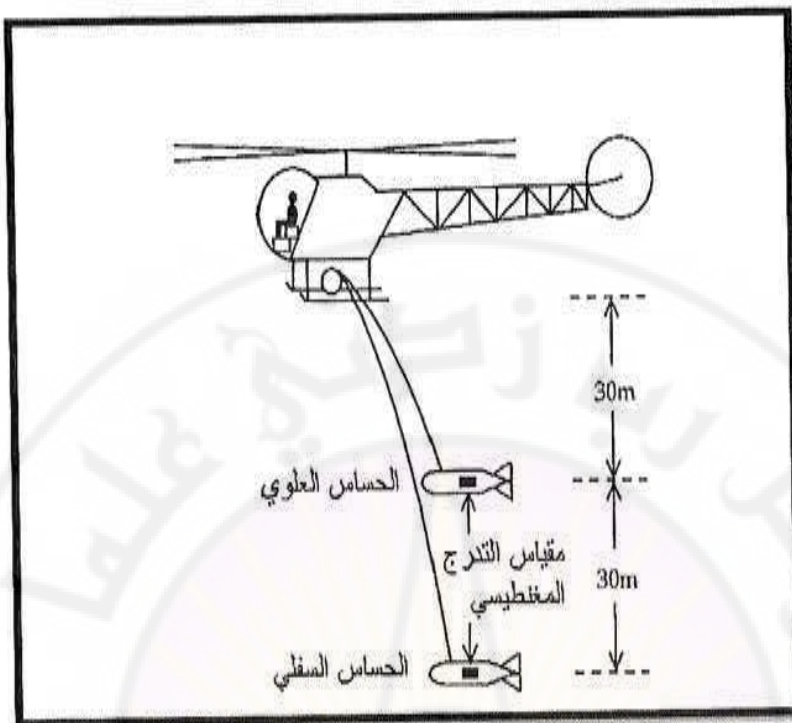
الفصل الرابع طرائق المسح المغنطيسي

Magnetic survey Methods



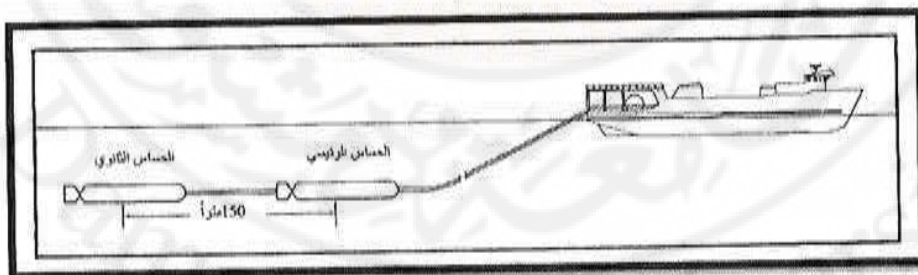
وترسم خرائط تساوي الفرق بين القياسين وتدعى خرائط تساوي التدرج الشاقولي أو الأفقي. تفيد هذه الطريقة أيضاً في التخلص من التغيرات اليومية، إذ يسجل المقياسان في وقت واحد القيمة نفسها للتغير الناتج من مصادر بعيدة، ثم تختصر عند حساب الفرق بين القياسين. وبما أنه يتم أيضاً قياس شدة الحقل الكلي في كل حساس فيتم طرح القيمتين من بعضهما وتبقى التغيرات الناتجة عن تغير وضع الحساسين بالنسبة للجسم المغنطيسي، مما يعني أن التغيرات التي لا تظهر في تسجيل التدرج بالوقت نفسه فهذا يعني إنها ناتجة عن التغيرات اليومية.

إن خريطة التدرج المغنطيسي الشاقولي أكثر تأثراً بالتغيرات المحلية منها بالتغيرات الإقليمية، وبالتالي فإنها تعطي صورة أكثر حدة من الصورة التي تظهر عليها خريطة الشدة المغنطيسية الكلية، وهكذا تظهر الشواذ الصغيرة بوضوح كبير في منطقة خاضعة لاضطرابات إقليمية عالية. يظهر التأثير نفسه عند حساب المشتق الشاقولي الثاني للحقل المغنطيسي، أي أن خرائط المشتق الشاقولي الثاني المحسوبة من الشدة الكلية تظهر مشابهة لخرائط التدرج الشاقولي المقاسة خاصة القيم العظمى والصغرى والانغلاقات.

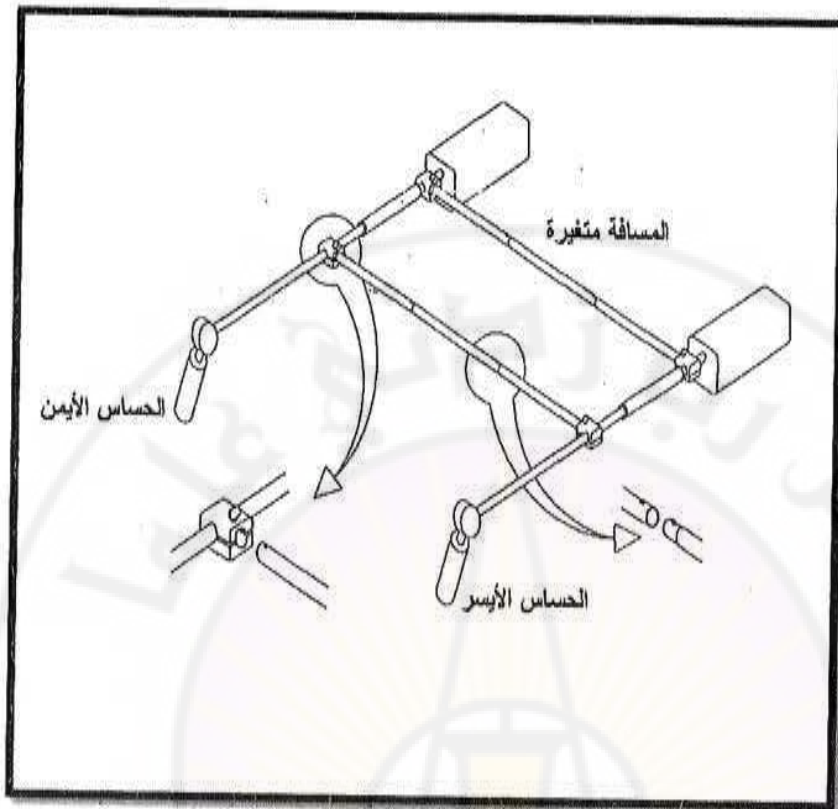


الشكل (3-18): توزيع الحساسين في مقياس التدرج الشاقولي الجوي.
(حسب لوري 2007 Lowrie)

يجري قياس التدرج الأفقي للحقل المغنطيسي الأرضي في المسح المغنطيسي البحري
بحر مقياسين خلف السفينة على بعدين مختلفين (تحدد المسافة بينهما بدقة)، ثم يحسب الفرق
بين القياسين المسجلين بالمقياسين (الشكل 3-19).



الشكل (3-19): توزيع الحساسين في مقياس التدرج الأفقي البحري.
(حسب دوبرين وسافيت، 1988 Dobrin & Savit)

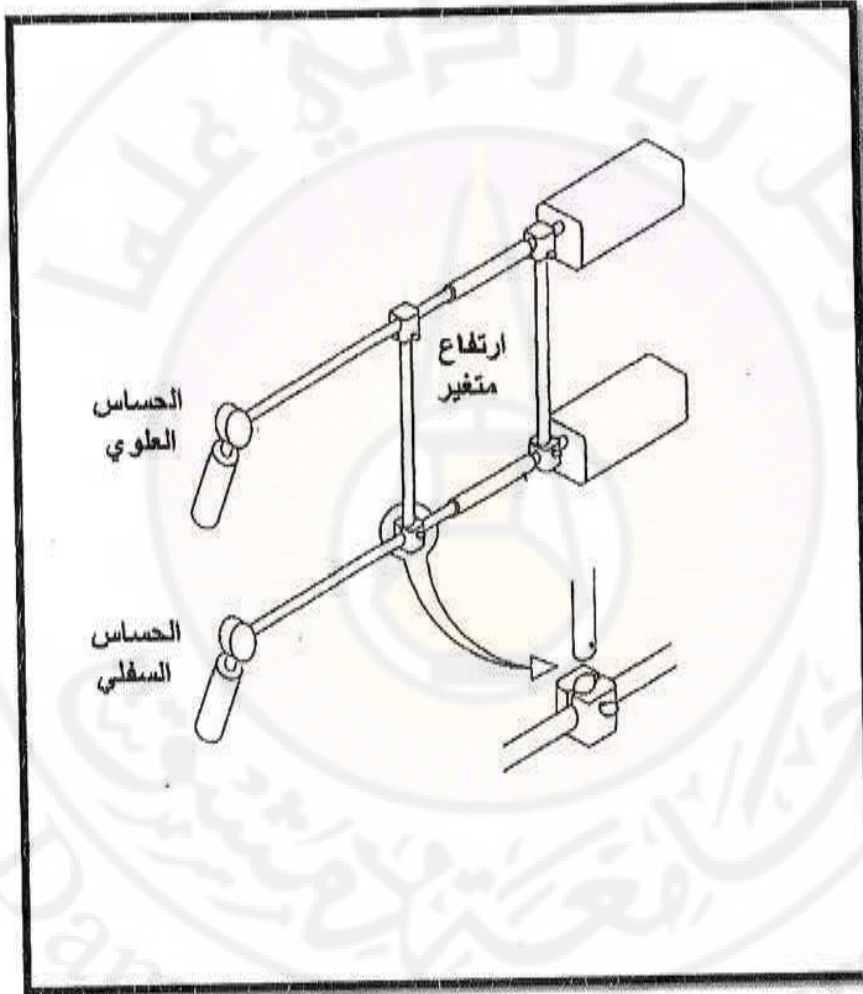


الشكل (3-17): توزيع الحساسين في مقياس التدرج الأفقي الأرضي.
(حسب سنترس 1996 , Scintrex)

يتم قياس التدرج الشاقولي في المسح المغناطيسي الجوي بوضع حساسين البعد الشاقولي بينهما بحدود 30 متراً. يحمل أحياناً أحد المقياسين على ذيل طائرة بينما يجر الآخر بواسطة حبل تحت الطائرة، وأحياناً يجر المقياسان بواسطة حبلين مختلفي الطول (الشكل 3-18).

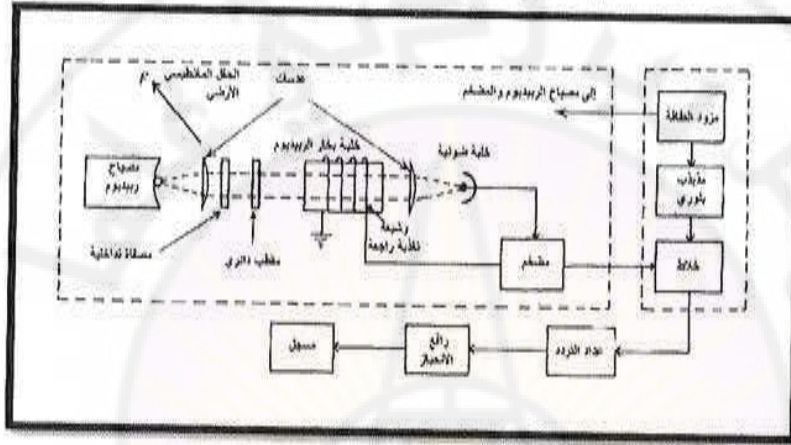
(الشكل 3-17). طَبَقَ التدرج الشاقولي أيضاً بوضع حساسين لمقياس البروتون على عصا وعلى ارتفاعين مختلفين بحيث يمكن قياس تدرج من مرتبة $\pm 0.1 \text{ nT/m}$. إذا كانت شدة الحقل المقاسة بالحساس العلوي T_1 وبالحساس السفلي T_2 والفرق بينهما ∂F والمسافة الفاصلة بين الحساسين Δz ، يعطى التدرج الشاقولي بالعلاقة التالية:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta z}$$



الشكل (3-16): توزيع الحساسين في مقياس التدرج الشاقولي الأرضي.
(حسب سنتركس، 1996، Scintrex)

يكون التردد مقيداً بالثابت الذري الذي يكون بالنسبة للرببيديوم 85 مساوياً لـ 4.667 Hz/nT، وبالنسبة للسيريزيوم 3.498 Hz/nT، وتكون شدة الحقل بالنسبة للرببيديوم $f/4.667 = 0.2142$ nT/Hz، وبالنسبة للسيريزيوم 0.2859 nT/Hz. يُختصر إذاً قياس شدة الحقل المغنطيسي الأرضي وتغيراته إلى قياس تردد مستمر من مرتبة 200 كيلوهرتز وهي عملية سهلة ومباشرة، ويمكن بهذه الطريقة قياس تغيرات في شدة الحقل المغنطيسي من مرتبة 0.001 nT وأقل وفي المسح الجوي يتم قياس تغيرات من مرتبة 0.1 nT.

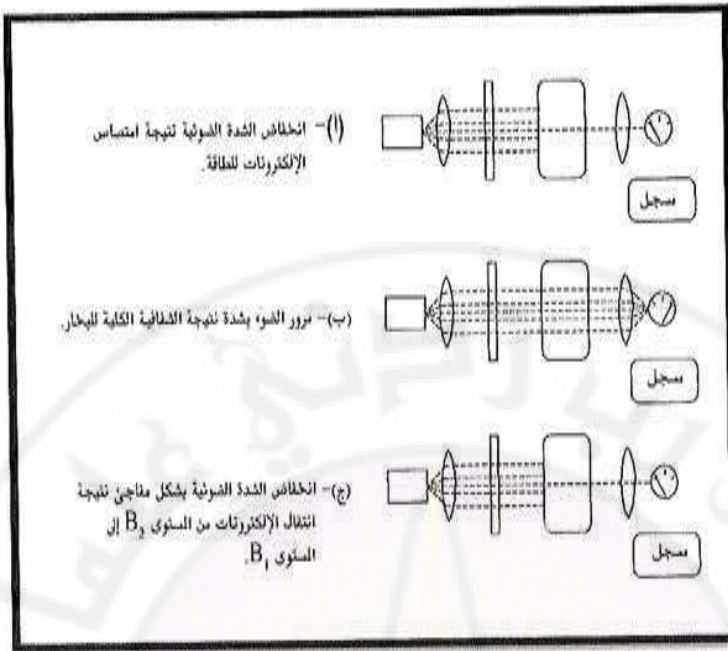


الشكل (3-15): الأجزاء الرئيسية المستخدمة في مقياس الضخ البصري.
(حسب تelford et al., 2004 وآخرين)

3-2-3-2-7- مقاييس التدرج المغنطيسي الشاقولي والأفقي

Magnetic gradiometer:

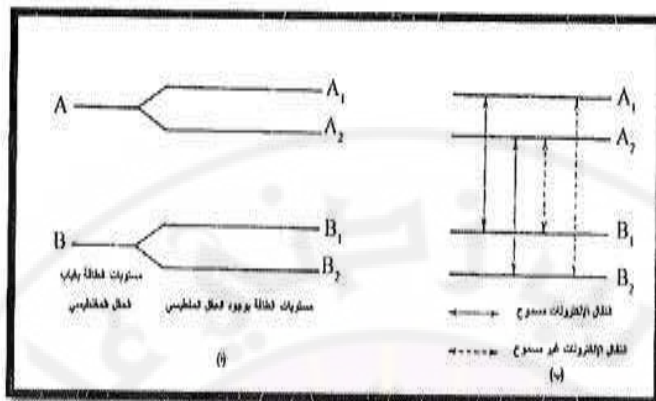
ممكن تطوير مقياس الضخ البصري شديد الحساسية من قياس تدرج الحقل المغنطيسي الأرضي بالاتجاهين الشاقولي (Vertical gradient) والأفقي (Horizontal gradient). يتم في هذه الطريقة قياس متزامن لشدة الحقل المغنطيسي الأرضي بواسطة حساسين وتطرح القيم المسجلة من بعضها ويتم تسجيل الفرق بين القيمتين المسجلتين في لحظة القياس. فلقياس التدرج الشاقولي في المسح المغنطيسي الأرضي يوضع الحساسان شاقولياً فوق بعضهما ويبعدان عن بعضهما بمسافة محددة (0.5 متر) (الشكل 3-16). بينما لقياس التدرج الأفقي يوضع الحساسان أفقياً بجانب بعضهما ويبعدان عن بعضهما بمسافة متغيرة (0.5 متراً إلى 1.5 متراً)



الشكل (3-14): تتابع الانتقالات الإلكترونية وشدة الإضاءة في مقياس الضخ البصري (معدل من تelford et al., 1990 وآخرين)

- يظهر الشكل (3-15) دائرة مقياس الضخ البصري والأجزاء المستخدمة فيه:
- 1 - مصباح مملوء ببخار الربيديوم أو السيزيوم يستمد الطاقة من تردد Oscillator.
 - 2 - عدسات ومسدة (Collimator) لتوجيه الأشعة عبر الأجزاء الضوئية الأخرى.
 - 3 - مصفوفة تداخلية (Interference filter) تعمل على تحديد تردد الضوء المرسل على الخط $7948 \text{ \AA}$ من أجل الربيديوم.
 - 4 - مقطب دائري (Circular polarizer) لتحديد دوران الضوء باتجاه واحد بحيث تجبر العزم الدوراني للإلكترونات على الدوران حول محور مواز (أو معاكس) للحقل المقاس.
 - 5 - خلية امتصاص (absorption cell) مملوءة ببخار الربيديوم (أو السيزيوم) ومحاطة بوشعة تردد.
 - 6 - عدسات من أجل تركيز الضوء على الخلية الضوئية.
 - 7 - خلية ضوئية (Photo cell).

فلا يمكن رفعها إلى مستوى أعلى وتبقى في المستوى B_2 . ويؤدي استمرار الإضاءة إلى انتقال كل الإلكترونات من المستوى B_1 إلى المستوى A_1 ويصبح B_1 فارغاً.



الشكل (3-13): مستويات الطاقة المحتملة لوجود الإلكترونات.
(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

يُزال كل كوانتوم ضوئي رفع الإلكترونات من مستوى طاقة إلى مستوى طاقة أعلى من الشعاع الضوئي بالامتصاص مما يؤدي إلى انخفاض ملموس في شدة الضوء الواصل إلى الخلية الضوئية (الشكل 3-14-أ). لكن عندما تزال كل الذرات من المستوى B_1 يصبح البخار الذي يحوي الذرات شفافاً كلياً للضوء، مما يؤدي لمرور الضوء بشدة إلى الخلية الضوئية (الشكل 3-14-ب).

إذا أمكن عند هذه النقطة إعادة بعض الإلكترونات إلى المستوى B_1 فإن كوانتا الضوء تمتص بواسطتها وتنتقل إلى المستوى A_1 ، مما يؤدي إلى خفض شدة الشعاع الضوئي المار عبر الحجرة الحاوية على البخار. ويمكن رفع الإلكترونات من المستوى B_2 إلى B_1 إذا عرضت لإشعاع بموجات لاسلكية ترددها مماثل للفرق في الطاقة بين المستوى B_1 والمستوى B_2 . لتحديد هذا الفرق وبالتالي شدة الحقل المغناطيسي تمرر موجات لاسلكية بترددات متغيرة عبر الحجرة، ويلاحظ التردد الذي يؤدي لانخفاض مفاجئ في شدة الشعاع الضوئي المار في حجرة البخار ويدعى تردد لارمور (الترنحي) للإلكترون، وهو متناسب مع شدة الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي. ويظهر انخفاض الضوء المفاجئ على الخلية الضوئية التي تسجل التغيرات لأن الانتقال من المستوى B_1 إلى المستوى A_1 قد استؤنف (الشكل 3-14-ج).

مستوى طاقة أعلى وعندما يسقط الإلكترون من مستوى طاقة عالٍ إلى مستوى طاقة منخفض يرسل دفقة (كوانتوم quantum أو كم) من الإشعاع الكهرومغناطيسي لها طاقة معادلة للطاقة التي خسرها الإلكترون. في كلتا الحالتين يكون التغير بالطاقة (ΔE) متعلقاً بتردد الإشعاع (γ) حسب علاقة بلانك Planck's relation التالية :

$$\Delta E = h.\gamma \quad (3-5)$$

حيث h ثابت بلانك Planck's constant .

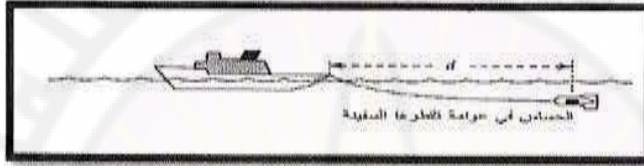
وحتى يحدث هذا الانتقال يجب أن يكون للإشعاع الخارجي تردد مماثل تماماً للفرق بين مستويي الطاقة، ولا يمكن أن يحدث هذا الانتقال عند وجود اختلاف في التردد. يظهر الشكل (3-13) الانتقال الذي يحدث في عملية الضخ البصري، ففي غياب حقل مغناطيسي يكون للإلكترون التكافؤ لذرة معدن قلوي (مثل الربيديوم أو السيزيوم) مستويان هما المستوى النظامي B (Normal level) ومستوى الإثارة A (Exited level).

وعند وجود حقل مغناطيسي خارجي ينقسم (split) المستوى A إلى زوج من المستويات هي A_1 و A_2 وينقسم المستوى B إلى B_1 و B_2 ويكون الفرق بين مستويي الطاقة A_1 و A_2 ومستويي B_1 و B_2 أصغر من الفرق بين مستويي الطاقة A و B (الشكل 3-13-أ). يمثل المستويان A_1 و B_1 الطاقة عندما يكون العزم الدوراني للإلكترون موازياً لاتجاه الحقل المغناطيسي، بينما يمثل المستويان A_2 و B_2 الطاقة عندما يكون العزم الدوراني للإلكترون معاكساً لاتجاه الحقل. إن الفرق بين A_1 و A_2 وكذلك بين B_1 و B_2 متناسب طردياً مع شدة الحقل المغناطيسي الخارجي، فإذا أمكن قياس كمية الطاقة الممتصة أو المشعة عند الانتقال بين المستوى B_1 والمستوى B_2 يمكن تحديد شدة الحقل المغناطيسي الخارجي، علماً أن هذه الطاقة متناسبة مع تردد الإشعاع المرتبط بالانتقال ويقع هذا التردد في مجال الترددات اللاسلكية المنخفضة، بينما يقع التردد المرتبط بالانتقال بين A و B في المجال المرئي (visible range).

يظهر الشكل (3-13-ب) كيفية حصول هذا، فبفرض أن الذرات قد أضيئت بضوء تردده γ مساوٍ للفرق بين مستويي الطاقة ($\gamma = (A-B)/h$) ليؤثر في الإلكترونات، فيكون الانتقال الممكن في هذه الحالة من B_1 إلى A_1 ثم تبقى هذه الإلكترونات في المستوى A_1 لمدة زمنية قصيرة وبعدها تعود إلى المستوى B_1 بإشعاع الطاقة، أما الإلكترونات في المستوى B_2

ب - مقياس البروتون البحري:

يعتمد هذا المقياس على الآلية المذكور سابقاً ويوضع في السفينة، بينما يوضع الحساس في صندوق مانع لتسرب الماء موضوع في عوامة تُجر على مسافة عدة مئات من الأمتار خلف السفينة (المسافة d في الشكل 3-12)، وذلك لمنع التأثير بالتغيرات المغناطيسية المتولدة في السفينة. تؤخذ القياسات على فترات تتراوح بين 3 ثوان إلى 60 ثانية، ويفضل أخذ القياس كل 6 ثوان. تسجل كل المعلومات بذاكرة مغناطيسية مدمجة في المقياس، بحيث تُخزن القياسات والمعلومات المتعلقة بها بما فيها تحديد موقع السفينة بإحدى الطرائق التي سنوردها فيما بعد.



الشكل (3-12): وضع الحساس بالنسبة للسفينة في المسح المغناطيسي البحري.
(حسب لوري 2007 Lowrie)

3-2-3-2-6- مقياس الضخ البصري

Optical pumped vapor magnetometer:

تم تطوير هذا المقياس في الستينيات من القرن الماضي لقياس شدة الحقل المغناطيسي الكلي بدقة أكبر بكثير من المقاييس الأخرى اعتماداً على خاصية التجاوب (المبادرة) النووي المغناطيسي للإلكترونات، لأن كتلة الإلكترون أصغر نحو 2000 مرة من كتلة البروتون فيكون التردد أعلى بكثير من تردد البروتون. يستخدم المقياس ظاهرة الضخ البصري

Optical pumping التي تطبق على بخار السيزيوم Cesium أو الربيديوم Rubidium

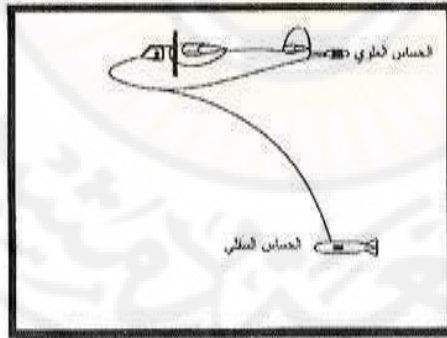
أو الهليوم شبه المستقر Metastable Helium.

تتحدد طاقة ذرة ما بالمدارات التي تدور فيها إلكتروناتها حول نواتها وباتجاه عزومها الدورانية (Spins)، لكن المدارات واتجاهات عزومها الدورانية محدودة بعدد قليل ولكل منها مستوى طاقة محدد. عندما يُعرض الإلكترون لإشعاع خارجي يرتفع من مداره إلى مدار آخر ذي

العامل في المناطق التي يحتاج العامل فيها لاستخدام يديه. تؤخذ القياسات كل 6 ثوان وتسجل على ورقة خاصة، وقد تم تزويد المقاييس الحديثة بذاكرة مغناطيسية مدمجة في المقياس، بحيث تُخزن القياسات الحقلية والمعلومات المتعلقة بها، ثم تُفرغ هذه المعلومات إلى حاسوب مبرمج لمعالجة المعطيات المغناطيسية لتُجرى عليها العمليات كافة للوصول إلى القيم المصححة النهائية التي يتم تفسيرها كما سنرى فيما بعد.

ب- مقياس البروتون الجوي:

يتألف المقياس من زجاجة حاوية على الماء ومغلقة بغلاف يحميها من الكهرباء الساكنة، ويطبق عليها حقل مغناطيسي مُقَطَّب قيمته نحو (100) أوستد. يتم قياس التردد مرة كل ثانية ولفترة تستغرق نصف ثانية عند قطع الحقل المُقَطَّب، ويتم تعداد التردد بعدد بطيء ثم يحول إلى فرق كمون يتم رسمه على شريط ورقي أو شريط تسجيل، وحالياً يتم تسجيل المعلومات بذاكرة مغناطيسية مدمجة في المقياس وتُخزن القياسات والمعلومات المتعلقة بها، بما فيها تحديد مكان الطائرة بالنسبة للأرض بإحدى الطرائق التي سنوردها فيما بعد. تكون دقة القياس بحدود واحد نانوتسلا، وتدعي بعض الشركات بأن دقة مقاييسها تصل إلى نصف نانوتسلا، يبلغ وزن المقياس بحدود 50 كيلو غراماً، مما يساعد على استخدامه في طائرة خفيفة ذات محرك واحد. يوضع المقياس ضمن الطائرة ويوضع الحساس على ذيل أو جناح الطائرة أو يُجر خلف الطائرة بواسطة حبل قد يصل إلى 100 متر طولاً (الشكل 3-11).



الشكل (3-11): وضع الحساس بالنسبة للطائرة في المسح المغناطيسي الجوي.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

يمكن عد هذه الحركة دورية وسرعتها ω أي أن $\omega = 2\pi f$ ، حيث f تردد هذه الحركة الدورانية ويدعى تردد تجاوب لارمور (Larmor precession frequency). إذن :

$$T = \frac{2\pi}{f/\gamma_p} \quad \text{إذن:}$$

$$\frac{2\pi}{\gamma_p} = 23.4874 \pm 0.0018 \frac{nT}{Hz} \quad \text{لكن:}$$

إذن :

$$T = 23.4874.f \quad (3-4)$$

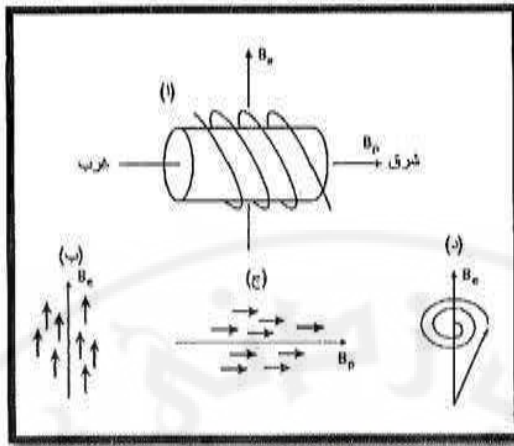
حيث تعطي T بالنانوسلا و f التردد بالهرتز لدوران العزم المغنطيسي حول الحقل المغنطيسي الأرضي.

تتألف أجزاء المقياس الرئيسة من: 1- تجمع بروتوني، 2- وشيعة مقبلة لتوليد حقل مغنطيسي مقبب عالي جداً (50-100 أورستد) بالنسبة للحقل المغنطيسي الأرضي ومتعامد معه، 3- وشيعة لاقطة، 4- مضخم لفرق الكمون الضعيف المتحرض في الوشيعة اللاقطة، 5- عداد للتردد الواقع في الترددات المسموعة لكونه مساوياً لـ 2130 هرتز عندما تكون شدة الحقل المغنطيسي الأرضي بحدود (0.5) أورستد.

يصنع حالياً مقياس البروتون بثلاثة أشكال، الأول من أجل القياسات الأرضية والثاني للقياسات الجوية والثالث للقياسات البحرية، وكلها تقيس الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي، سندرس هذه المقاييس بشكل مختصر.

آ- مقياس البروتون الأرضي:

يعتمد هذا المقياس الآلية السابقة وصمم ليتمكن حمله بسهولة، بحيث لا يزيد وزنه على سبعة كيلوغرامات وتتراوح دقته بين 1 و 10 نانوسلا. يُحمل المقياس بواسطة جعبة تعلق بالرقبة بحيث يتدلى أمام العامل، ويحمل الحساس (sensor) إما على عصا بارتفاع يزيد عن مترين لتخفيف تأثير المواد المغنطيسية المبعثرة على سطح الأرض، أو في جعبة على ظهر



الشكل (3-10): توجه البروتونات في مقياس الطنين النووي المغناطيسي.
(حسب كيري وآخرين، 2002، Kearey et al.)

يدور البروتون حول اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي بسرعة زاوية (ω) ، وهي متناسبة مع شدة الحقل المغناطيسي الأرضي T ، أي:

$$\omega = \gamma_p \cdot T \quad (3-3)$$

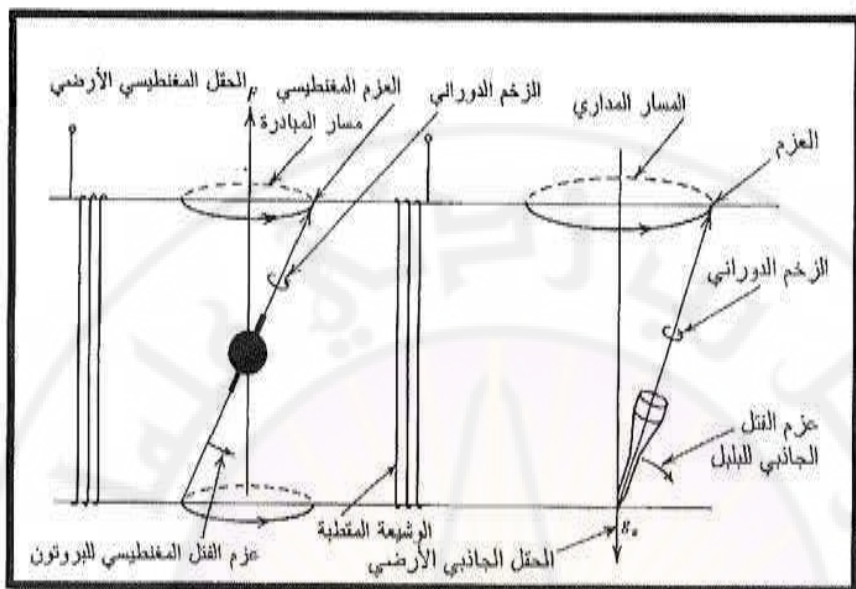
حيث:

γ_p : عامل التناسب ويدعى النسبة الجيرومغناطيسية للبروتون Gyromagnetic ratio of proton وتساوي نسبة العزم المغناطيسي (magnetic moment) إلى الزخم الدوراني (spin angular momentum).

إذن: يتم التقاط هذه الحركة بوضع وشيعة ثانوية (وشيعة لاقطة pickup coil) حول الزجاجاة المائية لتسجل فرق الكمون المتحرض من دوران البروتون موجب الشحنة ضمنها.
ومنه:

$$T = \frac{\omega}{\gamma_p}$$

الأرضي قوة التجاذب أو الدوران للعزوم، كما تفعل قوة الجاذبية بالنسبة للبلبل. يبين الشكل (9-3) التشابه بين حركة البلبل والبروتون وتشابه القوى المطبقة عليهما.



الشكل (9-3): مبدأ عمل مقياس الطنين النووي المغنطيسي.
(حسب تelford وآخرين 2004)

ويبين الشكل (10-3) ما يجري في الزجاجاة المائية الحاوية على التجمع البروتوني الخاضع للحقل المغنطيسي الأرضي (B_e) (الشكل 10-3-أ)، بينما يطبق الحقل المغنطيسي المقلب (B_p) بشكل معامد لاتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي. يُظهر الشكل (10-3-ب) توجه البروتونات تحت تأثير الحقل المغنطيسي الأرضي (B_e)، بينما يُظهر الشكل (10-3-ج) توجه البروتونات تحت تأثير الحقل المغنطيسي المقلب (B_p)، ويُظهر الشكل (10-3-د) مسار المبادرة اللولبي لعزوم البروتونات في أثناء عودتها إلى اتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي.

4-2- المسح المغنطيسي القاري:

4-2-1- تحديد محطات المسح: يبدأ المسح المغنطيسي بتعيين محطة مرجع (Base station) ثابتة لقياس التغيرات اليومية في الحقل المغنطيسي الأرضي تتوفر فيها الشروط التالية:

- 1- أن يكون الحقل المغنطيسي فيها ممثلاً للحقل المغنطيسي الإقليمي.
- 2- سهل الوصول إليها بسبب الحاجة للعودة إليها بشكل متكرر.
- 3- بعيدة عن كل مصادر التشويش المغنطيسي (magnetic noise) كما في حالة المحطات المغنطيسية الحقلية.

عند تحديد المحطات الحقلية وفق الخطة الموضوعية، يجب إبعادها عن كل مصادر التشويش المغنطيسي والآبقل البعد عن السكك الحديدية عن 100 متر و 25 متراً عن الآليات والسيارات الحديدية والأبنية الحاوية على تجهيزات معدنية وتيارات كهربائية، ويجب أيضاً تجنب خطوط القدرة الكهربائية خاصة ذات التوتر العالي. كما يجب على حامل المقياس تجنب حمل المواد المغنطيسية وخلو ملابسه من المواد المعدنية المغنطيسية، ويفضل دوماً إبعاد حساس المقياس أكبر مسافة ممكنة عن حامله وعن سطح الأرض.

كما يقتضي المسح تحديد اتجاه مسارات المسح بدقة كبيرة نظراً لتغير شدة الشواذ المغنطيسية مع اتجاه المسار، كما تحدد المسافة بين المحطات بدقة، وخاصة في الأبعاد الصغيرة مثل المسح الأثاري. ويتم هذا التحديد بواسطة فرقة عمل طبوغرافية تقوم بتوقيع المنطقة المدروسة على خريطة المنطقة حسب المقياس المطلوب.

4-2-2- تنفيذ المسح: يتطلب تنفيذ المسح تعيين زمن القياس بدقة لرصد التغيرات المغنطيسية اليومية، ثم إجراء التصحيحات المغنطيسية اليومية المطلوبة في أي مسح مغنطيسي قاري أو جوي أو بحري.

تعتمد طريقة تنفيذ المسح على أجهزة المسح المتوفرة كما يلي:

- 1- يجب في حال توفر مقياس مغنطيسي واحد أخذ القياس الأول في المحطة المرجع ثم الانتقال إلى المحطات الحقلية ثم العودة للمحطة المرجع كل 2-3 ساعات خلال اليوم في حال المسح التنقيبي وكل ربع ساعة في حال المسح الأثاري.

- 2- أما عند توفر مقياسين مغنطيسيين يثبت الأول في المحطة المرجع، بحيث يقيس شدة الحقل المغنطيسي الأرضي على فترات زمنية محددة، بينما يستخدم الثاني كمقياس حقل بدون العودة إلى المحطة المرجع، ويجب مقارنة قراءات المقياسين في بداية العمل ونهايته بحيث يقسم الفرق، إن وجد، بين القراءتين بانتظام على المحطات المختلفة.
- 3- في حال وجود مرصد مغنطيسي دائم قريب من المنطقة المدروسة، يمكن استخدام مقياس حقل فقط، ويتم اعتماد تسجيلات المرصد لحساب التغيرات المغنطيسية اليومية.
- 4-2-3- اختزال النتائج القارية: يجب القيام بالتصحیحات اليومية (diurnal correction) دوماً ومهما يكن المسح المنفذ، أما التصحيحات الأخرى فيعتمد تطبيقها على المسح المنفذ وهي على نوعين:

أ- تصحيحات الارتفاع والطبوغرافيا (Elevation and terrain corrections).

ب- التصحيحات النظامية (Normal corrections).

من الضروري إيقاف المسح المغنطيسي في حال حدوث عاصفة مغنطيسية أو إلغاء القياسات التي أخذت في أثناء حدوث العاصفة، نظراً لأن التغيرات المغنطيسية الناتجة عن العاصفة المغنطيسية قد تتجاوز الشواذ المغنطيسية الناتجة عن التغيرات تحت السطحية.

1- التصحيحات اليومية:

يتم في جميع الحالات رسم منحنى التغيرات المغنطيسية اليومية مع الزمن في المحطة المرجع، ثم تسقط القيم الحقلية المقاسة عليه وفق زمن قياسها، للتخلص من التغيرات اليومية. في كل الحالات يعتبر زمن القياس الأول في المحطة المرجع مبدأ محور الزمن، وشدة الحقل المقاسة في ذلك الزمن مبدأ محور الشدة، يتم رسم المنحنى وفق ما يلي:

1- في حال استخدام مقياس واحد يرسم المنحنى بين قيم شدة الحقل المقاسة (المحور

الشاقولي) مع أزمنة العودة إلى المحطة المرجع (المحور الأفقي).

2- في حال استخدام مقياسين يرسم المنحنى بين قيم شدة الحقل المقاسة بمقياس المحطة

المرجع (المحور الشاقولي) مع أزمنة قياسها (المحور الأفقي).

3- في حال استخدام تسجيلات مرصد مغنطيسي قريب يتم الحصول على منحنى

التغيرات اليومية المسجلة بالمرصد كسجل يومي أو بشكل جدول يضم قيم شدة الحقل

والأزمنة الموافقة.

ب- تصحيحات الارتفاع والطبوغرافيا:

إن التدرج الشاقولي للحقل المغنطيسي الأرضي في الأقطاب يساوي 0.03 nT/m و 0.014 nT/m في خط الاستواء، لذا من غير المتبع عادة تطبيق هذا التصحيح في المسح المغنطيسي القاري، لكن يطبق في المسح المغنطيسي الجوي في حال جرى المسح على ارتفاعين مختلفين بسبب وجود الجبال في جزء من المنطقة الممسوحة. يمكن أن يكون تأثير الطبوغرافيا معتبراً، لكن يصعب التنبؤ به بسبب صعوبة معرفة الخصائص المغنطيسية للمعالم الطبوغرافية للمنطقة، لذا نادراً ما يطبق تصحيح الطبوغرافيا في المسح المغنطيسي.

ج- التصحيحات النظامية:

بما أن شدة الحقل المغنطيسي الأرضي واتجاهه يتغيران مع تغير الموقع على سطح الأرض، بغض النظر عن جيولوجية المنطقة، لذا يجب أخذ هذا التغير بعين الاعتبار وإجراء التصحيح المناسب له. وهذا يدعى: (الحقل المغنطيسي الإقليمي).
تجرى التصحيحات النظامية بطرح قيمة الحقل المحسوب، بإحدى الطريقتين، من قيمة الحقل المقاس وبعد الفرق بينهما قيمة الشواذ المغنطيسية الناتجة عن التغيرات المحلية بالأجسام المغنطيسية.
ويتم تحديد هذا الحقل بطريقتين:

أ- طريقة الشبكة التربيعية: تعطى قيم هذا الحقل في أمريكا مثلاً بشكل خرائط أو جداول تطبعها الإدارة الوطنية للتسجيلات المحيطية والجوية National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) من قياس الحقل المغنطيسي الأرضي في محطات محددة على شبكة تربيعية مسافتها الشبكية خمسة عشر كيلومتراً وتغطي أمريكا. لقد اختبرت هذه المسافة الكبيرة لأنها تتجاوز الشواذ الناتجة عن الأجسام المحلية الصغيرة، وتسمح بتخطيط الاتجاه الإقليمي للحقل المغنطيسي، وترسم هذه الخطوط بفرق 1000 نانوتسلا بين خطوط تساوي شدة الحقل.

ب- الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع

:International Geomagnetic Reference field (IGRF)

تستخدم القيم المحسوبة من الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع الذي يعد أفضل تمثيل رياضي للحقل المغنطيسي الأرضي المقاس، ويتم حسابه بدلالة حدود توافقية كروية terms of spherical harmonics معتمدة من قبل الإتحاد الدولي للمغنطيسية الأرضية وعلم الأجواء International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA).

نظراً لأهمية هذا الحقل قام المؤلف للمرة الأولى في سورية بكتابة برنامج (IGRF) للحاسوب بلغة البيسيك (BASIC) (Abou-Deeb, 1987) لحساب عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي باستخدام الحدود التوافقية الكروية التي يعتمد عليها الإتحاد الدولي للمغنطيسية الأرضية وعلم الأجواء والتي يجري تعديلها كل خمس سنوات، مع أخذ التغيرات التي طرأت على الحقل المغنطيسي الأرضي بالحسبان.

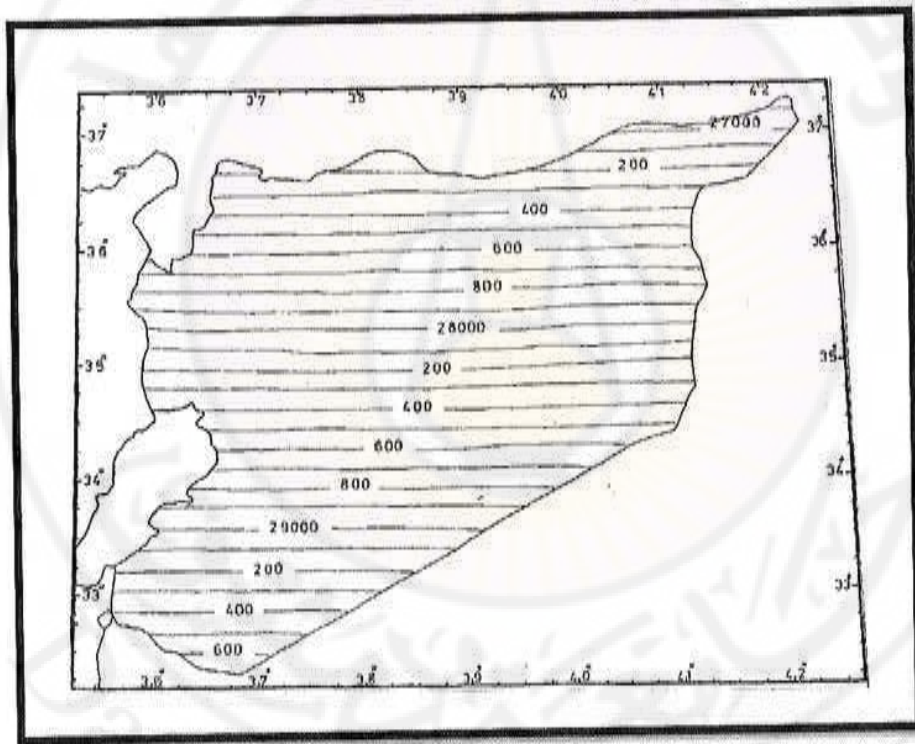
قام المؤلف بحساب عناصر الحقل المرجع لعام 1987 لمراكز رقع خريطة سورية بمقياس 1/200000 وعددها 19 رقعة، ولمراكز رقع خريطة سورية بمقياس 1/50000 وعددها 299 رقعة لتزويد الدارسين بالمعلومات اللازمة عن الحقل المغنطيسي الأرضي في سورية، ثم طبع (Abou-Deeb, 1987) جداول تحتوي على اسم الرقعة، المركبة الشاقولية، الحقل الكلي، المركبة الأفقية، الانحراف والميل المغنطيسيين. كما قام المؤلف بحساب عناصر الحقل المرجع لعام 1995 (Abou-Deeb, 1994) لجميع رقع خريطة سورية بمقياس 1/50000، ورسم خرائط لخطوط تساوي كل عنصر من عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع وحسب التغيرات القرنية خلال خمسين عام من عام 1945-1995 في مدينتي دمشق واللاذقية.

ثم قام المؤلف بحساب عناصر الحقل المرجع لبداية عام 2001 (Abou-Deeb, 2001) لجميع رقع خريطة سورية بمقياس 1/50000 كما حسب التغيرات القرنية خلال القرن الماضي في مدينتي دمشق وحلب ودير الزور.

وأخيراً قام المؤلف بحساب عناصر الحقل المرجع لبدائية عام 2008 (Abou-Deeb, 2009) لجميع رقع خريطة سورية مقياس 1/50000 (الجدول 1-4) ورسم خرائط لخطوط تساوي كل عنصر من عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع (الأشكال 1-4 إلى 7-4).

نورد فيما يلي شرحاً مختصراً لتغيرات مركبات الحقل المغنطيسي الأرضي في سورية لبيان قيم هذه التغيرات على نطاق مساحة محددة.

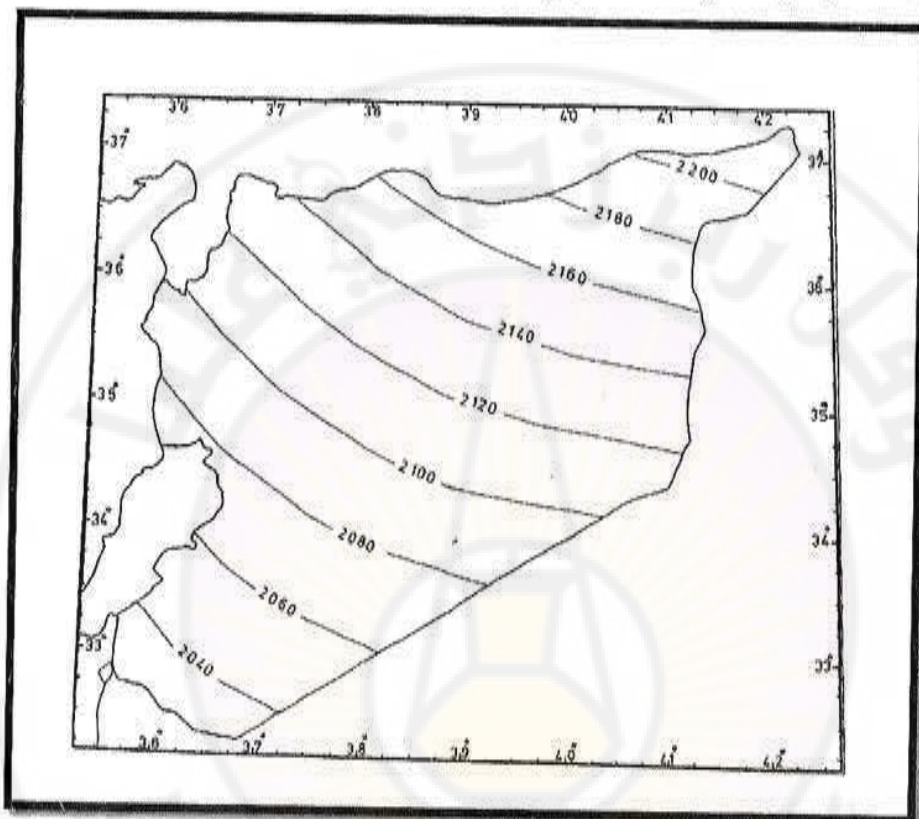
المركبة الشمالية X: تتناقص قيم المركبة الشمالية باتجاه الشمال (الشكل 1-4)، إذ تبلغ قيمتها العظمى 29664 nT في مركز رقعة صلخد الواقعة في جنوب سورية، وقيمتها الصغرى 26941 nT في مركز رقعة دير الغصين الواقعة في الشمال الشرقي من سورية بفارق مقداره 2723 nT.



الشكل (1-4): خريطة خطوط تساوي شدة المركبة الشمالية (X) للحقل المغنطيسي الأرضي المرجع في 2008/1/1.

(حسب أبوديپ 2009 (Abou-Deeb, 2009))

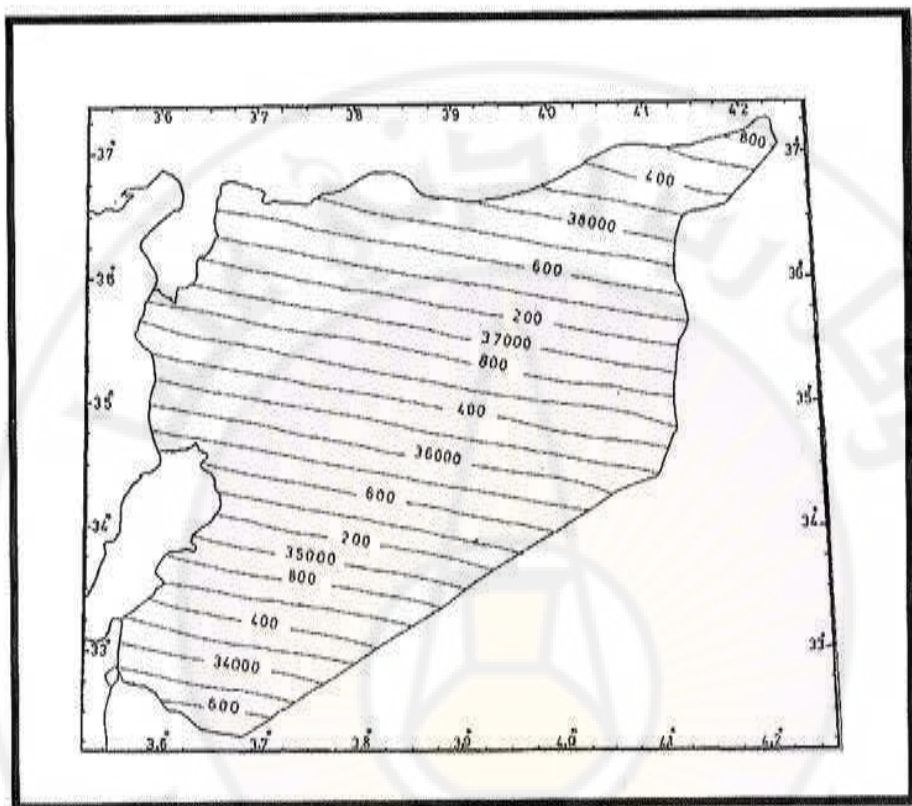
المركبة الشرقية Y: تتزايد قيم المركبة الشرقية باتجاه الشمال (الشكل 4-2)، إذ تبلغ قيمتها الصغرى 2032 nT في مركز رقعة صلخد، وقيمتها العظمى 2213 nT في مركز رقعة المالكية الواقعة في الشمال الشرقي من سورية بفارق مقداره 181 nT.



الشكل (4-2): خريطة خطوط تساوي شدة المركبة الشرقية (Y) للحقل المغناطيسي الأرضي المرجع في
2008/1/1.

(حسب أبوديب 2009 (Abou-Deeb)

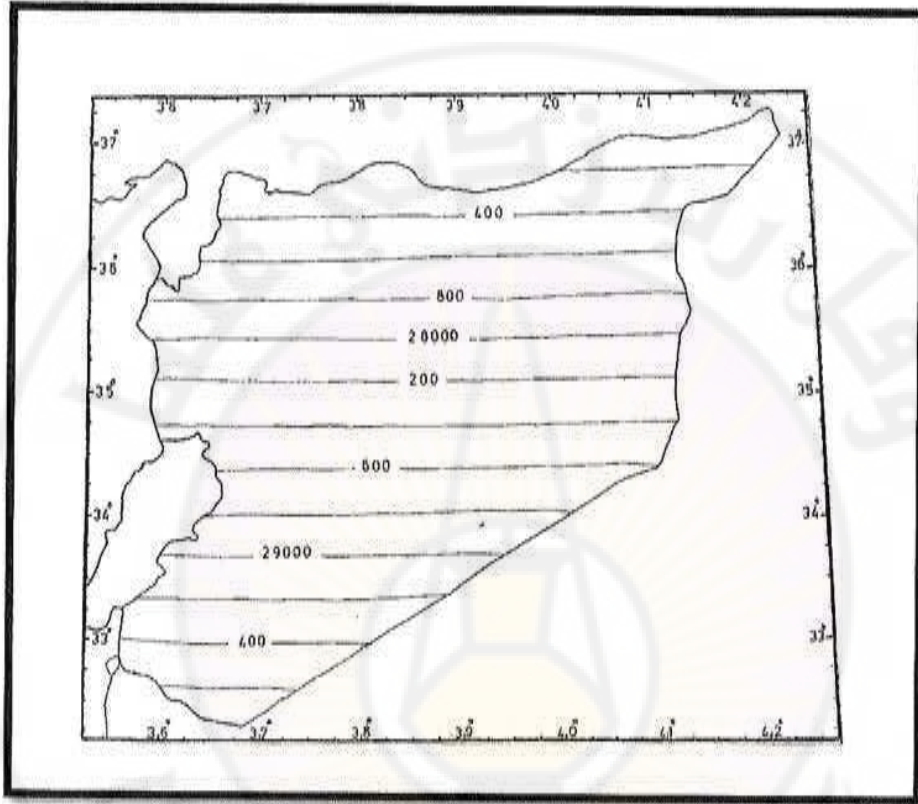
المركبة الشاقولية Z: تتزايد قيم المركبة الشاقولية باتجاه الشمال (الشكل 4-3)، إذ تبلغ قيمتها الصغرى 33470 nT في مركز رقعة صلخد، وقيمتها العظمى 38808 nT في مركز رقعة المالكية بفارق مقداره 5338 nT.



الشكل (4-3): خريطة خطوط تساوي شدة المركبة الشاقولية (Z) للحقل المغناطيسي الأرضي المرجع في 2008/1/1.

(حسب أبوديب 2009, Abou-Deeb)

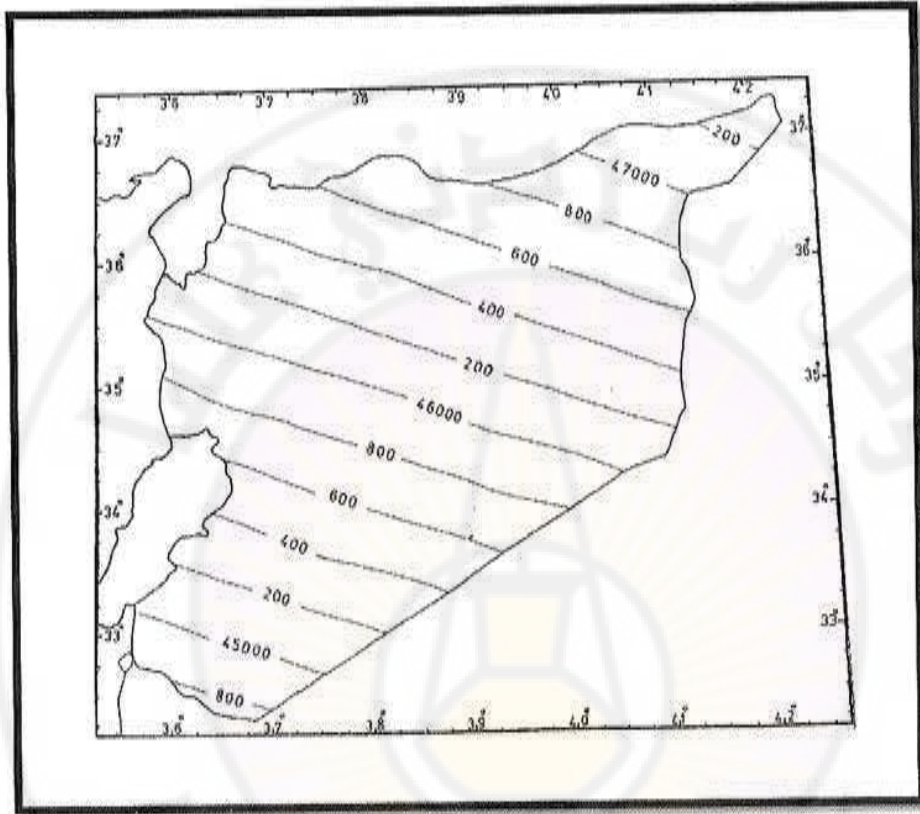
المركبة الأفقية H : تتناقص قيم المركبة الأفقية باتجاه الشمال (الشكل 4-4)، إذ تبلغ قيمتها العظمى 29733 nT في مركز رقعة صلخد، وقيمتها الصغرى 27032 nT في مركز رقعة دير الغصين بفارق مقداره 2701 nT .



الشكل (4-4): خريطة خطوط تساوي شدة المركبة الأفقية (H) للحقل المغناطيسي الأرضي المرجع في
2008/1/1.

(حسب أبوديب 2009 (Abou-Deeb)

الحقل الكلي T: تتزايد قيم الحقل الكلي باتجاه الشمال (الشكل 4-5)، إذ تبلغ قيمته الصغرى 44770 nT في مركز رقعة صلخد وقيمته العظمى 47296 nT في مركز رقعة المالكية بفارق مقداره 2526 nT.

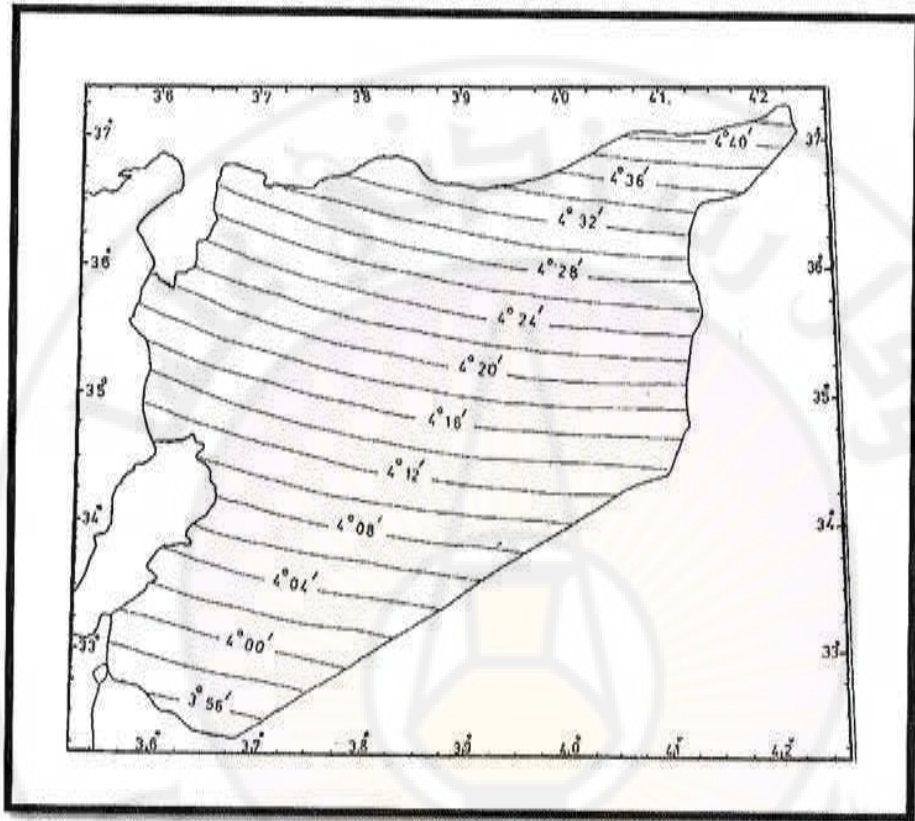


الشكل (4-5): خريطة خطوط تساوي شدة الحقل الكلي (T) للحقل المغناطيسي الأرضي المرجع في 2008/1/1.

(حسب أبوديپ 2009, Abou-Deeb)

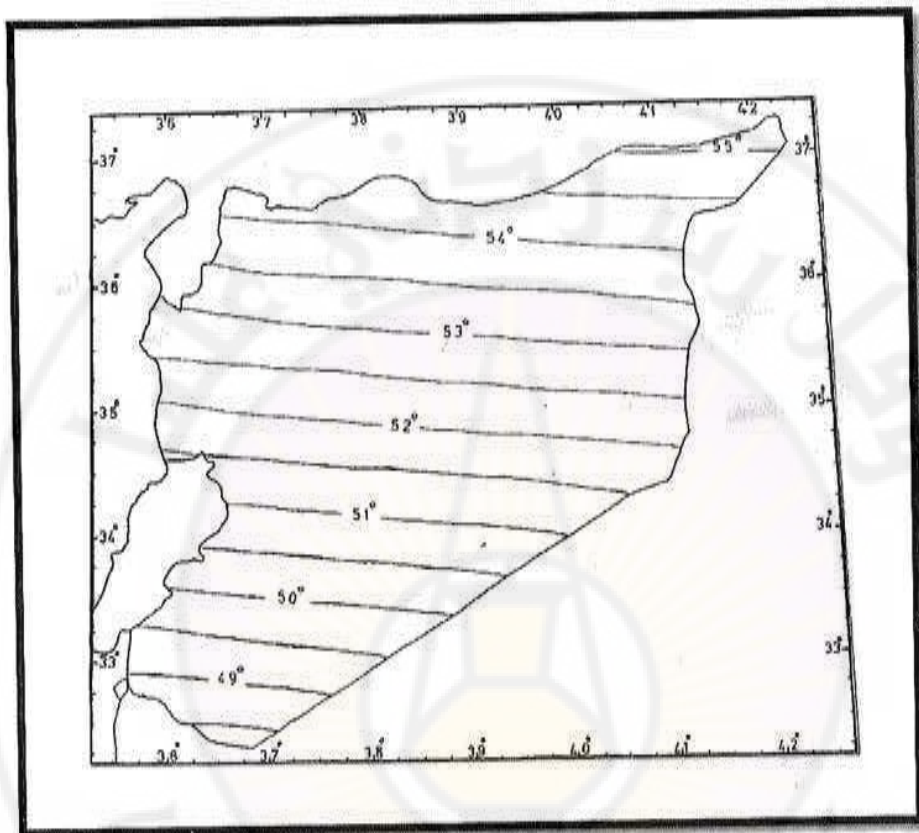
الانحراف المغنطيسي D: تتزايد قيم الانحراف المغنطيسي باتجاه الشمال (الشكل 4-4)

(6)، إذ تبلغ قيمته الصغرى $3^{\circ} 55' 09''$ في مركز رقعة صلخد، وقيمته العظمى 41° في مركز رقعة المالكية بفارق مقداره $46' 34''$.



الشكل (4-6): خريطة خطوط تساوي قيمة الانحراف (D) للحقل المغنطيسي الأرضي المرجع في 2008/1/1.
(حسب أبوديب 2009, Abou-Deeb)

الميل المغنطيسي I: تتزايد قيم الميل المغنطيسي باتجاه الشمال (الشكل 4-7)، إذ تبلغ قيمته الصغرى $48^{\circ} 23' 00''$ في مركز رقعة صلخد، وقيمته العظمى $55^{\circ} 08' 14''$ في مركز رقعة المالكية بفارق مقداره $6^{\circ} 45' 14''$.



الشكل (4-7): خريطة خطوط تساوي قيمة الميل (I) للحقل المغنطيسي الأرضي في 2008/1/1.
(حسب أبوديب 2009, Abou-Deeb)

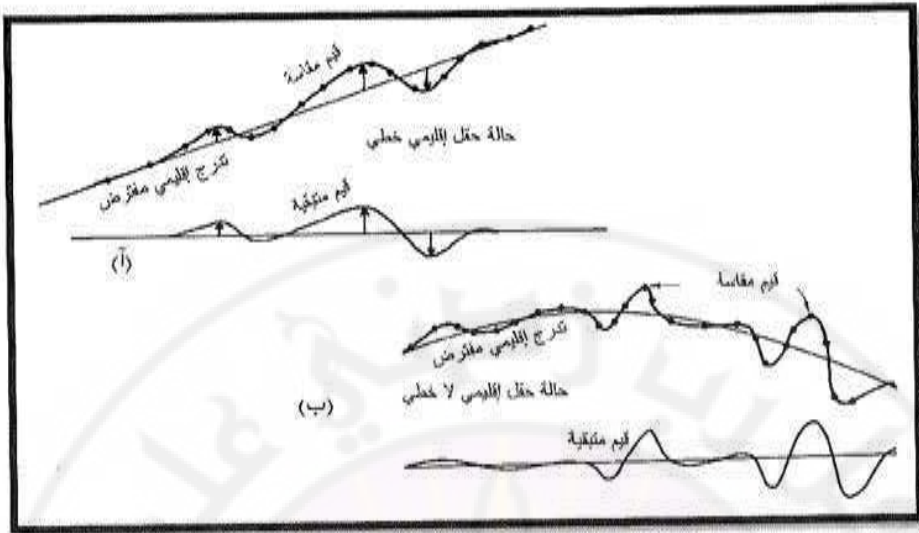
الجدول (1-4): عناصر الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع في 2008/1/1 لمراكز بعض رفع خريطة سورية
1/50000

(حسب أبوديب، 2009 (Abou-Deeb)

IGRF 2005 EARTH MAGNETIC FIELD IN nT FOR SYRIAN MAP 1/50000						
MAP NO.	MAP NAME	F	Z	H	D	I
1A	DEIR EL-GHUSEN	47265	38773	27032	4:41:32	55: 6:59
1B	AL-MALIKIYEH	47296	38808	27035	4:41:43	55: 8:14
2A	RASUL-EIN	46975	38322	27167	4:37: 6	54:39:58
2B	TELL ABOU-RASEIN	47002	38355	27168	4:37:25	54:41:19
2C	IZAMIYEH	47031	38389	27170	4:37:42	54:42:38
2D	TELL KHANZIR	47060	38423	27172	4:37:57	54:43:58
2E	TELL DAHAB	47089	38457	27174	4:38:12	54:45:17
2F	HASSAWIYEH	47118	38491	27176	4:38:24	54:46:35
2G	MAHATET QUBOR EL BID	47146	38524	27178	4:38:35	54:47:53
2H	BAB EL-HADID	47175	38558	27180	4:38:45	54:49: 9
2I	YARABIYEH	47203	38591	27182	4:38:53	54:50:25
3A	RAJOU	46482	37619	27302	4:27:55	54: 1:47
3B	AAFRIN	46520	37662	27307	4:28:36	54: 3:19
3C	AAZAZ	46542	37691	27304	4:29:11	54: 4:46
3D	ER-Ra'i	46570	37726	27305	4:29:47	54: 6:14

4-2-4- مستوى الصفر Zero level:

في معظم الحالات، تظهر الشواذ المحلية المطلوبة مترابكة فوق الشواذ الإقليمية العريضة غير المطلوبة والناجمة أساساً عن الحقل المغنطيسي الأرضي الرئيس أو المصادر البعيدة جداً أو العميقة جداً. يتم عادة التلخيص من هذه الشواذ الإقليمية كما في الشكل (4-8) تبعاً لحالة الحقل الإقليمي إن كان خطياً (الشكل 4-8-أ) أو لا خطياً (الشكل 4-8-ب)، وفي كل الحالات يتم تحديد الحقل الإقليمي برسم خط مستقيم أو خط محدب واسع عبر المنطقة غير الشاذة مغنطيسياً، ثم تطرح قيم الحقل الإقليمي من القيم المقاسة في كل نقطة ويرسم الناتج ليمثل الشواذ المحلية المطلوبة (القيم المتبقية في الشكلين 4-8-أ و ب).

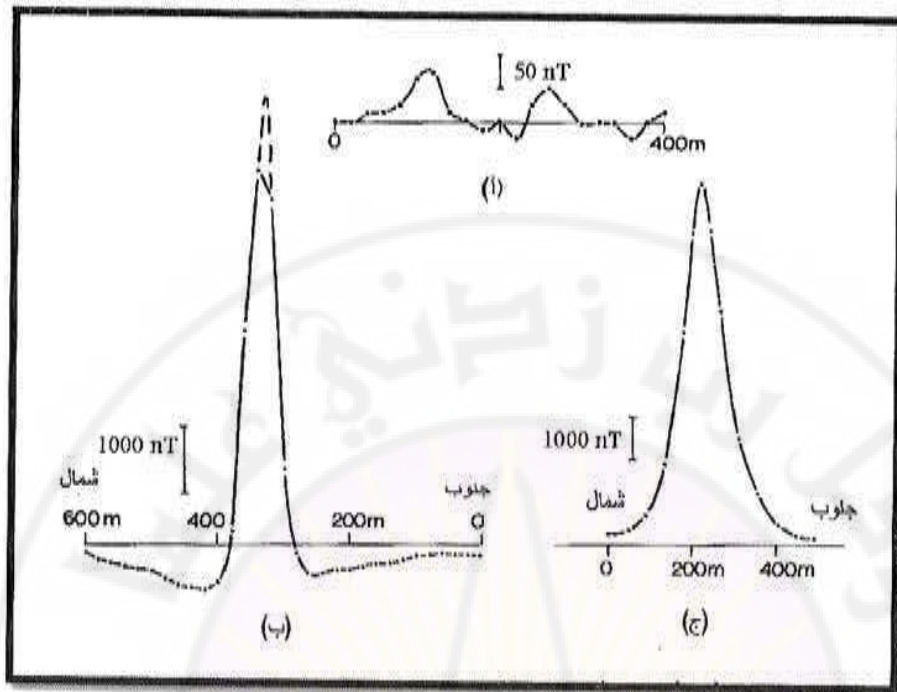


الشكل (8-4): التلخيص من الحقل المغناطيسي الإقليمي.

(حسب بريئر 1973)

وينتم بالطريقة نفسها تحديد ما يقال له "مستوى الصفر العملي" الذي يمثل الحقل المغناطيسي الإقليمي، ثم تصحح كل القراءات في نهاية العمل وذلك بجمع أو طرح كمية ثابتة، هي قيمة الصفر العملي، من القراءات. إذا بقيت شدة الحقل ثابتة أو متغيرة قليلاً لمسافة طويلة من منطقة ما (الشكل 4-9-1)، يمكن عندها عد وسطى الشدة المقاسة مستوى الصفر، ثم يعبر عن القيم المقاسة بموجبة أو سالبة بالنسبة إلى مستوى الصفر فيما إذا كانت أكبر أو أصغر منه. ويمكن عند ظهور شواذ عالية في منطقة نتيجة وجود أجسام مغناطيسية مطمورة استنتاج مستوى الصفر من أطراف منحنى الشواذ التي تكون قريبة من مستوى الصفر (الشكل 4-9-9-ب و ج).

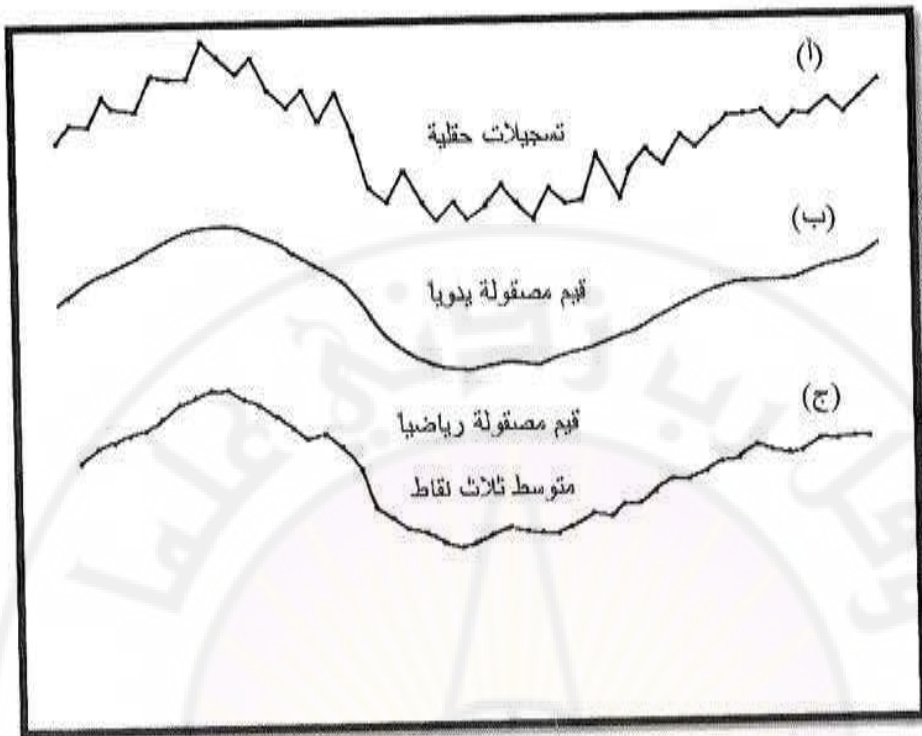
يعتمد تفسير الشواذ المغناطيسية كثيراً على مستوى الصفر العملي المختار، إذ أنه يحدد القيم العظمى الموجبة والقيم الصغرى السالبة، وبما أن هذه القيم الصغرى هي دليل على عمق السطح السفلي للجسم المغناطيسي المطمور وعلى ميل الجسم، فإن اختيار مستوى الصفر قد يؤثر بشكل كبير في تقدير امتداد الجسم نحو الأسفل (الفقرة 2-2).



الشكل (4-9): اختيار مستوى الصفر العملي.
(حسب باراسنيس 1975 Pararnis)

4-2-5- صقل منحنى الشواذ المغنطيسية Profile smoothing:

تظهر، بعد تطبيق التصحيحات اليومية والنظامية على النتائج الحقلية، تغيرات قصيرة الموجة (الشكل 4-10-أ) على الأمواج الطويلة على المنحنى مصدرها المقياس أو الأجسام المغنطيسية الصغيرة ضحلة العمق تجعل من الصعب تطبيق طرائق تفسير المعطيات، لذا يتم صقل منحنى الشواذ إما يدوياً بإمرار خط متوسط بين هذه القيم (الشكل 4-10-ب)، أو بتطبيق طريقة صقل رياضية تعتمد على إعطاء وزن للقيم المختلفة حول القيمة التي يجري صقلها، ثم حساب متوسط القيم وعد الناتج كقيمة مصقولة للقيمة المقاسة، وبعد رسم منحنى الشواذ بالقيم المصقولة (الشكل 4-10-ج) وبعدها يجري صقل يدوي لهذا المنحنى المصقول رياضياً.



الشكل (4-10): صفق منحنى الشواذ المغنطيسية.

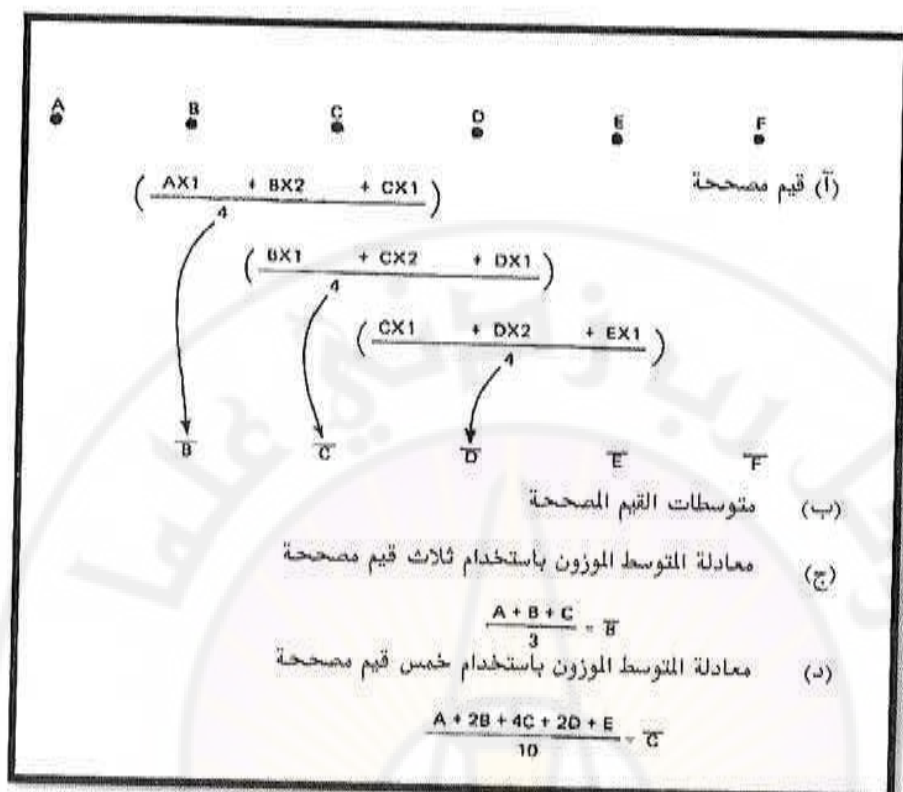
أ - المنحنى المرسوم من القيم المصححة، ويلاحظ وجود تغيرات طويلة الموجة وتغيرات قصيرة الموجة.

ب - المنحنى المصقول يدوياً.

ج - المنحنى المصقول رياضياً بأخذ المتوسط الموزون (weighed mean) لثلاث نقاط وفق المعادلة في الشكل (4-11).

(حسب برينر 1973 Breiner)

يظهر الشكل (4-11) طريقة حساب القيم المصقولة، أو ما يدعى متوسطات القيم المصححة (الشكل 4-11-ب)، لمجموعة من القيم الحقلية المصححة (الشكل 4-11-أ)، ومعادلة المتوسط الموزون باستخدام ثلاث قيم مصححة (الشكل 4-11-ج)، ومعادلة المتوسط الموزون باستخدام خمس قيم مصححة (الشكل 4-11-د).

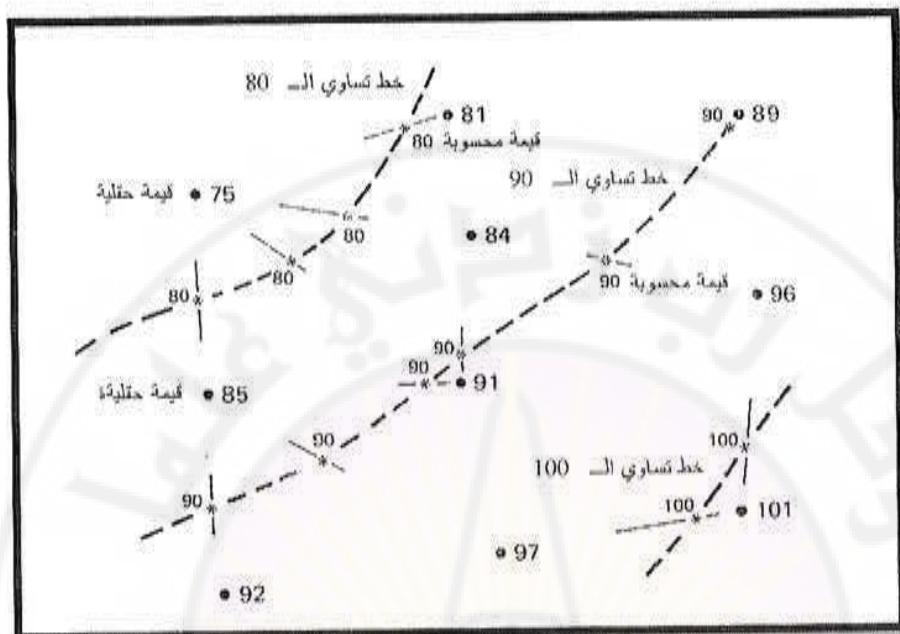


الشكل (4-11): المعادلات المطبقة لصقل منحنى الشواذ المغنطيسية رياضياً باستخدام المتوسط الموزون لثلاث قيم مصححة (ج) والمتوسط الموزون لخمس قيم مصححة (د).
(حسب برينر 1973 Breiner)

4-2-6- رسم خريطة خطوط تساوي الشدة المغنطيسية:

عندما يتم مسح منطقة، وليس القياس على مسار منفرد، توقع القيم المصححة على خريطة المنطقة المدروسة لرسم خريطة خطوط تساوي الشدة المغنطيسية وتطبق الأسس المطبقة لرسم خريطة طبوغرافية، فتحسب القيم في مواقع لم يتم فيها القياس فعلاً لتتكرر خطوط تساوي الشدة، مما يؤدي إلى إهمال تغيرات الشدة المغنطيسية الصغيرة الواقعة بين خطين متجاورين كما يبدو في الشكل (4-12)، إذ تمثل النقاط الغامقة القيم المقاسة في الحقل وتشير النجوم إلى

القيم المحسوبة من القيم المقاسة بحيث أمكن رسم خطوط تساوي الشدة المغناطيسية من مضاعفات العشرة.



• قيم حقيقية مقاسة.

* قيم محسوبة يدوياً.

--- خط تساوي الشدة عبر القيم المحسوبة.

الشكل (4-12): رسم خريطة خطوط تساوي الشدة المغناطيسية من قيم مبعثرة.

(حسب برينر 1973 (Breiner).

4-2-7- طرائق قياس قارية أخرى:

هنالك طريقتان تنتجان أحياناً في عمليات المسح القاري وهما:

1- طريقة القياسات البئرية.

2- طريقة القياسات الشعاعية.

1 - طريقة القياسات البئرية Borehole measurements:

لقد ازداد استخدام السبر البئري Well logging في السنوات الأخيرة في التنقيب عن النفط وبدرجة أقل عن الماء، وبقي استخدامه في مجال التنقيب عن الفلزات المغناطيسية محدوداً. يتم في السبر البئري قياس شدة الحقل المغناطيسي أو المتأثرية المغناطيسية للتشكيل الجيولوجي. قد تشير شواذ المتأثرية المغناطيسية على وجود فلزات مغناطيسية مثل المغنيتيت أو الإلمينيت أو البيروثيت.... الخ. وقد استخدم سجل التجاوب النووي البروتوني nuclear-magnetic-resonance log لدراسة الهيدروجين في سوائل التشكيل الجيولوجي وتقدير النفوذية في صخور الخزان.

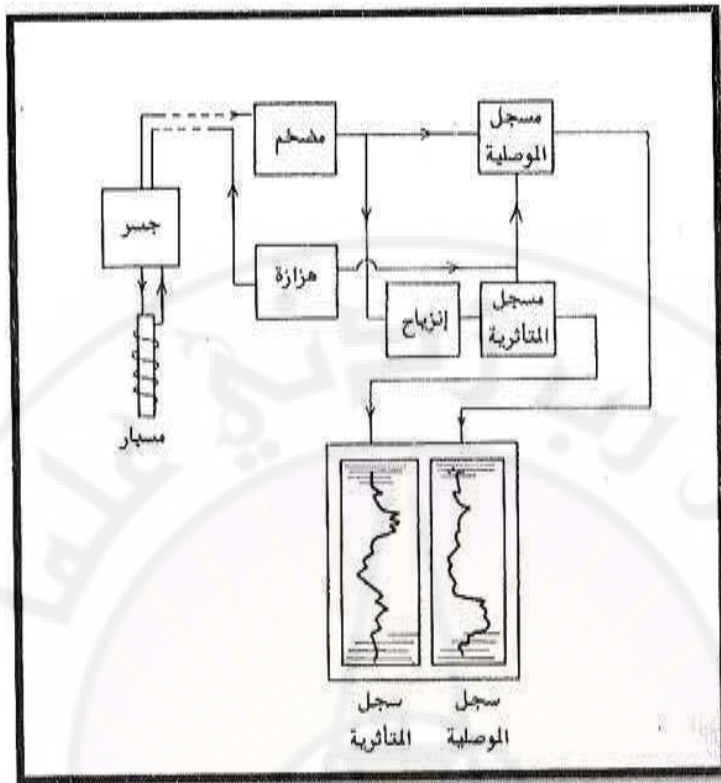
4- التسجيل البئري للحقل المغناطيسي: استخدم مقياس التدفق المغناطيسي ومقياس

الطنين النووي للتسجيل المغناطيسي البئري. كما استخدم التسجيل البئري للتدرج الشاقولي للحقل المغناطيسي ولتحديد عمق الشواذ المغناطيسية.

5- التسجيل البئري للمتأثرية المغناطيسية: يعد القياس المباشر للمتأثرية المغناطيسية ذا قيمة في تحديد التشكيلات الجيولوجية وتعالقها، مع أنها غير مفيدة في تمييز أنواع الصخور.

6- التسجيل البئري للطنين النووي البروتوني: يتم في هذا التسجيل إثارة البروتونات الحرة في سوائل التشكيل الجيولوجي، بشكل مماثل للبروتونات الحرة في الزجاج المائتة لمقياس الطنين النووي البروتوني، فتتوجه نوى الهيدروجين الحرة بتأثير الحقل المغناطيسي الشديد، وعند قطع هذا الحقل تدور هذه النوى لفترة قصيرة من الزمن حول اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي قبل أن تعود لتوجهها العشوائي. يؤدي هذا الدوران إلى توليد حقل مغناطيسي متناوب، وبالتالي إلى فرق كمون في وشيعة اللاقط. يؤدي هذا إلى تمييز نطاقات السائل وتحديد كمية السوائل الحرة في التشكيل الجيولوجي. كما يمكن تمييز النفط عن الماء بقياس زمن الاسترخاء الحراري thermal relaxation time.

وتشبه التجهيزات البئرية جهاز قياس المتأثرية الحقلية، كما في الشكل (4-13)، الذي يمثل مخططاً للسابرة البئرية المصممة لقياس المتأثرية المغناطيسية والموصلية الكهربائية.



الشكل (4-13): رسم تخطيطي لسابرة يدوية مصممة لقياس المتأثرية المغناطيسية والموصلية الكهربائية.
(حسب تelford وآخرون 1976)

يشير التماثل الذي يظهر أحياناً بين سجلات الكمون الذاتي (spontaneous potential (SP)) والمتأثرية المغناطيسية إلى أن النطاقات المسامية قد اغتنتت بتوضع فلزات الحديد في المباه الجوفية. لا يتأثر سجل المتأثرية المغناطيسية بمقاومية الطين ويمكن تطبيقه في الآبار الجافة.

يطبق التسجيل المغناطيسي البئر بثلاث طرائق:

- أ- قياس الشدة المغناطيسية الكلية على طول البئر،
- ب- قياس الشدة المغناطيسية في نقاط معينة من البئر،

ت- قياس ثلاث مركبات متعامدة للحقل المغنطيسي الأرضي لتحديد شعاع الحقل الكلي في نقاط معينة في البئر (تؤخذ عادة إحدى المركبات على طول البئر). وتعطي هذه الطريقة كمية من المعلومات أكبر مما تعطيه الطرائق الأخرى. لقد كتب القليل عن هذه الطريقة لكن تفسير المعطيات طور بشكل جيد في روسيا، لكن هنالك أشياء مهمة يجب ذكرها:

- 1 - يجب استخدام نموذج ثلاثي الأبعاد لتوجيه الأشعة من أجل الحصول على صورة أكثر وضوحاً من تفسير المعطيات.
- 2 - يؤدي اختراق البئر للنطاق مغنطيسي (مثل طبقات حاوية على المغنيتيت أو البيروتيت) إلى إعطاء صورة مضطربة عن المغنطيسية المتبقية والمتحيزة، كما يظهر في الشكل (4-27)، إذ تختلف شدة المغنطيسية واتجاهها عندما تخترق البئر الجسم المغنطيسي عن حالة مرور البئر بعيداً عن الجسم. بشكل عام، يبدو أن هذه الطريقة قادرة على إغناء الطرائق الجيوفيزيائية الأخرى، خاصة عند محاولة تحديد مكان جسم مغنطيسي لم تمر به البئر الاستكشافية.

2- طريقة القياسات الشعاعية Vector measurements method:

استخدمت هذه الطريقة قبل تطوير مقاييس المركبة الشاقولية الدقيقة في المناجم السويدية حيث T, Z, H المركبات الأفقية والشاقولية وشدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي على التوالي. تهدف هذه الطريقة لتحديد مركبة شواذ الحقل الكلي H_T الناتجة عن وجود جسم مغنطيسي مطمور، ويتم ذلك على مرحلتين:

- 1- قياس H_H المركبة الأفقية الإضافية الناتجة عن جسم مغنطيسي مطمور.
 - 2- قياس H_Z المركبة الشاقولية الإضافية الناتجة عن جسم مغنطيسي مطمور.
- يتم تحديد H_H كما يلي: نرسم مستقيماً PQ (الشكل رقم 4-14) بمقياس مناسب (1 سم لكل 1000 نانوتسلا) يمثل شدة المركبة الأفقية للحقل المغنطيسي الأرضي. يشكل هذا المستقيم زاوية (α) مع اتجاه ثابت محدد على الطبيعة، وتمثل الزاوية (α) انحراف البوصلة في المستوى الأفقي بالنسبة للاتجاه الثابت في محطة مرجع خالية من الاضطرابات المغنطيسية.

(حسب باراسنیس 1975, Parasnis)

167

عليها بأخذ الفرق بين (Z) المأخوذة في نقطة المرجع و (Z₁) المقاسة في نقطة القياس وبإكمال متوازي الأضلاع (PVWS) نحصل على (PW) الذي يمثل ($\Delta T = H_T$) التي تهدف الدراسة إلى إيجادها.

يعطي انحراف (H_T) عن الاتجاه الثابت بالزاوية (LPS) ويعطي ميلها عن المستوى الأفقي بالزاوية (SPW).

بشكل عام لا تقع الأشعة (H_T) المأخوذة في نقاط معينة على طول مسار القياس بمستوى شاقولي واحد ولهذا فليس من الممكن الحصول على صورة كافية لأشعة الشواذ دون رسم نموذج ثلاثي الأبعاد (فراغي).

لكن قد يكون من المفيد عد نموذج ثنائي الأبعاد بإسقاط الأشعة على مستوى شاقولي يمر بمسار القياس، كما في حالة إسقاط $PW = H_T$ على هذا المستوى الشاقولي (PW). كما يمكن الحصول على (PW) بإسقاط $H_T = PS$ على مسار القياس فيعطى المسقط (PX)، ثم نرسم (PW) الذي هو محصلة PX و PV.

4-3- المسح المغنطيسي الجوي Aeromagnetic survey:

تم تطبيق المسح المغنطيسي الجوي على نطاق واسع بعد تطوير مقاييس الحقل الكلي التي استخدمت في البداية بالأمور العسكرية. وقد أجريت تجارب المسح المغنطيسي الجوي لأول مرة عام (1921) بواسطة مقاييس محمولة على منطاد، ثم استخدم مقياس التدفق المغنطيسي للكشف عن الغواصات في الحرب العالمية الثانية، واستخدم مقياس الطنين النووي البروتوني في المسح الجوي في أواسط الخمسينيات من القرن الماضي. كان معظم المسح المغنطيسي الذي غطى مساحات واسعة من العالم مسحاً جويّاً للحقل المغنطيسي الكلي. يجري المسح المغنطيسي الجوي للمسح الاستطلاعي، والتنقيب الفلزي، ودراسة عمق سطح الركيزة البلورية، واحتمال وجود التراكيب الملائمة لتجمع النفط. لكن تعترضه مشكلتان أساسيتان هما تحديد موقع الطائرة بالنسبة للأرض وثبات ارتفاع الطائرة وحركتها في أثناء القياس.

4-3-1- تحديد موقع الطائرة في المسح الجوي أو السفينة في

المسح البحري:

من المهم تحديد موقع الطائرة في أثناء المسح المغنطيسي الجوي وموقع السفينة في أثناء المسح المغنطيسي البحري بدقة، وقد استخدم لهذا الغرض التصوير الفوتوغرافي في بدايات تطبيق المسح المغنطيسي الجوي، ثم أدخل عدد من الطرائق الإلكترونية، وسنستعرض فيما يلي كلاً من هذه الطرائق باختصار:

أ- التصوير الفوتوغرافي:

استخدم التصوير الفوتوغرافي في المسح المغنطيسي الجوي في البداية عند وجود معالم طبوغرافية واضحة في المنطقة المدروسة مثل الجبال والوديان وغيرها، لكن من المستحيل تطبيقه فوق الصحاري والبحار والغابات والمناطق المغطاة بالثلج التي لا تبدي معالم طبوغرافية متميزة وواضحة. عند تطبيقه يتم، على فيلم التصوير نفسه، تسجيل زمن النقاط الصورة وارتفاع الطائرة وشدة الحقل المغنطيسي المقاس.

ب- الطرائق الإلكترونية:

تلك عدد من الطرائق الإلكترونية التي تستخدم لهذا الأمر في المسح الجوي وبعضها يطبق في المسح المغنطيسي البحري.

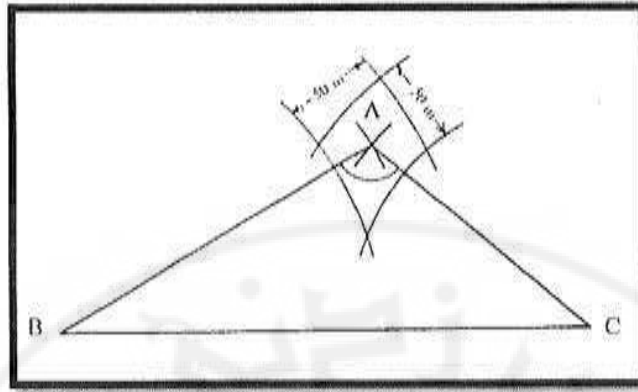
1- طريقة الرادار Radar method:

اشتقت كلمة الرادار من التسمية الإنجليزية (Radio Detection And Ranging)، وتعني "النقاط راديوي وتحديد مجال" وهو منظومة تستخدم الأمواج الكهرومغناطيسية، خاصة أمواج الراديو، لتحديد مجال جسم ثابت أو متحرك وارتفاعه وجهته وسرعة الأجسام المتحركة مثل الطائرات والمركبات الفضائية وتشكيلات الطقس والأرض، وفي الجيولوجيا تم تطوير الرادار الناقب الأرضي (ground-penetrating radar) لمسح الصخور تحت السطحية. يتألف الرادار من مرسل (صحن أو هوائي) يرسل نبضات أمواج راديو (radio waves) أو أمواج ميكروية (microwaves) فتعكس وتتناثر على أي جسم يقع في مسارها،

فيعود جزء يسير من طاقة الموجة إلى مستقبل (صحن أو هوائي) موضوع في نفس موقع المرسل. تحدد هذه المعلومات موقع الجسم الذي تنعكس عليه الأمواج، لذا استخدم في الأمور العسكرية والمدنية الجوية والبحرية والقارية، منها تحديد أبعاد الأجسام البحرية بما فيها السفن الأخرى والشواطئ والجزر والعوامات. استخدم الرادار العادي ضمن مجال تردد 3000-10000 كيلوهرتز لتحديد موقع السفينة في المسح البحري عند توافر عواكس معروفة على الشاطئ، ونظراً لندرة العواكس في المسح البعيد عن الشاطئ يتم وضع عوامات عاكسة للأمواج الرادارية محددة المواقع بدقة. تعطى المسافة بين العاكس والسفينة أو الطائرة بنصف جداء زمن رحيل-عودة الموجة وسرعة الموجة.

2 - طريقة شوران Shoran method:

كلمة شوران مختصر للتعبير الإنجليزي "Short Range Navigation" وتعني "الملاحة قصيرة المدى"، وهي منظومة ملاحية تستخدم في الطائرات والقذائف الموجهة والسفن، إذ ترسل إشارات راديو من الطائرة أو السفينة إلى زوج من الأجهزة المرسلات المستجيبة (transponders) الأرضية معلومة الموقع بدقة، فتسمح الإشارات العائدة بتحديد موقع الطائرة أو السفينة. هذه الطريقة معدلة من طريقة الرادار وتعتمد على مبدأ خط نظر (Line of Sight)، أي أنها لا تنعكس على طبقات الغلاف الجوي، وبالتالي لا تستطيع مساييرة تحذب سطح الأرض لأنها تستخدم ترددات عالية جداً في المجال 225-450 مليون هرتز. وتوضع هذه الأجهزة في أماكن محددة في أثناء المسح الجوي أو البحري وجهاز على الطائرة أو السفينة يقوم بإرسال إشارة لاسلكية ليلتقطها الجهازان الموجودان على الأرض، وبعد فترة تأخير زمنية قصيرة محددة الطول بدقة تعاد الإشارة إلى الجهاز المرسل المستجيب الموجود على الطائرة أو السفينة، ثم يحدد الزمن المقطوع باتجاه واحد بطرح فترة التأخير من الزمن الكلي وقسمة الباقي على اثنين وبضرب الناتج بسرعة الإشارة اللاسلكية، يتم الحصول على المسافة الفاصلة بين الطائرة أو السفينة والجهاز المرسل المستجيب. تعد نقطة تقاطع الدائرتين اللتين مركزاهما مواقع الأجهزة المرسلات المستجيبة (C و B في الشكل 4-15) على أنها مكان وجود الطائرة أو السفينة في ذلك الوقت (A في الشكل 4-15).



الشكل (4-15): تحديد مكان الطائرة أو السفينة (A) بطريقة شوران بالنسبة لجهاز الإرسال الثابتين على الأرض B و C.

(حسب تelford et al., 1976 وآخرين)

استخدمت هذه الطريقة أولاً في قاذفات القنابل في الحرب الكورية في بداية الخمسينيات من القرن الماضي. وفي السبعينيات من القرن الماضي استخدمت على نطاق واسع في استكشاف النفط والغاز، وذلك لتحديد أماكن وجود سفن المسح السيسمي ومواقع أجهزة حفر الآبار النفطية حول العالم. يتم ذلك بتجهيز قارب يحمل جهاز مرسل مستجيب ليرسل إشارات الراديو إلى هوائيات عالية (27 متراً) موضوعة على بعد عدة أقدام من نقاط جيوديزية على الشاطئ. حققت هذه الطريقة دقة كبيرة في تحديد الموقع على بعد 320 كيلومتراً عن الهوائيات.

3- طريقة التردد الراديوي Radio-frequency method:

واجه استخدام طريقة شوران في المسح المغناطيسي بعض المصاعب، كان أهمها: 1- ضرورة تحقق مبدأ خط نظر بين الطائرة أو السفينة والجهاز المرسل المستجيب على الأرض، 2- استخدام ترددات طريقة شوران في الأمور العسكرية، مما استدعى الحصول على ترخيص عند استخدامها في المسح المغناطيسي الجوي أو البحري. لذا، ابتداء من عام 1955، استبدلت طريقة شوران بطريقة التردد الراديوي التي لا تتطلب تحقق مبدأ خط نظر، ثم إنها تستخدم مجال التردد بين 1500-4000 كيلوهرتز، لترسل الأمواج اللاسلكية فوق سطح الأرض أو قريباً من السطح، وتعتمد على المبدأ التالي:

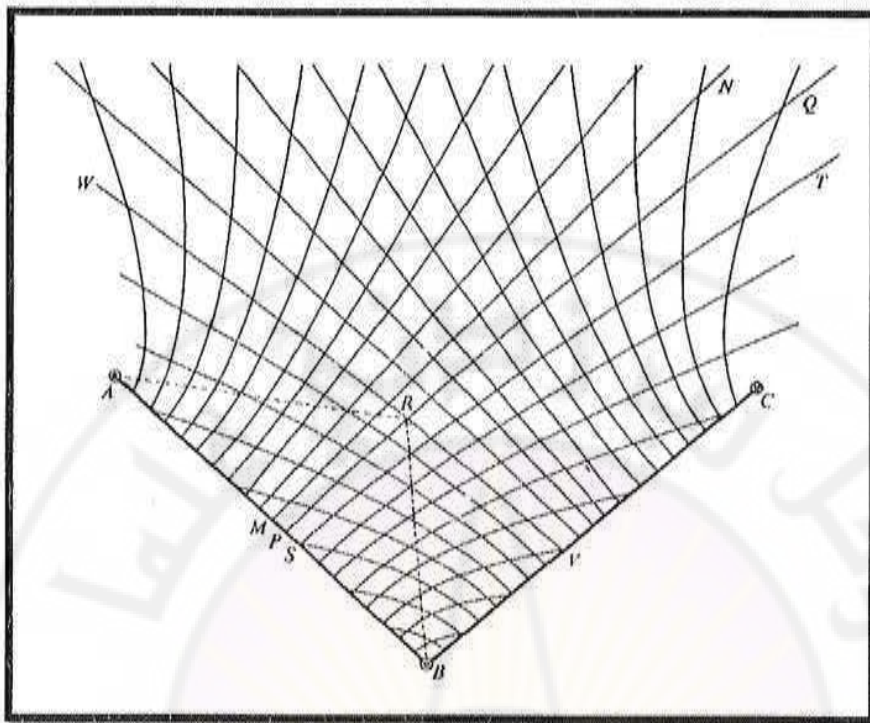
تعتمد الطريقة في تصميمها على وجود زوجين من الأجهزة اللاسلكية المرسلة الثابتة على الأرض (A و B) و (B و C) وجهاز استقبال في الطائرة أو السفينة بقياس فرق الطور بين الأمواج الواردة من كل زوج من الأجهزة الثابتة. فإذا أرسل الجهازان (A و B) في الشكل (4-16) نبضة لاسلكية في لحظة زمنية واحدة فيمكن لجهاز الاستقبال (R) الموضوع في الطائرة أو السفينة قياس فرق المسافة بين الجهاز المتحرك وكل من الجهازين الثابتين. يظهر المحل الهندسي (Locus) للنقاط ذات الفرق الثابت بالمسافة بشكل قطع زائد (hyperbola) محرقاه منطبقان على الجهازين الثابتين. كما يبدو في الشكل (4-16) حيث يمثل (PQ) قطعاً زائداً يمر من الجهاز المتحرك (R). كذلك الأمر يمكن تحديد قطع زائد آخر (WV) يمر من الجهاز المتحرك ناتج عن الجهازين الثابتين (B و C)، أي أن الجهاز المتحرك R واقع على تقاطع قطعين زائدين (WV) و (PQ). إذا كان الجهاز المتحرك في نقطة M أو على طول المنصف MN فلن يعطي عداد مقارنة الطور (phase-comparison meter) أي فرق في الطور. وإذا كانت $MP = \frac{\lambda}{2}$ (طول الموجة اللاسلكية) فلن يعطي عداد مقارنة الطور أي فرق في الطور في نقطة P أيضاً، فإذا تحرك الجهاز المتحرك باتجاه ثابت لفرق الطور فهذا يعني أنه يتحرك وفق PQ. وبشكل عام فإن الجهاز المتحرك يتحرك ليكون:

$$RA - RB = n\lambda$$

حيث:

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

وبالتالي فإنه يتبع مجموعة من القطوع الزائدة الناتجة عن الجهازين A و B ومجموعة أخرى من القطوع الزائدة الناتجة عن الجهازين B و C. يقوم عداد فرق الطور بتحديد موقع الأجهزة الثابتة A و B و C وبالتالي حساب موقع الطائرة أو السفينة.



الشكل (4-16): القطوع الزائدة الناتجة عن زوجي الأجهزة المرسلة (B و A) و (C و B) التي تستخدم لتحديد موقع الطائرة أو السفينة.

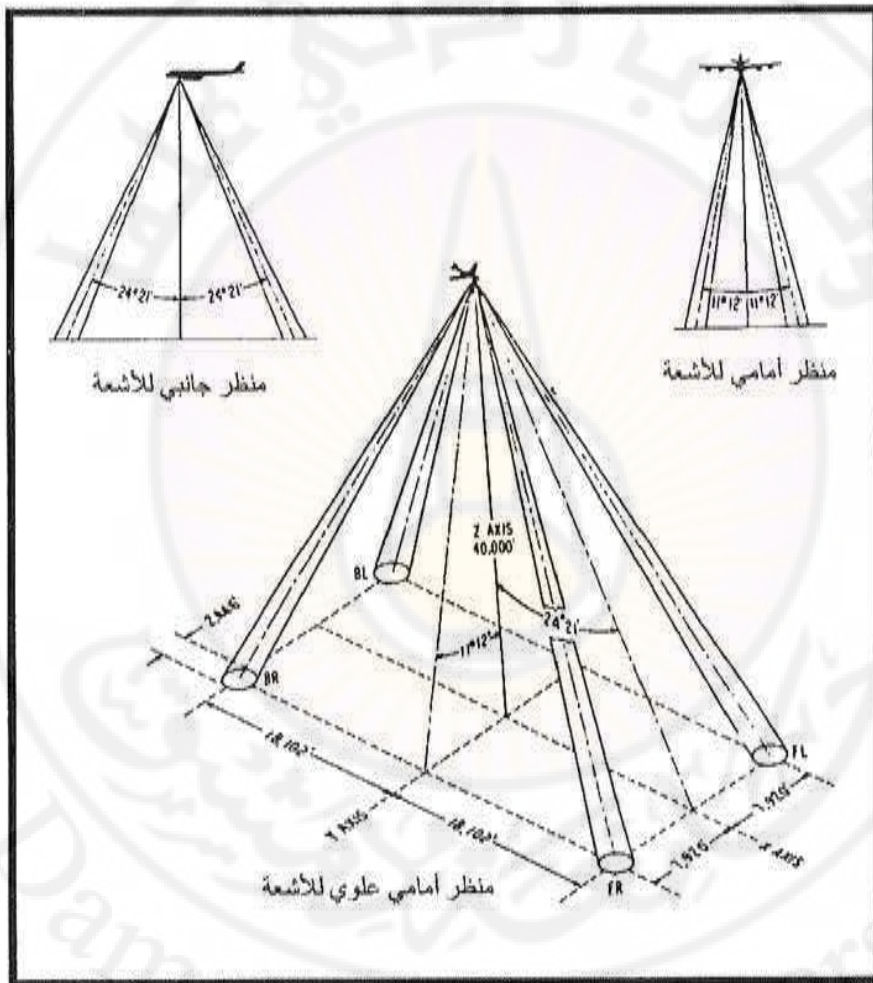
(حسب تelford وآخرين 1976)

4- طريقة دوبلر Doppler method:

سميت هذه الطريقة تأثير دوبلر نسبة إلى الفيزيائي النمساوي كريستيان دوبلر، الذي اقترح عام 1842 حدوث تغير في تردد الموجة بالنسبة لمتحرك يمر قريباً من منبع الأمواج. يُسمع هذا التغير عند اقتراب سيارة تطلق بوقاً، وعند مرورها ثم مغادرتها لمكان مستمع واقف بجانب الطريق، إذ يزداد التردد عند الاقتراب بينما يبقى ثابتاً عند المرور مقابل المستمع ثم يقل بعد المغادرة. كما يعتمد هذا التغير بالتردد على اتجاه حركة منبع الأمواج. يتم تقدير مكان الأرض بالنسبة للطائرة بواسطة جهاز يرسل أشعة مرسلة من الطائرة، إذ تقوم معظم أجهزة دوبلر بإرسال ثلاثة أو أربعة أشعة موجية متواصلة بتردد 8.8 جيجا هرتز.

تقريباً (الشكل 4-17). فعند إرسال أربعة أشعة بوجه شعاعان أمام الطائرة وشعاعان خلفها وتعود الإشارة المرسلة بعد الانعكاس إلى المرسل مع تغير بالتردد حسب سرعة الأرض بالنسبة للطائرة.

يحلل حاسوب دوبلر الأشعة المنعكسة، ومن خلال تكامل تغيرات التردد لهذه الأشعة الأربعة، يمكن للحاسوب أن يحدد المسافة التي قطعتها الطائرة أفقياً وشاقولياً فوق سطح الأرض. ويعطي مؤشر "مراقب" مسار الطائرة وسرعة الرياح وسرعة الأرض بالنسبة للطائرة.

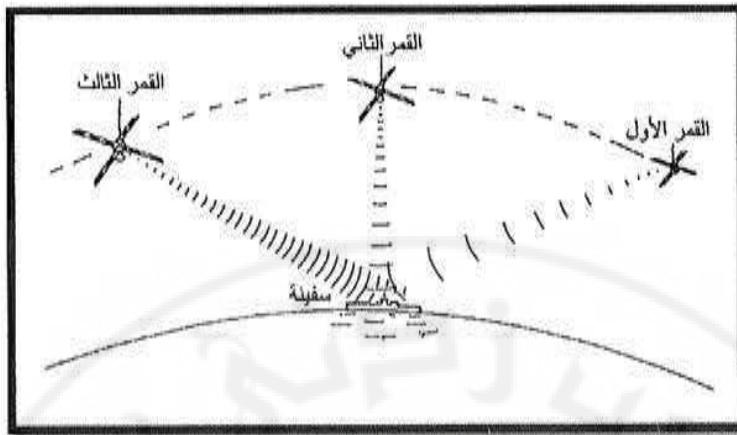


الشكل (4-17): توزيع الأشعة الرادارية في طريقة دوبلر.
(حسب دوبرين 1976 (Dobrin))

5 - طريقة الأقمار الصناعية :Satellites navigation method

تدعى هذه الطريقة "نظام تعيين المواقع ((Global Positioning System (GPS) وتعمل بوساطة منظومة أقمار صناعية ملاحية تحدد الموقع والمعلومات الزمنية على سطح الأرض أو قريباً من السطح في أي طقس. يقتضي ذلك توفر خط نظر (line of sight) - لايعيقه أي حاجز - إلى أربعة أو أكثر من الأقمار الصناعية العاملة في المنظومة. يتلقى كل مستقبل على سطح الأرض المعلومات التي يبثها كل قمر وتتضمن الرسائل التالية:

- 1- زمن بث الرسالة.
 - 2- معلومات مدار القمر الدقيقة.
 - 3- وضع المنظومة العام بما فيها معلومات مدارات منظومة الأقمار.
- يقوم المستقبل بتحديد موقعه من تحديد الزمن الذي قطعتة كل من الإشارات المرسلة من هذه الأقمار، ثم بحسب البعد عن كل قمر بضرب الزمن بسرعة الإشارة. ثم تستخدم الأبعاد عن الأقمار مع مواقع الأقمار نفسها بعملية تثليث لحساب موقع المستقبل ويتم عرضه على شاشة المستقبل حسب منظومة الإحداثيات المطلوبة (مثلاً: خط العرض وخط الطول) مع الارتفاع عن سطح البحر.
- تستخدم هذه الطريقة الأمواج اللاسلكية التي ترسلها الأقمار الصناعية في المجال الترددي 150-400 مليون هرتز. نظراً لأن القمر الصناعي يحتاج لـ 100 دقيقة للدوران حول الأرض فإنه يظهر لمدة 18 دقيقة على أي نقطة واقعة تحت مداره (من الأفق للأفق) (الشكل 4-18)، ويرسل المعلومات عن موقعه كل دقيقتين. تخضع الترددات المقاسة على السفينة إلى انزياح دوبلر، نظراً لتحرك القمر بالنسبة للسفينة. وهكذا يتم حساب الاختلاف بين خط طول وخط عرض القمر وخط طول وخط عرض السفينة من انزياح ترددات دوبلر. يقوم حاسوب على السفينة بتحليل هذه المعلومات جميعها وقيمة انزياح ترددات دوبلر مع سرعة السفينة لتحديد موقع السفينة على سطح الأرض.



الشكل (4-18): مواقع الأقمار الصناعية بالنسبة للسفينة في طريقة الأقمار الصناعية.
(حسب تelford et al., 1976 وآخرين)

6 - نظام تعيين المواقع التفاضلي

Differential Global Positioning System (DGPS):

طلورت هذه الطريقة لتعزيز نظام تعيين المواقع (GPS) وزيادة الدقة في تحديد الموقع التي كانت بحدود 15 متراً، وكذلك التخلص من تأثير مصدر الأخطاء في التحديد، وهو تأخر البث في الغلاف المتأين (ionosphere) الذي يمكن حسابه وإجراء تصحيح له مما يسمح بتحسين تحديد الموقع بدقة 5 أمتار. تستخدم محطات مرجعية أرضية لتبث الفروق بين المواقع المعينة بواسطة منظومات الأقمار الصناعية والمحطات ثابتة المواقع. تبث هذه المحطات في مجال التردد فوق العالي (Ultra High Frequency (UHF)). تشير هذه الطريقة بشكل محدد إلى منظومات تبث التصحيحات من أجهزة إرسال أرضية (ground-based transmitters)، فمثلاً يدير خفر السواحل الأمريكية (United States Coast Guard) وخفر السواحل الكندية (Canadian Coast Guard) منظومة في أمريكا وكندا تبث على ترددات راديوية طويلة الموجة (Long wave radio Frequencies) بين 285 إلى 325 كيلوهرتز، وهي الترددات التي تستخدم عادة من قبل راديو البحرية وتبث عادة بالقرب من الممرات البحرية الرئيسة والموانئ.

تدير أستراليا منظومتين من تعيين المواقع التفاضلي؛ إحداهما للملاحة البحرية بشكل رئيس وتبث بنطاق الأمواج الطويلة، والأخرى للمسح القاري والملاحة القارية وتبث

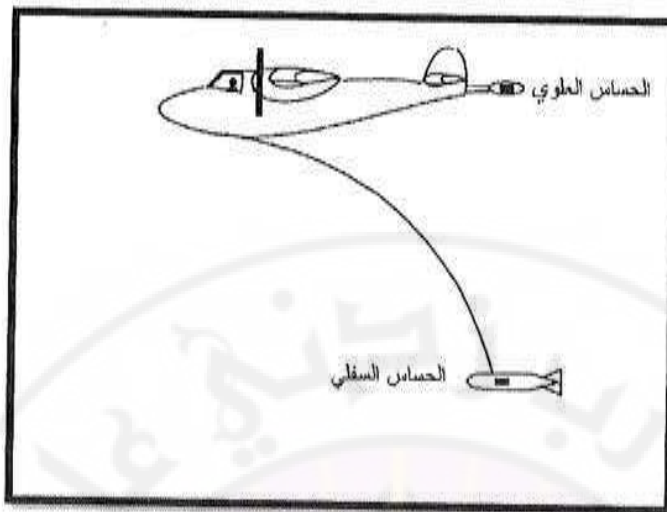
التصحيحات بنطاق تضمين التردد التجاري (Commercial Frequency Modulation (FM)). تقوم أستراليا حالياً ببناء منظومتين من تعيين المواقع التفاضلي للملاحة الجوية، وكلاهما سبئان التصحيحات

بوساطة نطاق التردد العالي جداً (Very High Frequency (VHF)). وهناك منظومة أخرى مشابهة تبت التصحيحات من مجموعة أقمار صناعية بدلاً من أجهزة الإرسال الأرضية تدعى منظومة الزيادة القائمة على الأقمار الصناعية (Satellite Based Augmentation System). إلى جانب تأخر البث في الغلاف المتأين المذكور سابقاً، تعترض منظومة الأقمار الصناعية عدة أخطاء منها الخطأ في تحديد موقع القمر الصناعي وانزياح ساعة القمر الصناعي. لذا تعتمد دقة تحديد الموقع على كمية التصحيحات المرسل إلى قمر تعيين المواقع التفاضلي، بحيث يمكن الوصول إلى دقة أقل من 10 سنتيمتر.

4-3-2- تحديد مكان حساس المقياس المغنطيسي على الطائرة:

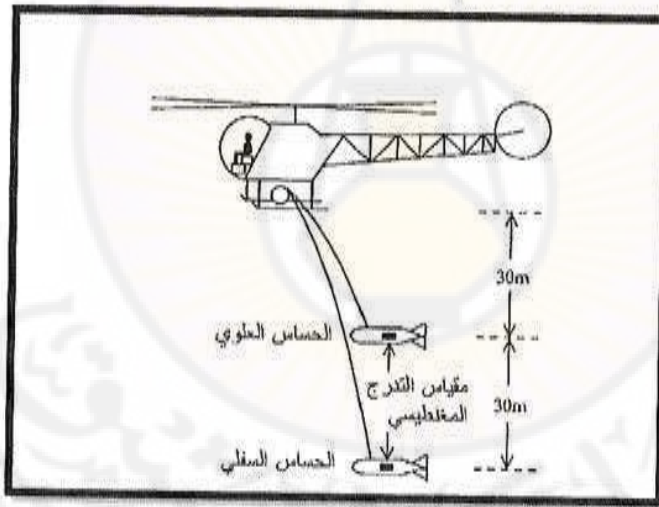
يقتضي وضع الحساس في المسح المغنطيسي الجوي التخلص من تأثير المواد المغنطيسية الموجودة على الطائرة. إن الطريقة الأكثر استخداماً هي جر الحساس المغنطيسي بوساطة حبل يتراوح طوله بين 25-30 متراً (الشكل 4-19) وعندها يفرض أن تأثير الطائرة مهمل على هذا البعد. أما الطرائق الأخرى فتتخصص في وضع الحساس على نهاية الجناح أو على ذيل الطائرة أو داخلها، ويجب في الحالات الأخيرة إدخال تعديل على النتائج بحيث يتم التخلص من تأثير الطائرة.

تستخدم أحياناً طائرة الهليكوبتر لحمل مقياس التدفق المغنطيسي أو مقياس الطنين البروتوني (الشكل 4-20) وتفضل الهليكوبتر نظراً لإمكانية تثبيت الارتفاع وتثبيت الطائرة أثناء القياس.



الشكل (4-19): استخدام طائرة عادية أثناء المسح المغناطيسي الجوي، وأماكن وضع حساس مقياس المغناطيسية على الطائرة.

(حسب لوري 2007 Lowrie)



الشكل (4-20): استخدام طائرة هليكوبتر أثناء قياس التدرج المغناطيسي الشاقولي في المسح المغناطيسي الجوي.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

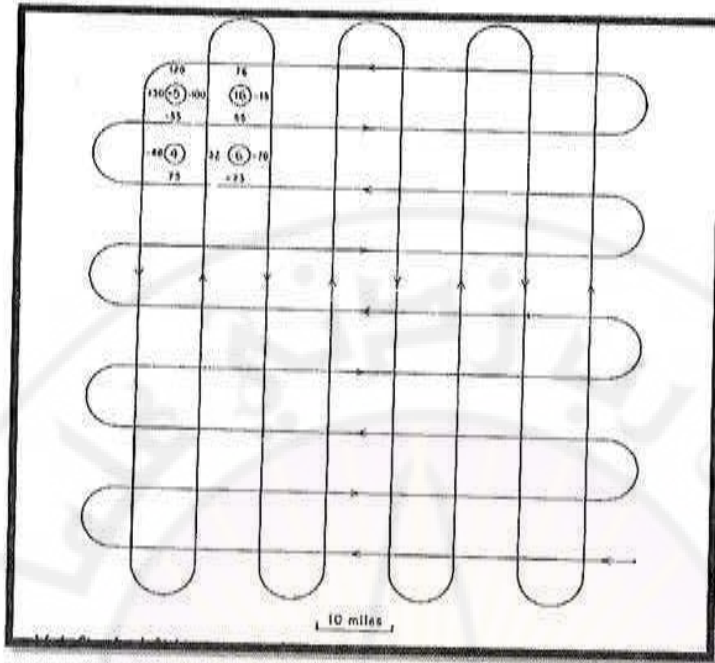
4-3-3- تسجيل معطيات المسح المغنطيسي الجوي:

يتم تسجيل الشدة المغنطيسية إما بشكل منحني على شريط ورقي أو على شريط تسجيل مغنطيسي أو بوساطة عداد ضوئي، بحيث يتم تنقيب النتائج في الوقت نفسه على شريط أو تطبع بشكل عددي. لقد أدخلت حديثاً تقنية الحاسوب بحيث يتم تسجيل المعطيات كلها على قرص أو في ذاكرة الحاسوب.

يتم في أثناء المسح الجوي تسجيل التغيرات اليومية بوساطة محطة مغنطيسية ثابتة على الأرض قريبة من المنطقة الممسوحة، ولكن لا تعتمد نتائج المحطة الثابتة لإجراء التصحيحات اليومية نظراً لاختلاف التغيرات من منطقة لأخرى وخاصة ما بين محطة أرضية ومقياس جوي واقع على ارتفاع معين، لكن يستفاد من تسجيل التغيرات اليومية لاكتشاف بدء عاصفة مغنطيسية حتى يتم إيقاف المسح في أثناء حدوث العاصفة.

4-3-4- اختيار مسار الطائرة وارتفاعها:

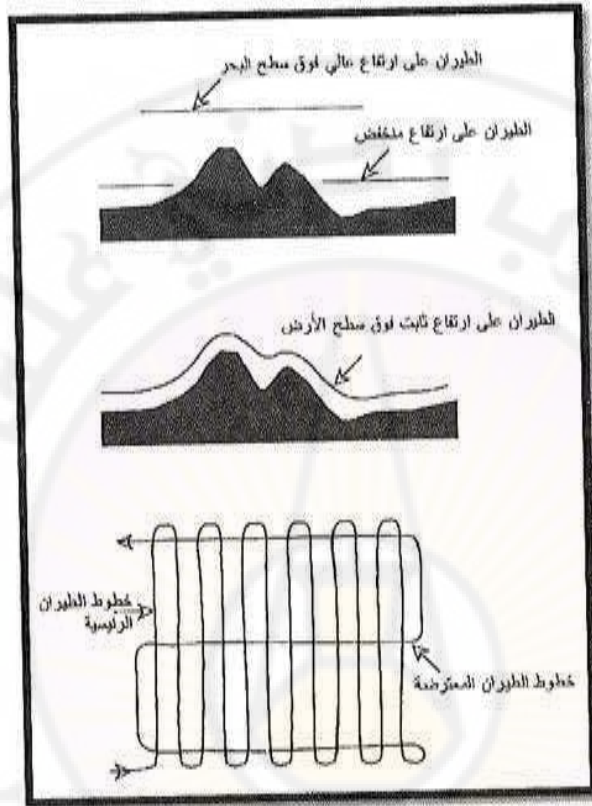
بقتضي اختيار مسار الطائرة وارتفاعها دراسة طبوغرافية المنطقة الممسوحة والأخذ بعين الاعتبار الهدف من المسح، بحيث يحقق تباعد المسارات هذا الهدف ويتم مسح كامل المنطقة رغم وجود اختلافات في الارتفاعات الطبوغرافية. يتم عادة الطيران على شبكة من المسارات الرئيسية المتوازية بتباعد ثابت (أي بمسافة شبكية ثابتة) بقدر الإمكان، وتكون هذه المسارات متعامدة تقريباً مع الاتجاه السائد للصخور الرسوبية أو التراكيب الجيولوجية فيما لو كانت معروفة مسبقاً. يتم ربط هذه المسارات الرئيسية بمسارات معترضة أي متعامدة معها وبتباعد أكبر كثيراً من تباعد المسارات الرئيسية، بحيث يتراوح طول المستطيل الصغير من الشبكة بحدود 10×20 كم. لكن قد يوحد تباعد المسارات لأسباب معينة كما في الشكل (4-21) حيث أخذ تباعد المسارات الرئيسية 10 أميال.



الشكل (4-21): مخطط لمسارات شبكة طيران بتباعد ثابت مقداره 10 أميال للمسح المغناطيسي الجوي.
(حسب دوبرين 1976 Dobrin)

يمكن أن يتغير ارتفاع الطائرة من 60 متراً إلى عدة آلاف من الأمتار، ويتعلق تحديد الارتفاع بتباعد مسارات الشبكة، ففي المسح الجوي من أجل التنقيب المنجمي يؤخذ الارتفاع بحدود 150 متراً عندما يكون التباعد ربع ميل، أما عند التنقيب عن النفط حيث تأتي الشواذ من صخور الركيزة التي تقع على عمق أكبر من مصدر الشواذ الناتجة عن أجسام قابلة للتنقيب المنجمي فليس هنالك سبب مهم للحفاظ على ارتفاع ثابت، لكن يفضل المحافظة على ارتفاع ثابت، وقد استخدم مؤخراً الطيار الآلي للمحافظة على الارتفاع والاتجاه. على العموم يمكن القول أن الارتفاع يتراوح بين 250-450 متراً فوق سطح الأرض. أما في حال وجود فروق كبيرة في الارتفاعات الطبوغرافية يمكن تقسيم المنطقة إلى عدة أقسام حسب تغير الارتفاعات ليتم الطيران على ارتفاع ثابت فوق كل قسم ويتم تراكب مسارات الطيران على حدود الأقسام المختلفة لتغطية المساحة الكلية للمنطقة (الشكل 4-22). ثم ترسم خطوط تشير إلى الحدود الفاصلة بين

الأقسام المختلفة المتجاوزة، وتختلف القيم المقاسة على ارتفاعات مختلفة بتأثير التدرج الشاقولي للحقل المغناطيسي الأرضي، الذي يؤخذ بالحسبان عند ضرورة رسم خريطة مغناطيسية مستمرة، ويتم في هذه الحالة إدخال تصحيح الارتفاع المذكور سابقاً.

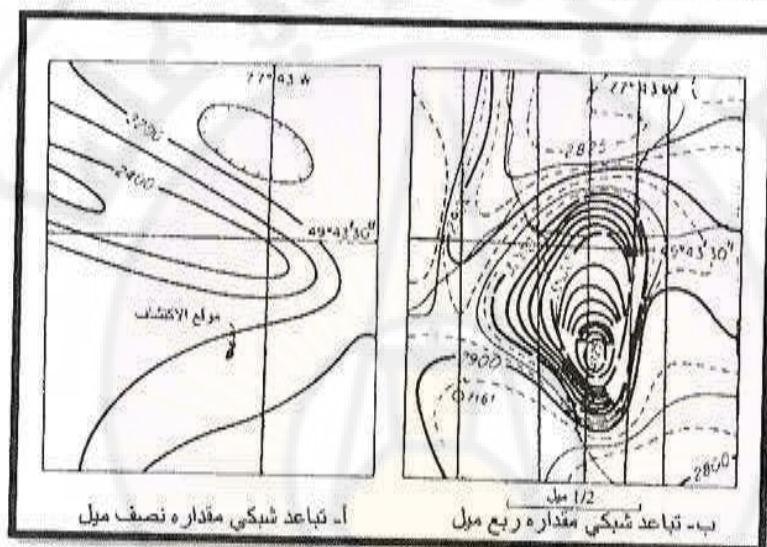


الشكل (4-22): الطرائق المتبعة في اختيار ارتفاع مسار الطائرة في المسح المغناطيسي الجوي ومخطط لمسارات شبكة طيران حقيقية.

(حسب لوري 2007 Lowrie)

عند القيام بمسح مغناطيسي جوي مفصل لمنطقة ما يتم تحديد تباعد المسارات بناء على الدراسة الأولية لشكل الجسم المغناطيسي وقياسه وعمقه، فإذا كان لدينا جسم مغناطيسي صغير مثل جسم أسطوانتي شاقولي أو جسم معدني صغير له شكل كروي يجب أن تكون شواذ المغناطيسية دائرية الشكل، فلو أخذنا تباعد المسارات مساوياً عمق الجسم فسنجد مساراً واحداً

على الأقل له سعة شواذ لا تقل عن نصف سعة القيمة العظمى. لقد طبعت جداول إحصائية تعطي تباعد مسارات الشبكة اللازمة لالتقاط شواذ ذات حجم معين. في الحقيقة إن صورة شواذ معينة قد تتغير عند تغيير التباعد كما في الشكل (4-23) الذي يعطي الشواذ المغناطيسية فوق جسم معدني يدعى ماتاغامي Mattagami في منطقة كوبيك بكندا، والذي لم يظهر عند أخذ تباعد المسارات مساوياً لنصف ميل (الشكل 4-23-أ) بينما أعطى تغيير التباعد لربع ميل شكلاً أفضل للشواذ (الشكل 4-23-ب)، وبناء على الشكل الأخير للشواذ تم اكتشاف أكبر توضعات للكواريت المعدنية في كندا.

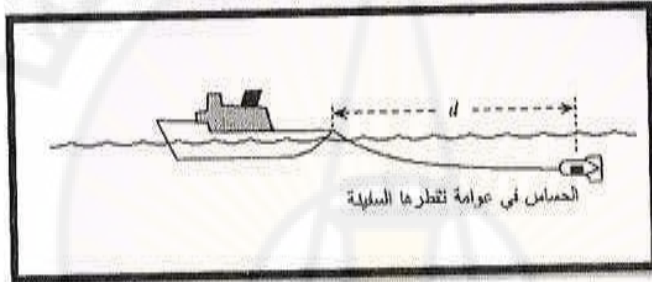


الشكل (4-23): تغير خريطة شواذ المغناطيسية مع تغير تباعد مسارات شبكة المسح الجوي.
 أ- خريطة الشواذ في حال تباعد الشبكة بمقدار $\frac{1}{2}$ ميلاً فوق منطقة ماتاغامي في كوبيك بكندا.
 ب- خريطة الشواذ في حال تباعد الشبكة بمقدار $\frac{1}{4}$ ميلاً.
 (حسب دوبرين 1976 Dobrin)

4-4- المسح المغناطيسي البحري Marine magnetic survey:

يفرض احتواء جسم السفينة على كمية كبيرة من الحديد والأجسام المغناطيسية وضعاً خاصاً عند إجراء المسح البحري، فيجر الحساس على مسافة بعيدة عن السفينة (150-300

متراً حسب حجم السفينة) لمنع تأثير هذه الأجسام المغناطيسية، وهذا بدوره يُختم وضع الحساس في غلاف عازل للماء على عوامة تؤمن عمقاً بحدود 15 متراً من سطح الماء (الشكل 4-24). يستخدم مقياس الطنين النووي البروتوني أو مقياس التدفق المغناطيسي المصمم للمسح البحري أو أي مقياس مصمم لمقياس الحقل الكلي، ويتم إرسال التسجيلات من الحساس إلى المقياس بواسطة سلك يمر بمحاذاة حبل الجر. يحتوي حساس المقياس على وشيعة حلقة لإلغاء الضجيج، كما أن حبل الجر مصمم ليبقى الحساس قريباً من سطح الماء أثناء الحركة لتجنب العوائق ضحلة العمق. كانت المشكلة الأكثر أهمية في المسح المغناطيسي البحري هي تحديد موقع السفينة في البحر وخاصة في الأماكن البعيدة عن الشاطئ، لذا ورد في فقرة تحديد موقع الطائرة في المسح المغناطيسي الجوي الطرائق التي تطبق في تحديد موقع السفينة في المسح المغناطيسي البحري.

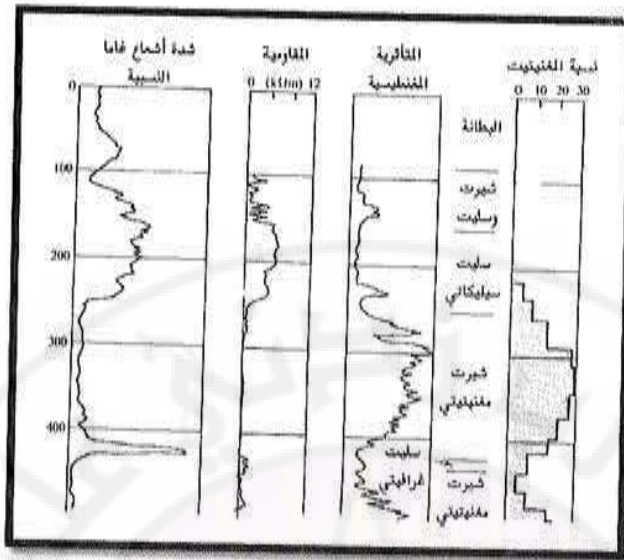


الشكل (4-24): وضع الحساس بالنسبة للسفينة في المسح المغناطيسي البحري.
(حسب لوري 2007 Lowrie)

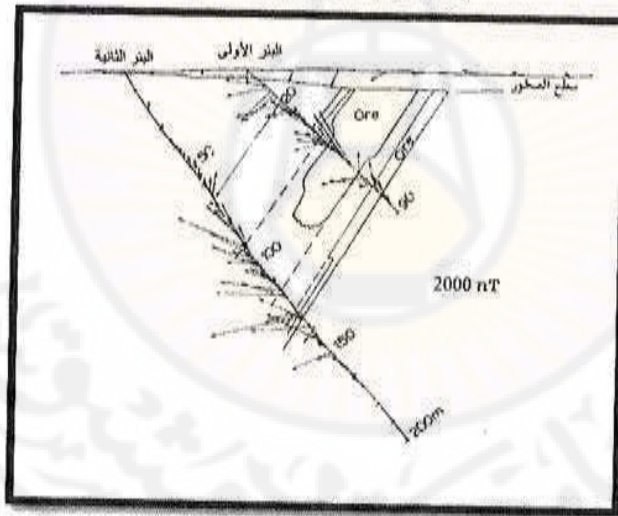
4-5- أمثلة على الأنواع المختلفة للمسح المغناطيسي:

4-5-1- مثال على تطبيق طريقة القياسات البرية:

يعطي الشكل (4-25) سجلات برية لشدة إشعاع غاما النسبي relative γ -ray intensity log والمقاومية الكهربائية electrical resistivity log والمتأثرية المغناطيسية magnetic susceptibility log والنسبة المئوية للمغنيتيت magnetite percentage في صخور تشكيل جيولوجي يحتوي على السليت slate والشيرت chert (Telford et al., 1976). يبين سجل شدة إشعاع غاما النسبي السليت بوضوح بسبب وجود الصوديوم K(K) بينما تبين منحنيات المتأثرية المغناطيسية الشيرت بسبب غناه بالمغنيتيت.



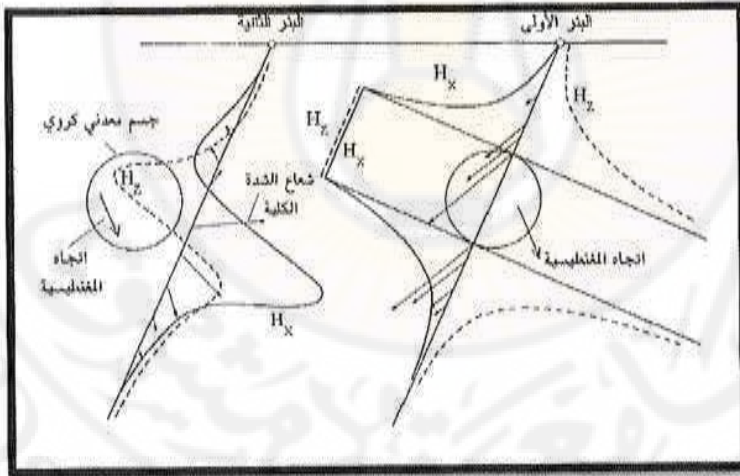
الشكل (4-25) سجلات بئرية لشدة إشعاع غاما النسبي والمقاومة الكهربائية والمتأثرية المغناطيسية والنسبة المئوية للمغنيتيت في صخور التشكيل الجيولوجي.
(حسب بيكيت 1970 Peckett)



الشكل (4-26): تطبيق طريقة القياسات البئرية وتعيين أشعة شواذ المغناطيسية على طول بئر في كانكبرغ بالسويد.

(حسب باراسنيس 1975 Parasnis)

يظهر الشكل (4-26) مثلاً على أشعة شواذ المغنطيسية المقاسة في ثمر تمر عبر طبقة حاملة للبيروتيت في كانكبرغ Kankberg في السويد. حيث تمر البئر الأولى عبر الجسم الفلزي في حين تمر البئر الثانية تحت الجسم الفلزي وعلى يساره. جرت محاولة لتفسير القياسات البئرية (الشكل 4-27) بفرض أن الجسم الفلزي هو جسم كروي متجانس المغنطيسية تمر البئر عن يمينه (الشكل الأيسر) أو تمر البئر في وسطه (الشكل الأيمن). ففي الشكل الأيسر يظهر منحنى الشدة المغنطيسية المقاسة باتجاه محور البئر (الشكل الأيمن). وفي الشكل الأيمن يظهر منحنى الشدة المغنطيسية المقاسة باتجاه محور البئر وواقع في مستوى الصفحة. وفي الشكل الأيمن يلاحظ أن شدة المغنطيسية على طول محور البئر (H_z) تزداد بشكل مستمر عند الاقتراب من الجسم المغنطيسي ثم تنقطع عند الدخول في الجسم، ثم تتوجه بالاتجاه المعاكس ضمن الجسم وتأخذ قيمة ثابتة لا تتغير، ثم تعود إلى التناقص بالاتجاه الأول عند الخروج من الجسم، كذلك تأخذ شدة المغنطيسية المأخوذة بالاتجاه المتعامد مع محور البئر (H_x) قيمة ثابتة ضمن الجسم. هكذا يظهر أن الصورة مختلفة تماماً في حالة تقاطع البئر مع الجسم المغنطيسي عنها في حالة عدم التقاطع. يظهر في الشكل (4-27) اتجاه الأشعة المغنطيسية ويظهر الخلاف بين الحالتين.



الشكل (4-27): تطبيق طريقة القياسات البئرية على جسم مغنطيسي كروي متجانس وتظهر حالتين:

الشكل الأيسر: تمر البئر على يمين الجسم ويظهر تغير المركبتين H_x , H_z .

الشكل الأيمن: تمر البئر في وسط الجسم ويظهر تغير المركبتين H_x , H_z .

(حسب باراسنيس 1975 Parasnisi)

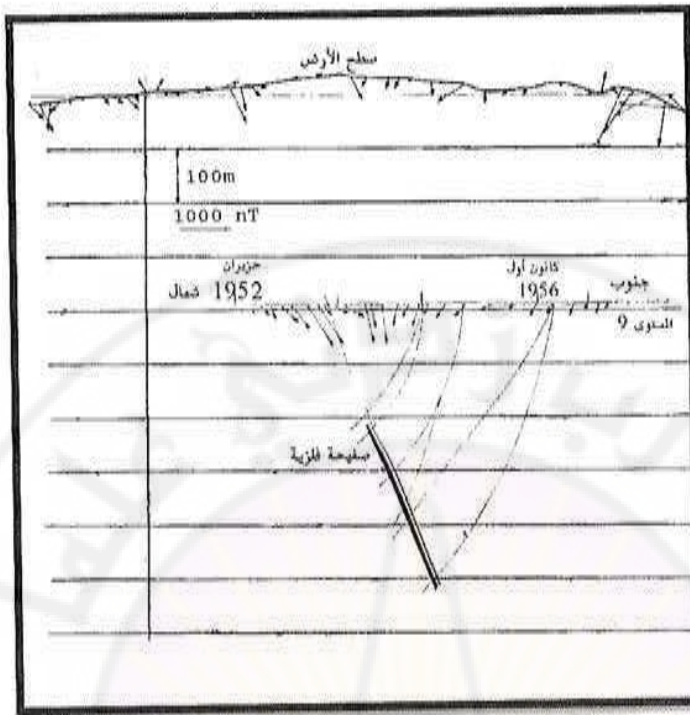
4-5-2- مثال على تطبيق طريقة القياسات الشعاعية:

أظهر التعدين في منجم فوسدالين (Fosdalen iron mine) في النرويج أن فلزات خام الحديد تتوضع بشكل شرائح رقيقة وطويلة، وهناك على الأقل شريحتان يقع سطحاهما العلويان على عمق 800م تحت سطح الأرض وموقع إحدى هاتين الشريحتين غير محدد بدقة، لذا قام لوغن (Logn, 1964) بين كانون الثاني 1952 وكانون الثاني 1954 بتطبيق طريقة القياسات الشعاعية على طول نفق منجمي حفر بين عامي 1952 و 1954 (المقطع السفلي من الشكل 4-28). كان الهدف هو التحديد الدقيق لمكان الشريحة المجهولة لتقصير النفق قدر الإمكان.

طبقت كذلك طريقة القياسات الشعاعية على سطح الأرض (المقطع العلوي من الشكل 4-28). تشير الأشعة في مركز المقطع نحو القطب السالب العميق على السطح العلوي للشريحة الخام الرئيسية. يدل توجه الأشعة الدائم نحو الأسفل على أن القطب السفلي للشريحة عميق جداً، أو أن الأشعة متأثرة بوجود قطب موجب فوق مستوى النفق أي من السطح السفلي لواحدة (أو أكثر) من العدسات المعدنية ضحلة العمق.

تفرض هذه الطريقة الحذر الشديد عند تفسير تقاطع الأشعة بأنها دليل على مكان الأقطاب المغناطيسية لأنه من الممكن أن تكون الأقطاب المغناطيسية بعيدة جداً عن المنطقة، وسبب ذلك هو كون خطوط القوة المغناطيسية محدبة وليست مستقيمة ونقطة تقاطع الأشعة المستقيمة تختلف عن نقطة تقاطع الأشعة المحدبة.

الشيء الأهم في هذه الطريقة هو أنها لا تحل الغموض المعروف في تفسير الشواذ المغناطيسية والنتائج عن إمكان وجود عدد كبير من احتمالات توزيع المغناطيسية التي تعطي الشكل النهائي نفسه للشواذ.



الشكل (4-28): تطبيق طريقة القياسات الشعاعية على منجم حديد فوسداين:

أ- تطبيق الطريقة على سطح الأرض.

ب- تطبيق الطريقة ضمن النفق.

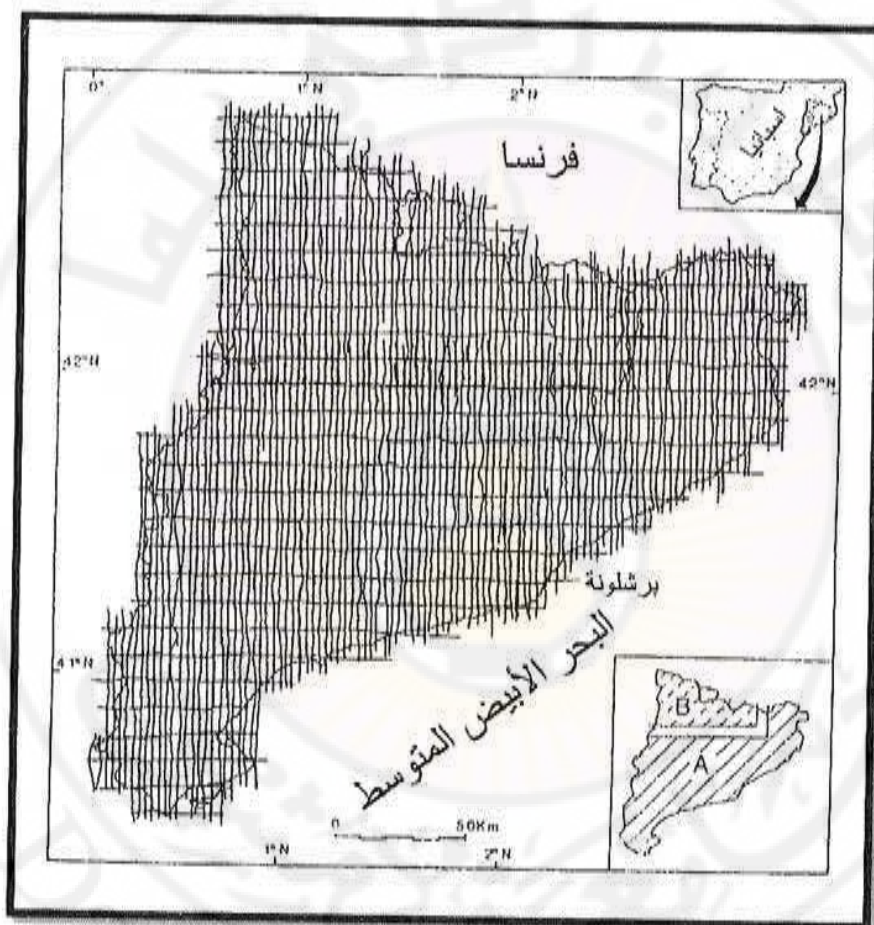
(حسب باراسنيس 1975 Parasnisi)

4-5-3- مثال على المسح المغنطيسي الجوي:

طلبت إدارة المسح الجيولوجي الإسباني وضع خريطة مغنطيسية بمقياس 1/250000 لمنطقة كاتالونيا في شمال شرق إسبانيا وتشمل جزءاً من جبال البيرينية. قام بذلك زيبين وآخرون (Zeyen et al., 1988) في صيف الأعوام 1984، 1985، 1986، فتم مسح 32000 كم² من خلال 22000 كم من الطيران. كان تباعد المسارات الرئيسية 2.5 كم باتجاه شمال-جنوب، ومسارات الربط (المعترضة) باتجاه شرق-غرب وبتباعد 10 كم.

قسمت المنطقة إلى قطاعين، قطاع A حيث حدد ارتفاع الطائرة بـ 2500 م وقطاع B فوق جبال البيرينية حيث حدد ارتفاع الطائرة بـ 3700 م (الشكل 4-29). حدد موقع الطائرة

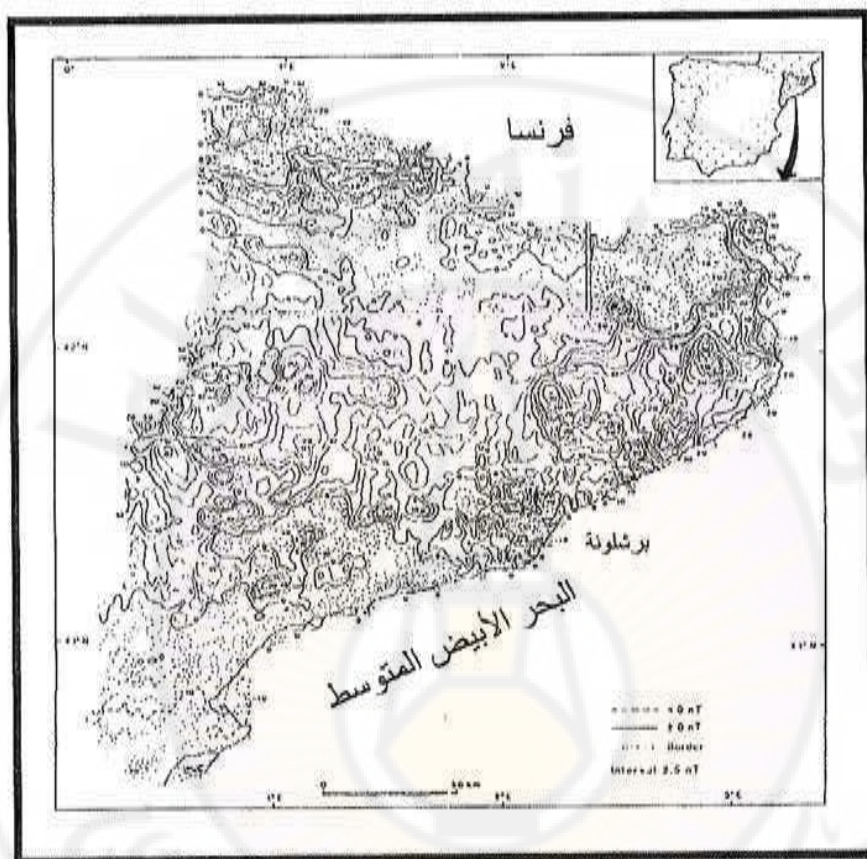
بوساطة التصوير الجوي وأخذت صورة كل 30 ثانية، وقيس الحقل المغنطيسي الكلي كل 1 ثانية بمقياس بروتون صنع شركة جيومتريكس الأمريكية (Geometrics 803/1).
يعطي الشكل (4-29) خريطة لموقع المنطقة المسوحة في إسبانيا واتجاه مسارات الطيران الرئيسية والمعتزضة وخريطة صغيرة تظهر القطاعين A و B للمنطقة المسوحة. أخذت محطتا مرجع أحدهما في القطاع A والثانية في القطاع B وتم التسجيل فيهما على فترات زمنية مقدارها 1 دقيقة.



الشكل (4-29): خريطة لموقع المنطقة المسوحة في إسبانيا (أعلى) واتجاه مسارات المسح، والقطاعين A و B.

(حسب زيبين وآخرين 1988 Zeyen et al., 1988)

كانت نتيجة المسح خريطة للحقل المغنطيسي الأرضي الكلي (ΔT)، وبعد طرح قيمة الحقل المغنطيسي الأرضي النظامي تم الحصول على الخريطة (الشكل 4-30) التي تمثل الشواذ المغنطيسية المتبقية (أو ما يقال له خريطة ΔT).

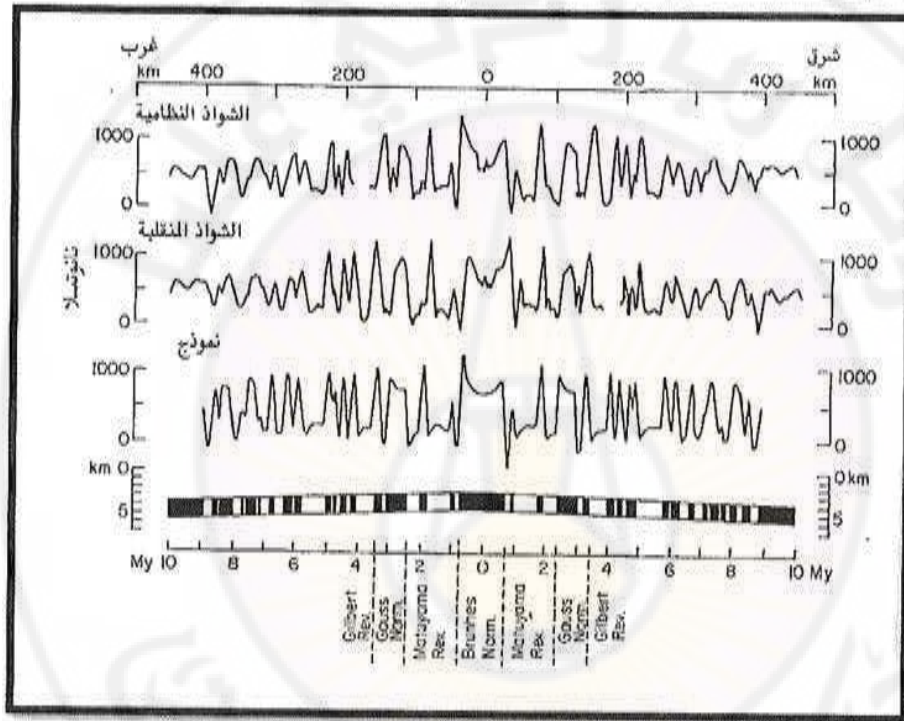


الشكل (4-30): خريطة الشواذ المغنطيسية للحقل المغنطيسي الكلي (ΔT).
(حسب زيبين وآخرين 1988 Zeyen et al., 1988)

4-5-4- مثال على المسح المغنطيسي البحري:

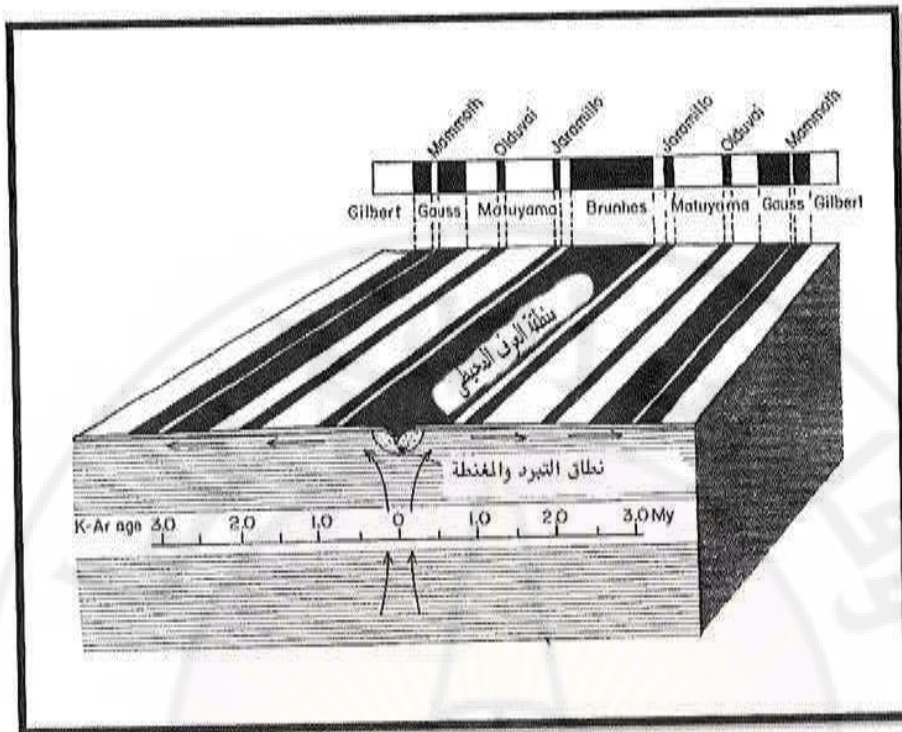
في الخمسينات والستينات من القرن الماضي تم مسح مغنطيسي بحري للمحيطات والبحار، ولوحظ وجود شواذ مغنطيسية عالية فوق منطقة العرف المحيطي في وسط المحيطات

بالنسبة للمناطق المحيطة، كما يظهر في الشكل (4-31) الذي يمثل تغير الشواذ المغنطيسية الكلية المقاسة فوق عرف الباسيفيك-أنتراكتيكا وعلى مسافة 1000 كيلومتراً (الين Allen, 1969). تشكل هذه الشواذ أحزمة متناظرة على جانبي العرف المحيطي مؤلفة من تناوب للشواذ المغنطيسية الموجبة والشواذ المغنطيسية السالبة (الشكل 4-32). لتفسير هذا التناوب ربط فاين وماتيو (Vine and Matthews, 1963) انقلاب الحقل المغنطيسي الأرضي مع فكرة تمدد قاع المحيط بالشكل التالي:



الشكل (4-31): تغير الشواذ المغنطيسية الكلية المقاسة فوق عرف الباسيفيك-أنتراكتيكا وعلى مسافة 1000 كيلومتراً.

(حسب ألين Allen, 1969)

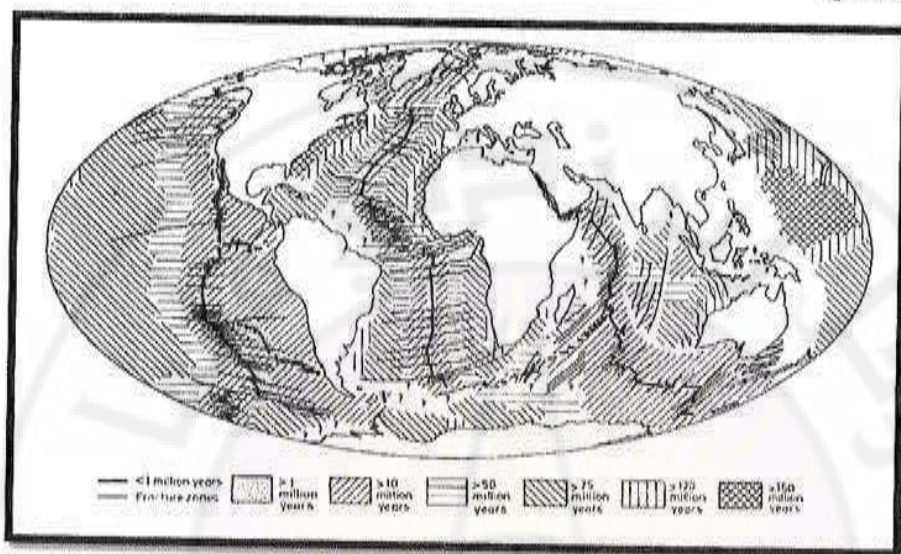


الشكل (4-32): الأحمدة المتناظرة على جانبي العرف المحيطي المؤلفة من تناوب للشواذ المغنطيسية الموجبة والشواذ المغنطيسية السالبة المسجلة في المواد النارية المؤلفة لقاع المحيط.
(حسب فاين وماتيو، Vine and Matthews, 1963)

يتم تشكل القشرة الأرضية في وسط المحيطات حيث تخرج المواد المنصهرة في قمة العرف المحيطي وتبرد بملامسة الماء، فتسر عبر درجة حرارة كوري فتتمغنط باتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي المسيطر (موجباً أو سالباً أو نظامياً أو منقلباً أو معكوساً)، أي أن الحزام نظامي اتجاه المغنطيسية اكتسب مغنطيسيته عندما كان الحقل المغنطيسي الأرضي نظامي التوجه، كما في هذا الوقت، والحزام منقلب اتجاه المغنطيسية اكتسب مغنطيسيته عندما كان الحقل المغنطيسي الأرضي منقلب التوجه.

بناء على هذه الفرضية ومع استمرار المسح المغنطيسي للمحيطات والبحار تم وضع خريطة لأعمار المحيطات (الشكل 4-33) (Tarling, 1983)، كما ساعد على وضع سلم زمني لانقلاب الحقل المغنطيسي الأرضي، يستعمل حالياً لتأريخ الصخور. يعطي (الشكل XI

في المقدمة) سلم الانقلاب لمئة وأربعين مليون سنة مضت. وقدم ذلك تأكيداً لنظرية الزباج القارات وفرضية الصفائح التكتونية التي أدت إلى ثورة علمية ومنطقاً جديداً في التفكير الجيولوجي.



الشكل (4-33): خريطة لأعمار المحيطات بناء على الأحزمة المغناطيسية الموجودة حول مناطق الأعراف المحيطية.

(حسب تارلنغ 1983, Tarling)

الفصل الخامس

تفسير المعطيات المغنطيسية

Interpretation of Magnetic Data

5-1- مقدمة:

تتوج الأعمال السابقة برسم منحنيات الشواذ المغناطيسية (magnetic anomaly curves) أو خريطة لخطوط تساوي المغناطيسية (magnetic contour maps) حسب المركبة المقاسة، لذا يكون الهدف النهائي من العمل هو تفسير الشواذ المغناطيسية، واستنتاج شكل الجسم المغناطيسي المسبب لتلك الشواذ. لكن تواجه المفسر مشكلة موجودة في العديد من الطرائق الجيوفيزيائية وهي أن هنالك عدداً لا متناهياً من الأجسام التي قد تعطي شكل الشواذ نفسه. مما يستدعي اللجوء إلى طرائق أخرى لتأكيد شكل الجسم المقترح من الدراسة المغناطيسية.

يختلف تفسير المعطيات المغناطيسية حسب المركبة المغناطيسية المقاسة، كالمركبة الشاقولية، أو الحقل الكلي، وبعد تفسير معطيات الحقل الكلي أصعبها، ولكن تطور الحاسوب والبرمجيات الحاسوبية ساعدت بشكل كبير على تسهيل تفسير معطيات الحقل الكلي، وخاصة تلك الناتجة عن المسح الجوي والبحري.

ولا يتوفر للمفسر، غالباً، غير المنحنيات أو خرائط تساوي الشدة للمركبة المقاسة وعلى المفسر الوصول إلى تعيين متحولات هذا الجسم، التي يمكن أن تعطي فكرة أولية عن شكل هذا الجسم، وبالتالي تطبيق طريقة "التجريب والخطأ" (Trial and Error method)، التي تقوم على حساب الشواذ المغناطيسية التي ينتجها هذا الجسم، في شروط الحقل المغناطيسي الأرضي الذي ساد أثناء المسح المغناطيسي الحقل، ثم يقارن منحنى الشواذ المحسوبة أو خريطة الشواذ المحسوبة مع منحنى الشواذ المقاسة أو الخريطة المقاسة، فإذا لم يكن التطابق بين المنحنيات أو الخرائط المحسوبة والمقاسة جيداً، تُغير بعض متحولات الجسم، حتى يتم الحصول على أفضل تطابق بين المنحنيات أو الخرائط المحسوبة والمقاسة. ثم يقارن الشكل الأخير المستنتج للجسم المغناطيسي مع المعطيات الجيولوجية المتوفرة أو النتائج المستخلصة من طرائق جيوفيزيائية أخرى وفي حال توفر الانسجام مع هذه المعطيات الأخرى يمكن القبول بالجسم المقترح كنتيجة مقبولة للدراسة.

من الواضح أن معالجة المعطيات تقتضي البدء بتفسير كيفي (qualitative interpretation) ثم الانتقال إلى تفسير كمي (quantitative interpretation) الذي يعتبر الهدف الأخير للدراسة كلها.

5-2- التفسير الكيفي للمعطيات المغنطيسية

Qualitative interpretation of magnetic data:

يعتمد التفسير الكمي كثيراً على مقدرة المفسر على إجراء التفسير الكيفي لما لذلك من أهمية كبيرة في مجمل الدراسة المغنطيسية، إذ قد يهملنا معرفة وجود أو غياب فائق أكثر مما يهملنا مقدار رميته. وقد تشير الحدود الواضحة بين مناطق شديدة الاختلاف بقيم التدرج إلى وجود فائق كبير في الركيزة. وقد يهملنا معرفة وجود جسم اندفاعي مندرس، أكثر مما يهملنا شكله وعمقه، وكثيراً ما يكون الهدف هو التأكد من وجود الأحواض الرسوبية، ومعرفة حدود تماسها مع سطح الركيزة الضحل، والتي يمكن تحديدها بالنظر إلى الخريطة المغنطيسية، إذ يتميز الحوض الرسوبي بتدرج لطيف لخطوط تساوي الشدة المغنطيسية مع انخفاض قيم الشدة المغنطيسية باتجاه مركز الحوض، بينما تتميز مناطق ارتفاع سطح الركيزة المحيطة بالحوض بتدرج شديد لخطوط تساوي الشدة المغنطيسية مع ارتفاع قيم الشدة المغنطيسية. وقد يمكن تفسير معظم انبثاقي diapiric feature من المعطيات السيسمية وكأنه قبة ملحبة salt dome أو جسم اندفاعي ديسيس، وتحل المشكلة بإجراء مسح مغنطيسي للمنطقة وملاحظة قيم الشدة المغنطيسية فوق المعلم الانبثاقي، التي غالباً ما تكون الحكم الفاصل في معرفة حقيقة المعلم، لأن القبة الملحبة لن تسبب شواذاً موجباً بالشدة المغنطيسية في حين يفعل ذلك الجسم الاندفاعي المندرس.

يمكن تقسيم التفسير الكيفي للمعطيات المغنطيسية إلى:

أ- تفسير كيفي للمنحنيات الناتجة عن المسح على مسارات محددة.

ب- تفسير كيفي لخرائط خطوط تساوي الشدة.

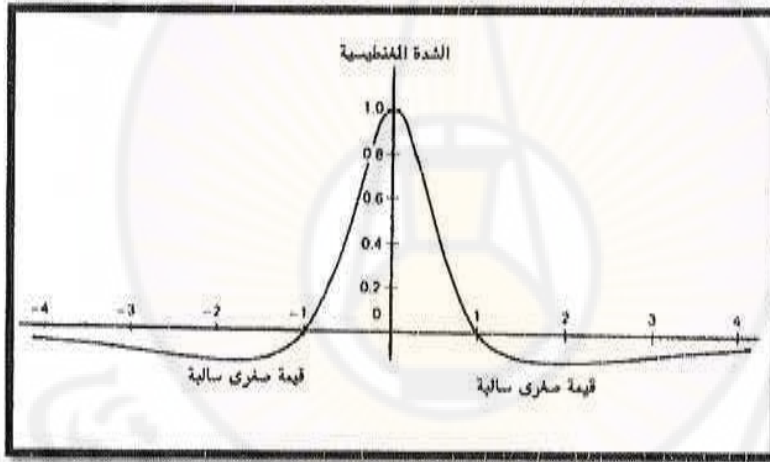
5-2-1- التفسير الكيفي لمنحنيات المسح على مسارات محددة:

5-2-1-1- منحنى شواذ المركبة الشاقولية في حقل مغنطيسي

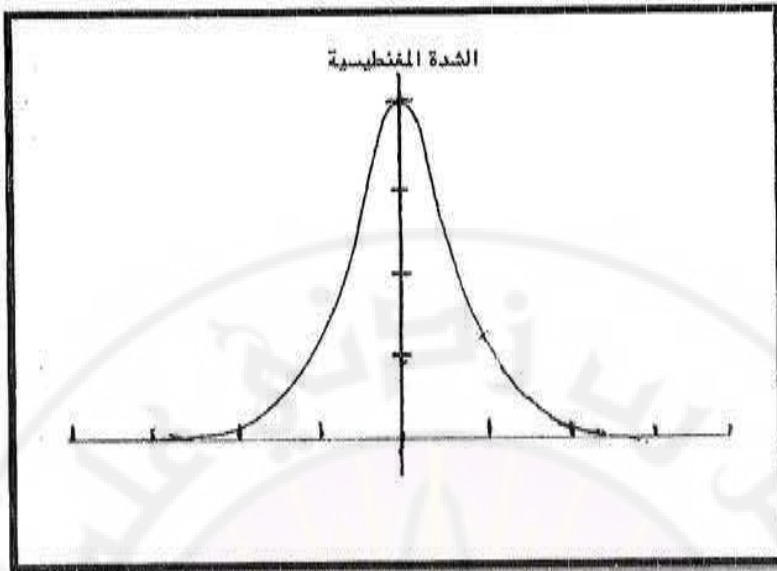
شاقولي:

يمكن التعبير عن المغنطيسية الحجمية لجسم إما بالعزم المغنطيسي M لثنائي قطب، أو بتوزيع الأقطاب الحرة على سطح الجسم المغنطيسي، إذ يعتمد توزيع هذه الأقطاب الحرة على شكل الجسم، لذا يمكن اعتبار توزيع هذه الأقطاب على شكل صفائح، أو خطوط، وعلى شكل

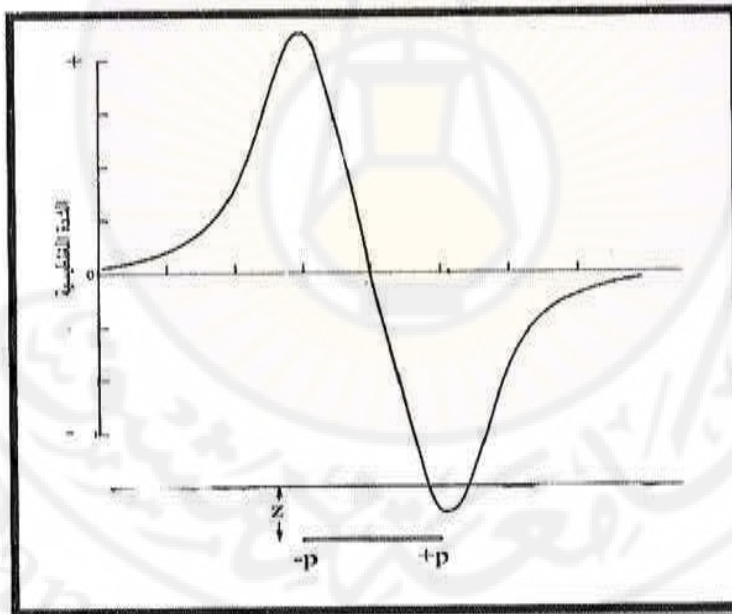
نقاط في حال السطوح الصغيرة جداً. من محاسن هذه المقاربة البسيطة إنه ليس من الضروري معرفة متأثرية الجسم، أو حجمه، أو شدة الحقل المغنطيسي الأرضي المسيطر في أثناء المسح الحقلي. فمثلاً يمكن اعتبار جسم أنبوبي شاقولي، أو شديد الميل ومحدود الطول وذو مقطع عرضي صغير واقع في حقل قريب من الشاقولي، وكأنه ثنائي قطب، فيعطي منحني شواذ المركبة الشاقولية كما في الشكل (1-5)، وتظهر القيم الصغرى السالبة على جانبي الشاذ الموجب الأعظمي، نتيجة لتأثير القطب الموجب القريب من السطح. بينما سيظهر المنحني كما في الشكل (2-5) في حال كان القطب السفلي عميق جداً، أي أن الجسم طويل جداً، وبالتالي سيبدو كأن شواذ المركبة الشاقولية ناتجة عن قطب وحيد. أما عندما كون ثنائي القطب أفقياً، سيبدو منحني شواذ المركبة الشاقولية كما في الشكل (3-5)، وعند ميل ثنائي القطب بزاوية مقدارها 45 درجة فسيبدو منحني شواذ المركبة الشاقولية كما في الشكل (5-4).



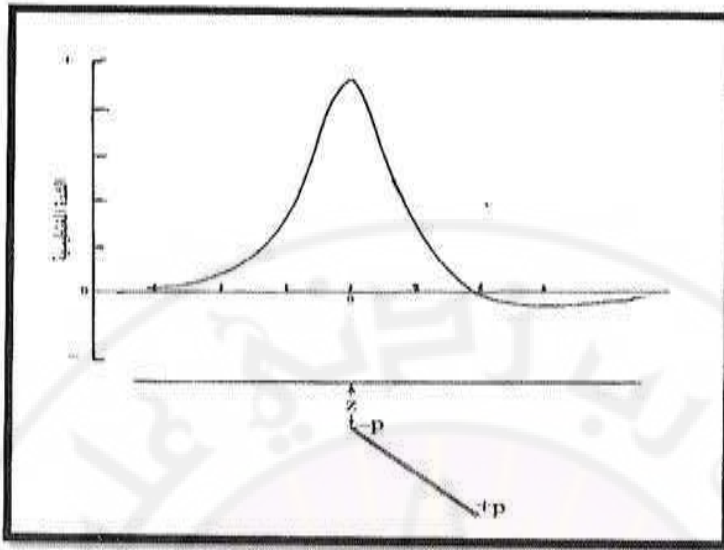
الشكل (1-5): منحني شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب شاقولي قصير.
(معدل من تelford et al, 1990)



الشكل (2-5): منحنى شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب شاقولي طويل.
(معدل من تelford 1990)



الشكل (3-5): منحنى شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب أفقي.
(معدل من تelford 1990)

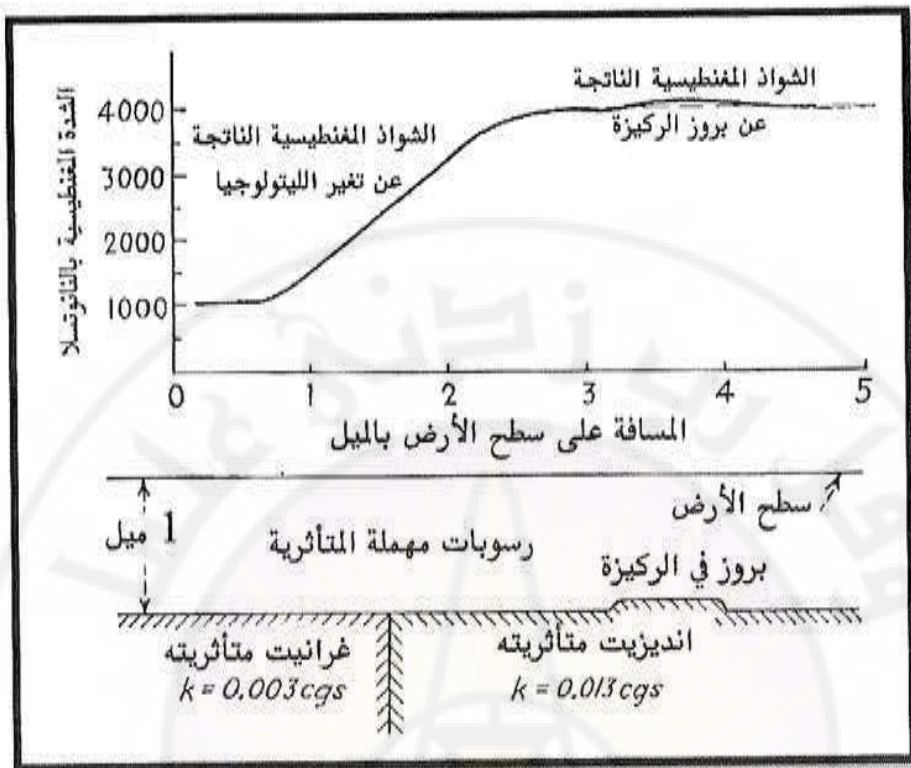


الشكل (5-4): منحنى شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن ثنائي قطب يميل بزاوية مقدارها 45 درجة عن الأفق.

(معدل من تelford et al, 1990)

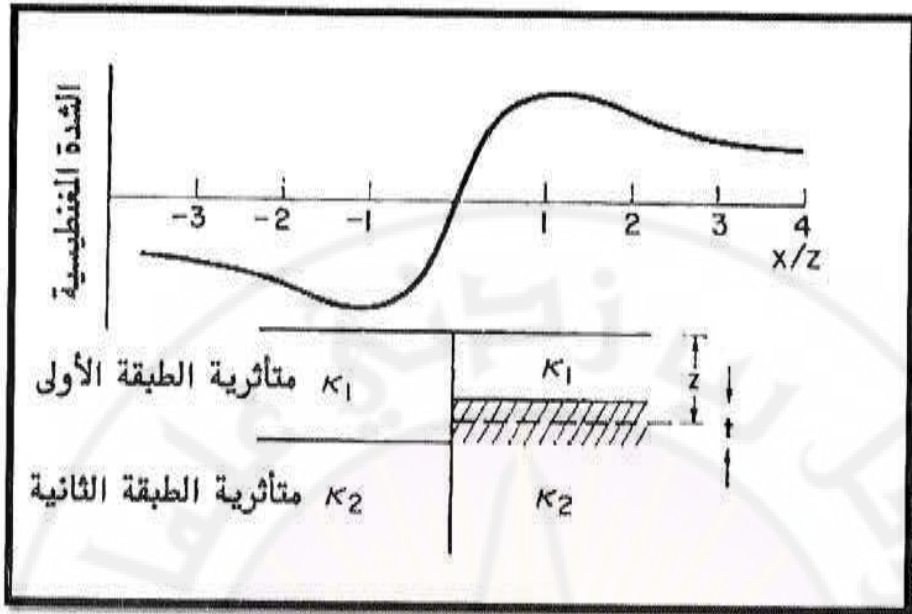
بينما ستبدو شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن سطح تماس شاقولي بين نوعين من الصخر مختلفي المتأثرية المغناطيسية واقعين تحت طبقة من الرسوبيات غير المغناطيسية وفي حقل مغناطيسي قريب من الشاقولي كما في الشكل (5-5). من المهم أيضاً معرفة أن هذا التماس الناتج عن اختلاف متأثرية الصخور قد يؤدي إلى ازدياد كبير في الشدة المغناطيسية المقاسة، في حين لا يعطي بروز عالٍ في الركيزة مثل هذه الزيادة الكبيرة الناتجة عن اختلاف المتأثرية (الشكل 5-5).

وستبدو شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن وجود فائق شاقولي ضرب طبقة صخرية مغناطيسية واقعة في حقل قريب من الشاقولي كما في الشكل (5-6).



الشكل (5-5): منحنى شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن سطح تماس شاقولي بين نوعين من الصخر مختلفي المتأثرية المغناطيسية وبروز في الركيزة.

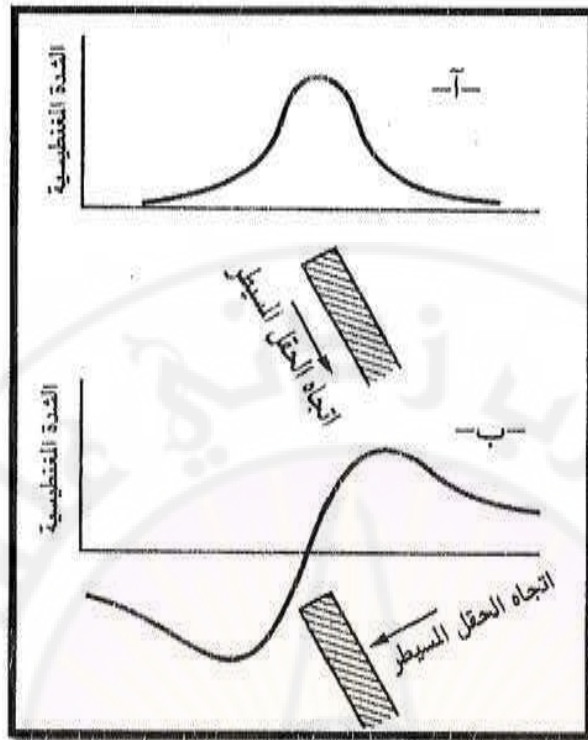
(حسب دوبرين 1983 Dobrin)



الشكل (5-6): منحنى شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن وجود هالق شاقولي ضرب طبقة صخرية مغناطيسية.

(حسب غريفت وكينغ 1976 Griffiths & King)

بينما تبدو صورة الشواذ الناتجة عن أجسام صفائحية مثل الجدران القاطعة الشاقولية والمائلة كأنها ناتجة عن خطوط من الأقطاب، أو صفائح من ثنائيات الأقطاب، بناء على اتجاه الحقل المغناطيسي المسيطر بالنسبة لمستوى الجدار القاطع. فمثلاً، ستبدو شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن جدار قاطع رقيق مائل واتجاه الحقل المسيطر واقع في مستوى الجدار وكأنه خط من الأقطاب على طول حرفه العلوي كما في الشكل (5-7-أ). أما إذا كان الحقل متعامداً مع مستوى الجدار فيمكن اعتباره وكأنه صفيحة من ثنائيات الأقطاب المائلة وستبدو شواذ المركبة الشاقولية كما في الشكل (5-7-ب).



شكل (5-7): منحني شواذ المركبة الشاقولية الناتجة عن جدار قاطع رقيق مائل واتجاه الحقل المغناطيسي واقع:

أ- في مستوى الجدار،

ب- متعامداً مع مستوى الجدار.

(حسب غريفت وكينغ 1976 Griffiths & King)

5-2-1-2- اعتماد شواذ الحقل المغناطيسي الكلي على خط العرض

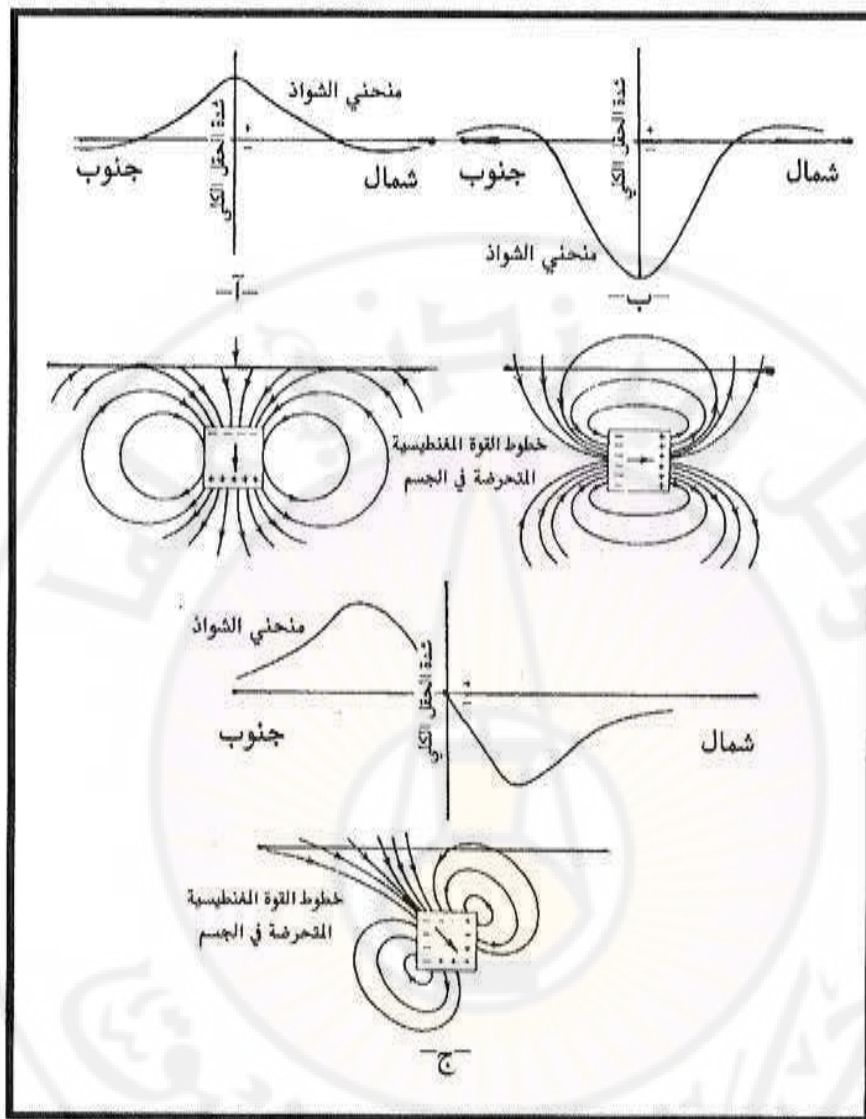
المغناطيسي:

تعتمد شواذ الحقل المغناطيسي الكلي المسجلة فوق جسم مغناطيسي على خط العرض المغناطيسي فإذا كان الطيران باتجاه شمال-جنوب ومتعامداً مع اتجاه جسم مغناطيسي متطاول أي باتجاه شرقاً - غرباً ومقطعه العرضي مربع ومغناطيسيته متحيزة فقط، أي لا يحمل مغناطيسية متبقية (الشكل 5-8) وواقع في خطوط عرض مختلفة كما في الحالات التالية:

فعندما يكون الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي شاقولياً كما في القطب المغنطيسي الشمالي (الشكل 5-8-أ) نجد أن خطوط القوة المغنطيسية الناتجة عن المغنطيسية المتحيزة في الجسم المغنطيسي متناظرة حول محور شاقولي، يمر من مركز الجسم ومتجهة نحو الأسفل في مستوى خط الطيران، فهي بالتالي تعزز الحقل المغنطيسي الأرضي، وتعطي شواذاً مغنطيسية موجبة. أما عندما تكون خطوط القوة المغنطيسية مماسة لخط الطيران، كما في حالة المناطق الواقعة على جانبي الجسم تصبح الشواذ مساوية للصفر، وعندما تكون خطوط القوة المغنطيسية شاقولية ومتجهة نحو الأعلى، نجد أن الشواذ سالبة كما في حالة المناطق البعيدة عن الجسم.

وعندما يكون الحقل المغنطيسي الكلي أفقياً كما في خط الاستواء المغنطيسي (الشكل 5-8-ب) نجد أن خطوط القوة المغنطيسية تعاكس الحقل المغنطيسي الأرضي فوق المركز السطحي للجسم، مؤدية إلى ظهور شواذ مغنطيسية سالبة. وتكون الشواذ مساوية للصفر في النقطتين الواقعتين على خط الطيران، حيث تتقاطع خطوط القوة المغنطيسية مع خط الطيران بزاوية قائمة وتعزز خطوط القوة المغنطيسية الحقل المغنطيسي الأرضي بعيداً عن هاتين النقطتين مما يعطي شواذ موجبة.

وعند وجود الجسم في خط عرض مغنطيسي (45°) شمالاً نلاحظ أن الوجهين القريبين من القطب الشمالي الأرضي يكتسبان مغنطيسية سالبة، بينما يكتسب الوجهان البعيدان مغنطيسية موجبة، وهكذا تتناظر خطوط القوة المغنطيسية حول قطر المربع (الشكل 5-8-ج)، وتتعاقد مع الحقل المغنطيسي الأرضي في المركز السطحي للجسم، لذا تكون محصلة الشواذ مساوية للصفر، وبأخذ منحني الشواذ الشكل الظاهر في الشكل (5-8-ج) بعيداً عن المركز السطحي للجسم.



الشكل (5-8): اعتماد الحقل المغناطيسي الكلي على خط العرض المغناطيسي.

أ- الجسم في القطب المغناطيسي الشمالي.

ب- الجسم في خط الاستواء المغناطيسي.

ج- الجسم في خط عرض مغناطيسي 45° شمالاً.

(حسب دوبرين 1983 Dobrin)

5-2-1-3- اعتماد شواذ الحقل المغنطيسي على توجيه الجسم

المغنطيسي:

تعتمد شواذ الحقل المغنطيسي الكلي على توجيه الجسم المغنطيسي المتطاول بالنسبة لخط الزوال المغنطيسي، إذ يزداد تفسير الشواذ المغنطيسية تعقيداً فيما لو شكّل اتجاه الجسم المغنطيسي المتطاول زاوية مع خط الزوال المغنطيسي.

فلو كان الجسم شريحة مغنطيسية رقيقة بحيث يكون وجهها الطويل أفقياً، وعرضها أكبر بكثير من سماكتها، وليكن خط الطيران عمودياً دوماً على اتجاه الشريحة. يعطي الشكل (5-9) منحنيات شواذ الحقل الكلي في الحالات الثلاث التالية:

1- اتجاه الشريحة شمالاً - جنوباً:

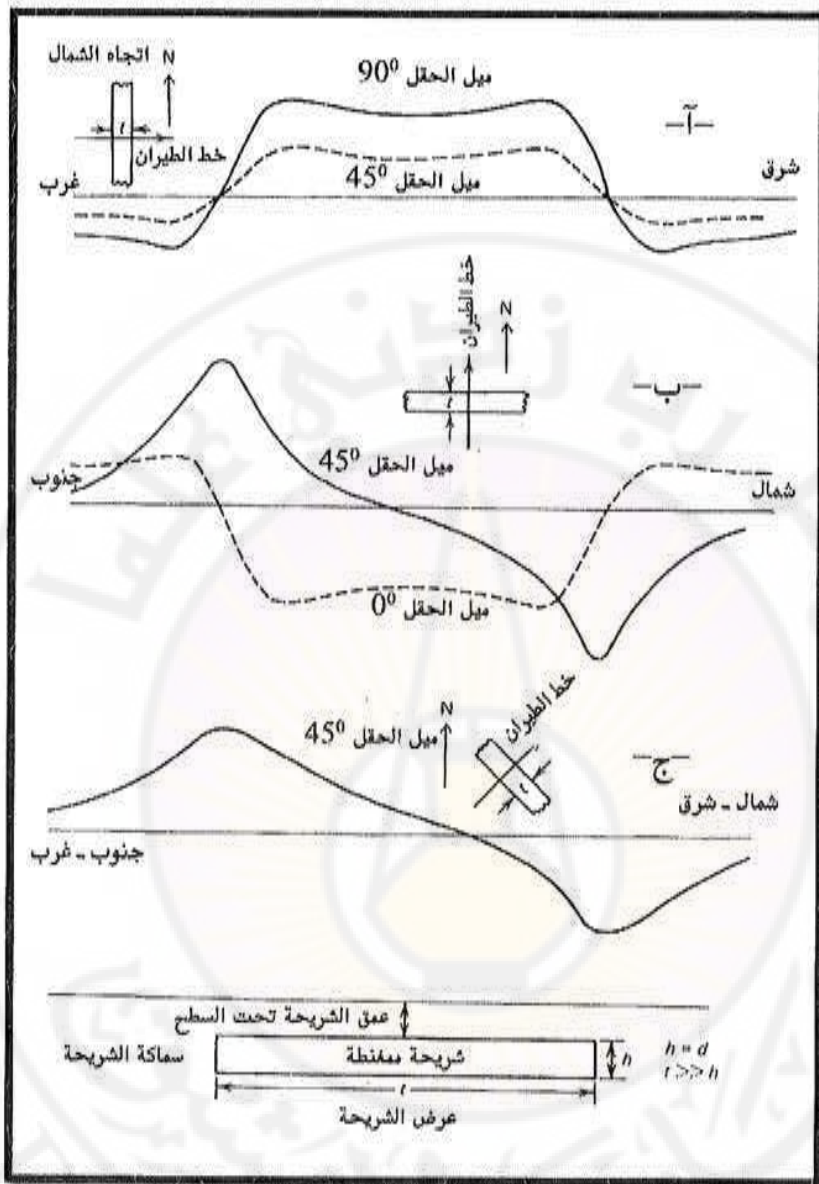
تكون الشواذ موجبة فوق الشريحة نفسها وسالبة خارجها وتزداد سعة الشواذ كلما ازداد خط العرض المغنطيسي، كما يبدو عندما تكون الشريحة في القطب المغنطيسي وفي خط عرض مغنطيسي 45 درجة (الشكل 5-9-أ).

2 - اتجاه الشريحة شرقاً-غرباً:

تعتمد الشواذ على قيمة الميل المغنطيسي ففي خط عرض مغنطيسي مقداره (45°) تكون الشواذ غير متناظرة بحيث تكون موجبة فوق القطب السالب للحقل المحرض، وتكون سالبة فوق القطب الموجب للحقل المحرض، وإذا كان الحقل المحرض أفقياً تكون الشواذ سالبة فوق الشريحة مباشرة وموجبة على جانبيها (الشكل 5-9-ب).

3 - اتجاه الشريحة شمالاً 45° غرباً-جنوباً 45° شرقاً:

تكون الشواذ مشابهة لتلك الملاحظة فوق الشريحة في الوضع الثاني وفي خط عرض مغنطيسي (45) لكن سعة الشواذ أقل وتختلف النقطة التي تتغير فيها قيمة الشواذ من سالبة إلى موجبة (الشكل 5-9-ج).

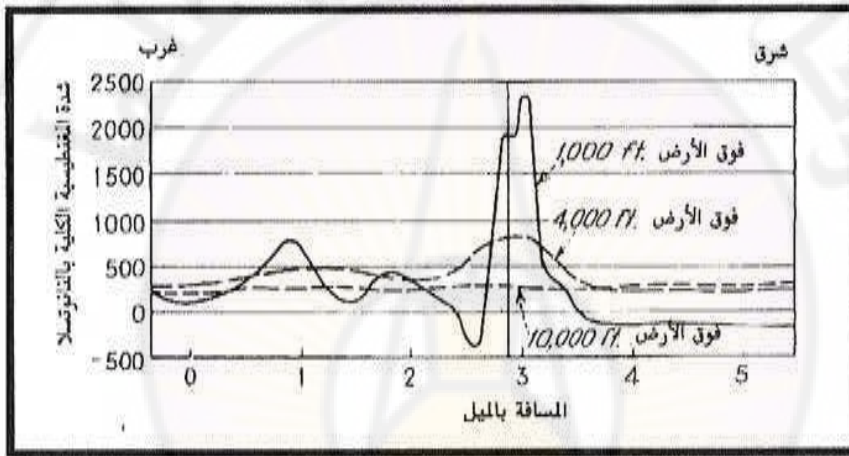


الشكل (5-9): اعتماد شواذ الحقل المغنطيسي الكلي على اتجاه خط الطيران.

- أ- اتجاه الجسم شمالاً-جنوباً.
 - ب- اتجاه الجسم شرقاً-غرباً.
 - ج- اتجاه الجسم شمالاً 45° غرباً - جنوباً 45° شرقاً.
- (حسب دوبرين 1983 Dohrin, 1983)

5-2-1-4- تأثير ارتفاع الطائرة على الشواذ المغناطيسية:

يلاحظ عند إجراء مسح مغناطيسي جوي لمنطقة على ارتفاعات مختلفة أن شدة الحقل الكلي المقاس على الارتفاع المنخفض تكون أعظمية، وتكون الشواذ الصغيرة محللة وواضحة على المنحني (الشكل 5-10). تضعف شدة الشواذ المغناطيسية المقاسة فوق الجسم المغناطيسي وتنتشر على مساحة أكبر كلما ازداد ارتفاع الطائرة كما في الشكل (5-10)، الذي يظهر ثلاثة منحنيات مغناطيسية، مأخوذة من الطائرة على ارتفاعات 1000 و 4000 و 10000 قدم فوق مناجم مغنيتيت بنسون في منطقة سانت لورانس في نيويورك، ويلاحظ أن الشواذ العالية المقاسة على ارتفاع 1000 قدم تختفي تقريباً على ارتفاع 10000 قدم.



_____ منحني الشواذ المقاس على ارتفاع 1000 قدم.

_____ منحني الشواذ المقاس على ارتفاع 4000 قدم.

----- منحني الشواذ المقاس على ارتفاع 10000 قدم.

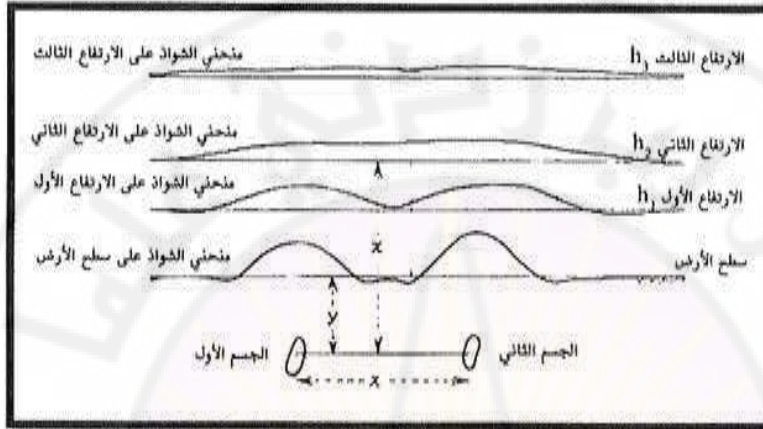
الشكل (5-10): تأثير ارتفاع الطائرة في شكل منحني الشواذ المغناطيسية المقاسة فوق مناجم بنسون.

(حسب دوبرين 1983, Dobrin)

يعتمد تحليل الشواذ الناتجة عن أجسام مغناطيسية منفصلة على ارتفاع الطائرة فوق الأرض أيضاً كما يظهر في الشكل (5-11)، الذي يعطي ثلاثة منحنيات مقاسة على ارتفاعات مختلفة h_1 , h_2 , h_3 ، ويلاحظ أن المنحني المقاس على ارتفاع منخفض يظهر تحديين واضحين وتقل قيمتهما في المنحني المقاس على الارتفاع المتوسط إلى أن يندمج

التحديان بتحدب واحد أقل حدة، إنما ينتشر على مسافة أكبر في المنحني المقاس على الارتفاع العالي.

وبلاحظ عملياً أن الشواذ المقاسة لن تحلل فيما لو كان ارتفاع الطائرة h أكبر من الفرق $x-y$ ، حيث x هي المسافة الفاصلة بين الجسمين المغنطيسيين و y عمق الجسمين المغنطيسيين عن سطح الأرض.

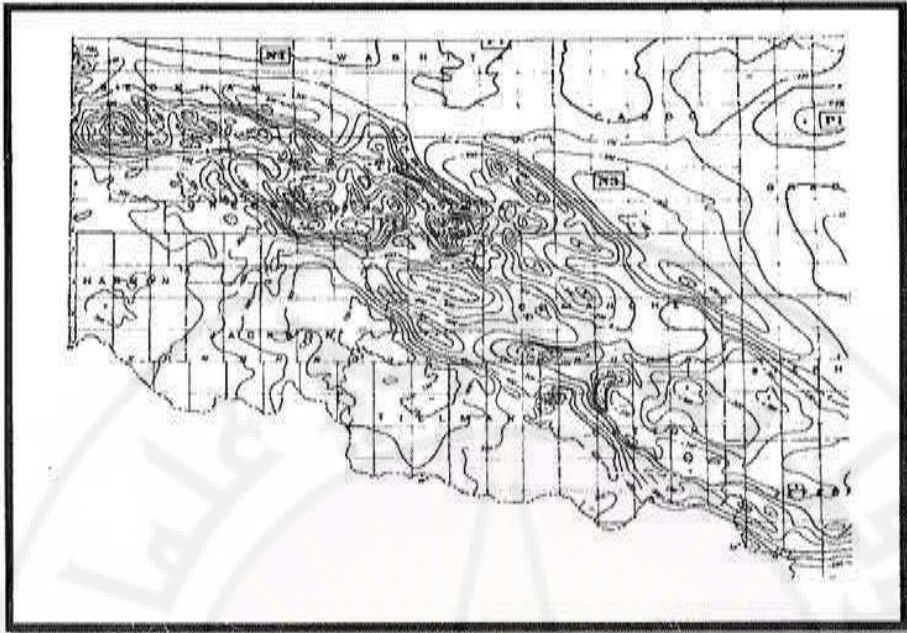


الشكل (5-11): اعتماد تحليل الشواذ المغنطيسية على ارتفاع الطائرة.

(حسب دوبرين 1983 Dobrin)

5-2-2- التفسير الكيفي لخرائط خطوط تساوي الشدة:

تسمح خرائط خطوط تساوي الشدة المغنطيسية بأخذ فكرة سريعة عن بنية منطقة ما لو كانت الصخور قريبة من السطح وذات متأثرية مغنطيسية عالية. فمثلاً تشير الخريطة المغنطيسية في الشكل (5-12) إلى أن الالتواءات التي شكلت جبال الوشيتا الواقعة في جنوب غرب ولاية أوكلاهوما الأمريكية قد أصابت صخور الركيزة العميقة، أو طبقات رسوبية عالية المتأثرية المغنطيسية، مما رفعها نحو الأعلى وأدى إلى ظهور الشواذ المغنطيسية العالية التي تمتد باتجاه شمال غرب-جنوب شرق.



الشكل (5-12): الخريطة المغناطيسية لجنوب غرب ولاية اوكلاهوما وتظهر التغيرات المغناطيسية المفاجئة بين جبال الوشيتا الممتدة باتجاه شمال غرب-جنوب شرق والحوضين الرسوبيين في الشمال الشرقي والجنوب الغربي.

(حسب دوبرين 1983 Dobrin)

تساعد متابعة الاتجاهات العامة لخطوط تساوي الشدة المغناطيسية على تخطيط الاتجاهات البنيوية العميقة، مثل اتجاه الأجسام الاندفاعية الدسيسة المتطاولة، أو اتجاه الفوالق المؤثرة في الركيزة، أو تغيرات ليتولوجية الركيزة، والتي قد لا يكون لها أثر في سطح الأرض كما في الشكل (5-5). كما أن الشكل العام للشواذ المغناطيسية قد يساعد على تحديد طبيعة الجسم المغناطيسي المغمور، فإذا أظهرت خطوط تساوي الشدة المغناطيسية تناظراً دائرياً عندما يكون الحقل المغناطيسي الأرضي شاقولياً فقد يكون الجسم عرقاً اندفاعياً شاقولياً (الشكل 5-13)، وإذا كانت خطوط تساوي الشدة المغناطيسية متطاولة ومغلقة فقد يكون الجسم جداراً قاطعاً، يدل اتجاه تطاول الخطوط على اتجاهه. وإذا كان لدينا نطاق متطاوّل بتدرج شديد ودون تحديد دقيق

لانغلاقه فمن المحتمل أن يكون ذلك ناتجاً عن فائق تحت سطحي أدى إلى تباعد شاقولي بين جزأي جسم مغناطيسي.



الشكل (5-13): خريطة خطوط تساوي الشدة المغناطيسية فوق عرق اندفاعي شاقولي واقع في حقل مغناطيسي أرضي شاقولي.

5-3- التفسير الكمي للمعطيات المغناطيسية

Quantitative interpretation of magnetic data:

تقتصر الدراسة المغناطيسية، في كثير من الأحيان، على التفسير الكيفي لشواذ المغناطيسية لتكون دليلاً لتطبيق دراسات جيوفيزيائية أخرى مثل الدراسة السيسمية. لكن عندما تقتضي الدراسة المغناطيسية تفسيراً كمياً دقيقاً فلا بد من الاستمرار في الموضوع حتى نهايته، وهذا يحتاج لمعرفة جميع متحولات الجسم المغناطيسي، أو الأجسام الموجودة في المنطقة المدروسة للتمكن من وضع نموذج بنيوي لما تحت السطح. ويعتمد حسن اختيار المتحولات من

البداية، على الإلمام الكافي بالتأثير المغنطيسي الناتج عن الأجسام المغنطيسية منتظمة الشكل، والتحولات التي تطرأ عليها، مع تغير خط العرض المغنطيسي واتجاه الجسم بالنسبة للشمال المغنطيسي. ويمكن تلخيص متحولات الجسم المغنطيسي كما يلي:

1- عمق السطح العلوي (z_1) Depth of the upper surface.

2- طول الاتجاه (L) Strike length.

3- الميل Dip.

4- التفریق Plunge.

5- عمق السطح السفلي (z_2) Depth of the lower surface.

6- العرض (b) Width.

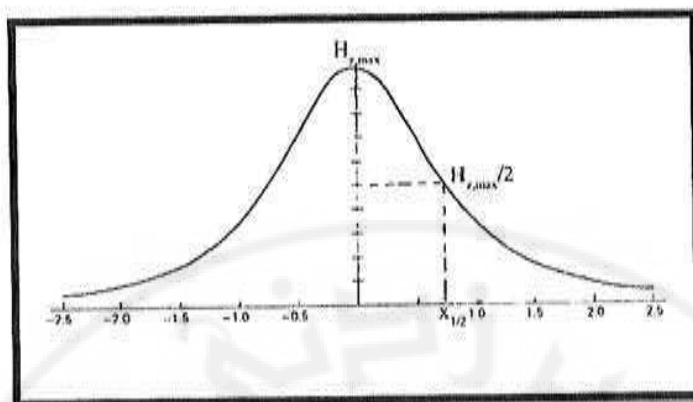
7- مساحة المقطع العرضي لجسم أسطواني شاقولي (A) Cross-section area of a vertical cylindrical body.

8- شدة المغنطة (I_T) Intensity of magnetization.

ونورد فيما يلي كيفية الحصول على متحولات الجسم من منحنيات الشواذ المغنطيسية لوضع النموذج الأولي له:

5-3-1- عمق السطح العلوي للجسم (z_1):

يُستنتج عمق السطح العلوي (z_1) من المنحني المغنطيسي، المأخوذ باتجاه عمودي على اتجاه (strike) الجسم المغنطيسي، ويمر بمركز الشواذ أو قريباً جداً منه. ويمكن القول إن عمق السطح العلوي من مرتبة نصف عرض منحني الشواذ المغنطيسي، أي المسافة الفاصلة بين مسقطي- على المحور x- نقطة القيمة العظمى للشواذ والنقطة التي تساوي فيها الشواذ نصف القيمة العظمى ويرمز لهذه المسافة بـ (x_p)، وتدعى نصف عرض الشواذ (Half width) (الشكل 5-14).



الشكل (5-14): تعيين نصف عرض الشواذ.

بشكل عام، للحصول على عمق السطح العلوي للجسم (z_1)، يجب ضرب $x_{1/2}$ بمعامل f يتراوح بين 1-2، ويعتمد هذا المعامل على طول اتجاه الجسم (L) وامتداده نحو الأسفل.

يعطي الجدول (5-1) قيم المعامل f حيث $f = \frac{z_1}{x_{1/2}}$ لقيم متغيرة لعمق السطح العلوي

(z_1)، وعمق السطح السفلي (z_2)، وطول اتجاه الجسم (L).

يلاحظ في الجدول (5-1) أنه عندما $\frac{L}{z_1} = 0$ ، و $\frac{z_2}{z_1} = 1$ يكون لدينا قطب نقطي،

أما عندما $\frac{L}{z_1} > 0$ و $\frac{z_2}{z_1} > 1$ فيكون لدينا خط من الأقطاب $\frac{z_2}{z_1}$.

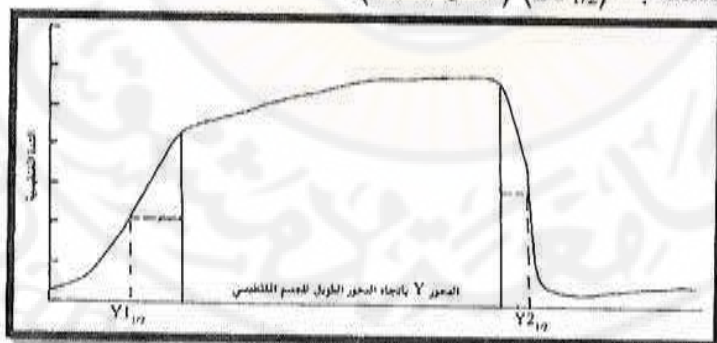
الجدول (1-5): قيم المعامل (f) من أجل جسم مغناطيسي بشكل صفيحة شاقولية تتركز الأقطاب على سطحها العلوي والسفلي.

(حسب پاراسنيس 1972)

$\frac{z_2}{z_1}$				
∞	4	2	1	$\frac{L}{z_1}$
1.305	1.37	1.54	1.99	0
1.18	1.26	1.45	1.91	2
1.08	1.21	1.43	1.88	4
1.03	1.20	1.48	2.02	8
1.00	1.26	1.53	2.06	∞

5-3-2- طول الاتجاه (L):

إذا كانت الشواذ المغناطيسية متطاولة فهذا يعني أن الجسم متطاول، ويجب تعيين طول الجسم باتجاه اتجاهه. ففي خطوط العرض المغناطيسية العليا، يمكن تقدير طول الاتجاه بدقة من منحنى الشواذ المغناطيسية المرسوم باتجاه الاتجاه أي في اتجاه المحور Y. يساوي الطول في هذه الحالة المسافة الفاصلة بين مسقطي نقطتين $Y_{1/2}$ و $Y_{2/2}$ ، على المحور (Y)، كل منهما واقعة على جانب من القيمة العظمى، حيث تهبط الشواذ إلى نصف القيمة العظمى، ويرمز لهذه المسافة بـ $(2Y_{1/2})$ (الشكل 5-15).

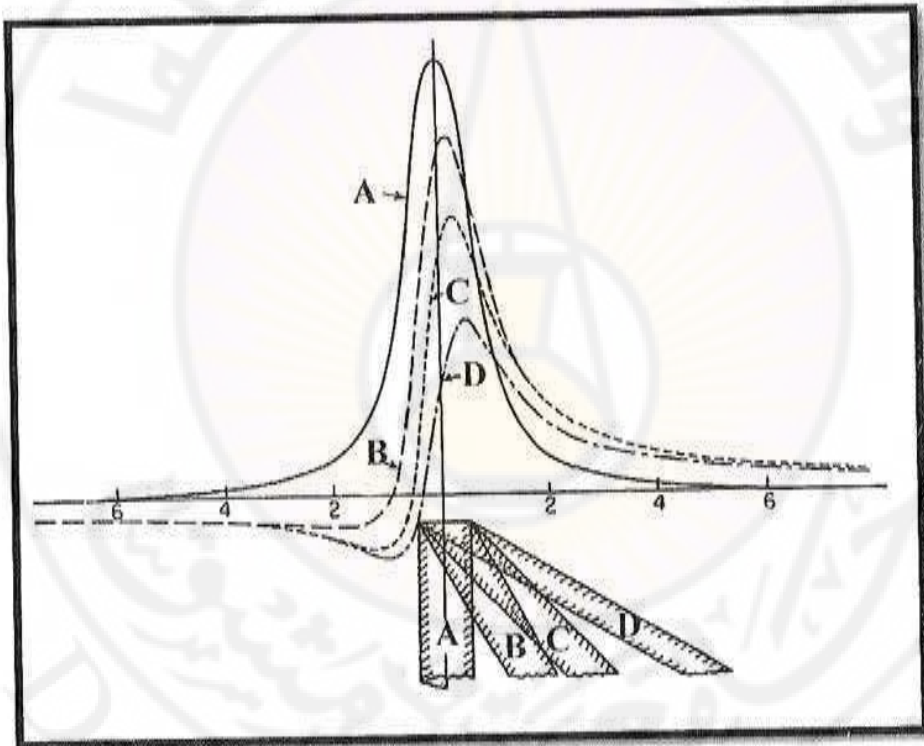


الشكل (5-15): تحديد طول الجسم المغناطيسي باتجاه اتجاهه على طول المحور Y في خطوط العرض المغناطيسية الدنيا.

وفي خطوط العرض الدنيا حيث توجد مركبة مغناطيسية أفقية عالية الشدة وتتركز الأقطاب المغناطيسية على جانبي الجسم المغناطيسي بدلاً من السطحين السفلي والعلوي ويأخذ منحنى الشواذ شكلاً صندوقياً له قمتان إحداهما فوق القطب الموجب، والأخرى فوق القطب السالب، لذا يعد طول الجسم، وبشكل تقريبي، مساوياً المسافة الفاصلة بين القمتين أو بين مسقطيهما على المحور Y.

5-3-3- الميل:

يمكن استنتاج اتجاه الميل من اللاتناظر في منحنيات الشواذ المغناطيسية المرسومة عمودياً على اتجاه الجسم كما يظهر من الشكل (5-16) إذ يتغير ميل المنحني مع تغير زاوية ميل الجسم عن الأفق.

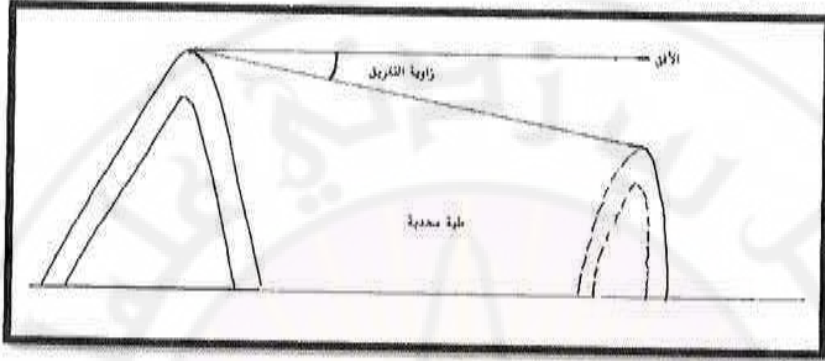


الشكل (5-16): تغير تناظر الشواذ المغناطيسي مع تغير ميل الجسم المغناطيسي.

(حسب دوبرين 1983 Dobrin)

5-3-4- التفریق:

تقدر زاوية التفریق من عدم التناظر في منحنيات الشواذ المغناطيسية المرسومة باتجاه الاتجاه، والتي تشبه إلى حد كبير ما يظهر من اللاتناظر في منحنيات الشواذ المغناطيسية المرسومة عمودياً على اتجاه الجسم في الشكل (5-17).



الشكل (5-17): تغير تناظر الشواذ المغناطيسي مع تغير زاوية تفریق الجسم المغناطيسي.

5-3-5- عمق السطح السفلي للجسم (z_2):

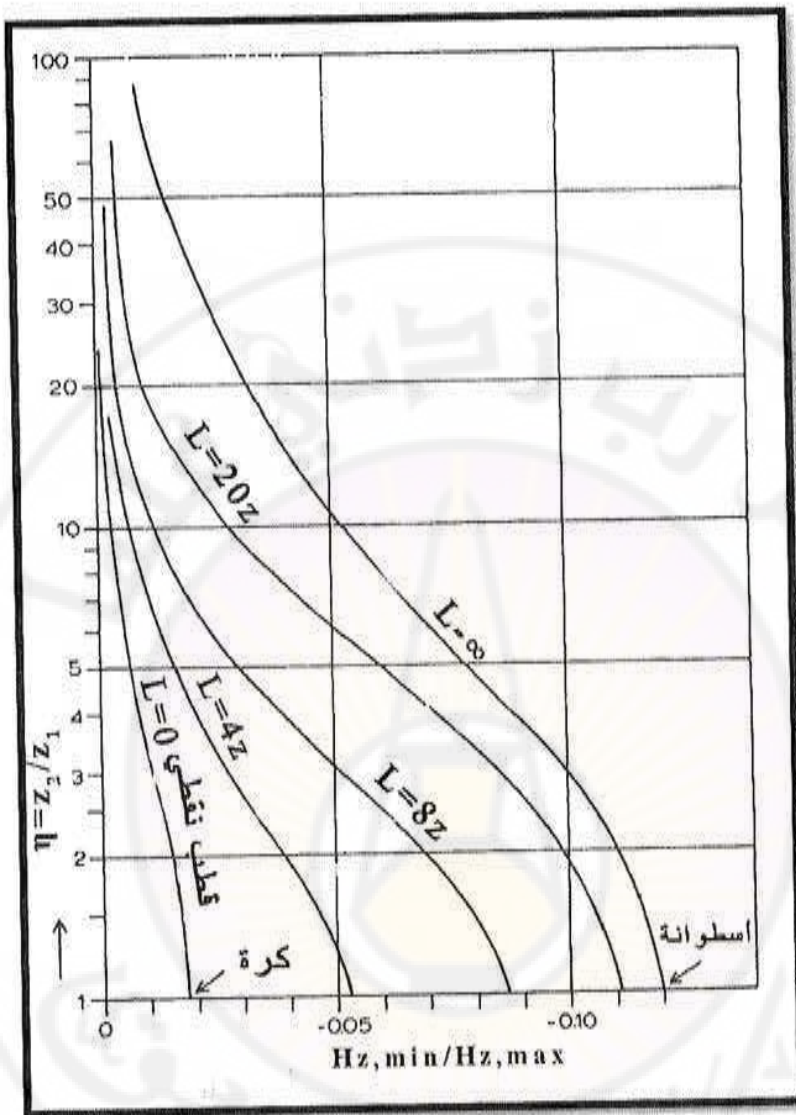
يمكن تقدير عمق السطح السفلي للجسم z_2 بطريقتين:

- 1 - نقاط تقاطع منحنى الشواذ مع محور السينات أي عندما $H_z = 0$.
- 2 - مقدار القيم الصغرى السالبة $H_{z,min}$.

يعطي بعد نقاط تقاطع منحنى الشواذ مع محور السينات عن المركز السطحي للجسم فكرة عن عمق السطح السفلي للجسم المغناطيسي، إذ يتناسب هذا البعد طردياً مع عمق السطح السفلي، فعندما يكون الجسم عميقاً جداً يزداد هذا البعد، بحيث لا يتقاطع منحنى الشواذ مع محور السينات. وإذا كانت القيم الصغرى الجانبية السالبة ظاهرة بوضوح، والجسم شديد الميل، فيمكن تقدير عمق السطح السفلي بدقة مقبولة من النسبة $H_{z,min}/H_{z,max}$ باستخدام

الشكل (5-18) الذي يعطي النسبة $\eta = \frac{z_2}{z_1}$ لجسم متغير الطول باتجاه اتجاهه ($L = 0$) إلى

إلى ($L = \infty$) وشديد الميل، فيما لو عرف عمق سطحه العلوي (z_1) وطول اتجاهه (L).



الشكل (5-18): تقدير عمق الجسم من أماكن ومقادير القيم الصغرى السالبة مع تغير طول الجسم باتجاه اتجاهه (L).

(حسب باراسنيس 1975 Parasnīs)

5-2-6- عرض الصفيحة الشاقولية (b):

يعطى $b \cdot I$ جداء عرض صفيحة رقيقة (b) (مقدر بالمتر) بشدة مغنطيسيتها (I) (مقدر بالأمبير/متر) لجسم طويل باتجاه اتجاهه وذو امتداد كبير نحو الأسفل بالعلاقة التالية:

$$b \cdot I = 0.5 \cdot 4\pi \cdot z_1 \frac{H_{z,max}}{\mu_0} \quad (5-1)$$

ويقدر عمق السطح العلوي z_1 بالمتر و $H_{z,max}$ بالويبر/م² و I بالأمبير/م و μ_0 هي النفوذية في الفراغ.

إذا كان الجسم قصيراً باتجاه اتجاهه فيجب استبدال الرقم 0.5 برقم أكبر نوعاً ما.

إذا كان امتداد الجسم نحو الأسفل صغيراً فيقترب هذا الرقم من 1.

إذا كانت الشدة المغنطيسية شاقولية تقريباً فيمكن كتابة العلاقة :

$$I = k \cdot Z / \mu_0 \quad (5-2)$$

حيث (k) هي المتأثرة و Z المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي المسجل

وتقدر بالويبر/م²، ويمكن إعطاء عرض الجسم كما يلي:

$$b = f \cdot \frac{4\pi \cdot z_2 \cdot H_{z,max}}{k \cdot Z} \quad (5-3)$$

حيث : $f = 0.5 - 1$

بينت الحسابات التجريبية بأن عرض الجسم المغنطيسي من مرتبة حاصل جمع نصف عرض الشواذ على الجانب الأيمن، ونصف عرض الشواذ على الجانب الأيسر لمنحني الشواذ، وذلك عندما يكون عرض الجسم المغنطيسي أكبر أو مساوياً للمسافة الفاصلة بين الجسم المغنطيسي ومستوى القياس. وقد وُجد بالتجربة أيضاً أنه يمكن الاعتماد على قيم العرض المحسوبة من المسح المغنطيسي الجوي، فيما لو قُسم العرض المحسوب كما ذُكر سابقاً على المسافة الفاصلة بين الجسم المغنطيسي ومستوى القياس، مقدرة بالآلاف الأقدام، أو

الأمطار، نظراً لأن منحنى الشواذ سيزداد عرضاً كلما ارتفعت الطائرة، أي أنه لو حسب العرض بالطريقة المذكورة وكان 3600م وكانت المسافة 3000م، فيجب قسمة 3600م على 3 فيكون العرض المقبول 1200م.

5-2-7- مساحة المقطع العرضي لجسم أسطوانى شاقولى (A):

عندما يقدر عمق السطح العلوي لجسم أسطوانى شديد الميل، أي قريب من الشاقولى، z_1 بالمتر وتقدر $H_{z,max}$ و Z بالويبر/م²، ومساحة المقطع العرضي (A) بالمتر المربع، تعطى مساحة المقطع العرضي بالعلاقة التالية:

$$A = g \cdot \frac{4\pi z_1^2 \cdot H_{z,max}}{k \cdot Z} \quad (5-4)$$

حيث : $g = 1 - 2$

تكون $g = 1$ لجسم ذو امتداد كبير نحو الأسفل، و $g = 2$ لجسم ذو امتداد صغير نحو الأسفل.

5-3-8- شدة المغنطيسية (I_T):

يصعب تحديد شدة المغنطيسية I لكن بما أن $I = k \cdot Z / \mu_0$ و Z معروفة في منطقة القياس، يتم فرض قيمة لمتأثرية الجسم المدروس k ، بناء على المعطيات الجيولوجية أو بشكل تقديري.

تعد مغنطيسية جسم مغنطيسي مطمور I_T هي محصلة المغنطيسية المتحرضة بالحقل المغنطيسي المسيطر $I_i = kZ / \mu_0$ ، والمغنطيسية المتبقية I_r ، ولهذا تقدر H_z و Z بالويبر/م² و I_r بالأمبير/م أي:

$$I_T = I_i + I_r = kZ / \mu_0 + I_r \quad (5-5)$$

وللتذكير نقول أن:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ ohm} \cdot \text{s} / \text{m}, \quad 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ wb} / \text{m}^2$$

إذا كانت المغنطيسية المتحرضة، والمغنطيسية المتبقية في اتجاه واحد فيجب إبدال المقدار kZ في مقامي المعادلتين (5-3) و (5-4) بالمقدار $(kZ / \mu_0 + I_r)$ ، وإذا كانتا باتجاهين متعاكسين نستبدله بالمقدار $(kZ / \mu_0 - I_r)$.

من الواضح أن إهمال المغنطيسية المتبقية سيزيد قيم b و A في الحالة الأولى، وينقصها في الحالة الثانية، كذلك إذا كانت المغنطيسية المتبقية أعلى من المغنطيسية المتحرضة سيكون الخطأ في b و A كبيراً جداً.

5-4- التفسير الكمي لمعطيات المركبة المغنطيسية الشاقولية:

يُعد التفسير الكمي لمعطيات المركبة الشاقولية أسهل بكثير من التفسير الكمي لمعطيات الحقل الكلي، لكن تطبيقه محدود جداً في المناطق التي يبتعد فيها الحقل الكلي كثيراً عن الوضع الشاقولي. لكن يمكن تطبيقه عند استخدام مقاييس المركبة الشاقولية المغنطيسية، مع العلم أن استخدام هذه المقاييس أقل انتشاراً من مقاييس الحقل المغنطيسي الكلي. ويمكن عند دراسة عرق شاقولي أو قريب من الشاقولي وطول جداً بالنسبة لعمق طرفه العلوي إهمال تأثير طرفه السفلي، ومعاملة الطرف العلوي وكأنه قطب مغنطيسي معزول. يعطي هذا القطب المعزول تغير شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية مع المسافة الأفقية، كما في الشكل (5-13). ويمكن حساب عمق الطرف العلوي لهذا القطب المعزول Z من طريقة نصف عرض الشواذ (Half width rule) حسب العلاقة التجريبية:

$$z = f \cdot x_1$$

ويجب معالجة الجسم القصير كأنه ثنائي قطب مطمور، أو مغنطيس بسيط، أما إذا كان طول ثنائي القطب، وميله كبيرين، بحيث يمكن عزل تأثير القطب الموجب عن تأثير القطب السالب، فيمكن حساب العمق لكل من الأقطاب بشكل منفرد باستخدام معادلة القطب المعزول. عندما تكون الأجسام المغنطيسية أكثر امتداداً وتعقيداً من مغنطيس بسيط، أو ثنائي قطب، فمن المفيد مقارنة المنحنيات المقاسة مع المنحنيات النظرية المحسوبة للأجسام الهندسية البسيطة (كرة أو أسطوانة أو شرائح أو جدران قاطعة) المذكورة في الفصل الثاني. تتغير العلاقة بين عمق مركز الجسم (z_c) ونصف عرض الشواذ (x_1) بالنسبة لكرة، أو أسطوانة أفقية، حسب قيمة المعامل f الذي يساوي 2 للكرة و 2.05 للأسطوانة الأفقية وهكذا يكون:

$$z_c = f \cdot x_1 = 2x_1 \quad \text{عمق مركز الكرة}$$

$$z_c = 2.05x_1 \quad \text{عمق محور الأسطوانة الأفقية}$$

تؤخذ الجدران القاطعة الاندفاعية كأمثلة على الشرائح ثنائية الأبعاد. ومن المعروف أن الجدران القاطعة لها أهمية كبيرة في التنقيب المنجمي، لكونها مصادر محتملة للفلزات. وعلى العموم للحصول على عمق الجسم المغنطيسي يجب ضرب قيمة x_1 بقيمة المعامل f ، التي

تتراوح بين 1 و 2 اعتماداً على طول اتجاه الجسم (L) وامتداده نحو الأسفل، أي النسبة $\frac{z_2}{z_1}$

كما ورد في الجدول (1-5).

عندما يبتعد الجسم المغنطيسي عن شكل هندسي معين، فيجب إتباع طرائق أخرى. لقد وضع بيترز (Peters, 1949) طريقتين لتقدير العمق من شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية. الأولى طريقة الميل (slop method) والثانية طريقة منحنى الخطأ (error curve method) وهما سهلان، ويمكن تطبيقهما على شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية الناتجة عن أجسام مغنطيسية منتظمة، وعن غير منتظمة الشكل أيضاً. لقد استخدمت طريقة الميل كثيراً لتحديد العمق إلى سطح الركيزة باستخدام الشواذ الملاحظة فوق جزء من الركيزة تختلف متاثيرته عن بقية الركيزة. بينما تستخدم طريقة منحنى الخطأ عند وجود خريطة خطوط تساوي شدة المركبة المغنطيسية الشاقولية، وتتطلب استخدام الحاسوب لتحليل النتائج وحساب عمق السطح العلوي للجسم.

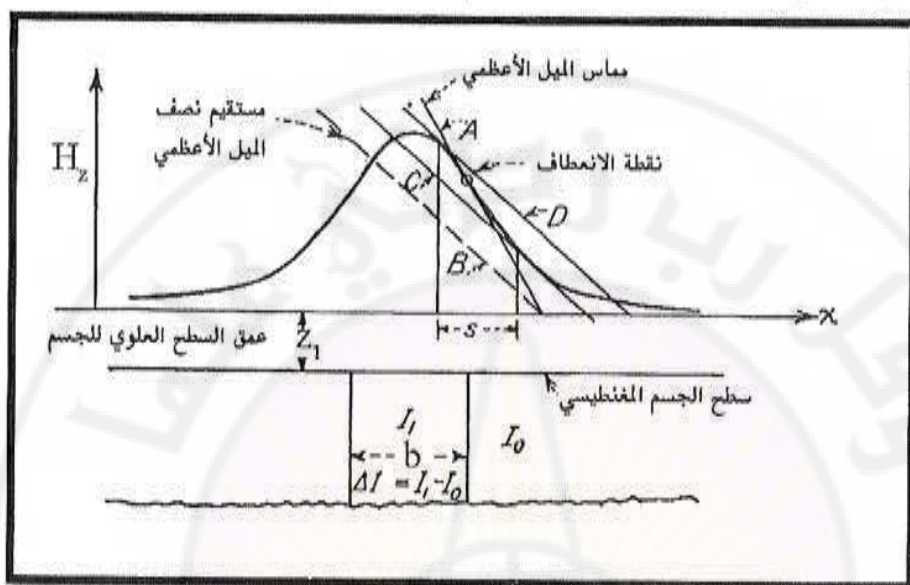
بالإضافة إلى طريقة نصف عرض الشواذ وطريقتي بيترز، وُضع عدد آخر من طرائق حساب العمق إلى السطح العلوي للجسم، باستخدام منحنى شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية، سنعرضها فيما يلي بشكل موجز. نورد فيما يلي الطرائق التي تطبق على منحني وحيد، ويلبيها الطرائق التي تطبق على خريطة.

5-4-1- طرائق التفسير المطبقة على منحني وحيد (أحادية البعد):

أ- طريقة الميل:

بفرض لتطبيق طريقة الميل أن الجسم المغنطيسي هو صفيحة شاقولية عرضها (b) لا محدودة الامتداد نحو الأسفل، ولها امتداد أفقي عمودي على المنحني (أو الصفحة) أي أنها ثنائية الأبعاد. بفرض أن متاثيرتها (k) وأنها لا تحتوي مغنطيسية متبقية وكذلك الوسط المحيط بها، وتقع قمته على عمق (z_1)، لذا تعد مغنطيسيتها (II) متحرضة حيث ($I_1 = k \cdot Z_1$)

ومغناطيسية المواد المحيطة بها (I_0)، وهكذا فالمغناطيسية الفعالة الناتجة عن الصفيحة هي ($\Delta I = I_1 - I_0$). من الواضح أن هذا الوصف مطابق لحالة جدار قاطع شاقولي، عرضه b ، ومتأثرته أعلى من متأثرية الصخور المحيطة (الشكل 5-19).



الشكل (5-19): تمثيل طريقة الميل.

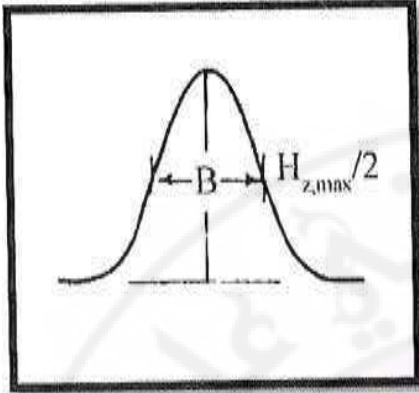
(حسب دوبرين 1983 (Dobrin, 1983))

نطبق طريقة الميل لحساب العمق إلى السطح العلوي للجسم المغناطيسي، باستخدام منحنى تغير الشدة المغناطيسية الشاقولية. نحدد نقطة الانعطاف (Inflection point) (الشكل 5-19) المقابلة للميل الأعظمي للمنحنى، ثم يرسم مماس (المستقيم A) للمنحنى في نقطة الانعطاف، ثم يرسم مستقيم (المستقيم B)، ميله يساوي نصف الميل الأعظمي، ينطلق من نقطة تلاقي المستقيم A مع المحور x ، ثم يرسم مماسان (المستقيمان C و D) موازيان للمستقيم B. يمر الأول (المستقيم C) بنقطة التماس الدنيا، ويمر الثاني (المستقيم D) بنقطة التماس العليا. ثم تُسقط نقطتا التماس الدنيا والعليا على المحور x ، ويرمز للمسافة الفاصلة بين المستقيمين بـ S ، وترتبط مع عمق السطح العلوي للجسم z_1 بالعلاقة:

$$S = 1.6 z_1$$

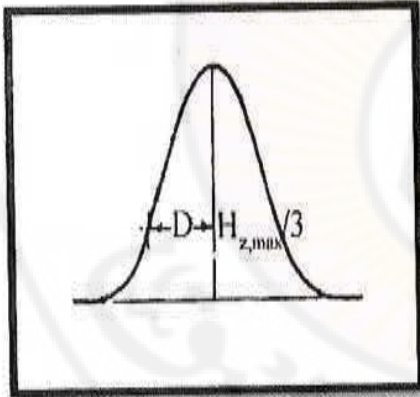
$$z_1 = S/1.6 = 0.625 S \quad (5-6)$$

- طريقة تيبورغ Tiburg rule:



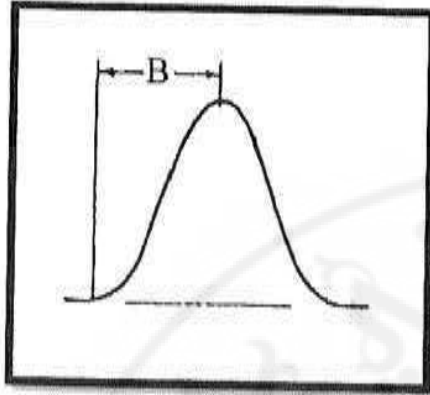
في هذه الطريقة يساوي العمق $\frac{2}{3}$ المسافة الأفقية الفاصلة بين جانبي المنحني عند القيمة $\frac{H_{z,max}}{2}$ أي ثلثي المسافة B في الشكل المجاور. تطبق هذه الطريقة على حالة قطب معزول، أو في حالة جسم أسطوانى رفيع جداً وسطحه السفلي عميق جداً.

- طريقة هانيل Hannel rule:

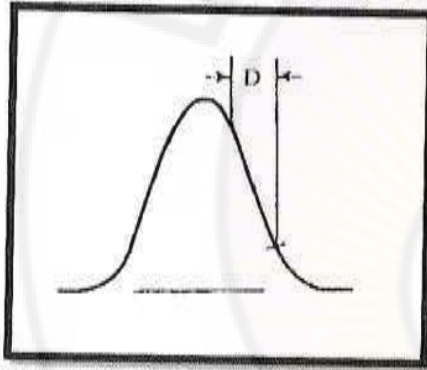


في هذه الطريقة يساوي العمق ثلث عرض الشواذ (x_1) أي المسافة D الأفقية الفاصلة بين المنحني والمحور الشاقولي عند القيمة $\frac{H_{z,max}}{3}$ كما في الشكل المجاور. تطبق هذه الطريقة أيضاً على حالة قطب معزول، أو حالة جسم أسطوانى رفيع جداً وسطحه السفلي عميق جداً.

طريقة تالين :Thalen rule



في هذه الطريقة يساوي العمق $\frac{7}{10}$ المسافة الأفقية الفاصلة بين نقطة القيمة العظمى ونهاية منطقة الشواذ، أي سبعة أعشار المسافة B في الشكل المجاور. تطبق هذه الطريقة في حالة اعتماد تأثير السطحين العلوي والسفلي للجسم.



- طريقة مستقيم الميل Slope :distance rule

في هذه الطريقة يساوي العمق المسافة الأفقية الفاصلة بين مسطوي بداية ونهاية الجزء المستقيم من جانب المنحني أي المسافة D في الشكل المجاور.

من الواضح أن ثمة فروق كبيرة بين نتائج هذه الطرائق المختلفة، لذا طبق ريديل (Riddell, 1966) كل هذه الطرائق على مكن حديد ديتون (Dayton) في غرب ولاية نيفادا الأمريكية، لإظهار هذه الفروق ومحاولة تحديد الطريقة الأفضل لحساب العمق إلى الجسم المغنطيسي. لقد وضعت هذه الطرائق أصلاً لحساب عمق الجسم المغنطيسي من منحني شواذ المركبة الشاقولية إلا أن ريديل طبقها على منحني شواذ الحقل المغنطيسي الكلي المقاس على سطح الأرض، وعلى الارتفاعات 500 و 1000 و 2000 و 3000 قدم، معتمداً على أن شدة المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي في المنطقة تبلغ نحو 90% من شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي. وجد ريديل أن طريقة نصف عرض الشواذ، وطريقة

الميل، تعطيان أفضل النتائج لقيم العمق. بينما تعطي طريقة تيبورغ، وطريقة هانيل، نتائج أقل جودة من الطريقتين السابقتين. في حين تعطي طريقة تالين قيماً أكبر من الواقع، وتعطي طريقة مستقيم الميل قيماً أصغر من الواقع.

2-4-5. طرائق التفسير المطبقة على خريطة (ثنائية البعد):

طريقة منحنى الخطأ:

تعتمد الطريقة على إمكانية إجراء التتابع نحو الأسفل للحقل المقاس على السطح إلى مستويات مختلفة العمق، ثم إجراء التتابع نحو الأعلى للنتائج التتابع نحو الأسفل لكل مستوى من المستويات. أي يتم نقل مزدوج للحقل نحو الأسفل ثم نحو الأعلى. ويجب، من الناحية النظرية أن يكون الحقل المحسوب الناتج مشابهاً تماماً للحقل المقاس الأولي، لكن من الناحية العملية نجد فرقاً بين الحقلين المقاس والمحسوب، إنما يكون المتوسط أو جذر متوسط المربعات ((root mean square (rms) للفرق بين الحقل المقاس والحقل المحسوب صغيراً لكل الأعماق حتى عمق السطح العلوي للجسم. لكن التتابع نحو الأسفل إلى عمق أكبر من عمق السطح العلوي للجسم ينتج حقلاً غير مستقر، وعند إجراء التتابع نحو الأعلى يظهر الحقل المحسوب مختلفاً كثيراً عن الحقل المقاس الأولي، وكلما زاد العمق عن السطح العلوي للجسم زاد الفرق بين الحقلين.

لتطبيق الطريقة يتبع ما يلي: بفرض شدة المركبة الشاقولية المقاسة H_{zc} و H_{zm} المركبة الشاقولية المحسوبة من التتابع نحو الأسفل إلى عمق z فيكون:

$$H_{zc} = \sum C_n \cdot \bar{H}_z(b_n, z) \quad (5-7)$$

لحساب H_{zc} يُبحث في خريطة شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية عن النقطة التي يكون التحدب فيها أعظيماً، وتُفرض كمركز، ثم يؤخذ حولها دوائر، ذات أنصاف أقطار مساوية للجداء b_n, z ، حيث z العمق المتوسط المقدّر. يضرب المتوسط على دائرة بقيمة C_n الموافقة من الجدول (2-5)، ثم تجمع النتائج للدوائر المختلفة فنحصل على قيمة H_{zc} . (يقصد بالمتوسط هنا متوسط قيم شدة المركبة الشاقولية في نقاط محددة، موزعة على محيط دائرة نصف قطرها (b_n, z)).

الجدول (2-5): يعطي قيم C_n الموافقة لقيم b_n .

(حسب بيترز 1949)

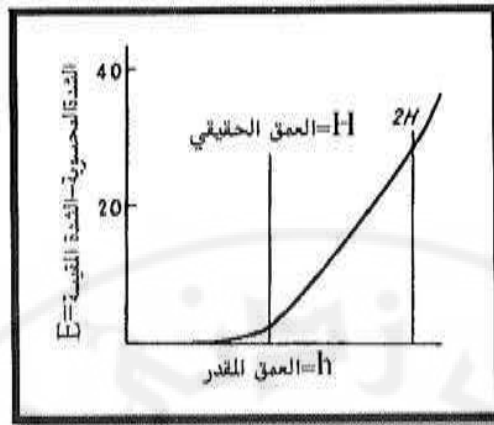
b_n	C_n
0.1	0.3001
0.3	0.5102
0.5	0.2622
0.7	0.0311
0.9	-0.0378
1.1	-0.0348
1.3	-0.0190
1.5	-0.0087
1.7	-0.0035
1.9	-0.0011
2.25	0.0000
2.75	0.0007
3.25	0.0003
3.27	0.0003

ثم يحسب E الفرق بين شدة المركبة الشاقولية المقاسة والمحسوبة أي:

$$E = H_{zm} - H_{zc} = H_{zm} - \sum C_n \cdot \bar{H}_z(b_n \cdot z) \quad (5-8)$$

يعاد الحساب بعد الاستعاضة عن z بـ $\frac{z}{2}$ ، $\frac{3z}{2}$ ، $2z$ بالترتيب، ثم يرسم منحن

لـ z و E كما في الشكل (20-5)، ثم تحدد نقطة الانحراف الحاد الأولي على المنحني المرسوم، ويُعد العمق H المقابل لها عمق السطح العلوي للجسم (z_1).



الشكل (5-20): منحنى الفرق بين شدة المركبة الشاقولية المقاسة والمحسوبة بدلالة العمق المقدر.
(حسب دوبرين Dobrin, 1983)

5-5- التفسير الكمي لمعطيات الحقل المغناطيسي الكلي:

تشكل معطيات الحقل المغناطيسي الكلي الغالبة العظمى من معطيات المسح المغناطيسي، لأنها ناتجة عن المسح الجوي والبحري، كما أن تفسير معطيات الحقل المغناطيسي الكلي أكثر تعقيداً من تفسير معطيات المركبة المغناطيسية الشاقولية، إلا في الحالات التي يمكن فيها تمثيل الجسم المغناطيسي بشكل هندسي بسيط أو نموذجي، لذا درست بالتفصيل الشواذ المغناطيسية الناتجة عن شرائح ذات سطوح متوازية، وامتداد جانبي كبير مع درجات مختلفة من الميل، وتلك الناتجة عن مواشير عمودية، أو أجسام ذات مقطع مستطيل. نظراً لأن اتجاه المغناطيسية المتبقية لا يتوافق مع اتجاه المغناطيسية المتحرضة بالحقل المغناطيسي الأرضي، الذي سيطر في أثناء القياس، ولأن معرفة اتجاه المغناطيسية الكلية والمغناطيسية المتحرضة وميلها ضرورية لتفسير وتحليل الشواذ المغناطيسية فقد جرت محاولات كثيرة لمعرفة اتجاه المغناطيسية الكلية وميلها. لذا يستخدم حالياً الحقل المغناطيسي الأرضي المرجع (IGRF) لحساب اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي، وميله، واتجاهه للمنطقة المدروسة وفي زمن القياس، وبالتالي يمكن تحديد اتجاه المغناطيسية المتحرضة، مما يمكن من معرفة اتجاه المغناطيسية المتبقية، فيما لو لم يكن بالإمكان تحديدها من عينات صخرية بسبب استحالة الوصول إلى الصخر. نظراً لصعوبة تحديد ميل المغناطيسية المتبقية واتجاهها تعتبر المغناطيسية المقاسة فعلاً

هي محصلة المغنطيسية المتحرضة والمغنطيسية المتبقية أي المغنطيسية الكلية. كذلك لا تأخذ الأجسام المغنطيسية أشكالاً هندسية منتظمة مما يدعو لتقريب شكل الجسم إلى أقرب شكل هندسي ممكن.

لهذه الأسباب نجد أن الطرائق المستخدمة في التفسيرات معقدة، وتحتاج إلى حاسوب للقيام بها، نظراً لضخامة كمية الحسابات اللازمة للخروج بنتيجة صحيحة. نورد فيما يلي أهم الطرائق المستخدمة في التفسير:

- 1- طريقة ورنر.
 - 2- طريقة نودي.
 - 3- طريقة هوشيسون.
 - 4- منحنيات غي النموذجية.
 - 5- طريقة المشتق الثاني.
 - 6- طريقة التتابع: أ- التتابع نحو الأعلى.
ب- التتابع نحو الأسفل.
 - 7- طريقة الإرجاع إلى القطب.
 - 8- طريقة التجريب والخطأ.
 - 9- حساب شواذ المغنطيسية الكلية الناتجة عن مصادر ثلاثية الأبعاد لا منتظمة الشكل.
- وضعت طريقتا ورنر ونودي لحساب العمق إلى الجسم المغنطيسي باستخدام الحاسوب، لكن هذه الطرائق تحتاج لجهد كبير وحذر شديد في تطبيقها على مساحة واسعة، نظراً لضرورة تحديد العمق بالنسبة لكل شاذ مغنطيسي على حده. وعموماً تحتاج هذه الطرائق للكثير من التطوير، لتعطي أفضل النتائج المطلوبة. وسنشرح فيما يلي المبدأ العام لهاتين الطريقتين من دون التعمق بالرياضيات المستخدمة فيها.

5-5-1- طريقة ورنر Werner method:

طورت هذه الطريقة بواسطة Werner، لكنها لخصت بواسطة هارتمان (Hartman et al., 1971)، ويمكن بهذه الطريقة استخدام القيم المأخوذة من منحنى التدرج الشاقولي المقاس، أو المحسوب، أو منحنى التدرج الأفقي المحسوب، أو من منحنى الحقل المغنطيسي الكلي

المقاس. ويفرض بأن الجسم بشكل صفيحة مائلة سماكتها أقل من عمقها، وتتألف من عدد من الصفائح المتوضعة بعضها فوق بعض، لتشكل جسماً عريضاً. يعطي حل المعادلة رقم (5-9) عمق نقطة محددة على سطح الصفيحة والمسافة الأفقية التي تفصل مسقط هذه النقطة على سطح الأرض عن نقطة القياس. وهكذا يعطي كل حل للمعادلة نقطة واقعة على جسم مغناطيسي، قد تكون واقعة على سطح الركيزة، أو تحتها، أو فوقها.

كمثال على هذا يفرض أن $H_T(x)$ هي شواذ الحقل المغناطيسي الكلي، الناتج عن جدار قاطع (صفيحة) طويل جداً باتجاه اتجاهه، وعلى مسافة مقدارها (x) واقعة على طول خط عمودي على اتجاه الصفيحة، أي واقعة على طول مسار الطيران. يعبر عن $H_T(x)$ بما يلي:

$$H_T(x) = \frac{A(x - x_0) + Bz}{(x - x_0)^2 + z^2} \quad (5-9)$$

حيث :

x_0 : المسافة إلى مسقط النقطة على سطح الأرض (أي مركزها السطحي).

z : العمق إلى السطح العلوي للصفيحة .

A, B : ثوابع يجب تعيينها من شدة الحقل الأرضي وميله واتجاهه وانحراف مغناطيسية الصفيحة وميلها.

يوجد في المعادلة السابقة أربعة مجاهيل هي: A, B, x_0, z فلو وضعت بالصيغة التالية:

$$a_0 + a_1 + b_1 F + b_1 x F = x^2 F \quad (5-10)$$

حيث

$$a_0 = -Ax_0 + Bz$$

$$a_1 = A$$

$$(5-11)$$

$$b_0 = -x_0^2 - z^2$$

$$b_1 = 2x_0$$

$$F = H_T(x)$$

وبحل هذه المعادلات نجد :

$$x_0 = \frac{b_1}{2} \quad (5-12)$$

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{-4b_0 - b_1^2} \quad (5-13)$$

بتبديل قيم $H_T(x)$ في أربع قيم مختلفة لـ (x) نحصل على a_0, a_1, b_0, b_1 ومنها نحصل على x_0, z .

ترسم النتائج أوتوماتيكياً على خريطة، ويوضع بجانب كل نقطة عمق المصدر المغنطيسي، أي عمق النقطة الواقعة تحتها مباشرة والواقعة على سطح الصفيحة المغنطيسية.

5-5-2- طريقة نودي Naudy method:

نشرت هذه الطريقة من قبل نودي (Naudy, 1971)، وتجمع بين فصل الشواذ المقاسة إلى توابع زوجية وفردية والإرجاع إلى القطب. يمكن فصل أي تابع لـ (x) مثل $y(x)$ إلى مركبة متناظرة $S_1(x)$ ومركبة غير متناظرة $S_2(x)$ حول مركز اختياري، بحيث

$$S_1(x) + S_2(x) = y(x) \quad (5-14)$$

فقيمة $S_1(x)$ لا تتغير عندما نستبدل (x) بـ $(-x)$ ، بينما تنعكس إشارة $S_2(x)$ إذا تغيرت إشارة (x) . ليس بالإمكان الحصول على تفسير منطقي لجزء $S_2(x)$ من المنحني ما لم يحول إلى تابع متناظر بالإرجاع إلى القطب. يتم ذلك باستخدام مجموعة المعاملات المحددة من قبل بارانوف (Baranov, 1957) لطريقة الإرجاع إلى القطب (انظر فقرة 5-5-7).

تتضمن الطريقة تحديد منحنيات $S_1(x)$ من المنحني الملاحظ، ومن المنحني المحول بشي (convolution) المنحني المقاس. بعدها يربط بكلا المنحنيين منحني نظري للشواذ فوق كل نموذج متناظر محدد. الخصائص من سلسلة جدران قاطعة. تغطي الجدران القاطعة

النموذجية مجالاً واسعاً من العمق والعرض، ويستخدم النموذج الناتج معامل الترابط الأكبر، لرسم العمق تحت مركز كل شاذ على المسار المدروس.

في حال وجود العديد من الجدران القاطعة على طول مسار واحد وعلى أعماق مختلفة تتيج طريقة نودي رسم كل منها بمفرده، بالترابط مع سلسلة من نماذج تغطي المجال المتوقع من الأعماق. ومن محاسن هذه الطريقة أنه يمكن استخدامها مع منحنيات شواذ ناتجة عن جدران قاطعة على أعماق مختلفة، يصعب فصلها عن بعضها بسهولة.

يتم في هذه الطريقة تحديد مراكز السطوح العليا، وأعماقها، للأجسام المغنطيسية المختلفة. تتم الحسابات وترسم الأعماق بواسطة الحاسوب الإلكتروني، بحيث تعطي جداراً قاطعاً لا حدود لعمقه، أو صفيحة رقيقة، وتمثل الأعماق المختلفة بواسطة إشارات معينة.

5-3-5- طريقة هوتشيسون Hutchison method:

وضع هذه الطريقة هوتشيسون (Hutchison, 1958)، لتفسير الجدران القاطعة التي تبدي شواذ مغنطيسية واضحة وبارزة، من دون تداخل من جدران قاطعة أخرى، أو مصادر مغنطيسية معادلة. مع أن الطريقة وضعت أصلاً لتفسير شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية، لكنها صالحة لتفسير شواذ الحقل المغنطيسي الكلي، إذا كان المسار المغنطيسي متعامداً مع اتجاه الجدار القاطع، وهي مشابهة لطريقة نودي التي تتضمن فصل الشواذ المتناظرة عن تلك غير المتناظرة.

يُرسَم التابع المتناظر على ورق لوغارتمي، بعد طرح مستوى قيمة الحقل المرجع، ويُرسَم التابع غير المتناظر لوغارتمياً بالطريقة نفسها. تقارن المنحنيات الناتجة مع مجموعة من المنحنيات النموذجية التي وردت في مقالة هوتشيسون. وتعتبر الجدران التي تظهر منحنياتها المغنطيسية أفضل تماثل مع المنحنيات المقاسة بأنها ممثلة للجدران الفعلية. يتم تحديد موقعي الحافة العليا للجدار من هذه المقاربة. وهكذا يمكن تحديد عمق الجدار القاطع، ومركبته في اتجاه معين، من عرضه وليس زاوية ميله.

بالحقيقة وردت في المقالة ثلاث مجموعات لمنحنيات الجدران القاطعة (dikes)، والمنحدرات الشديدة (scarps)، والأسرة الرقيقة (thin beds).

5-5-4- منحنيات غي النموذجية Gay's Master Curves:

نشر غي وباركر (Gay & Parker, 1967) مجموعة من المنحنيات النموذجية، لتفسير الشواذ المغنطيسية (المركبة الشاقولية والمركبة الأفقية والحقل الكلي) فوق جدران قاطعة مائلة رفيعة وسميكة. وقد تؤدي مقارنة المنحنيات المقاسة مع المنحنيات النموذجية إلى معرفة الجدار النموذجي الأقرب بالمواصفات إلى الجدار المسبب للشواذ المقاسة. وقد رُسمت المنحنيات لسيول مختلفة، واتجاهات مختلفة للأجسام، ولميول مختلفة للحقل المغنطيسي الأرضي، ولجدران قاطعة سميكة.

5-5-5- طريقة المشتق الثاني Second derivative

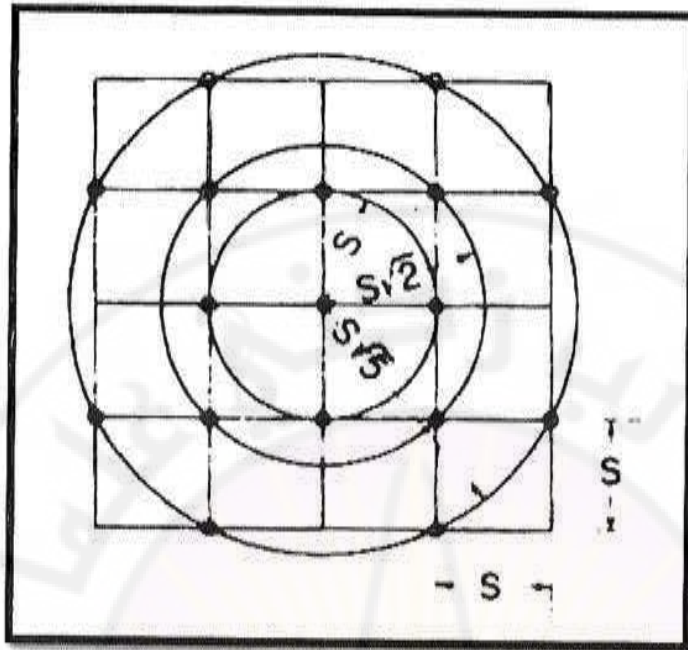
:method

يعتبر المشتق الثاني الشاقولي للحقل المغنطيسي الأرضي مفيداً جداً في تفسير الشواذ المغنطيسية، بسبب قدرته التحليلية العالية، لذلك تم تطوير الصيغ الرياضية، التي تسمح بالحساب العددي، أو الكمي. ولقد طورت هذه الطريقة لزيادة القدرة التحليلية الكمية للمغنطيسية، وللتخفيف من الغموض في التفسيرات المغنطيسية. لذا يمكن جعل التفسيرات النوعية والكمية أكثر موضوعية، بوضع خرائط المشتق الثاني الشاقولي للحقل المغنطيسي. يعتبر المشتق الثاني قياساً لنقوس أو تحذب (curvature) الحقل المغنطيسي. فكلما زاد نقوس منحنى الشواذ المغنطيسي (أي صغر نصف قطر النقوس) تزداد قيمة المشتق الثاني، وعندما لا يوجد نقوس (نصف القطر لا نهائي) يكون المشتق الثاني مساوياً للصفر.

فإذا وجد جسم مغنطيسي ضحل، ذو امتداد محدود ومغنطيسية أعلى من مغنطيسية الوسط المحيط، يكون نقوس منحنى الشواذ المغنطيسية الناتج عنه أكبر من نقوس الحقل المغنطيسي الإقليمي، وبالتالي يكون المشتق الثاني أكبر فوق الجسم الضحل منه فوق الحقل الإقليمي المحيط. لذا يكون منحنى المشتق الثاني أكثر بروزاً فوق الجسم الضحل، منه فوق الخلفية الناتجة عن الحقل الإقليمي. هكذا تعمل خرائط المشتق الثاني المغنطيسية كعامل تضخيم للمظاهر المغنطيسية المحلية، وتخفيض للشواذ الإقليمية، أي أنها جيدة للاستعمال في التنقيب الفلزي ولتعزيز تأثير الأجسام المفيدة القريبة من السطح، مثل وجود صخور عالية المغنطيسية في وسط من صخور رسوبية منخفضة المغنطيسية، كما تساعد على تعيين المنخفضات intrabasement، أو البروزات suprabasement في الركيزة.

يمكن حساب خرائط المشتق الثاني للمركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي أو خرائط المشتق الثاني للحقل المغنطيسي الكلي، إن المشتق الثاني الشاقولي هو المشتق الجزئي الثاني للحقل المغنطيسي T بالنسبة للشاقول أي $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ ، أو المشتق الجزئي الثالث للكُمون المغنطيسي.

عالج العديد من الباحثين الموضوع (هندرسون وزايتز (Henderson & Zietz, 1949) وبيترز (Peters, 1949) وآلكنز (Elkins, 1951) وروزنباخ (Rosenbach, 1953) وهندرسون وزايتز (Henderson & Zietz, 1967))، ووضع كل من منهم العلاقة الرياضية المناسبة لحساب المشتق الثاني للحقل المغنطيسي الكلي، أو للمركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي. ثم تم تحويل العلاقات الرياضية المعقدة إلى طرائق عملية للحساب، باستخدام قيم مأخوذة على شبكة منتظمة من النقاط لتحديد المتوسطات على محيط دوائر لها أنصاف أقطار مختلفة، ومتمركزة حول النقطة المركزية، التي يحسب بها المشتق الثاني كما في الشكل (5-21)، الذي يعطي مثلاً على شبكة مربعة منتظمة، وقد استخدمت ثلاث دوائر لحساب المشتق الثاني، وأخذت أنصاف أقطار الدوائر $S, S\sqrt{2}, S\sqrt{5}$ ، ليحسب المتوسط على الدائرة الأولى، التي نصف قطرها S من أربع قيم، وعلى الدائرة الثانية التي نصف قطرها $S\sqrt{2}$ من أربع قيم، وعلى الدائرة الثالثة التي نصف قطرها $S\sqrt{5}$ من ثمانية قيم.



الشكل (5-21): مثال لشبكة مربعة مسافات الشبكة S تتألف من خمسة صفوف وخمسة أعمدة وثلاث دوائر.

تتشارك الصيغ التي نشرت بالصيغة العامة التالية لكنها تختلف بعضها عن بعض بالمعاملات العددية، $w_0, w_1, \dots$ ويمكن تطبيقها لحساب المشتق الثاني للمغناطيسية أو للجاذبية:

$$g_{zz} = \frac{C}{S^2} (w_0 g_0 + w_1 g_1 + w_2 g_2 + \dots + w_n g_n) \quad (5-15)$$

حيث :

g_{zz} : المشتق الثاني في نقطة الحساب المركزية.

C : ثابت لصيغة معينة.

S : المسافة الشبكية.

w_0, w_1 : معاملات عددية.

g_0 : شدة المغناطيسية أو الجاذبية في نقطة الحساب المركزية.

$g_1, g_2, \dots$: متوسط قيم الشدة المغناطيسية أو الجاذبية في نقاط تقاطع الدوائر مع عقد الشبكة.

تأخذ المعاملات العددية القيم السالبة والموجبة (الجدول 5-3) وتكون العلاقة بينها كالتالي:

$$w_0 + w_1 + w_2 + \dots + w_n = 0 \quad (5-16)$$

الجدول (5-3): ملخص بعض صيغ حساب المشتق الثاني للمغناطيسية والجاذبية.
(حسب نيتلتون 1976 (Nettleton, 1976))

w_5	w_4	w_3	w_2	w_1	w_0	$k=Cw_0$	رقم الصيغة
$r_5=\sqrt{9.23}$	$r_4=\sqrt{5}$	$r_3=2$	$r_2=\sqrt{2}$	$r_1=1$	$r=0$		
				-1	1	1	1
				-1	1	4	1-A
			+0.354	-1.354	1	+6.185	2
			+0.333	-1.333	1	+6.000	3
		0.048	+0.571	-1.533	1	+7.000	4
	-0.625		-0.250	-0.125	1	+1.067	5
	-1.500		0	+0.500	1	+0.571	6
	-1.091		-0.273	+0.364	1	+0.710	7
+0.339	-1.175		-0.385	+0.221	1	+1.156	8
	+0.083		-0.333	-0.750	1	+3.000	9

مصادر الصيغ هي كالتالي:

(1) و (1-A) - النقطة المركزية مع حلقة واحدة.

(2) و (3) و (4) - هندرسون وزابتر (1949).

(5) و (6) و (7) ألكنز (1951).

(8) بيترز (1949).

(9) روزنباخ (1953).

لقد استخدمت القيم النسبية للمعاملات في المنشورات الأصلية، وذلك بقسمة القيم w_0 ، $w_1, w_2, \dots, w_n$ على w_0 بحيث تكون القيمة النسبية لمعامل w_0 هي الواحد أي $w_0 = 1$. كما

تظهر من الجدول (3-5) حيث w_0 مساوية الواحد في كل الصيغ (العمود الثالث). تُعطى وحدة المشتق الثاني المستخدمة في المغنطيسية بالنانوتسلا بالميل المربع nT/mi^2 ، أو النانوتسلا بالكيلومتر المربع nT/km^2 .

تختلف قيم المشتق الثاني المحسوبة كثيراً من صيغة إلى أخرى حسب المعاملات العددية المختارة، وتختلف خريطة المشتق الثاني حسب المسافة الشبكية المعطاة، فعندما تكون صغيرة تُظهر الخريطة الناتجة تفاصيل دقيقة، بينما لا تُظهر سوى التفاصيل الكبيرة عندما تكون المسافة الشبكية كبيرة.

طبق آلكنز (Elkins, 1951) الصيغ (5) و (6) و (7) وروزنباخ (Rosenbach, 1953) الصيغة (9) على شواذ الجاذبية. بينما طبق بيترز (Peters, 1949) الصيغة (8) على شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية، وطبق هندرسون وزايتز (Henderson & Zietz, 1967) الصيغ (2) و (3) و (4) على شواذ الحقل المغنطيسي الكلي.

1- صيغ المشتق الثاني لشواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي ($\bar{H}$):

وضع بيترز (Peters, 1949) الصيغة التالية:

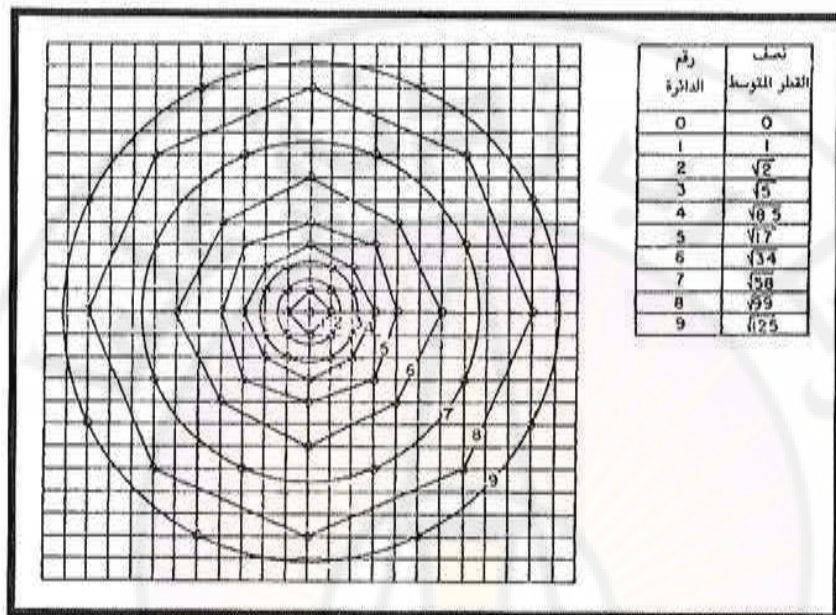
$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 1.156\bar{H}(0) + 0.256\bar{H}(1) - 0.445\bar{H}(\sqrt{2}) - 1.359\bar{H}(\sqrt{5}) + 0.392\bar{H}(\sqrt{9.23}) \quad (5-17)$$

التي تعطي المشتق الثاني للمركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي، والتي يمكن وضعها بالشكل التالي الموافق للصيغة الواردة في الجدول (3-5):

$$\frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 1.156 \left[\bar{H}(0) + 0.221\bar{H}(1) - 0.385\bar{H}(\sqrt{2}) - 1.175\bar{H}(\sqrt{5}) + 0.339\bar{H}(\sqrt{9.23}) \right] \quad (5-18)$$

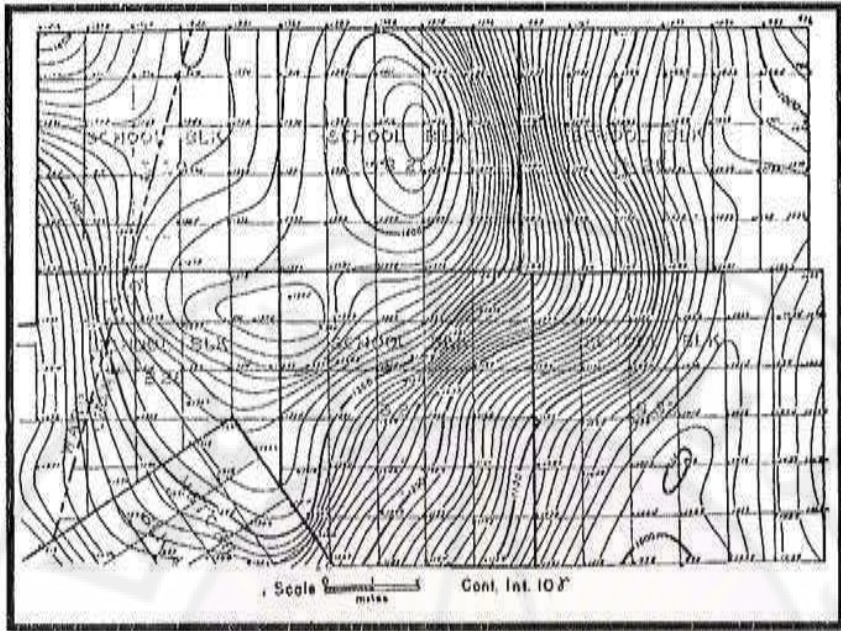
وهي الصيغة رقم (8) في الجدول (3-5) وطُبقت مع الشكل (5-22)، بحيث تشمل المتوسطات أربع قيم على الدائرة التي نصف قطرها $r=1$ ، وأربع قيم على الدائرة التي نصف

قطرها $r=\sqrt{2}$ ، وثمانية قيم على الدائرة التي نصف قطرها $r=\sqrt{5}$ ، أما المتوسط على الدائرة الرابعة التي نصف قطرها $r=\sqrt{9.23}$ ، فقد تم الحصول عليه بأخذ المتوسطات على الدوائر التي أنصاف أقطارها $r=\sqrt{8}$ ، $r=\sqrt{9}$ ، $r=\sqrt{10}$ ، والتي تشمل 4، 4، 8 قيم على التوالي.



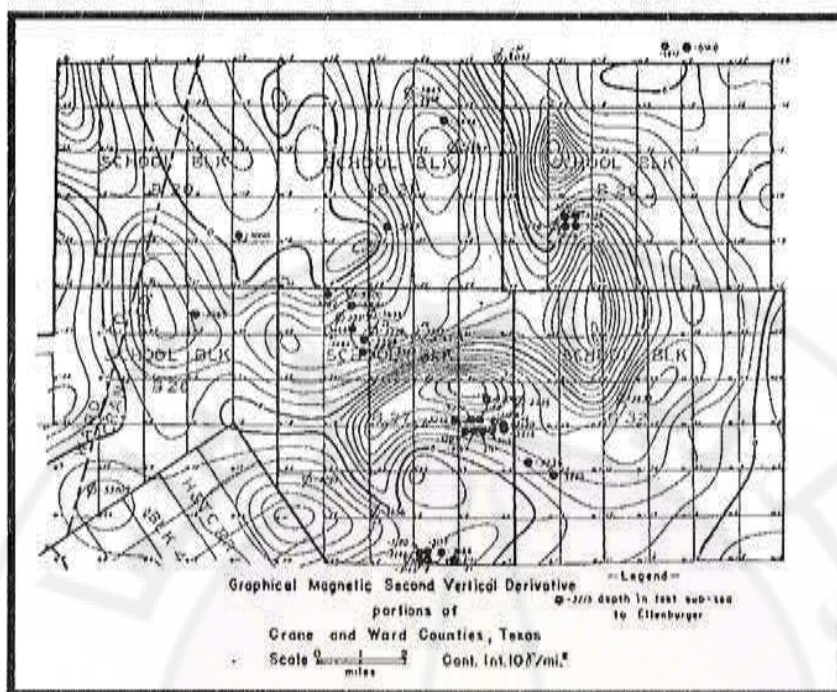
الشكل (5-22): الدوائر المستخدمة وأنصاف أقطارها ظاهرة في الجدول المرافق.
(حسب بيترز 1949 (Peters))

لتوضيح التطبيق العملي للنظرية التي اعتمدها بيترز لحساب المشتق الثاني وغيرها مما جاء في مقالته، قَدِّم عددًا من الخرائط منها خريطة شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي (الشكل 5-23) لمنطقة ساند هيلز في مقاطعتي وارد وكارين بولاية تكساس الأمريكية، وطبق عليها شبكة مربعة مسافتها الشبكية ميل واحد، بعد أن قام بتصحيحها لتغير الحقل الإقليمي. يعطي الشكل (5-24) خريطة المشتق الثاني لشواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي.



الشكل (5-23) خريطة شدة شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغناطيسي الأرضي في مقاطعتي وارد وكيرين بولاية تكساس الأمريكية.

(حسب بيترز 1949 Peters)



الشكل (5-24): خريطة شدة شواذ المشتق الثاني للمركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي في مقاطعتي وارد وكرين بولاية تكساس الأمريكية.
(حسب بيترز 1949 Peters)

2- صيغ المشتق الثاني لشواذ الحقل المغنطيسي الكلي (ΔT):

وضع هندرسون وزايتز (Henderson & Zietz, 1949) ثلاث صيغ لحساب المشتق الثاني لشواذ الحقل المغنطيسي الكلي وهي:

1- الصيغة الأولى:

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = \frac{I}{S^2} [6.185 \Delta T_0 - 8.374 \Delta T_1 + 2.189 \Delta T_2] \quad (5-19)$$

التي يمكن وضعها بالشكل التالي الموافق للصيغة الواردة في الجدول (5-3):

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = \frac{6.185}{S^2} (\Delta T_0 - 1.354 \Delta \bar{T}_1 + 0.354 \Delta \bar{T}_2) \quad (5-20)$$

وهي الصيغة رقم (2) في الجدول (3-5) وطبقت مع الشكل (5-22)، باستخدام دائرتين فقط. تشمل المتوسطات أربع قيم على الدائرة الأولى التي نصف قطرها $r_1 = 1$ وأربع قيم على الدائرة الثانية التي نصف قطرها $r_2 = \sqrt{2}$.

2- الصيغة الثانية:

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = \frac{2}{S^2} (3\Delta T_0 - 4\Delta \bar{T}_1 + \Delta \bar{T}_2) \quad (5-21)$$

التي يمكن وضعها بالشكل التالي الموافق للصيغة الواردة في الجدول (3-5):

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = \frac{6}{S^2} (\Delta T_0 - 1.333 \Delta \bar{T}_1 + 0.333 \Delta \bar{T}_2) \quad (5-22)$$

وهي الصيغة رقم (3) في الجدول (3-5) وطبقت مع الشكل (5-22)، كما في الصيغة السابقة باستخدام دائرتين فقط. تشمل المتوسطات أربع قيم على الدائرة الأولى التي نصف قطرها $r_1 = 1$ وأربع قيم على الدائرة الثانية التي نصف قطرها $r_2 = \sqrt{2}$.

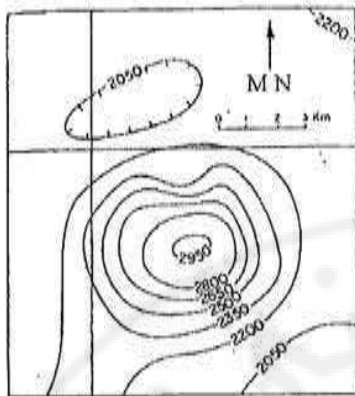
3- الصيغة الثالثة:

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = \frac{1}{3S^2} (21\Delta T_0 - 32\Delta \bar{T}_1 + 12\Delta \bar{T}_2 - \Delta \bar{T}_3) \quad (5-23)$$

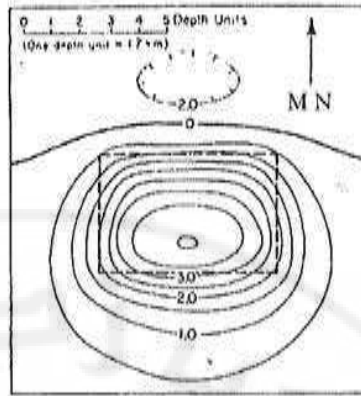
التي يمكن وضعها بالشكل التالي الموافق للصيغة العامة:

$$\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = \frac{7}{S^2} (\Delta T_0 - 1.533 \Delta \bar{T}_1 + 0.571 \Delta \bar{T}_2 - 0.048 \Delta \bar{T}_3) \quad (5-24)$$

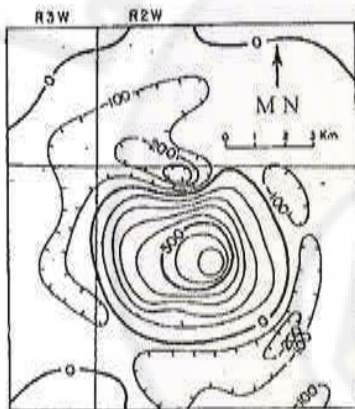
وهي الصيغة رقم (4) في الجدول (5-3) وطبقت مع الشكل (5-22) كما في الصيغتين السابقتين، ولكن بإضافة أربع قيم على الدائرة الثالثة التي نصف قطرها $r_2 = 2$. وتظهر مناطق سالبة ومناطق موجبة على خريطة المشتق الثاني لأن قيم المعاملات العددية سالبة وموجبة، وحاصل جمعها حسب العلاقة (5-16) يساوي الصفر، فلو أخذنا شواذ موجبة على خريطة الشدة المغنطيسية فستعطي منطقة موجبة في خريطة المشتق الثاني متمركزة على مركز الشواذ الموجبة، ويحدها منطقة سالبة غير ظاهرة في خريطة الشدة المغنطيسية (الشكل 5-25). تكون الخرائط المغنطيسية الجوية أقل تعقيداً، لانخفاض تأثير الأجسام القريبة جداً من السطح. بشكل عام تزداد دقة القيم المحسوبة للمشتق الثاني كلما صغرت المسافة الشبكية (S)، لكن يجب الانتباه إلى أن الشواذ السطحية التي تظهر أحياناً، قد لا يكون لها أهمية تذكر لأنها قد تنتج عن مصادر مغنطيسية صناعية أو رسوبية محلية، ويجب التخلص من تأثيرها قبل حساب المشتق الثاني. لهذا يتم عملياً اختيار قيمة المسافة الشبكية، مما يُظهر المعالم المغنطيسية المطلوب دراستها.



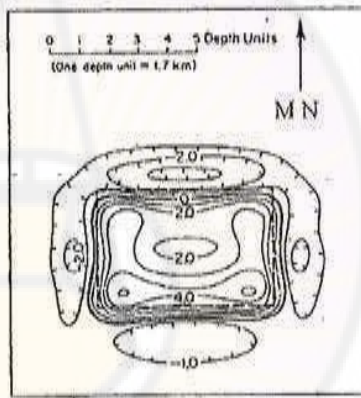
أ- خريطة شدة الحقل المغناطيسي الكلي



ج- خريطة شدة الحقل المغناطيسي الكلي للنموذج المفروض



ب- خريطة المشتق الثاني للحقل المغناطيسي الكلي



د- خريطة المشتق الثاني للحقل المغناطيسي الكلي للنموذج المفروض

الشكل (5-25): تطبيق طريقة المشتق الثاني على شواذ الحقل المغناطيسي الكلي في مقاطعة بولاسكي بولاية إنديانا الأمريكية.

(حسب رودمان و بلاكلي 1965 Rudman & Blakely)

5-5-6- طريقة التتابع Continuation method:

ساهم تطوير مقاييس المغنطيسية الجوية، واستخدامها في المسح المغنطيسي الجوي لمناطق شاسعة وبسرعة كبيرة، بتطوير طريقة التتابع نحو الأعلى، بالإضافة لطريقة التتابع نحو الأسفل. وكل من الطريقتين تهدف لمعرفة الصيغة التي يتحول لها حقل كمون، فيما لو قيس على مستوى أعلى أو أخفض من مستوى القياس الفعلي.

وكما في طريقة المشتق الثاني، يتم استخدام قيم على شبكة منتظمة واستعمال معاملات مناسبة، مجموعها يساوي الواحد، عند أخذ المتوسطات على دوائر متزايدة نصف القطر، إلا أن طريقة التتابع تحتاج إلى عدد أكبر من القيم الموزعة على مساحة أكبر من حالة طريقة المشتق الثاني، فيستعمل بعضهم حتى عشر دوائر من القيم حول نقطة القياس.

وفيما يلي سنقدم طريقتي حساب التتابع نحو الأعلى ونحو الأسفل كما طورت في مختبر أبحاث شركة غولف الأمريكية Gulf Research Laboratories في الثلاثينات من القرن الماضي (Peters, 1949)، والتي مازالت تستخدم حتى الآن في العديد من مراكز تفسير المعطيات المغنطيسية.

1- طريقة التتابع نحو الأعلى Upward continuation method:

تعطى طريقة التتابع نحو الأعلى خريطة أقل تعقيداً من الخريطة المقاسة في المستوى المنخفض، وقد استخدمت لإزالة التعقيد الناتج عن الأجسام السطحية، وكذلك لفصل الشواذ الناتجة عن أجسام متقاربة، واستخدمت لمعاملة نتائج المسح الجوي وقورنت الخرائط المقاسة على المستويات المختلفة مع خرائط التتابع نحو الأعلى على المستويات ذاتها، فلو حظ تشابه كبير بينها.

1. تتابع شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي ($\bar{H}$) نحو الأعلى:

تستخدم الطريقة قيم شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي H_z ، الموزعة على شبكة منتظمة وقيمة الشواذ المتابعة إلى ارتفاع $(-h)$ ، نظراً لأن الاتجاه موجب نحو الأسفل، هي $\bar{H}_z(x, y, h)$.
 $\bar{H}(0)$ شدة شواذ المركبة الشاقولية في المركز.

- $\bar{H}(b_1)$ متوسط شواذ شدة المركبة الشاقولية للقيم المأخوذة على دائرة نصف قطرها b_1 .
 $\bar{H}(b_2)$ متوسط شدة شواذ المركبة الشاقولية للقيم المأخوذة على دائرة نصف قطرها b_2 .
 $\bar{H}(b_3)$ متوسط شدة شواذ المركبة الشاقولية للقيم المأخوذة على دائرة نصف قطرها b_3 .
 b_4 نصف قطر الدائرة الرابعة.

أعطى بيبترز (Peters, 1949) قيمة شواذ المركبة الشاقولية المتابعة إلى الارتفاع h -

كما يلي:

$$\begin{aligned} \bar{H}_z(x, y, h) = & \frac{\bar{H}(0)}{2} \left[1 - \frac{h}{(h^2 + b_1^2)^{1/2}} \right] + \frac{\bar{H}(b_1)}{2} \left[1 - \frac{h}{(h^2 + b_2^2)^{1/2}} \right] \\ & + \frac{\bar{H}(b_2)h}{2} \left[\frac{1}{(h^2 + b_1^2)^{1/2}} - \frac{1}{(h^2 + b_3^2)^{1/2}} \right] \\ & + \frac{\bar{H}(b_3)h}{2} \left[\frac{1}{(h^2 + b_2^2)^{1/2}} - \frac{1}{(h^2 + b_4^2)^{1/2}} \right] + \dots \text{etc.} \end{aligned} \quad (5-25)$$

بما أن النتائج المغنطيسية تعطى على شكل شبكة كما في الشكل (5-22)، الذي يمثل خريطة شدة المركبة الشاقولية، حيث تُعلم قيم الشدة على زوايا الشبكة التي مسافتها الشبكية (S)، تمر الدائرة التي نصف قطرها مساوٍ للمسافة الشبكية (S) من أربع قيم ومتوسط هذه القيم $\bar{H}(b_1)$. إذا أريد حساب الشدة على ارتفاع مساوٍ للمسافة الشبكية أي $h=1$ باستخدام القيم على الدائرة الأولى، أي $b_1=1$ يكون الحد الذي تضرب به $\bar{H}(0)$ هو

$$\frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2}} \right] = 0.1464$$

وقيمتها $\sqrt{2}$ ، والتي تمر من أربع قيم ومتوسطها $\bar{H}(b_1)$ ، يكون الحد الذي تضرب به

$$\bar{H}(b_1) \text{ هو } \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \right] = 0.2113 \text{ أما قيمة } b_3 \text{ فهي } \sqrt{5} \text{ وتمر هذه الدائرة من ثماني}$$

قيم وقيمة b_4 هي $\sqrt{8.5}$.

يعطى الجدول (4-5) مجموعتين من المعاملات الأولى، عندما يكون التتابع نحو الأعلى بمقدار المسافة الشبكية أي $h=1$ ، والثانية عندما يكون التتابع نحو الأعلى بمقدار مسافتين شبكيتين $h=2$.

تطبق المعادلة التالية:

$$H_0(-h) = \sum \bar{H}(n) \cdot b_n \quad (5-26)$$

حيث b_n المعاملات الواردة في الجدول (4-5)، ويعطى حاصل جمع الحدود في المعادلة السابقة قيمة المركبة الشاقولية المتابعة نحو الأعلى إلى الارتفاع $(-h)$.

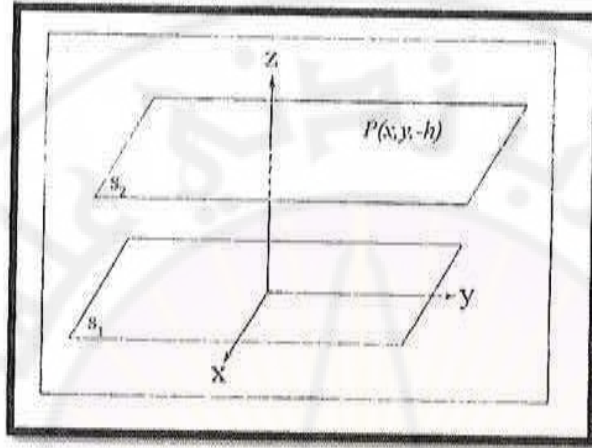
الجدول (4-5): يعطي المعاملات التي تضرب بها المتوسطات في الحالتين $h=1$, $h=2$ عند إجراء التتابع نحو الأعلى.

(حسب بيترز 1949 Peters)

رقم الدائرة	متوسط نصف قطر الدائرة	المعاملات عندما $h=1$	المعاملات عندما $h=2$
0	0	0.1464	0.0528
1	1	0.2113	0.0918
2	$\sqrt{2}$	0.1494	0.1139
3	$\sqrt{5}$	0.1264	0.1153
4	$\sqrt{8.5}$	0.0862	0.1151
5	$\sqrt{17}$	0.0778	0.1207
6	$\sqrt{34}$	0.0528	0.0902
7	$\sqrt{58}$	0.0346	0.0637
8	$\sqrt{99}$	0.0206	0.0400
9	$\sqrt{125}$	0.0949	0.1965

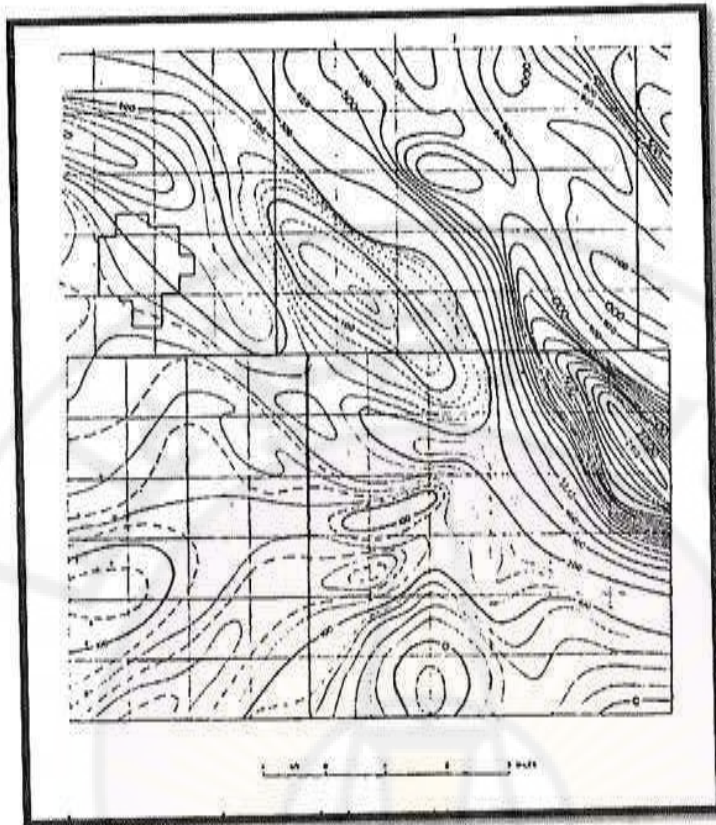
2. تتابع شواذ الحقل المغنطيسي الكلي (ΔT) نحو الأعلى:

وضع هندرسون وزايتز (Henderson & Zietz, 1949) معادلة لحساب تتابع شواذ الحقل المغنطيسي الكلي (ΔT) نحو الأعلى، من مستوى سطح الأرض أو فوقه (S_1) إلى سطح أعلى (S_2) (الشكل 5-26).

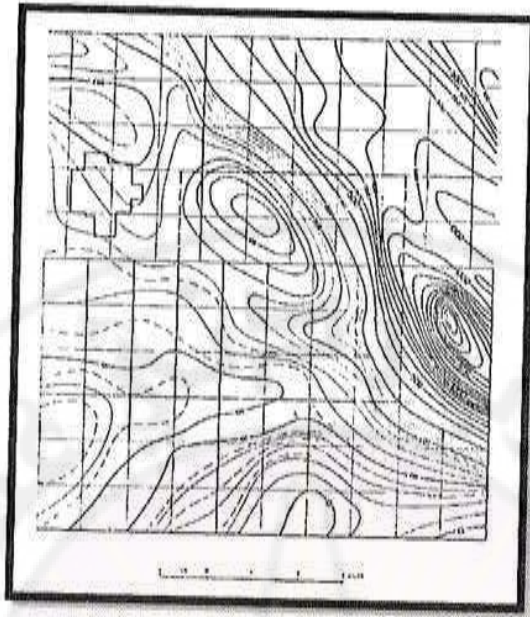


الشكل (5-26): يمثل مجموعة الاحداثيات المستخدمة ومستوى التتابع.
(حسب هندرسون وزايتز (Henderson & Zietz, 1949))

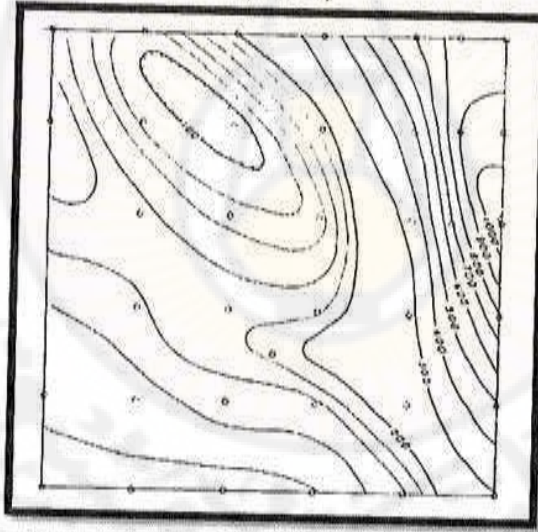
طبق هندرسون وزايتز الطريقة على عدة مناطق في أمريكا، تم بها المسح المغنطيسي الجوي على عدة ارتفاعات، بحيث أمكن مقارنة الخرائط المغنطيسية المحسوبة مع المقاسة فعلاً وعلى الارتفاع نفسه. نورد فيما يلي الخرائط المغنطيسية المقاسة والمحسوبة، بالقرب من مدينة مانغوم بولاية أوكلاهوما (Mangum, Oklahoma)، حيث تم المسح على الارتفاعات 1935 و 2935 و 7935 قدم فوق سطح البحر. وكانت النتائج مبرهنة على صحة الطريقة، نظراً للتعقيد الموجود والتدرج الشديد وكبر الشواذ المسجلة. كما تمثل الأشكال 5-27، 5-28، 5-29 الخرائط المقاسة على الارتفاعات المذكورة، في حين تمثل الأشكال 5-28-ب، 5-29-ب الخرائط المحسوبة من الطريقة التي اقترحها هندرسون وزايتز.



الشكل (5-27): يمثل خريطة شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي المقاس على ارتفاع 1935 قدماً.
(حسب هندرسون وزايتز Henderson & Zietz, 1949)



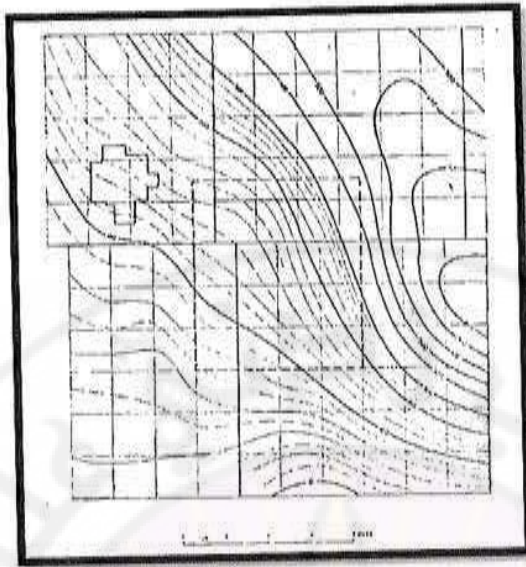
(5-28-أ)



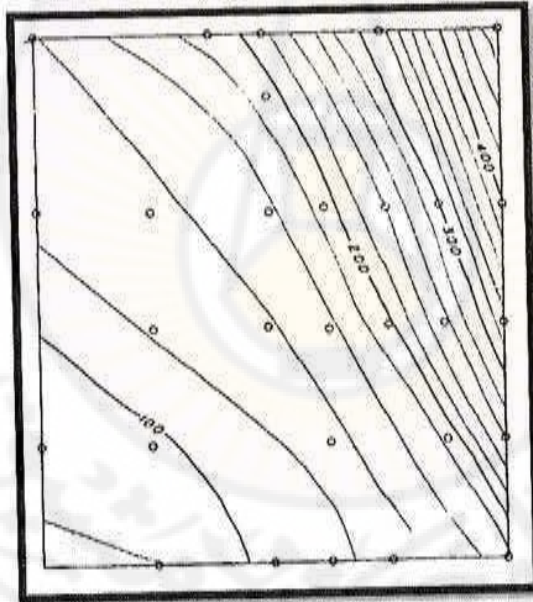
(5-28-ب)

الشكل (5-28): يمثل خريطة شدة الحقل المغناطيسي الكلي المقاس، والمحسوب على الارتفاع 2935 قدماً.
1- الخريطة المقاسة، ب- الخريطة المحسوبة.

(حسب هندرسون وزايتز Henderson & Zietz, 1949)



(5-29-أ)



(5-29-ب)

الشكل (5-29): يمثل خريطة شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي المقاس والمحسوب على الارتفاع 7935 قدماً. أ- الخريطة المقاسة، ب- الخريطة المحسوبة.

(حسب هندرسون وزايتز 1949 Henderson & Zietz)

2- طريقة التتابع نحو الأسفل

Downward continuation method:

1- تتابع شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي الأرضي (H) نحو الأسفل:

تستعمل طريقة التتابع نحو الأسفل لحساب عمق السطح العلوي للأجسام المغنطيسية ولفصل الشواذ المغنطيسية الناتجة عن أجسام متقاربة، إذ أنه عند وجود جسمين منفصلين، ومتقاربين، تحت غطاء متجانس من الصخور، يمكن إجراء التتابع نحو الأسفل حتى مستوى قريب جداً من السطح العلوي للجسمين، إلى أن يفصل تأثيرهما عن بعض، بينما كان تأثيرهما متصلين عند مستوى القياس. تعتبر طريقة التتابع نحو الأسفل مناسبة لتفسير الشواذ المغنطيسية في التقيب البترولي، عندما تكون الركيزة البلورية عالية المغنطيسية ومغطاة بطبقة سميكة من الرسوبيات الأقل مغنطيسية، وهذا يسمح باستخدام هذه الطريقة لحساب سماكة الرسوبيات المغطاة للركيزة.

اعتبر بيترز (Peters, 1949) أن التتابع يجري على مستوى يقع على عمق $z=h$ ، وفي مركز الإحداثيات، أي $y=0, x=0$ ووضع قيمة شواذ المركبة الشاقولية المتابعة على عمق h كما يلي:

$$H(0,0,h) = 2 \left[b_0 - 2b_2h^2 + \frac{8}{3}b_4h^4 - \frac{16}{5}b_6h^6 + \dots \right] - H(0,0,-h) \quad (5-27)$$

$H(0,0,h)$ هي قيمة شواذ المركبة الشاقولية المتابعة نحو الأعلى إلى ارتفاع $z=h$ وفي مركز الإحداثيات أي:

$y=0, x=0$ و b_0, b_2, b_4, b_6 معاملات سنورد قيمها. يمكن الاعتماد على الحدود الثلاثة الأولى دون فقدان الكثير من الدقة فتصبح المعادلة (5-24) بالشكل التالي:

$$H(0,0,h) \cong 2 \left[b_0 - 2b_2h^2 + \frac{8}{3}b_4h^4 \right] - H(0,0,-h) \quad (5-28)$$

باستخدام المتوسطات على دوائر أنصاف أقطارها:

$$0, 1, \sqrt{2}, \sqrt{5}, \sqrt{8.5}, \sqrt{17}, \sqrt{34}, \sqrt{58}, \sqrt{99}, \sqrt{125}.$$

تمكن بيترز من حساب قيم المعادلات b_4, b_2, b_0 كما يلي:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 = 0.2471\bar{H}(0) - 0.2351\bar{H}(1) + 0.2234\bar{H}(\sqrt{2}) \\ \quad + 0.1874\bar{H}(\sqrt{5}) + 0.1521\bar{H}(\sqrt{8.5}) + 0.0717\bar{H}(\sqrt{17}) \\ \quad - 0.0449\bar{H}(\sqrt{34}) - 0.1095\bar{H}(\sqrt{58}) + 0.0500\bar{H}(\sqrt{99}) \\ \\ b_2 = -0.0119\bar{H}(0) - 0.0105\bar{H}(1) - 0.0091\bar{H}(\sqrt{2}) \\ \quad - 0.0053\bar{H}(\sqrt{5}) - 0.0011\bar{H}(\sqrt{8.5}) + 0.0077\bar{H}(\sqrt{17}) \\ \quad + 0.0192\bar{H}(\sqrt{34}) + 0.0218\bar{H}(\sqrt{58}) - 0.0108\bar{H}(\sqrt{99}) \\ \\ b_4 = 0.00010\bar{H}(0) + 0.00009\bar{H}(1) + 0.00007\bar{H}(\sqrt{2}) \\ \quad + 0.00004\bar{H}(\sqrt{5}) - 0\bar{H}(\sqrt{8.5}) - 0.00009\bar{H}(\sqrt{17}) \\ \quad - 0.00020\bar{H}(\sqrt{34}) - 0.00020\bar{H}(\sqrt{58}) + 0.00020\bar{H}(\sqrt{99}) \end{array} \right\} \quad (5-29)$$

حيث $\bar{H}$ هي متوسط قيمة المركبة الشاقولية على الدائرة التي نصف قطرها المقدار الموضوع بين القوسين بجانب $\bar{H}$. بالتبديل في المعادلة (5-28) نجد معاملات الدوائر المختلفة، وبالجمع مع معاملات التتابع نحو الأعلى $H(0,0,-h)$ المعطاة في الجدول (5-4) نحصل على معاملات التتابع نحو الأسفل من أجل $h=1$ و $h=2$ كما في الجدول (5-5) وهي مستخدمة مع المخطط في الشكل (5-22). إن معاملات الدائرة الأخيرة محسوبة ليكون حاصل جمع المعاملات مساوياً للواحد، وتستخدم هذه المعاملات بالطريقة المستخدمة نفسها في طريقة التتابع نحو الأعلى، ثم تطبق المعادلة التالية لحساب قيمة المركبة الشاقولية المتابعة إلى العمق h :

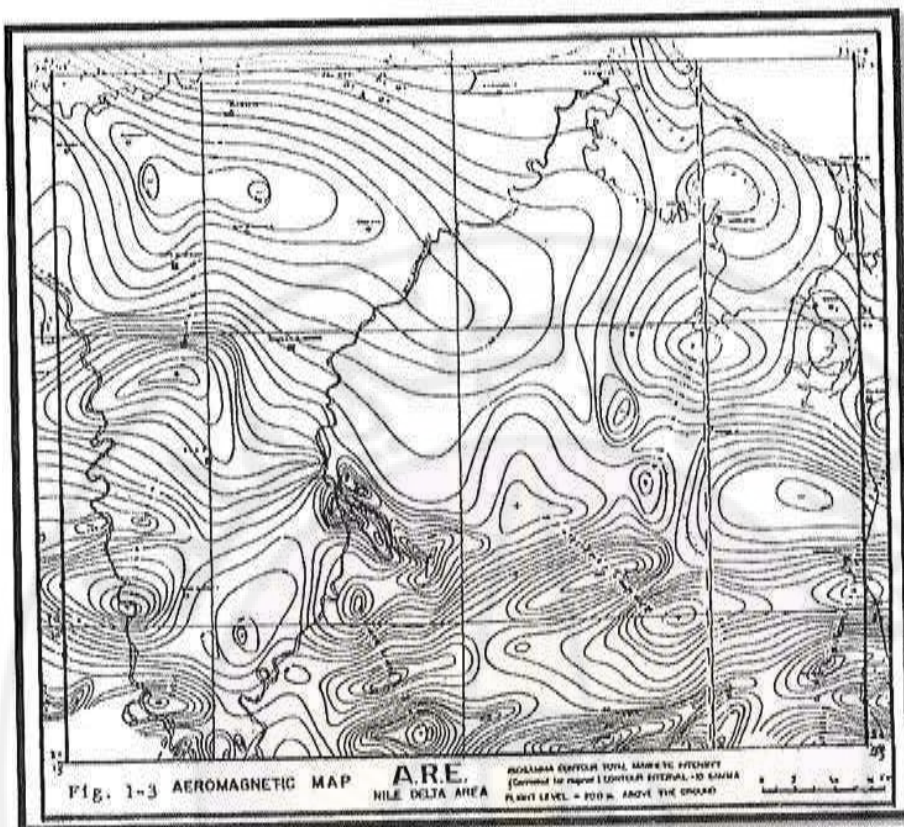
$$H(0,0,h) = C_0H(0) + C_1H(1) + C_2H(\sqrt{2}) \dots etc = \sum_0^9 CH \quad (5-30)$$

الجدول (5-5): يعطي المعاملات التي تضرب بها المتوسطات على الدوائر في الحالتين $h=1$ و $h=2$ عند إجراء التتابع نحو الأسفل.

(حسب بيترز 1949 Peters)

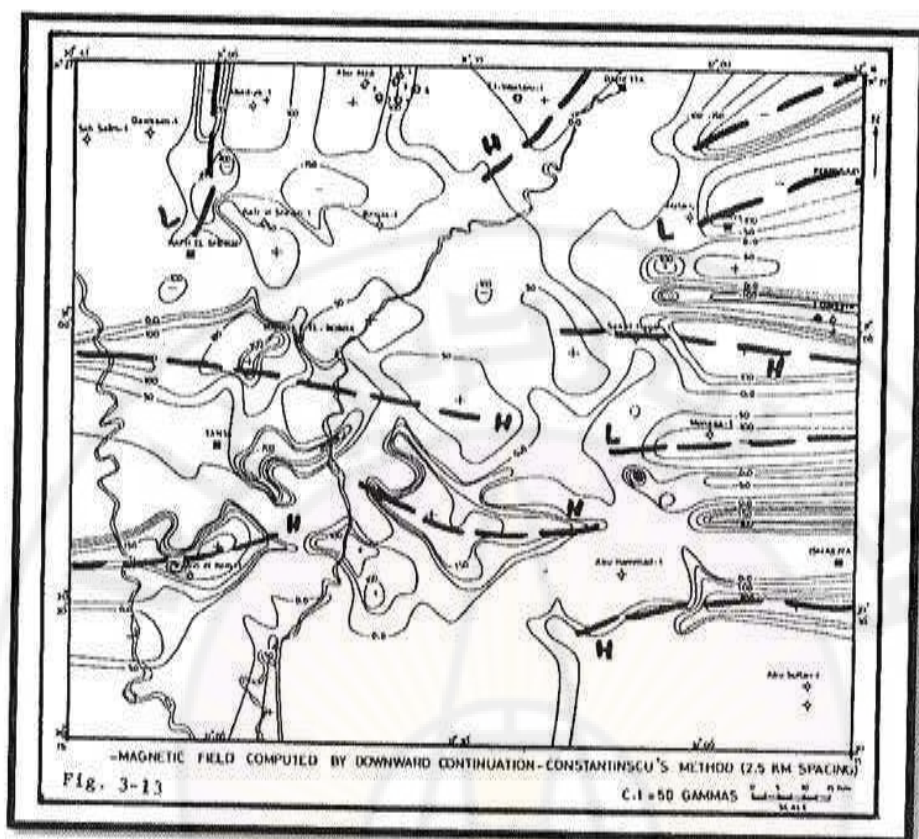
رقم الدائرة	متوسط نصف قطر الدائرة	المعاملات عندما $h=1$	المعاملات عندما $h=2$
0	0	0.3969	0.4197
1	1	0.3026	0.3532
2	$\sqrt{2}$	0.3356	0.5460
3	$\sqrt{5}$	0.2749	0.4071
4	$\sqrt{8.5}$	0.2234	0.2668
5	$\sqrt{17}$	0.0356	-0.0442
6	$\sqrt{34}$	-0.2194	-0.3762
7	$\sqrt{58}$	-0.3413	-0.6236
8	$\sqrt{99}$	0.1248	0.3130
9	$\sqrt{125}$	-0.1331	-0.1395

كمثال على تأثير المسافة الشبكية في خريطة التتابع نحو الأسفل، نورد الخرائط (الأشكال 5-30، 5-31، 5-32، 5-33، 5-34) حيث تعطي الخريطة (الشكل 5-30) شدة الحقل المغنطيسي الكلي فوق وسط دلتا النيل بمصر (El-Mosselly, 1987). يلاحظ العدد الكبير من الانغلاقات السالبة والموجبة التي تشير إلى تجمع الركيزة البلورية في المنطقة، وتغير سماكة الرسوبيات غير المغنطيسية فوقها.

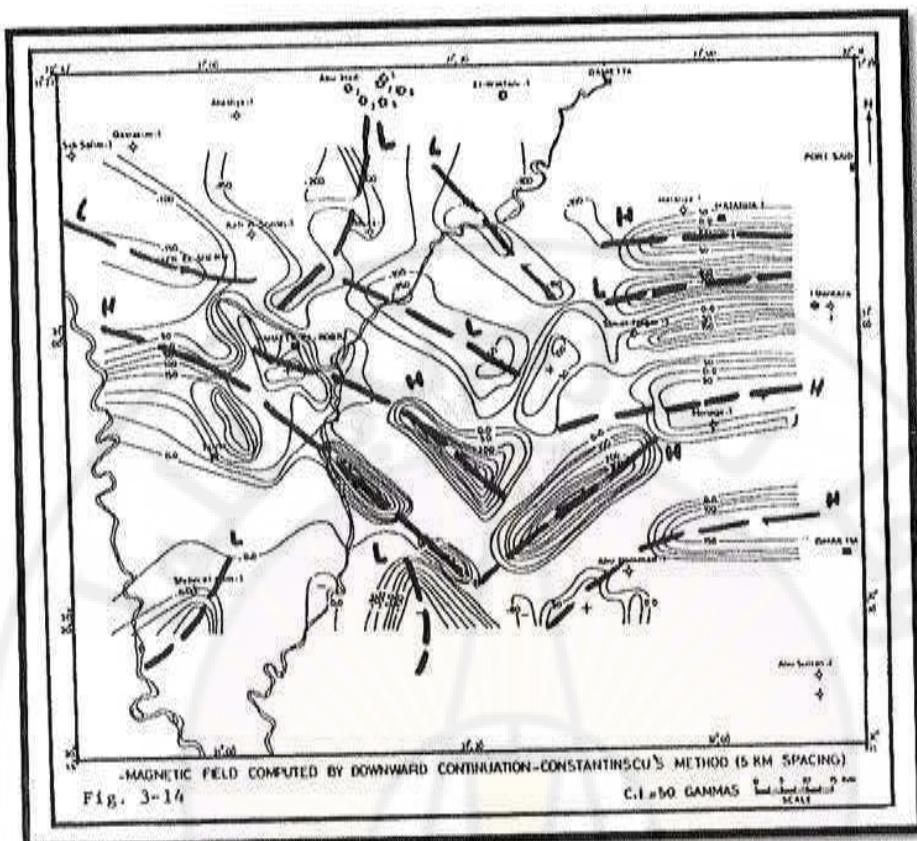


الشكل (5-30): شدة شواذ الحقل المغنطيسي الكلي فوق وسط دلتا النيل بمصر.
(حسب الموصلي 1987 (El-Mosselly))

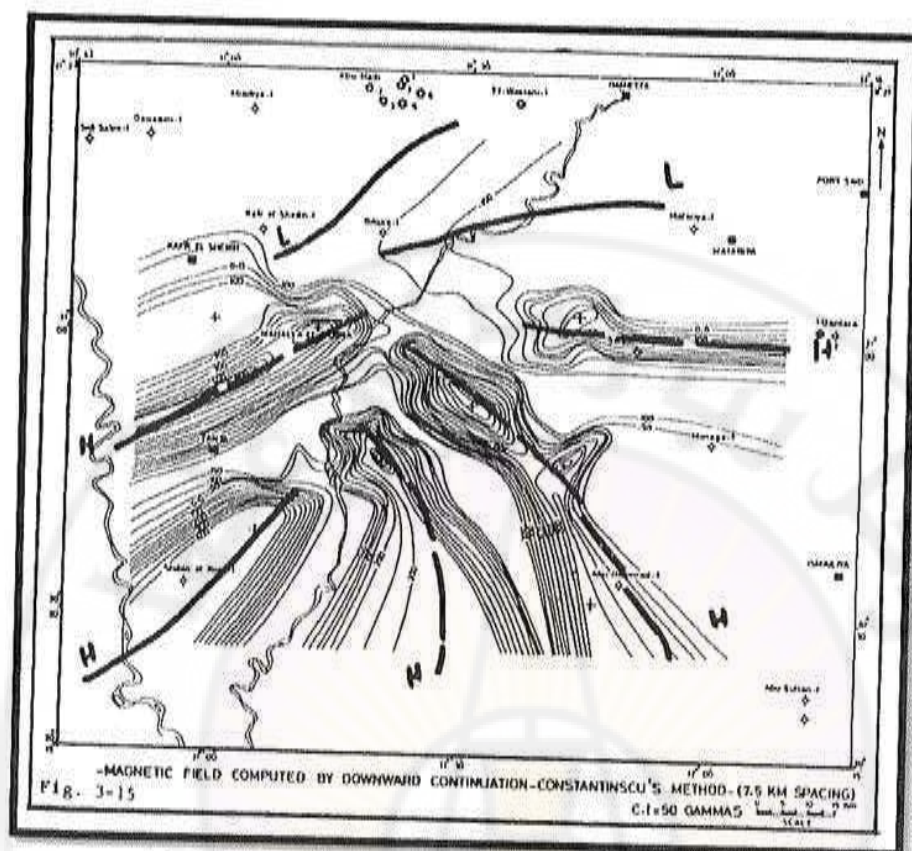
تلاحظ من الخرائط (الأشكال 5-31، 5-32، 5-33، 5-34) التغيرات الكثيرة لشدة شواذ الحقل المغنطيسي الكلي على الأعماق المختلفة، والتي استنتج منها الموصلي (El-Mosselly, 1987) إن الركيزة البلورية في المنطقة ضحلة العمق في الجزء الجنوبي من الخريطة وبتراوح بين 5 و 7.5 كيلومتراً، بينما يتراوح عمق هذا السطح ما بين 7.5 و 10 كيلومتراً في الجزء الشمالي من الخريطة.



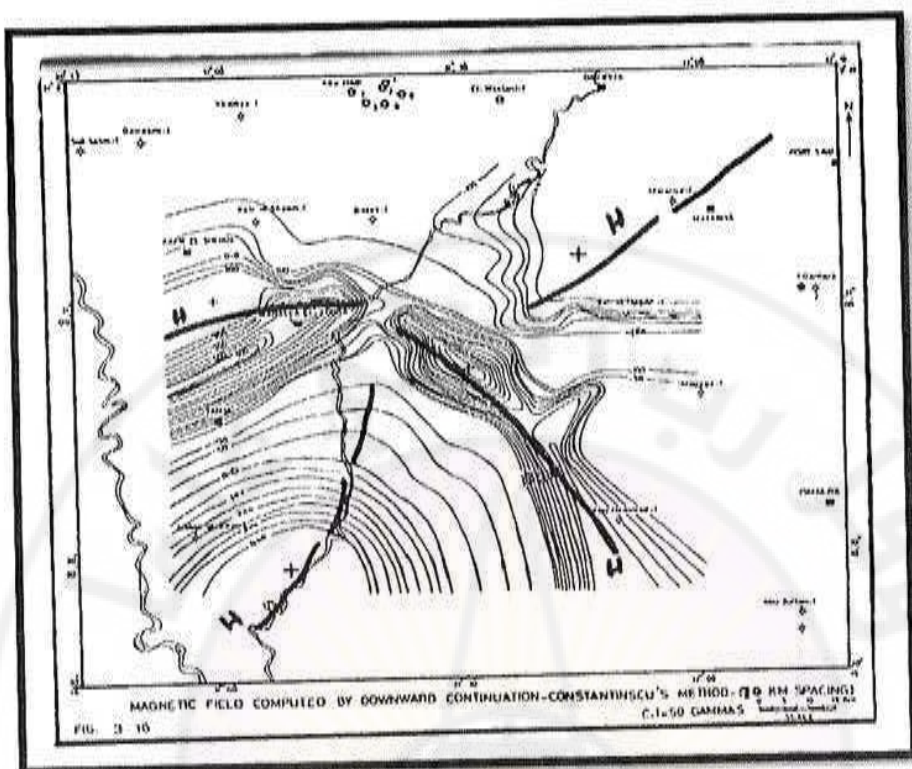
الشكل (5-31): خريطة التتابع نحو الأسفل عندما تكون المسافة الشبكية مساوية 2.5 كيلومتراً.
(حسب الموصلي، 1987 (El-Mosselly))



الشكل (5-32): خريطة التتابع نحو الأسفل عندما تكون المسافة الشبكية مساوية 5 كيلومتراً.
(حسب الموصلي، 1987 (El-Mosselly, 1987)



الشكل (5-33): خريطة التتابع نحو الأسفل عندما تكون المسافة الشبكية مساوية 7 كيلومتراً.
(حسب الموصلي 1987 (El-Mosselly))



الشكل (5-34): خريطة التتابع نحو الأسفل عندما تكون المسافة الشبكية مساوية 10 كيلومتراً.
(حسب الموصلي 1987 El-Mosselly)

7-5-5- طريقة الإرجاع إلى القطب

Reduction to the pole method:

يقوم مبدأ هذه الطريقة على إرجاع الشواذ التي تنتج عن جسم ما موجود في أي خط عرض مغنطيسي إلى القطب المغنطيسي (Baranov 1957)، أي تحويل خريطة شواذ المغنطيسية المقاسة فوق جسم ما موجود في حقل مغنطيسي أرضي وله ميل ما وانحراف ما إلى خريطة لشواذ المغنطيسية، فيما لو كان الجسم نفسه موضوعاً في حقل مغنطيسي أرضي شاقولي فقط. وكما في الطرائق الأخرى تستخدم هذه الطريقة شبكة من القيم منقولة من خريطة تساوي

الشدة المغناطيسية، وقد استخدم بارانوف شبكة بشكل مسدس تزداد أنصاف أقطار الدوائر المارة من رؤوسه بشكل منتظم.

استخدم بارانوف ونودي عام 1964 (Baranov and Naudy, 1964) العلاقة التالية لتعطي الحقل المرجع إلى القطب T_p في النقطة (O) ، التي يكون الحقل فيها $T(0)$ (الشكل 5-35):

$$T_p = \mu T(0) + I \quad (5-31)$$

حيث :

$$I = \frac{1}{2\pi} \iint T(\rho, \omega) \Omega_3(\omega) \frac{d\rho}{\rho} d\omega \quad (5-32)$$

حيث :

$$\left. \begin{aligned} \Omega_3(\omega) &= \gamma_0 + 2\gamma_1 \cos \omega + \dots + 2\gamma_k \cos k\omega \\ \gamma_0 &= 0 \\ \gamma_k &= (-\eta)^k k(k+\mu) \\ \eta &= \frac{I-\mu}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (5-33)$$

$$\lambda = \cos i$$

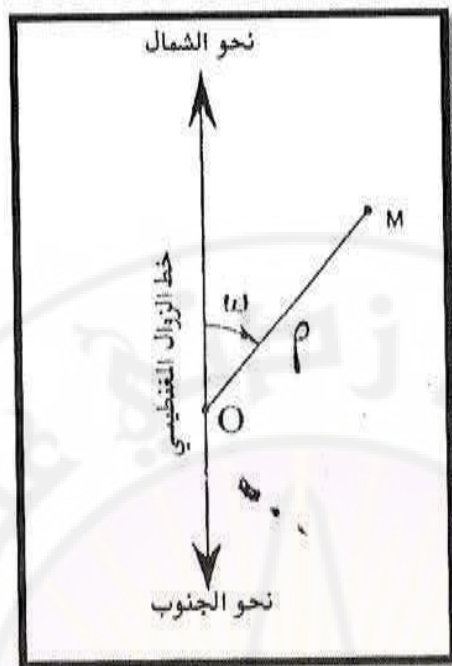
$$\mu = \sin i$$

p, ω الإحداثيات القطبية للنقطة M .

$T(p, \omega)$ قيمة الحقل الكلي في النقطة M .

$T(0)$ قيمة الحقل الكلي في المركز O حيث يُجرى الحساب.

i متوسط زاوية ميل الحقل في المنطقة المدروسة.



الشكل (5-35): يظهر النقطة (O) التي يتم ارجاع شدة الحقل $T(0)$ فيها إلى القطب.

حول بارانوف ونودي التكامل الثنائي في المعادلة 5-32 إلى مجموع، أصبحت معه قيمة الحقل الكلي المُرَجَّع إلى القطب بالشكل التالي:

$$T_p = \mu T(0) + \sum_{v,k} \alpha_v \cdot \beta_k \cdot T_k(\gamma) \quad (5-34)$$

حيث

$$v = 0, 1, 2, 3, 4, 5$$

$$k = 0, 1, 2, 3$$

$$\omega = \frac{\pi \cdot v}{3}$$

$$\beta_0 = -0.02843$$

$$\beta_3 = 0.33089$$

$$\beta_1 = 0.39792$$

$$\beta_4 = 0.24951$$

$$\beta_2 = 0.55651$$

$$\beta_5 = 0.19978$$

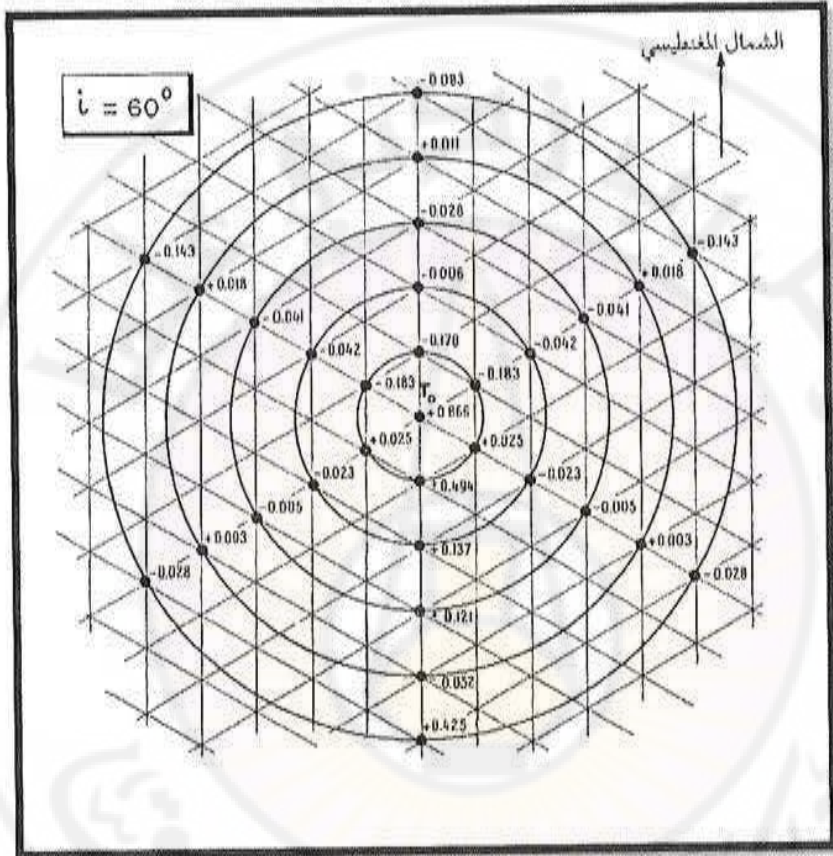
$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{1}{6}(\gamma_0 + 2\gamma_1 + 2\gamma_2 + \gamma_3) \\ \alpha_1 &= \alpha_3 = \frac{1}{6}(\gamma_0 + \gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3) \\ \alpha_2 &= \alpha_4 = \frac{1}{6}(\gamma_0 - \gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3) \\ \alpha_3 &= \frac{1}{6}(\gamma_0 - 2\gamma_1 + 2\gamma_2 - \gamma_3) \end{aligned} \right\} \quad (5-35)$$

تؤخذ ست قيم للتابع $T_k(\gamma)$ في ست نقاط محددة وموزعة بانتظام على محيط دائرة نصف قطرها (ρ) ، ومركزها في (O) ، وتمر من رؤوس المسدس الذي مركزه في (O) ، كما في الشكل (5-35)، وتحدد اتجاهات هذه النقاط على محيط الدائرة، بحيث يؤخذ الاتجاه لما $v=0$ باتجاه الشمال المغنطيسي، وهو الاتجاه الرئيس. يؤخذ عادة عدد من الدوائر المحيطة بالنقطة (O) ، كما يظهر في الشكل (5-36) الذي يمثل مخططاً لتوزيع المعاملات β_k, α_v, μ على نقطة القياس ورؤوس خمسة مسدسات محيطة بنقطة القياس، كما تظهر قيم ω و v للاتجاهات الستة المأخوذة.



الشكل (5-36) مخطط لتوزيع المعاملات بدلالة β_k, α_v, μ على رؤوس الشبكة السداسية.
(حسب بارانوف 1957 Baranov)

بينما يعطي الشكل (5-37) القيم العددية لهذه المعاملات عندما يكون ميل الحقل المغنطيسي الأرضي $I=60^\circ$ ، أي لحساب الحقل الكلي المُرَجَّع إلى القطب في النقطة (O)، نضرب قيمة الحقل في النقطة (O) بقيمة μ ، ويضاف لها مجموع حاصل ضرب قيم الحقل الكلي في النقاط المختلفة بالمعاملات المناسبة.

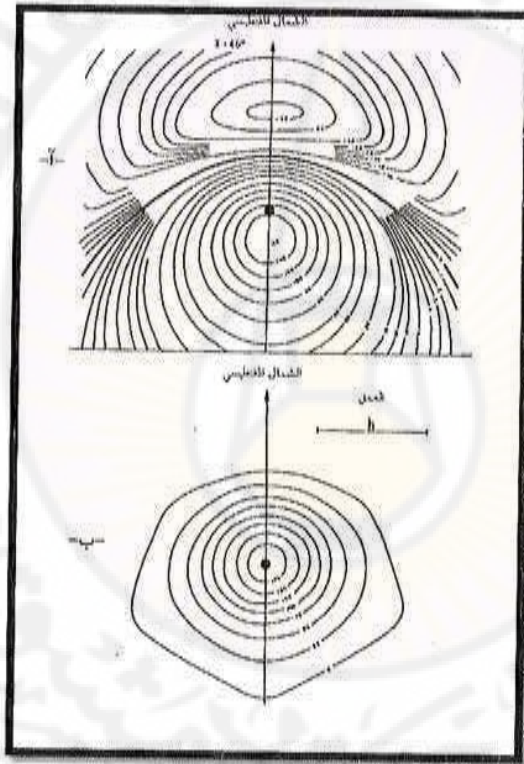


الشكل (5-37): مخطط لتوزيع القيم العددية لجداء المعاملات α و β عندما يكون ميل الحقل المغنطيسي الأرضي $I=60^\circ$.

(حسب بارانوف Baranov, 1957)

تختلف المعاملات العددية المستخدمة باختلاف زاوية ميل الحقل المغنطيسي الأرضي في نقطة القياس، وقد اشتقت مجموعات عديدة من المعاملات، بحيث تطبق كل مجموعة منها ضمن

حدود معينة من تغير زاوية الميل. يظهر الشكل (5-38-أ) خريطة تساوي الشدة المغناطيسية فوق كرة ممغنطة في حقل مغناطيسي أرضي ميله 60° ، بينما يعطي الشكل (5-38-ب) خريطة تساوي الشدة المغناطيسية للكرة نفسها بعد إرجاعها إلى القطب، ويلاحظ كيف أزيل عدم التناظر الموجود في الشكل (5-38-أ) وأصبح الشكل متناظراً بشكل دوائر متمركزة، كما يتوقع عندما تكون الكرة ممغنطة شاقولياً. ويظهر شكل (5-39-أ) حالة كرة ممغنطة في حقل مغناطيسي أرضي ميله $16^\circ 30'$ وحالة الإرجاع إلى القطب (الشكل 5-39-ب). يظهر الشكلان (5-40-أ و ب) حالة مماثلة، إنما لجسم مغناطيسي مقطعه العرضي بشكل مستطيل وامتداده شاقولي، ولا محدود نحو الأسفل.

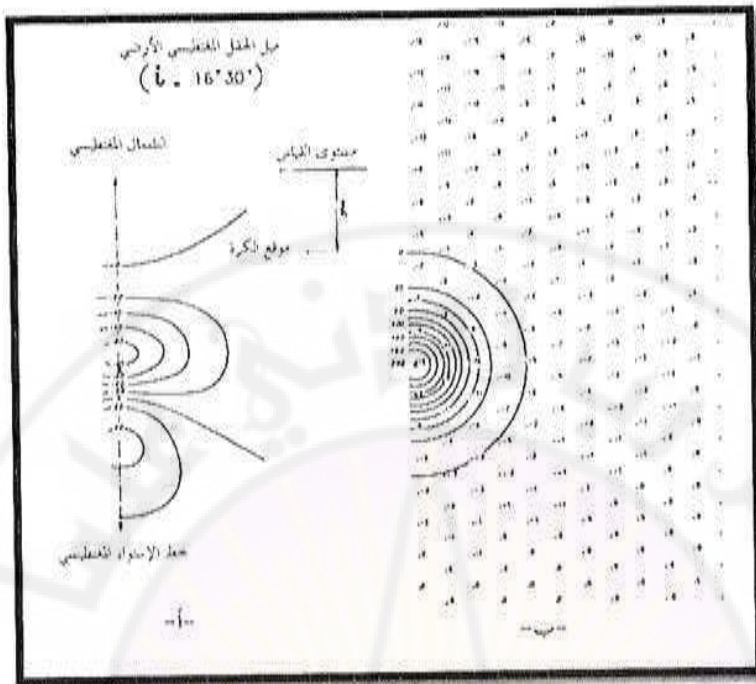


الشكل (5-38): أ- خريطة الشدة المغناطيسية الكلية لكرة ممغنطة في حقل مغناطيسي أرضي ميله 60° .

أ- خريطة الشدة المغناطيسية الكلية للكرة بعد إرجاعها إلى القطب.

h - عمق مركز الكرة المغناطيسية الواقعة تحت النقطة السوداء.

(حسب بارانوف 1957 Baranov)

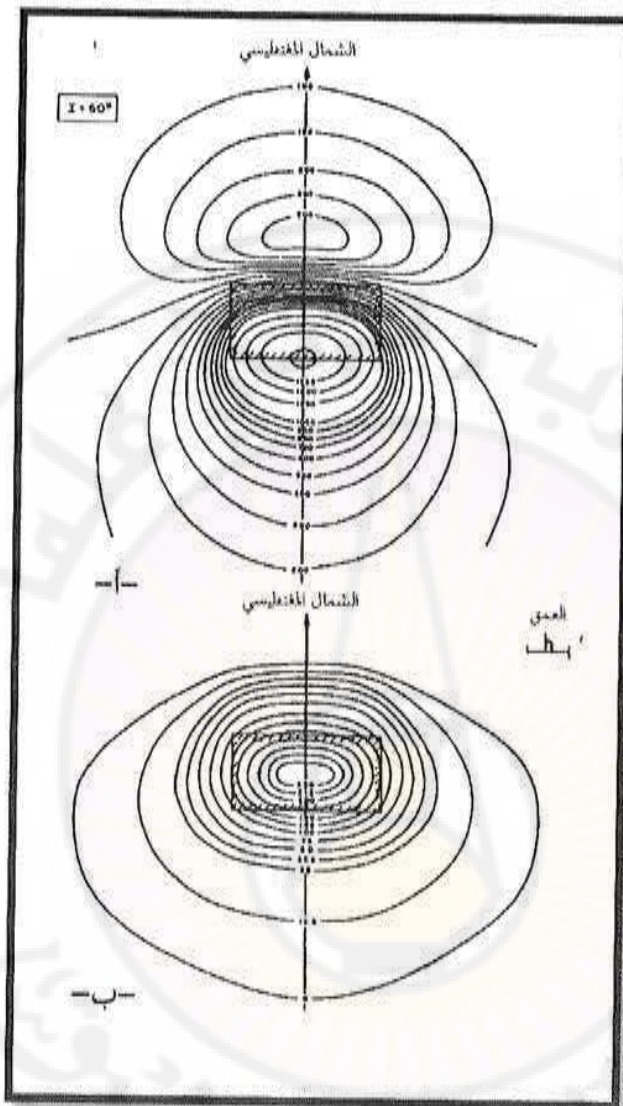


الشكل (5-39): 1- خريطة الشدة المغناطيسية الكلية لكرة ممغنطة في حقل مغناطيسي أرضي ميله $16^\circ 30'$.

2- خريطة الشدة المغناطيسية الكلية لكرة بعد إرجاعها إلى القطب.

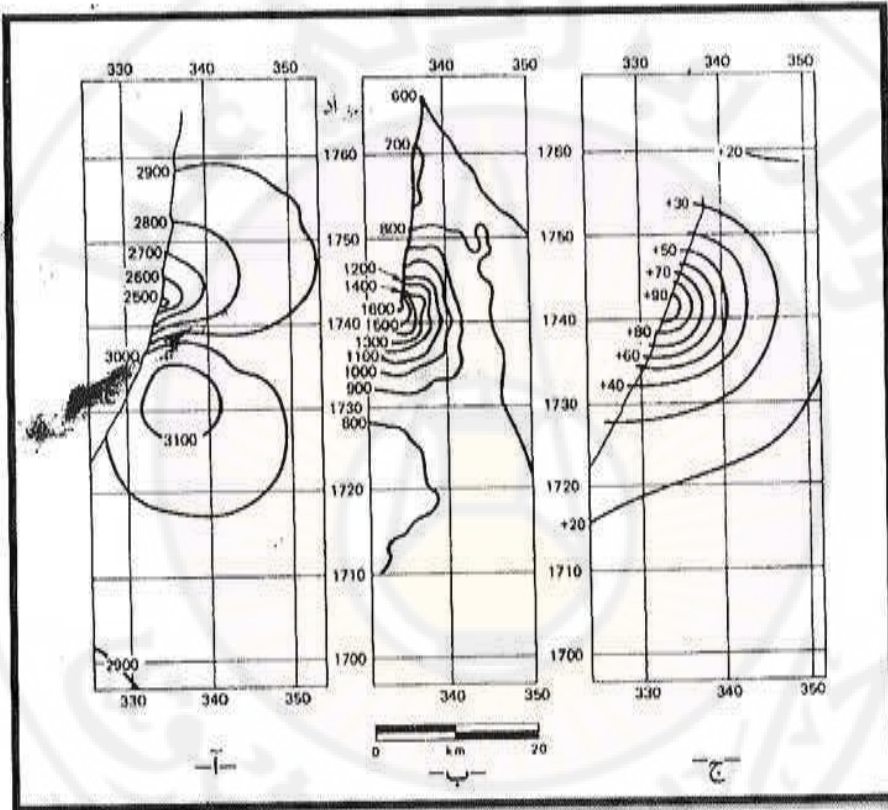
h - عمق مركز الكرة.

(حسب بارانوف ونودي (Baranov & Naudy, 1964)



الشكل (5-40) أ- خريطة الشدة المغنطيسية الكلية لجسم مقطعه العرضي مستطيل وسطحه السفلي لا محدود العمق، وممغنط في الحقل المغنطيسي الأرضي الذي ميله 60° .
 ب- خريطة الشدة المغنطيسية الكلية للجسم بعد إرجاعه إلى القطب.
 h - عمق السطح العلوي للجسم.
 (حسب بارانوف Baranov, 1957)

أورد بارانوف ونودي (Baranov & Naudy, 1964) في الشكل (5-41) تطبيقاً للطريقة على منطقة على شاطئ السنغال، حيث ميل الحقل المغنطيسي الأرضي بحدود 30°، وحيث يوجد اندساس كبير يعطي شواذاً بالحقل المغنطيسي الكلي مقدارها 700 نانوتسلا (الشكل 5-41-أ)، وشواذ جاذبية مقدارها 80 ميلي غال (الشكل 5-41-ج) وعند إجراء الإرجاع إلى القطب (الشكل 5-41-ب) لوحظ بأن مركز شواذ المغنطيسية قد انطبق تماماً على مركز شواذ الجاذبية.



الشكل (5-41): أ- خريطة الشدة المغنطيسية الكلية لمنطقة على الشاطئ الغربي للسنغال.

ب- خريطة الشدة المغنطيسية الكلية للمنطقة بعد إرجاعها إلى القطب.

ج- خريطة الجاذبية للمنطقة.

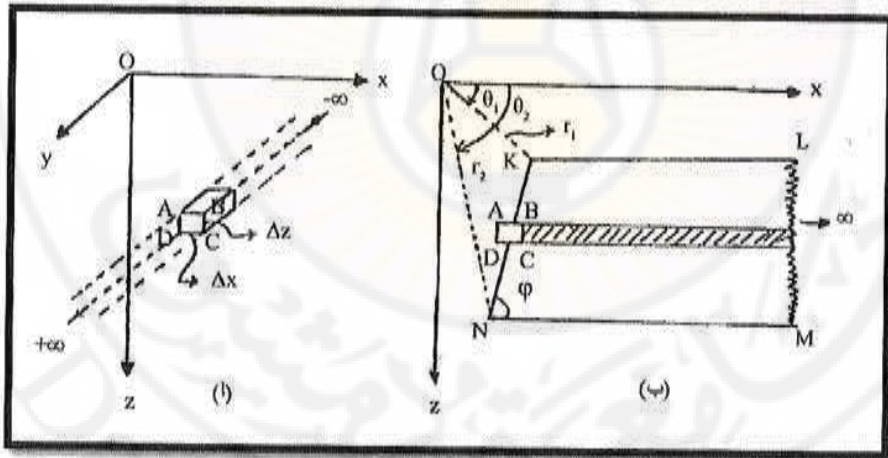
(حسب بارانوف ونودي (Baranov & Naudy, 1964))

5-5-8- طريقة التجريب والخطأ:

وضع هذه الطريقة مونيك تالواني وجيمس هيرتزler (Talwani and Heirtzler, 1964) ورافقها برنامج للحاسوب بلغة فورتران، لكنها كتبت بلغات أخرى وما زالت تستخدم في العديد من المخابر العالمية. تعتبر هذه الطريقة غير مباشرة (indirect method) في تفسير الشواذ المغنطيسية، وهي مملة ومتطلبة للوقت، لكن تطور الحواسيب وازدياد سرعاتها في المعالجة جعل الطريقة أكثر شعبية وانتشاراً.

يمثل مقطع الجسم ثنائي الأبعاد، وبشكل اختياري، بمتعدد أضلاع غير منتظم، وقد تم حساب المركبات المغنطيسية الأفقية، والشافولية، والحقل الكلي الناتجة عن هذا الجسم متعدد الاضلاع. وتتم مقارنة الشواذ المحسوبة مع الشواذ المقاسة، ومن ثم يغير شكل مقطع الجسم، ويجري الحساب من جديد حتى يتم الحصول على أفضل تطابق بين المنحنيين المحسوب والمقاس، عندئذ يمكن قبول أن الجسم المسبب للشواذ هو النموذج الذي حقق أفضل تطابق بين المنحنيين. وعموماً يفرض في هذا الحساب أن الجسم متجانس المغنطيسية، ويمتد من اللانهاية إلى اللانهاية بالاتجاه المعامد للمسار الذي تم القياس عليه.

تدرس الشواذ المغنطيسية المسببة من المؤشر ثنائي الأبعاد (KLMN) الممتد إلى اللانهاية باتجاه واحد ($+\infty$) على المحور x، وإلى اللانهاية باتجاهين $+\infty$ و $-\infty$ على المحور y (الشكل 5-42-1)، وحساب الشواذ المغنطيسية الناتجة عن الجسم، تحسب المغنطيسية الناتجة عن المؤشر الصغير الذي مقطعه العرضي ABCD (الشكل 5-42-ب).



الشكل (5-42): المؤشر ثنائي الأبعاد (KLMN) الممتد إلى اللانهاية باتجاه واحد ($+\infty$) على المحور x وإلى اللانهاية باتجاهين $+\infty$ و $-\infty$ على المحور y.

(حسب تالواني وهرتزler 1964 Talwani and Heirtzler)

لنكن J هي شدة المغنطيسية، فيعطى العزم المغناطيسي $\vec{m}$ لعنصر الحجم $\Delta x.\Delta y.\Delta z$ بالعلاقة:

$$\vec{m} = \vec{J}.\Delta x.\Delta y.\Delta z$$

ويكون كمونه المغنطيسي:

$$\Omega = \frac{\vec{m}.\vec{R}}{R^3} = \frac{J_x.x + J_y.y + J_z.z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}.\Delta x.\Delta y.\Delta z \quad (5-36)$$

وكمون الموشر اللانهائي ذو المقطع العرضي ABCD هو:

$$\Omega = \Delta x.\Delta z \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_x.x + J_y.y + J_z.z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}.dy = 2\Delta x.\Delta z.\frac{J_x.x + J_z.z}{x^2 + z^2} \quad (5-37)$$

وشدة الحقل الشاقولي V هي:

$$V = -\frac{\partial \Omega}{\partial z} = 2\Delta x.\Delta z.\frac{2x.z.J_x - J_z.(x^2 - z^2)}{(x^2 + z^2)^2} \quad (5-38)$$

وشدة الحقل الأفقي H باتجاه x هي:

$$H = -\frac{\partial \Omega}{\partial x} = 2\Delta x.\Delta z.\frac{J_x.(x^2 - z^2) + 2x.z.J_z}{(x^2 + z^2)^2} \quad (5-39)$$

ليس هناك شدة حقل أفقية مقاسة بالاتجاه y .

يتم الحصول على V و H للشريحة المظللة في الشكل (5-42-ب) بمكاملة العلاقتين (38-5) و (39-5) بالنسبة لـ x وحدود التكامل من x إلى $+\infty$ ، وتُعطى بالعلاقات:

$$V = 2\Delta z \cdot \frac{J_x \cdot z - J_z \cdot x}{x^2 + z^2} \quad (5-40)$$

$$H = 2\Delta z \cdot \frac{J_x \cdot x + J_z \cdot z}{x^2 + z^2} \quad (5-41)$$

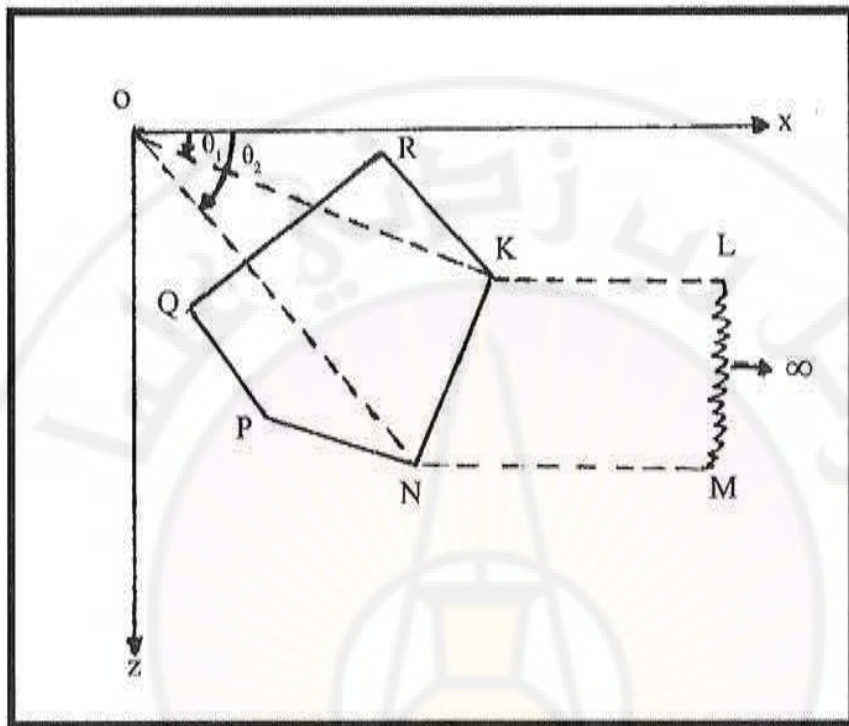
وللحصول على القيم بالنسبة للموشور KLMN يجرى التكامل بالنسبة لـ z ، وتكون x على طول KN مساوية:

$$x = (x_1 + z_1 \cot \theta) - z \cot \theta \quad \text{حيث}$$

$$\begin{aligned} V &= 2 \int_{z_1}^{z_2} \frac{J_x \cdot z - J_z \cdot x}{x^2 + z^2} dz \\ &= 2 \sin \phi \left[J_x \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \cos \phi + \sin \phi \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \right\} - J_z \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \sin \phi - \cos \phi \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \right] \end{aligned} \quad (5-42)$$

$$\begin{aligned} H &= 2 \int_{z_1}^{z_2} \frac{J_x \cdot x + J_z \cdot z}{x^2 + z^2} dz \\ &= 2 \sin \phi \left[J_x \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \sin \phi - \cos \phi \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \right\} + J_z \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \cos \phi + \sin \phi \cdot \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \right] \end{aligned} \quad (5-43)$$

يمكن حساب الشواذ المغنطيسية المسببة من موشور متعدد الأضلاع KNPQRK (الشكل 5-43)، بالحصول على الشواذ لمواشير مثل KLMN ثم الإضافة لبعضها، وبأخذ الإشارة بعين الاعتبار.



الشكل (5-43): موشور متعدد الأضلاع KNPQRK.
(حسب تالواني وهرتزلر 1964, Talwani and Heirtzler)

يلاحظ أنه إذا كان المسير باتجاه عقارب الساعة على طول زوايا متعدد الأضلاع KNPQR، ولأضلاع مثل KN حيث تزداد لها θ ، فيجب أن تكون الشواذ سالبة بالنسبة لـ KLMN. يمكن إذا إعادة كتابة المعادلتين (5-40) و (5-41) بأخذ الإشارة السالبة بعين الاعتبار وترتيبها بالشكل التالي:

$$V = 2 (J_x \cdot Q - J_z \cdot P) \quad (5-44)$$

$$H = 2 (J_x \cdot P + J_z \cdot Q) \quad (5-45)$$

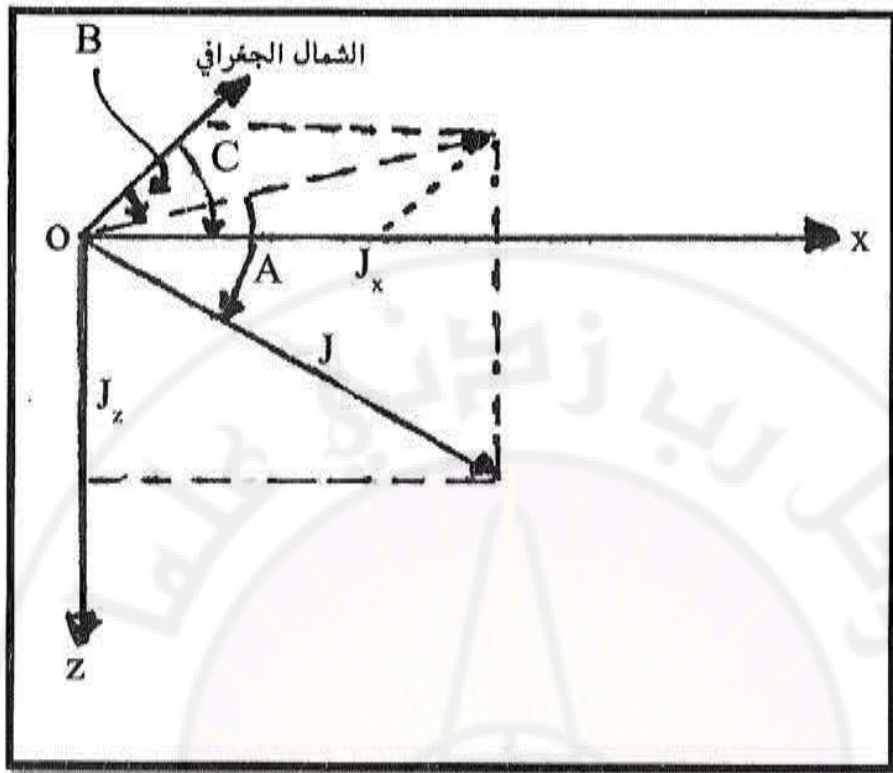
حيث

$$P = \frac{z_{21}^2}{z_{21}^2 + x_{12}^2} (\theta_1 - \theta_2) + \frac{z_{21} \cdot x_{12}}{z_{21}^2 + x_{12}^2} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (5-46)$$

$$Q = \frac{z_{21} \cdot x_{12}}{z_{21}^2 + x_{12}^2} (\theta_1 - \theta_2) - \frac{z_{21}^2}{z_{21}^2 + x_{12}^2} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (5-47)$$

$$x_{12} = x_1 - x_2, \quad z_{21} = z_2 - z_1, \quad r_1 = \sqrt{x_1^2 + z_1^2}, \\ r_2 = \sqrt{x_2^2 + z_2^2}$$

إذا تم التقدم في اتجاه عقارب الساعة، عندئذ تطبق كل من العلاقات السابقة بالنسبة لكل جزء من متعدد الاضلاع، والدليلان 1 و 2 يشيران إلى الزوايا المتلاحقة في كل حالة. ويتم حساب بروفييل أو مسار مغنطيسي بتحريك الأصل تدريجياً إلى نقاط مختلفة على طول المحور x (أي أن المسار المغنطيسي سيحسب لخط متعامد مع محور متعدد الاضلاع). لحساب J_x و J_z تم اعتماد الاصطلاح التالي (الشكل 5-44) بجعل الميل $\bar{r}$ موجباً، إذا كان تحت الأفق ويرمز للزاوية بـ Δ ، وتكون الزاوية التي يشكلها المسقط الأفقي، المقاس باتجاه دوران عقارب الساعة، مع الشمال الجغرافي هي B، أي أنها الزاوية بين الاتجاه الموجب للمسار واتجاه الشمال الجغرافي.



الشكل (5-44): حساب J_x و J_z .

(حسب تالواني وهرتزلر 1964, Talwani and Heirtzler)

ولتكن الزاوية الواقعة في المستوى الأفقي والتي يشكلها المحور الموجب لـ x مع الشمال الجغرافي مقاسة باتجاه دوران عقارب الساعة من الشمال الجغرافي، هي C إذن:

$$J_x = J \cdot \cos A \cdot \cos(C - B) \quad (5-48)$$

$$J_z = J \cdot \sin A \quad (5-49)$$

إذا كانت المغنطيسية متحرضة $J=k \cdot F$ فإن $A=I$ و $B=D$ حيث I و D هي ميل الحقل المغنطيسي الأرضي، وانحرافه على التوالي.

إذا أردنا حساب الشدة الكلية للشواذ T عندما تكون الشواذ صغيرة بالنسبة للحقل الكلي F ، فتكون T هي مجموع المساقط لـ H و V على طول اتجاه F :

$$T = V \cdot \sin I + H \cdot \cos I \cdot \cos (C-D)$$

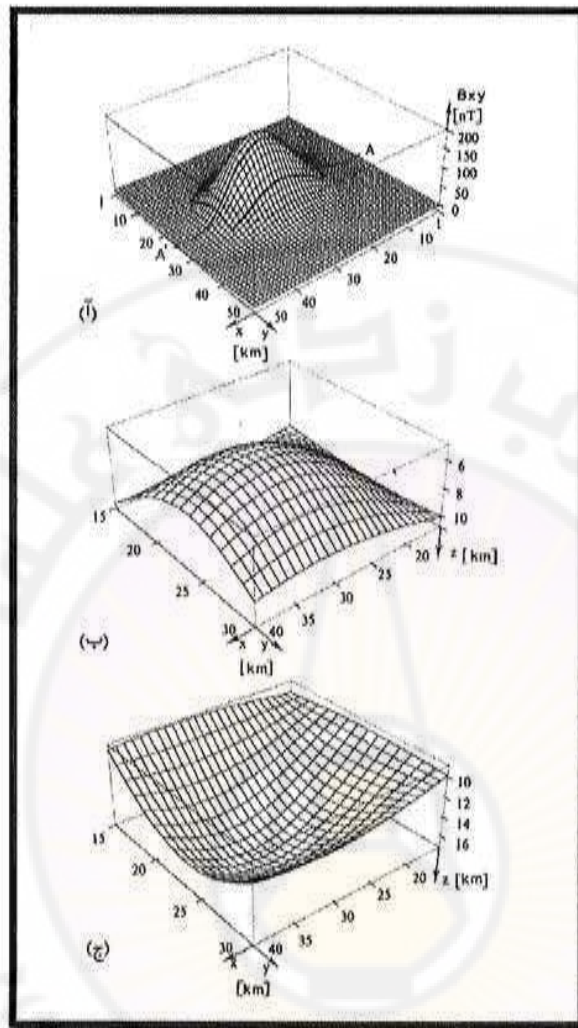
(5-50)

5-5-9- حساب الشواذ المغنطيسية الناتجة عن أجسام مغنطيسية

ثلاثية الأبعاد لا منتظمة الشكل:

تتغير خواص الصخور بشكل كبير في الأنواع المختلفة من الصخور، وحتى ضمن الصخر الواحد. تنتج هذه التغيرات بشكل رئيس من تغير تبعثر الفلزات المغنطيسية وشدة مغنطتها. يمكن أن تكون هذه التغيرات أولية، مثلاً، رسوبية أو مغماتية الأصل أو ثانوية، مثلاً، نتيجة الاستحالة التكتونية. يؤدي تنوع الصفات المغنطيسية للصخور في الطبيعة إلى صعوبة كبيرة في نمذجة الشواذ المغنطيسية. لقد عولجت مشكلة الشواذ المغنطيسية الناتجة عن أجسام ثلاثية الأبعاد لا منتظمة الشكل بعدد كبير من الدراسات مثل: (بوت 1963, Bott) (تالواني وهرتزل 1964, Talwani & Hertzeler) (شوي وماثيو 1964, Shuey & Matthews) (بارنيت 1976, Barnett) و (كادي 1980, Cady).

استطاع ريوستوماكي (Ruotoistenmaki, 1993) حساب هذه الشواذ بمزج التكامل التحليلي باتجاه والتكامل الثنائي الأبعاد بالاتجاهين الآخرين، مما أدى إلى معادلات معقدة وبطيئة التنفيذ. لكن تطوير الحواسيب السريعة جداً ساهم في حل المشكلة. ولقد قدم ريوستوماكي بعض الأمثلة النظرية التي تمت دراستها، وافترض أن شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي 50000 نانوتسلا، وميل الحقل 75° ، وانحرافه 0° ، أي أن اتجاه الشمال المغنطيسي باتجاه الشمال الجغرافي. كما افترض أن السطحين السفلي والعلوي غير مستويين، وعدت المتأثرية أحياناً متغيرة مع المكان كما في الشكل (5-45)، الذي يعطي شدة الشواذ المغنطيسية المحسوبة (الشكل 5-45-أ) لجسم نظري يمتد بين $x = 15-40$ km و $y = 15-30$ km ويعطى سطحه العلوي بالشكل (5-45-ب)، وسطحه السفلي بالشكل (5-45-ج)، وذلك باعتبار المتأثرية ثابتة في الجسم كله، وقيمتها 0.025 SI units. يظهر الشكل (5-46-أ) مقطعاً للشواذ المغنطيسية على طول المسار $A-A'$ في شكل (5-45-أ)، الذي يبدأ من نقطة $y = 25$ km ويمتد بين $x = 0-50$ km، ويظهر الشكل (5-46-ب) مقطعاً عرضياً للجسم تحت المسار $A-A'$.

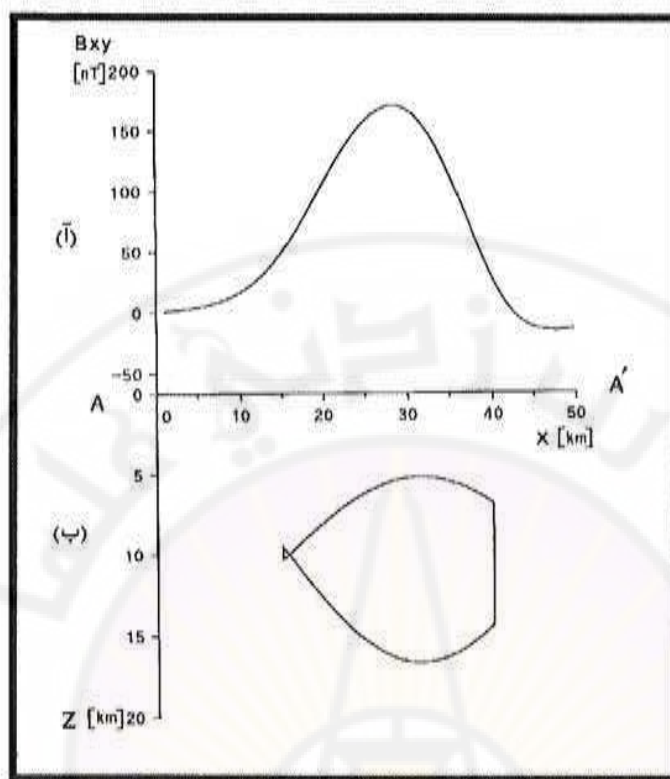


الشكل (5-45): أ- شدة الشواذ المغناطيسية على سطح ثلاثي الأبعاد.

ب- السطح العلوي للجسم النظري المفروض.

ج- السطح السفلي للسطح النظري المفروض.

(حسب ريوستينماكي 1993 Ruotoistenmaki)

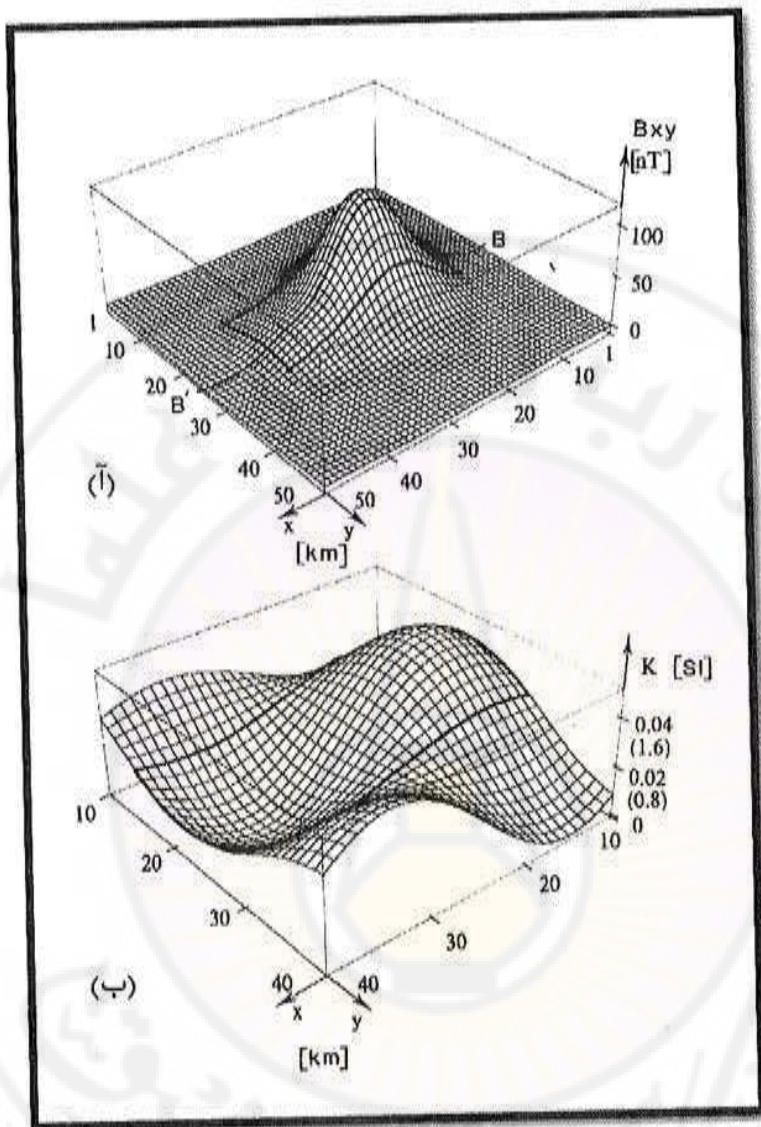


الشكل (46-5): أ- مقطع يظهر الشواذ المغناطيسية تحت المسار A-A'.

ب- مقطع عرضي للجسم تحت المسار A-A'.

(حسب ريوستينماكي 1993 (Ruotoistenmaki)

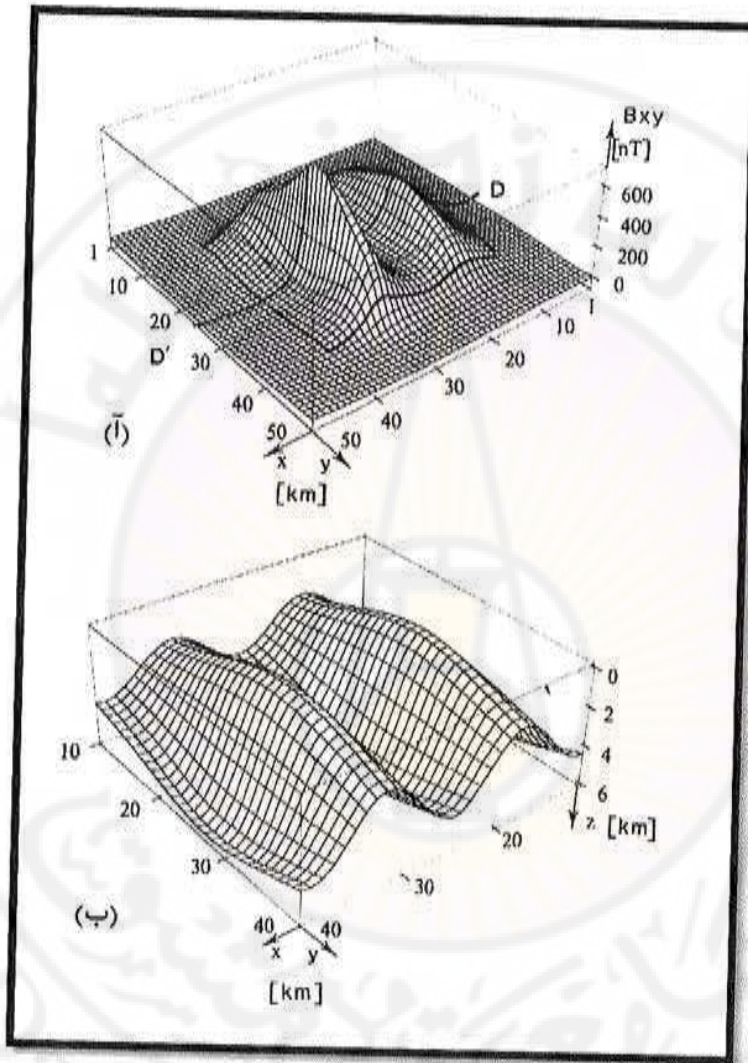
عند تغيير المتأثرية كما في الشكل (5-47-ب)، الذي يظهر توزيعاً ثلاثي الأبعاد للمتأثرية المغناطيسية المتغيرة بالاتجاهين x-y، نتج الشكل (5-47-أ) لشدة شواذ المغناطيسية وهي شبيهة بتلك الظاهرة في الشكل (5-46-أ) لكن قيمها العظمى أقل لكن أكثر حدة من تلك الظاهرة في الشكل (5-47-أ)، وانزاحت نحو المتأثرية العالية حيث يكون الجسم أقل سماكة.



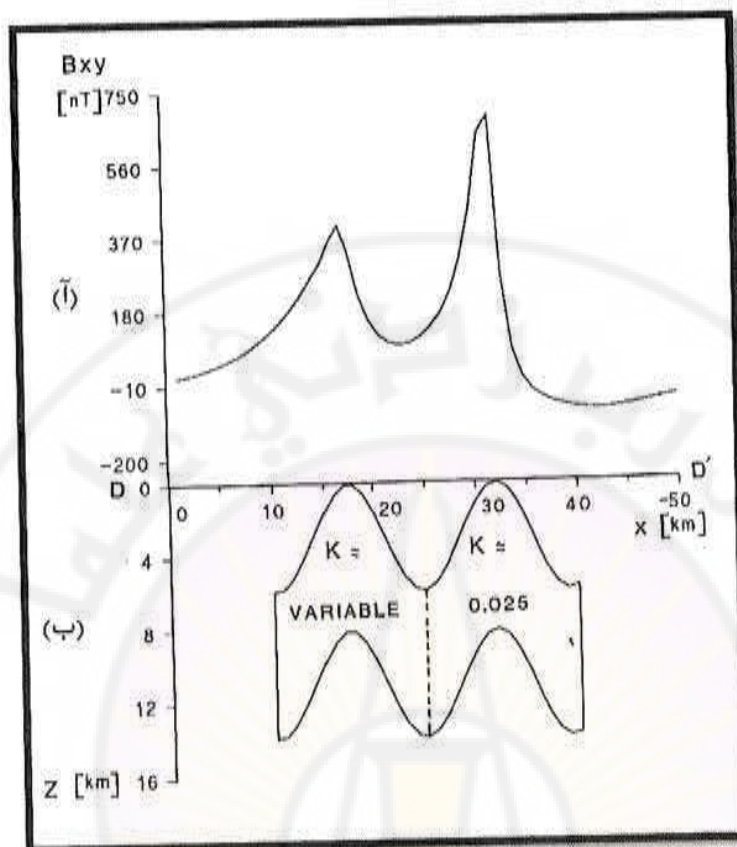
الشكل (5-47): أ- شدة الشواذ المغناطيسية على سطح ثلاثي الأبعاد.
 ب- توزيع ثلاثي الأبعاد للمتانة المغناطيسية للجسم تحت المسار B-B'.
 (حسب ريوستينماكي 1993 Ruotoistenmaki)

يعطي الشكل (5-48-أ) شدة الشواذ المغناطيسية على سطح ثلاثي الأبعاد تعرض للالتواء (شكل 5-48-ب). يظهر في الشكل (5-48-ب) التوزيع ثلاثي الأبعاد لعمق السطح العلوي

لهذا الجسم الذي تعرض للالتواء. لكن المتأثرية المغنطيسية ثابتة في الجزء الأيمن من الجسم وتساوي $k = 0.025$ SI units، ومتغيرة في الجزء اليساري من الجسم (الشكل 5-49-ب).



الشكل (5-48) أ- شدة الشواذ المغنطيسية على سطح ثلاثي الأبعاد.
ب- توزيع ثلاثي الأبعاد لعمق السطح العلوي لجسم تعرض للالتواء.
(حسب ريوستلماكي 1993 Ruotoistenmaki)

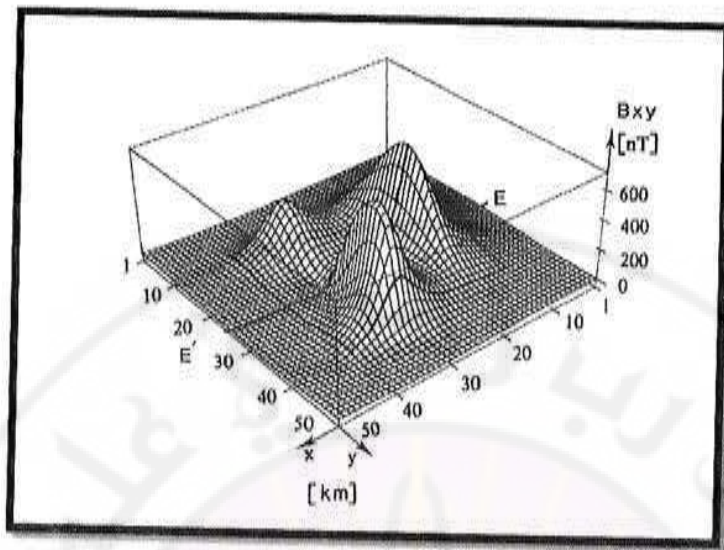


الشكل (5-49). أ- مقطع يظهر الشواذ المغناطيسية تحت المسار $D-D'$ للجسم الوارد في شكل (5-48-ب).

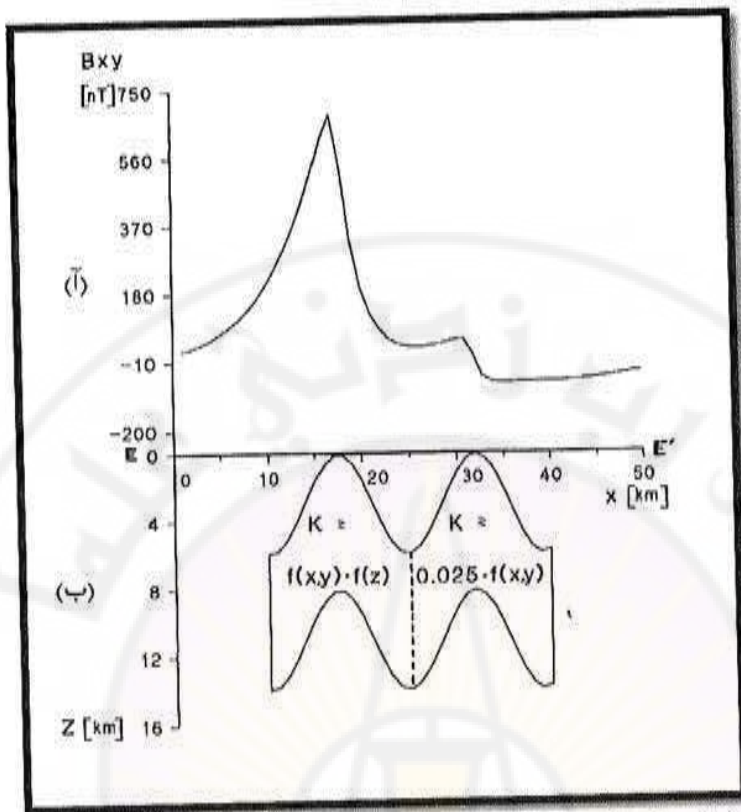
ب- مقطع عرضي للجسم تحت المسار $D-D'$ في شكل (5-48-ب).

(حسب ريوستينماكي 1993 Ruotoistenmaki)

يعطي الشكل (5-50) شدة الشواذ المغناطيسية على سطح ثلاثي الأبعاد تعرض للالتواء، لكن المتأثرية المغناطيسية متغيرة في كل من جزئي الجسم اليميني واليساري (الشكل 5-51-ب).



الشكل (5-50). شدة الشواذ المغناطيسية على سطح ثلاثي الأبعاد لجسم تعرض للالتواء.
(حسب ريوستينماكي 1993 Ruotoistenmaki)



الشكل (5-51): أ- مقطع يظهر الشواذ المغنطيسية تحت المسار E-E' للجسم الذي تعرض للالتواء.

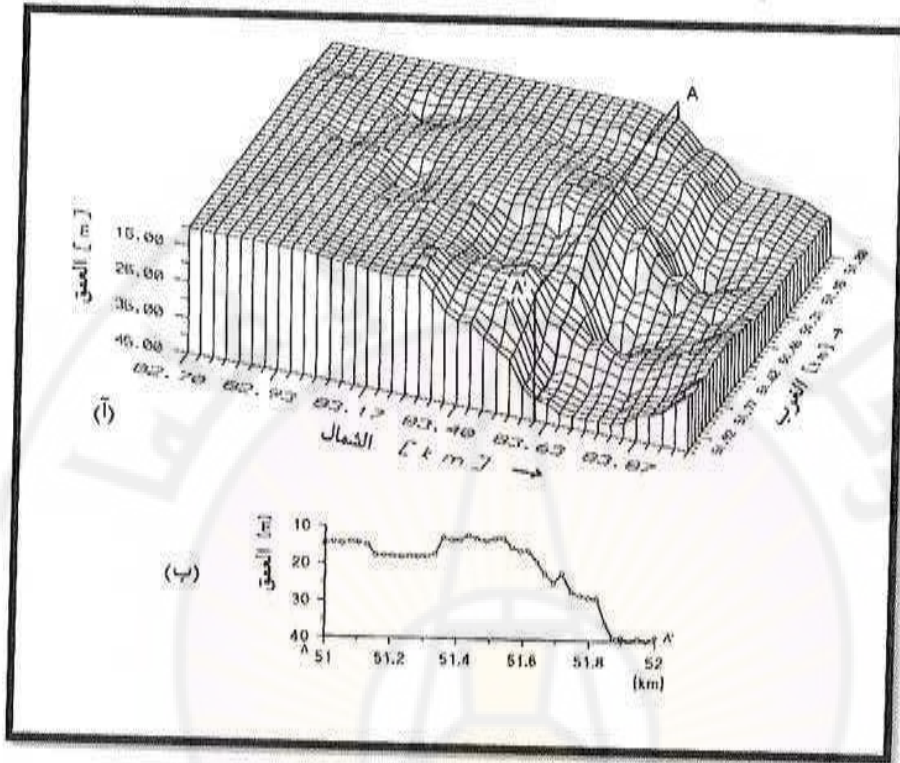
ب- مقطع عرضي للجسم تحت المسار E-E'.

(حسب ريوستينماكي (Ruotoistenmaki, 1993))

طبق ريوستينماكي الطريقة على كتلة معقد هيتورا (Hitura) في وسط فنلندا، حيث يتألف المعقد من جسمين من السربنتين يقتحمان غنيس ميكاي، وطوله نحو 1.5 كيلومتراً، وعرضه 350 متراً، ومغطى بغضار ورواسب جليدية ورمل وحصى، وسماكته متغيرة من نحو 12-45 متراً.

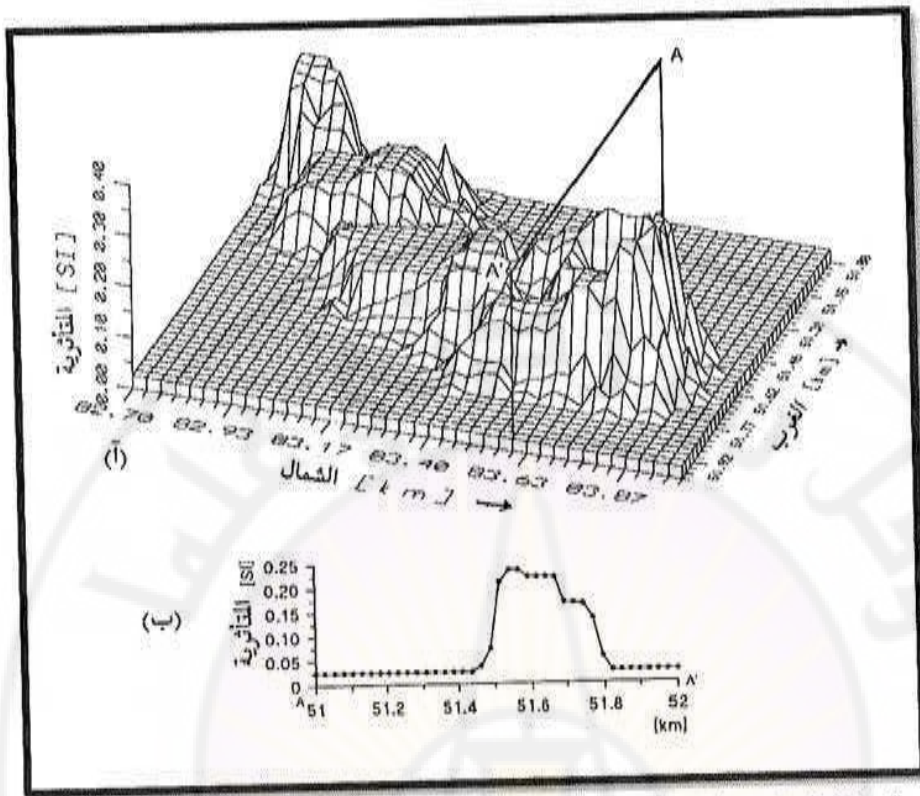
تم حساب الشواذ المغنطيسية باستخدام القيم المتغيرة للسطح العلوي للجسم، وللمناثنية المغنطيسية، باستخدام مؤشر ثلاثي الأبعاد، وعدت شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي 52000 نانوتسلا، وميله 75°، وانحرافه 6°، وأخذ عمق السطح السفلي للجسم 800 متراً

(الشكل 52-5). يعطي الشكل (52-5-أ) توزيعاً ثنائي الأبعاد لعمق السطح العلوي لمعقد هيتورا، بينما يعطي الشكل (52-5-ب) مقطعاً عرضياً تحت المسار A-A'.



الشكل (52-5) أ- توزيع ثنائي الأبعاد لعمق السطح العلوي لمعقد هيتورا.
 ب- مقطع عرضي لعمق السطح العلوي لمعقد هيتورا تحت المسار A-A'.
 (حسب ريوستينماكي 1993 Ruotoistenmaki)

يعطي الشكل (53-5-أ) توزيعاً ثنائي الأبعاد للمتأثرية المغناطيسية في معقد هيتورا، ويعطي الشكل (53-5-ب) مقطعاً عرضياً للمتأثرية المغناطيسية تحت المسار A-A'، ويلاحظ أن قيم المتأثرية المغناطيسية في النموذج قد تراوحت بين 0.025 SI و 0.25 SI units تحت المسار A-A'.



الشكل (5-53): أ- توزيع ثنائي الأبعاد للمتأثرية المغناطيسية في معقد هيتورا.

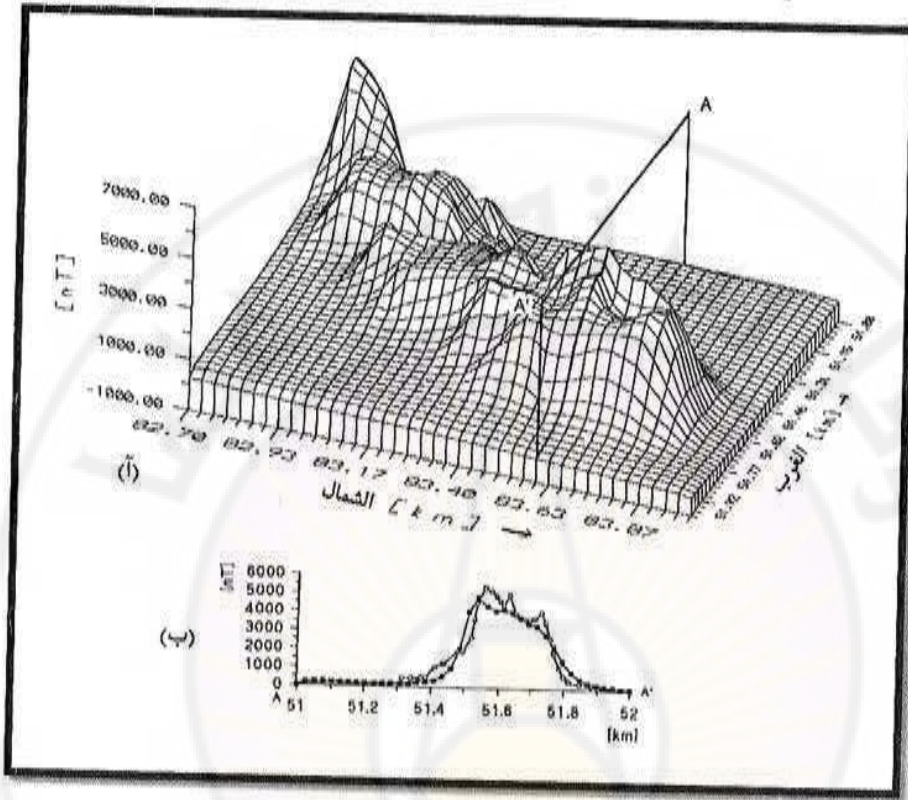
ب- مقطع عرضي للمتأثرية المغناطيسية تحت المسار A-A'.

(حسب ريوستينماكي 1993 (Ruotoistenmaki)

ويعطي الشكل (5-54-أ) توزيعاً ثنائي الأبعاد للشواذ المغناطيسية المحسوبة باستخدام عمق السطح العلوي، والمتأثرية المغناطيسية، الظاهرين في الشكلين (5-52 و 5-53)، بينما يعطي الشكل (5-54-ب) مقطعاً عرضياً لتغير الشواذ المغناطيسية المقاسة (المنحني المميز بالدوائر الفارغة)، وتغير الشواذ المغناطيسية المحسوبة (المنحني المميز بالمربعات السوداء) تحت المسار A-A'.

يلاحظ التطابق الجيد بين المنحني المحسوب والمنحني المقاس، وهذا ما يبرهن على صحة الطريقة المقترحة على نطاق محلي ضيق، ولكن ما يعيق تطبيقها على نطاق واسع هو الزمن الطويل الذي تستغرقه الحسابات. بالرغم من أن الحواسيب السريعة المتوفرة حالياً

تختصر الزمن إلى حد كبير، لكن مازال الأمر محتاجاً لزمن طويل من وقت الحاسوب بشكل متناسب طردياً مع المساحة المدروسة.



الشكل (5-54): أ- الشواذ المغناطيسية المحسوبة. ب- تغير الشواذ المغناطيسية المحسوبة (المنحني المميز بالمربعات السوداء)، وتغير الشواذ المغناطيسية المقاسة (المنحني المميز بالدوائر الفارغة) تحت المسار A-A'.
(حسب ريوستينماكي Ruotoistenmaki, 1993)

5-6- أمثلة على المسح المغنطيسي:

يُعرض في هذا الجزء من الفصل بعض الأمثلة على المسح المغنطيسي، حيث تتوفر المعلومات عن العلاقة بين المعطيات المغنطيسية وجيولوجية المنطقة. تشمل الأمثلة الاستكشاف الفلزي، والنفطي، والجيوحراري والأجسام المغنطيسية غير الفلزية (Dobrin, 1988).

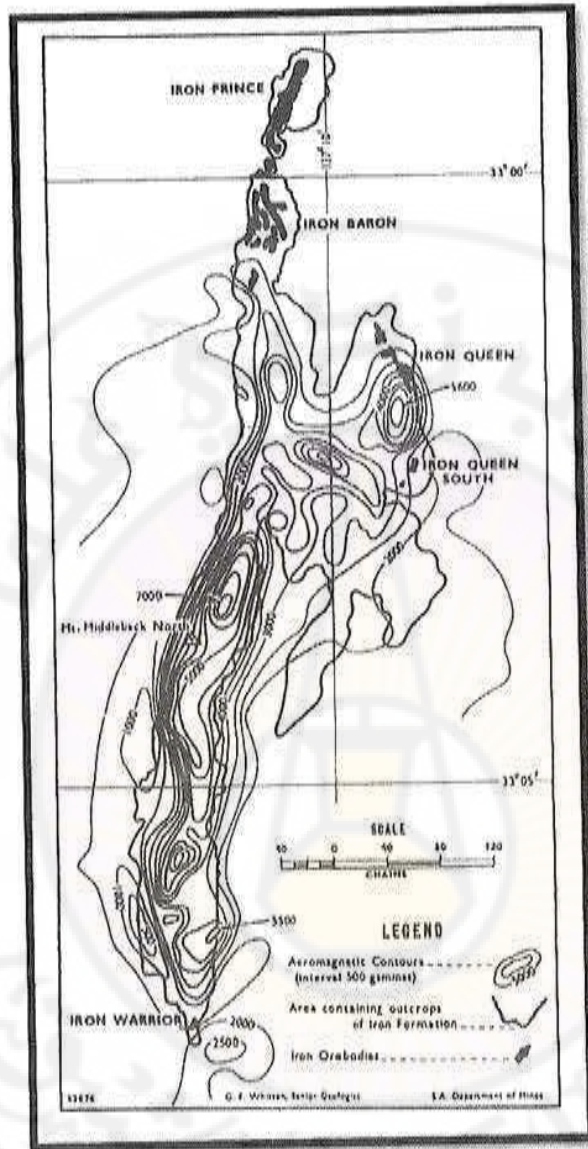
يهدف الاستكشاف الفلزي إلى واحد من الأهداف الثلاثة التالية:

- أ- البحث عن الفلزات المغنطيسية، مثل خامات الحديد الغنية بالمغنيتيت.
 - ب- استخدام الفلزات المغنطيسية المرافقة كدليل على الفلزات غير المغنطيسية.
 - ت- لحساب عمق النطاقات الفلزية، وحجمها، وبنيتها، نظراً لغياب الدلائل السطحية، بسبب وجود الغطاء الرسوبي، أو النباتي. كما يمكن اكتشاف الفوالق، أو المعالم البنيوية ذات التأثير على عمق التوضعات الفلزية.
- هنالك بعض الدراسات التي ربطت بين المصائد النفطية والشواذ المغنطيسية، مثل تجمع النفط في الرسوبات المغطاة لعرف في الركيزة البلورية، الذي يسبب شواذاً في الحقل المغنطيسي. كذلك تشكل شواذ مغنطيسي بسبب تشكل المغنيتيت القريب من السطح، نتيجة التفاعل الكيميائي بين النفط والبيئة المحلية المحيطة. فيما عدا هذه الحالات، فإن معظم المسوح المغنطيسية مفيدة في الاستكشاف النفطي لتحديد عمق الركيزة البلورية ولتركيز الضوء على وجود الاحواض النفطية، خاصة في المناطق غير المكتشفة سابقاً.
- يستخدم المسح الجيوحراري كل تقنيات التفسير المتوفرة لتحديد قاعدة المصدر المغنطيسي. هذا ما يدعى خط تساوي درجة حرارة كوري، أي الحرارة التي تفقد فيها الصخور مغنطيتها نتيجة التسخين. تعتبر المناطق ذات خط تساوي درجة حرارة كوري الضحل مناطق مؤهلة لإنتاج الطاقة الجيوحرارية.

5-6-1- الاستكشاف المغنطيسي للخامات الفلزية:

يأتي حوالي 90% من إنتاج الحديد في العالم من مصادر رسوبية بيوضية، أو سيليسية التركيب، وما تبقى من مصادر صخور نارية اندساسية، أو نتيجة تجوية الفلزات غير الحديدية. كثيراً ما تحتوي الخامات الناتجة عن الصخور النارية على نسبة عالية من المغنيتيت-الهيماتيت، ويمكن كشفها بالقياسات المغنطيسية مباشرة، وبهذا يمكن استخدام المسح المغنطيسي بشكل غير مباشر لتعيين موقع الخام.

يظهر الشكل (5-55) خريطة الحقل المغنطيسي الكلي فوق سلسلة نورثرن مديباك (Northern Middleback) في جنوب أستراليا، حيث يوجد المصدر الرئيس للحديد على القارة. تمثل المنطقة المظللة والمحاطة بخطوط غامقة المنطقة التي تتكشف فيها التشكيلات الحاملة للحديد، وتمثل البقع السوداء مناطق توضع الحديد بكميات اقتصادية، وأهم هذه التوضعات أيرون برنس (Iron Prince) وأيرون بارون (Iron Baron). تسبب مواقع الخام شواذاً بالجابدية، لذا تتم إجراءات الاستكشاف في المنطقة بتحديد المناطق المطلوبة من الخريطة المغنطيسية، ثم تعيين المواقع الاقتصادية بواسطة مقياس الجاذبية.

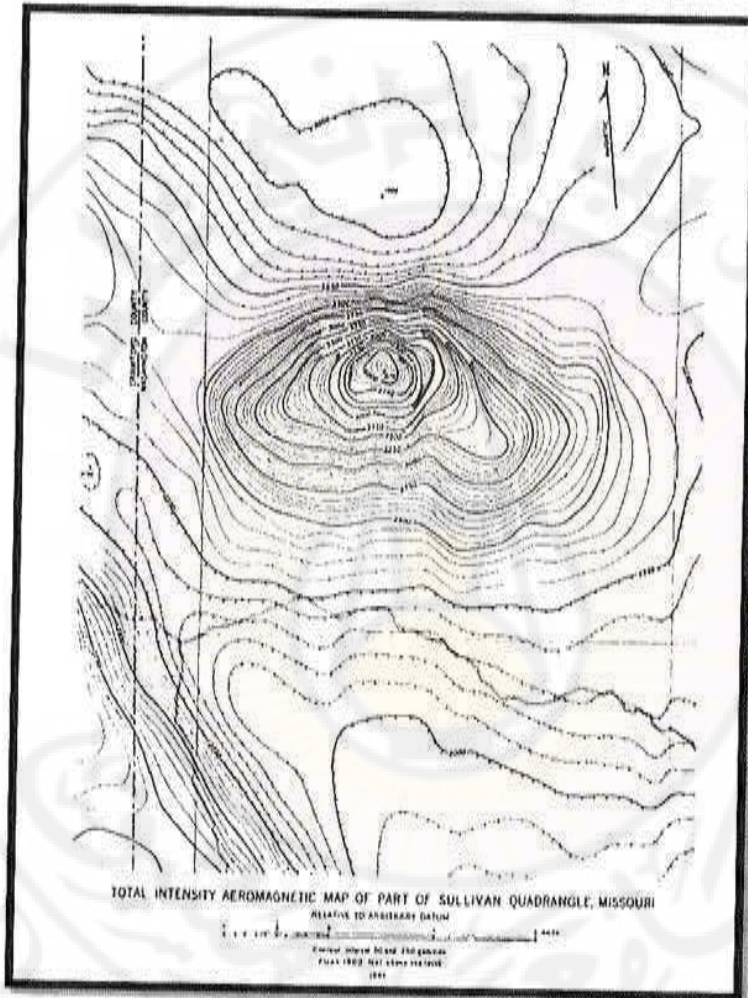


الشكل (5-55): خريطة شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق سلسلة نورثرن مديلاك في جنوب أستراليا.

(حسب دوبرن 1988 Dobrin)

يظهر الشكل (5-56) خريطة المغنطيسية الجوية فوق بي ريدج (Pea Ridge) في ولاية ميسوري الأمريكية، حيث يوجد توضع لخام كان من المتوقع أن ينتج حوالي 2 مليون

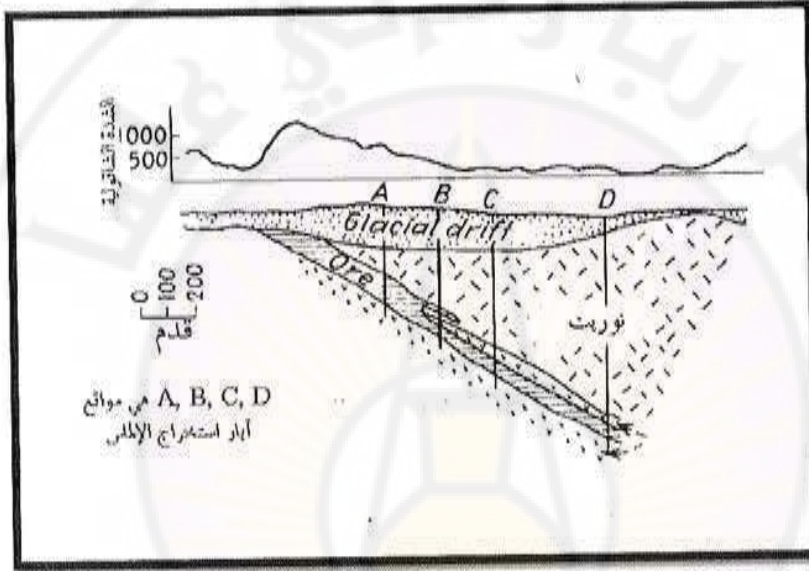
طن من الخام. جرى الحفر الذي كشف توضع الخام للتحري عن مصدر شواذ المغنطيسية البالغ 3000 نانو تسلا، الظاهر في الخريطة المغنطيسية. يقع التوضع على عمق 1250 قدماً، يمتد بطول 3000 قدماً، ويقع مركزه إلى الشمال قليلاً من قمة الشواذ المغنطيسية، وهو ناتج عن ملء وإحلال هيدروثرمالي لموقع بركاني بريكاميري.



الشكل (5-56): خريطة شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق جزء من سوليفان كوادرنكل، ميسوري.
(حسب دوبرن 1988 Dobrin)

5-6-2- الاستكشاف المغنطيسي للفلزات الأخرى:

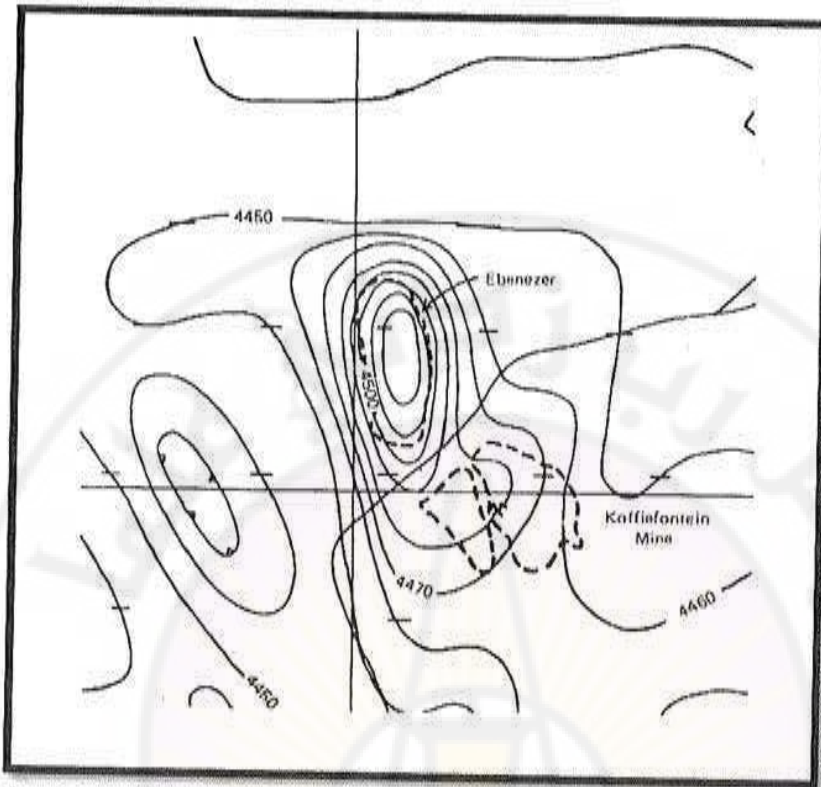
هنالك الكثير من المعادن غير المغنطيسية مثل المعادن القاعدية (النحاس مثلاً) والذهب، التي تترافق مع الفلزات المغنطيسية، مثل المغنيتيت والبيروتيت. يظهر الشكل (5-57) منحنى تغير شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي فوق مكن لخام كبريت النحاس والنيكل، تحت تماس من النوريت في منطقة سيدبري (Sudbury) الكندية. حيث تم اكتشاف الخام بعد حفر بئر، تم تعيين موقعها بناء على المسح المغنطيسي.



الشكل (5-57): منحنى تغير شواذ المركبة الشاقولية للحقل المغنطيسي فوق مكن لخام كبريت النحاس والنيكل في منطقة سيدبري.

(حسب دوبرن 1988 Dobrin)

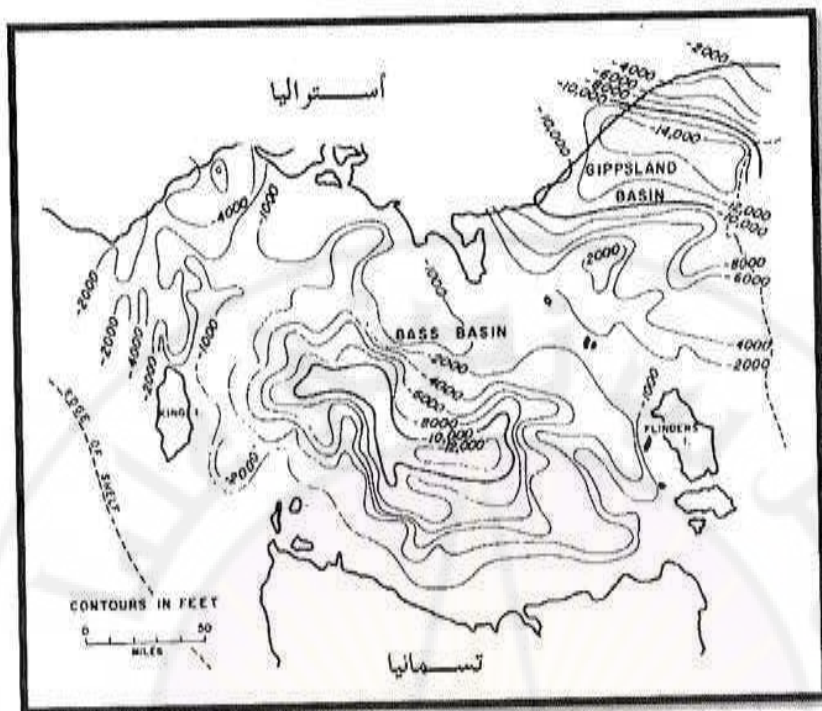
ويستخدم المسح المغنطيسي للتقيب عن أنابيب الكمبرليت الحامل للإلماس في مناطق متعددة. فالكمبرليت صخر فوق أساسي، ويعتبر مصدراً للإلماس، ويحتوي على المغنيتيت والإلميت بشكل رئيس. يمثل الشكل (5-58) خريطة المغنطيسية الجوية فوق بعض الأنابيب الكمبرلítica في كوفيفونتين (Koffiefontain) في جنوب إفريقيا.



الشكل (5-58): خريطة المغنطيسية الجوية فوق بعض الأنابيب الكمبرليتية في كوفيفونتين في جنوب إفريقيا.
(حسب دوبرن 1988 Dobrin)

5-6-3- الاستكشاف المغنطيسي للهيدروكربون:

استخدم المسح المغنطيسي في استكشاف الهيدروكربون كثيراً بعد الحرب العالمية الثانية، لتحديد امتداد الأحواض الرسوبية وسماكتها في مناطق غير مدروسة سابقاً، وذلك بتعيين العمق إلى الركيزة البلورية من المسح المغنطيسي الجوي، أو البحري. يعطي الشكل (5-59) خريطة عمق سطح الركيزة البلورية فوق مضيق باس ستريت (Bass Strait)، الواقع بين أستراليا وتسمانيا، بناء على المسح المغنطيسي. تم ذلك قبل إجراء المسح السيسمي للمنطقة، وأشار إلى وجود حوضين تحت بحرية مؤملين بوجود النفط. وقد أكد المسح السيسمي لاحقاً وجود هذين الحوضين، وتم اكتشاف كميات كبيرة من الغاز في المنطقة.



الشكل (5-59): خريطة عمق سطح الركيزة البلورية فوق مضيق باس ستريت الواقع بين أستراليا وتسمانيا.
(حسب دوبرن 1988, Dobrin)

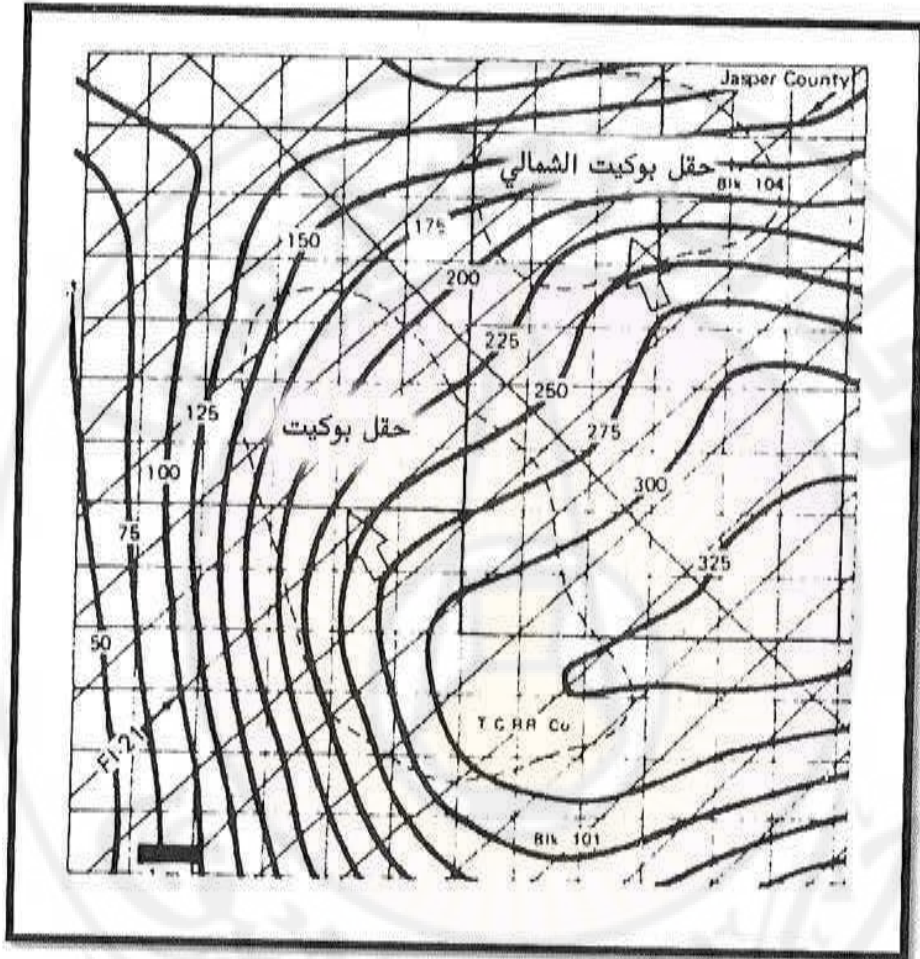
5-6-3-1 - حقل بترول بوكيت بولاية تكساس - Puckett field

:Texas

أجريت هذه الدراسة فوق حقل بترول منتج (Steenland, 1965)، لمقارنة النتائج مع نتائج الآبار المحفورة سابقاً، والمقارنة مع الدراسات المغنطيسية الاستطلاعية التي أجريت قبل بدء الحفر.

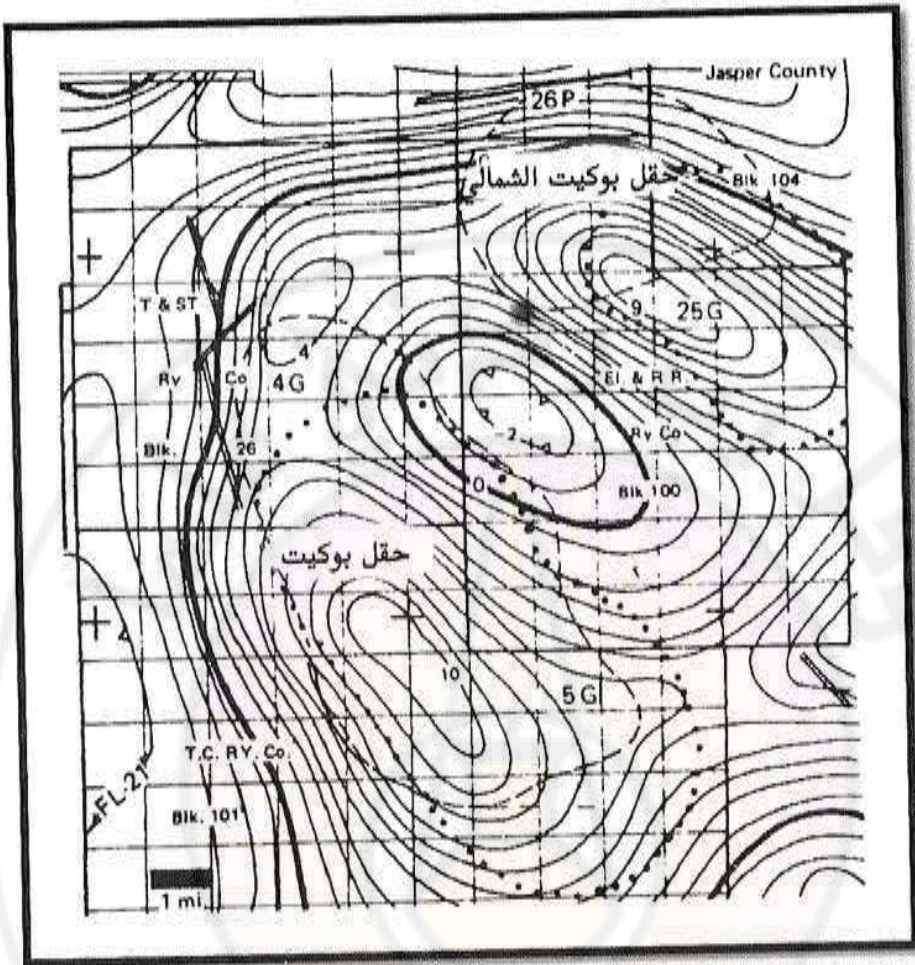
يظهر الشكل (5-60) خريطة مغنطيسية جوية، بينما يعطي الشكل (5-61) خريطة المشتق الثاني للشدة المغنطيسية الكلية. أعطت التفسيرات خريطة طبوغرافية الركيزة (الشكل 5-62)، ويظهر بها التغير الكبير بالعمق ما بين 22000 قدم في المنطقة الغربية، إلى 12000 قدم في المنطقة الوسطى. بمقارنة خريطة طبوغرافية الركيزة الناتجة عن الدراسة

المغناطيسية، مع خريطة طبوغرافية الركيزة الموضوعية سابقاً بنتيجة أعمال الحفر (الشكل 5-63)، يظهر التشابه الكبير بينهما.

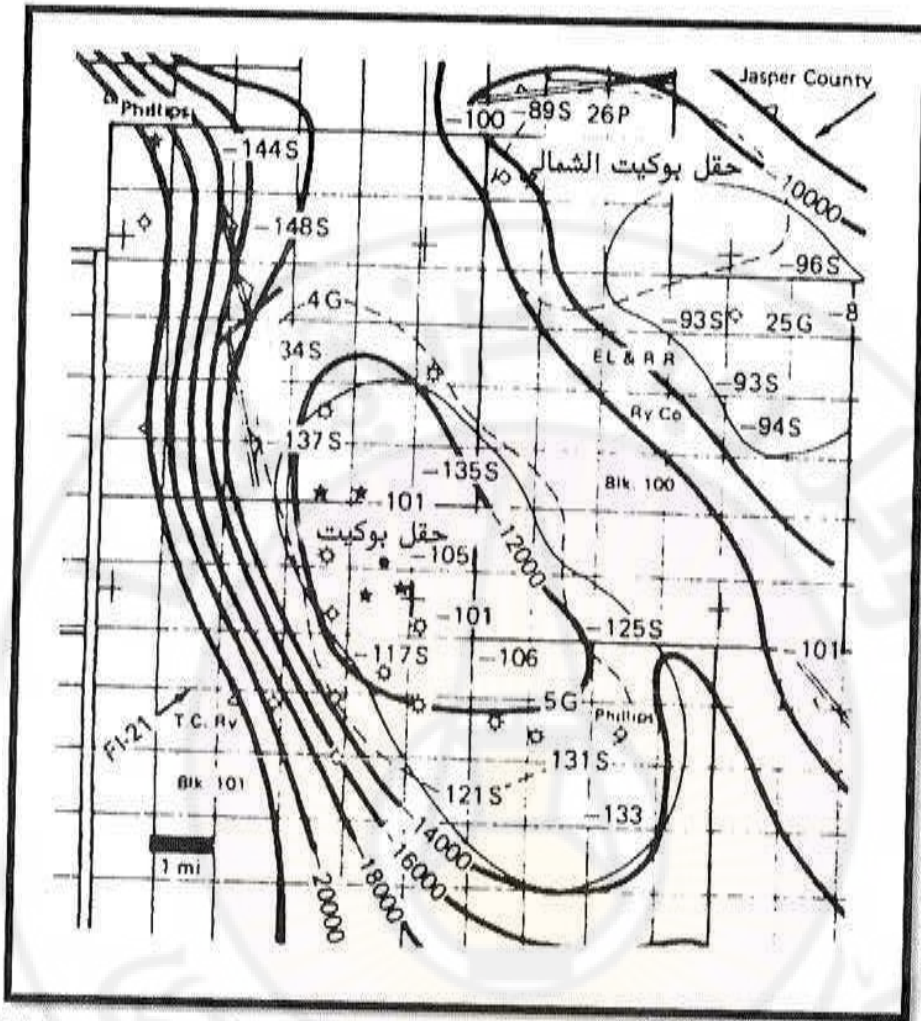


الشكل (5-60): خريطة الشدة المغناطيسية الكلية المقاسة فوق حقل بوكيت.
(قيم الشدة بالنانوتسلا).

(حسب ستينلاند 1965 (Steenland, 1965))

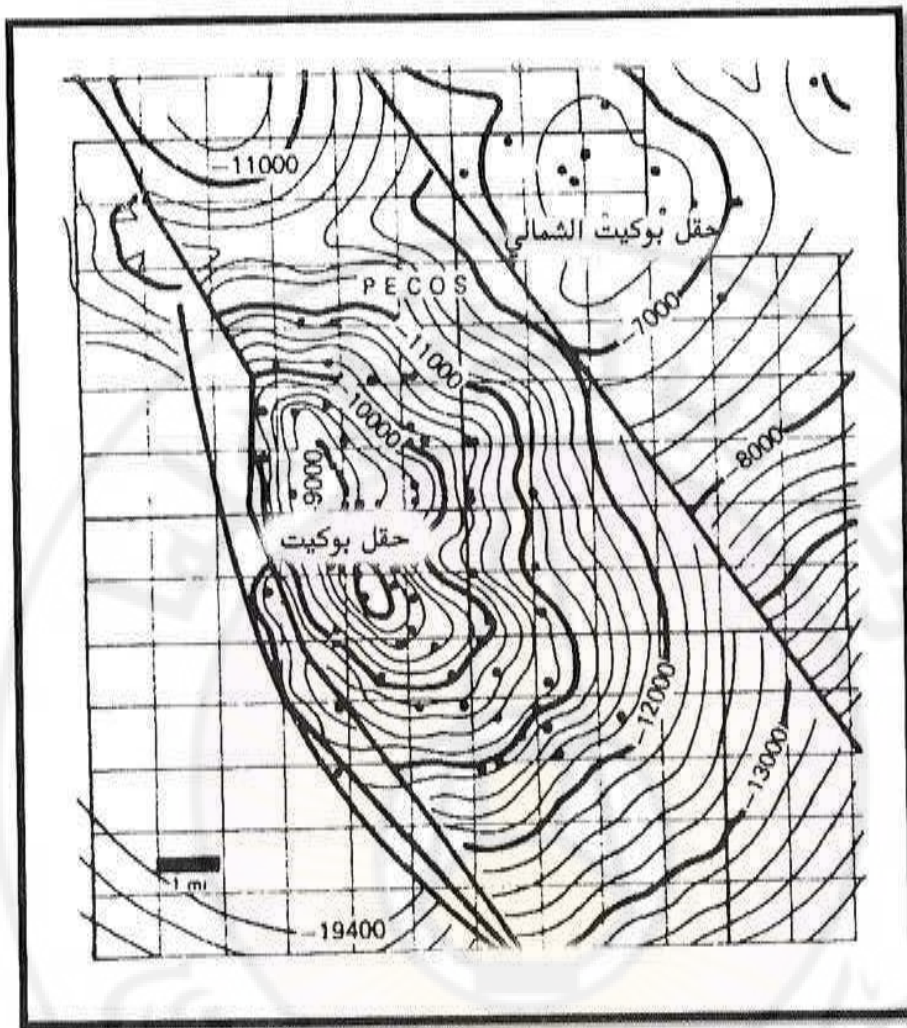


الشكل (5-61): خريطة المشتق الثاني للشدة المغناطيسية الكلية فوق حقل بوكيت، وتظهر المناطق المغلقة السالبة والموجبة لقيم المشتق الثاني.
(حسب ستينلاند 1965 Steenland)



الشكل (5-62): خريطة طبوغرافية الركيزة المحسوبة من الدراسة المغنطيسية لحقل بوكيت. يحيط الخط المتقطع بمنطقة الأمل بوجود البترول، والنتيجة عن الدراسة المغنطيسية فقط. تعطي الأرقام العمق بالأقدام تحت سطح الأرض.

(حسب ستينلاند 1965 Steenland)



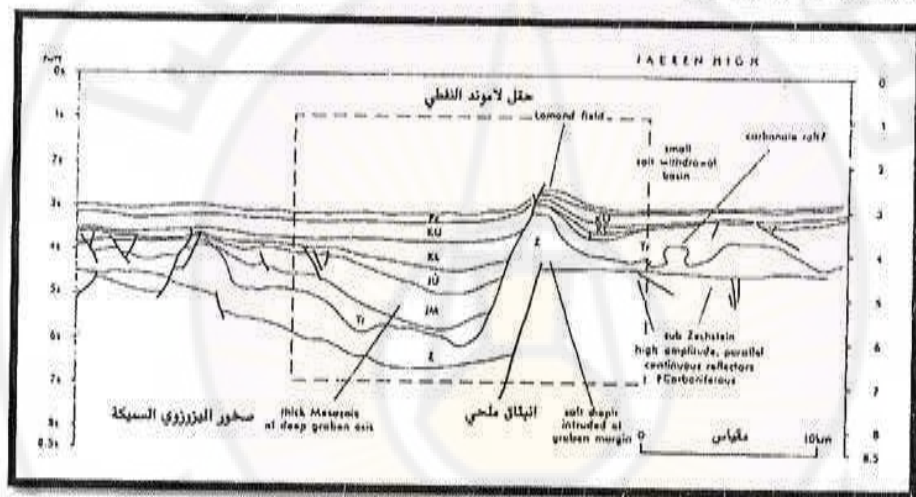
الشكل (5-63): خريطة طبوغرافية الركيزة الموضوعية سابقاً بنتيجة الحفر. تشير النقاط السوداء إلى الآبار المحفورة سابقاً. تعطي الأرقام العمق بالأقدام تحت سطح الأرض.
(حسب ستينلاند 1965 Steenland)

5-6-3-2- حوض بحر الشمال المركزي Central North Sea:

قام بلات وولتر (Platt and Walter , 1995) بدراسة مقطعين في بحر الشمال، لتأكيد الفائدة الكبيرة التي تجنى من تقاطع الدراسات الجيوفيزيائية لمنطقة ماء، وخاصة

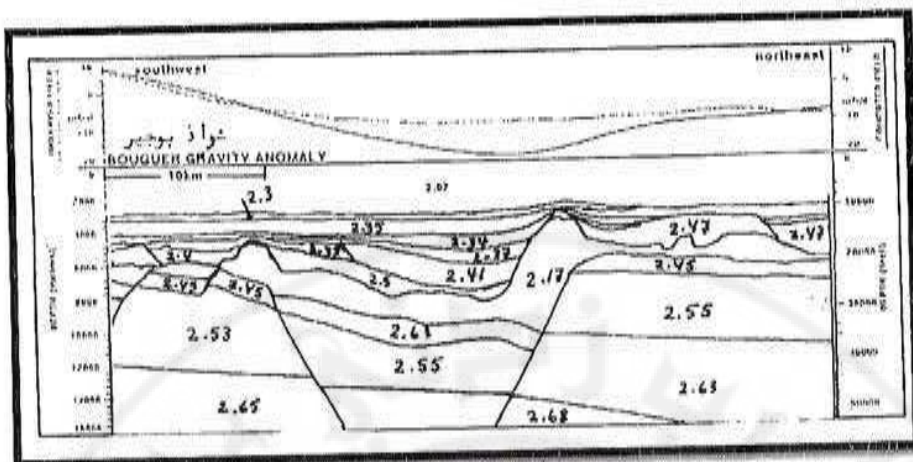
المناطق المعقدة، حيث تعجز طريقة واحدة عن تقديم نتيجة مؤكدة. لذا نورد المثال الذي أورده المؤلفان عن الغور الأوسط الشرقي (Eastern Central Graben) من حوض بحر الشمال المركزي. يظهر الشكل (5-64) التفسير السيسمي لمقطع الغور، حيث أمكن التتبع بدقة للسطوح العاكسة لرسوبيات العصر الرباعي والثلاثي حتى الترياسي الأعلى. فقد كانت الصعوبة في تمييز المستوى الملحي العلوي، نظراً لأن التباين السريع بين ملح البرمي والغضار الصفحي الترياسي صغير.

استخدمت قيم الكثافة المبينة في الشكل (5-65) لحساب شواذ بوجيه، فظهر اختلاف بين القيم المحسوبة والقيم المقاسة لشواذ الجاذبية، كما يظهر في المنحنيين الظاهرين في القسم العلوي من الشكل (5-65).



الشكل (5-64): مقطع عبر الغور الأوسط الشرقي مستنتج من الدراسة السيسمية، وتشير الرموز إلى الأعمار الجيولوجية للطبقات الرسوبية.

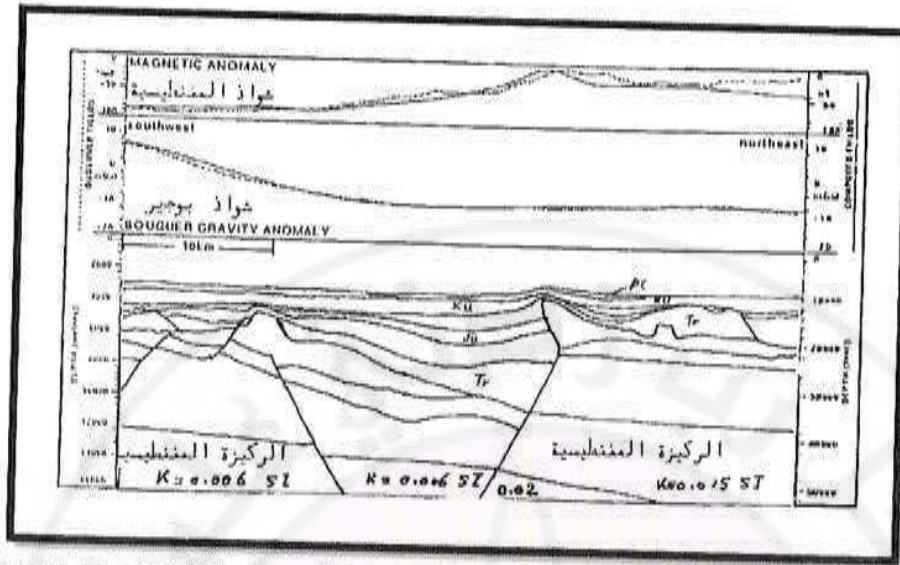
(حسب بلات وولتر 1995, Platt & Walter)



الشكل (5-65): مقطع عبر الغور الأوسط الشرقي معدل عن الدراسة السيسمية، وتشير الأرقام إلى قيم كثافة الصخور المستخدمة لحساب شواذ بوجيه.

(حسب بلات و ولتر 1995 Platt & Walter)

تم تعديل المقطع واستخدمت قيم المتأثرية المغنطيسية الظاهرة في الشكل (5-66)، لحساب شواذ المغنطيسية والجاذبية، فتم التوصل إلى أفضل تطابق بين المنحنيات الظاهرة في القسم العلوي من الشكل (5-66). لذا تم التوصل إلى الاعتقاد بأن المقطع الحقيقي تحت الغور هو الظاهر في القسم السفلي من الشكل.



الشكل (5-66): مقطع عبر الغور الأوسط الشرقي معدل عن الدراسة السيسمية. يلاحظ التطابق بين المنحنيات المحسوبة للمغناطيسية والجاذبية.
(حسب بلات و ولتر 1995 Platt & Walter, 1995)

5-3-6-3- غرب إفريقيا Senegal, W. Africa

أدى مسح مغناطيسي استطلاعي (Nettleton, 1962) إلى إظهار وجود حوض رسوبي واسع جداً في السنغال. يظهر في الشكل (5-67) الذي يمثل خريطة طبوغرافية الركيزة بفروق ارتفاع مقدارها (1000) متر، وتم تحديد الحدود الخارجية لسطحية تشغل مركز الحوض (الخط العريض المتقطع)، عرضها 150 كم وطولها 250 كم. يصل عمق الحوض حتى 7000 متر شمال دكار (Dakar)، ويمتد باتجاه شمال-شرق. كما يوجد حوض رسوبي آخر ضحل في الجهة الجنوبية الشرقية من السطحية، ويوجد حوض آخر عميق يصل عمقه حتى 7000 م في الجهة الجنوبية الغربية.



شكل (5-67): خريطة طبوغرافية الركيزة محسوبة من الدراسة المغناطيسية الجوية. يظهر الخط العريض المتقطع الحدود الخارجية لسطحية تشغل مركز الحوض الرسوبي.
(حسب نيتليتون 1962 , Nettleton)

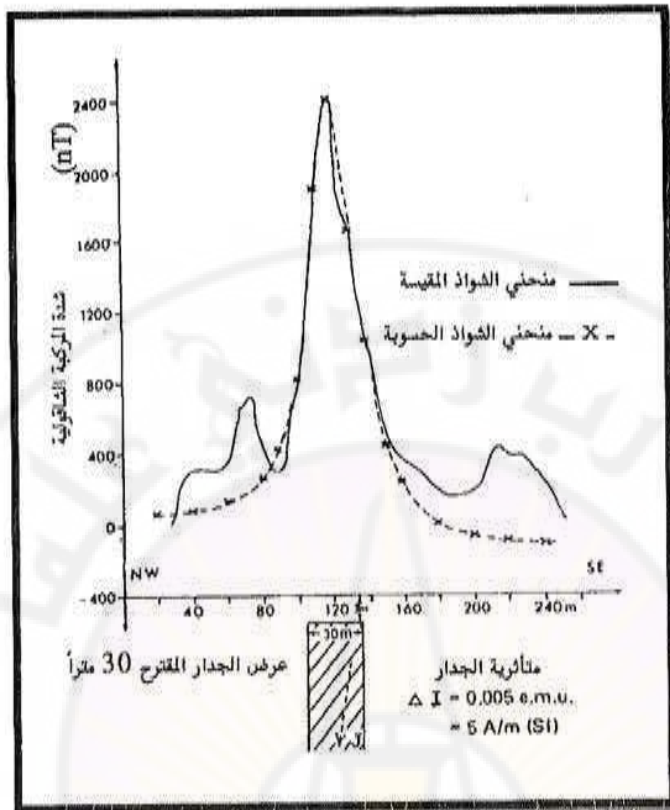
5-6-4- الاستكشاف المغناطيسي للأجسام غير الفلزية:

5-6-4-1- الجدار القاطع جيلديسي، الدنمارك Kjeldsea Dyke,

:Denmark

أثبتت الطرائق المغنطيسية فعاليتها العالية في اكتشاف الأجسام عالية المغنطيسية، مثل الصخور الاندفاعية الأساسية، التي لها متأثرية أعلى بكثير من الصخور الرسوبية المحيطة بها، كما في دراسة شونيمان (Schonemann , 1972) على جزيرة بورنهولم (Bornholm) التابعة للدنمارك. حيث تتكشف على الساحل الشمالي للجزيرة جدران قاطعة من دياباز البريكامبري، وتختفي هذه الجدران تحت سطح الجزيرة.

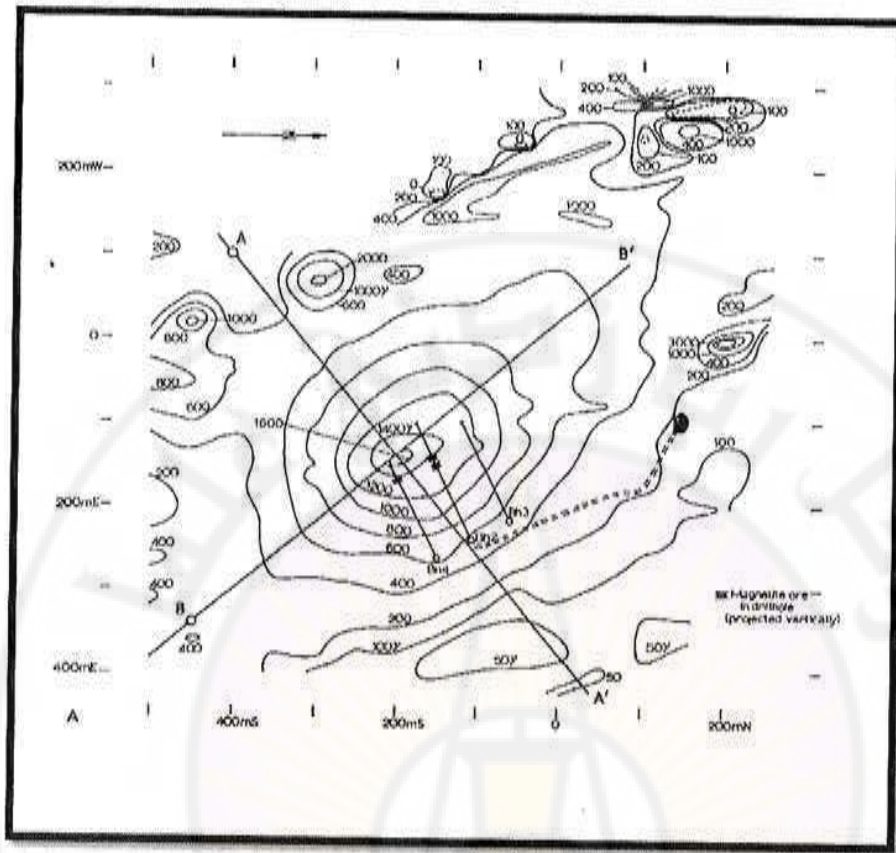
لقد مكنت الدراسة المغنطيسية من تتبع الجدار القاطع الذي يدعى جيلدسي (Kjeldsea Dyke)، لمسافة 15 كيلو متراً نحو داخل الجزيرة، وأمكن تقدير عمقه في مناطق تتبعه. يعطي الشكل (5-68) منحنى تغير شواذ المركبة المغنطيسية الشاقولية المقاسة على مسار فوق الجدار القاطع، ويظهر النموذج المقترح للجدار والذي استخدم لاستنتاج العمق إلى السطح العلوي للجدار، كما يظهر الشكل منحنى تغير الشواذ المحسوبة للنموذج المقترح (الخط المتقطع مع إشارة ضرب). يلاحظ التشابه الكبير بين منحنى الشواذ المقاسة ومنحنى الشواذ المحسوبة، مما يؤكد صحة النموذج المقترح.



الشكل (5-68): منحنيات تغير شدة المركبة الشاقولية فوق الجدار القاطع جيلدي في الدنمارك.
(حسب شارما 1976 (Sharma))

5-6-4-2- منطقة يودال، وسط السويد U-Dal, Central Sweden

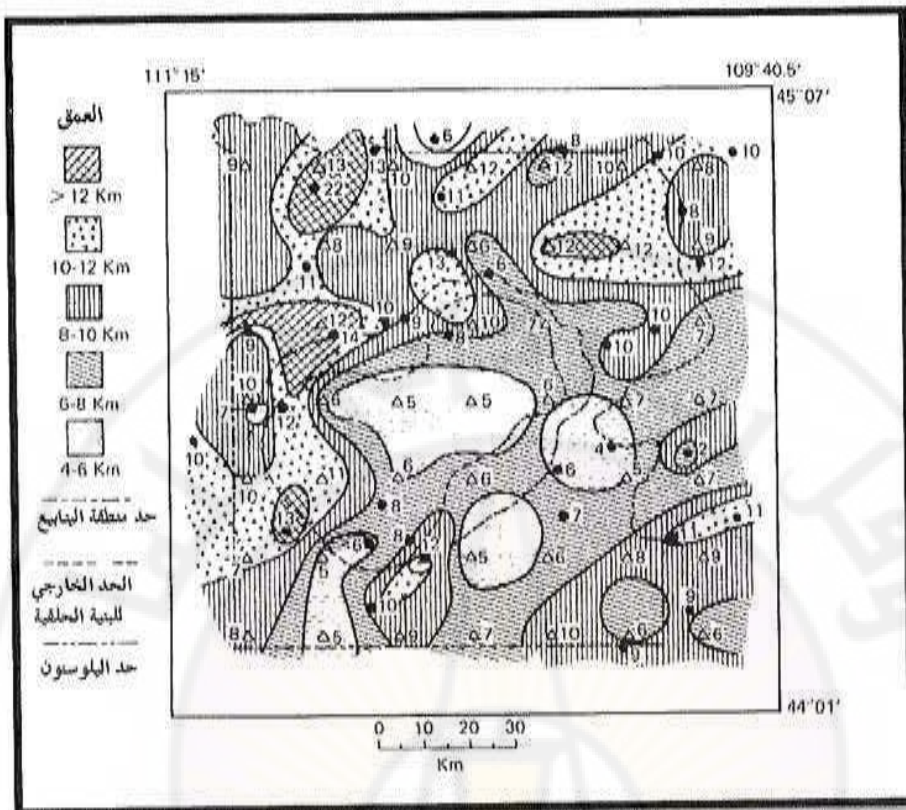
يظهر الشكل (5-69) نتائج المسح المغنطيسي في منطقة معظمها من الغرانوليت (Parasnis, 1975)، ويلاحظ وجود شواذ مغنطيسية عالية تصل إلى 1600 نالوتسلا في وسط المنطقة، كما يلاحظ وجود سلسلة من مراكز الشواذ العالية إلى الغرب من الشواذ الوسطى الغربية. بين تفسير هذه الشواذ أن الجسم المطمور يميل نحو الشمال الشرقي بزاوية قدرها 70°، وهذا يتوافق مع الميل العام لصخور المنطقة، وقد أيدت دراسة الآبار Bh_4 , Bh_3 , Bh_2 النتائج المغنطيسية.



الشكل (5-69): خريطة تساوي الشدة المغناطيسية في منطقة بودال في وسط السويد.
(حسب باراسنيس 1975 Parasn)

5-6-5- الاستكشاف المغناطيسي للمناطق الجيوحرارية:

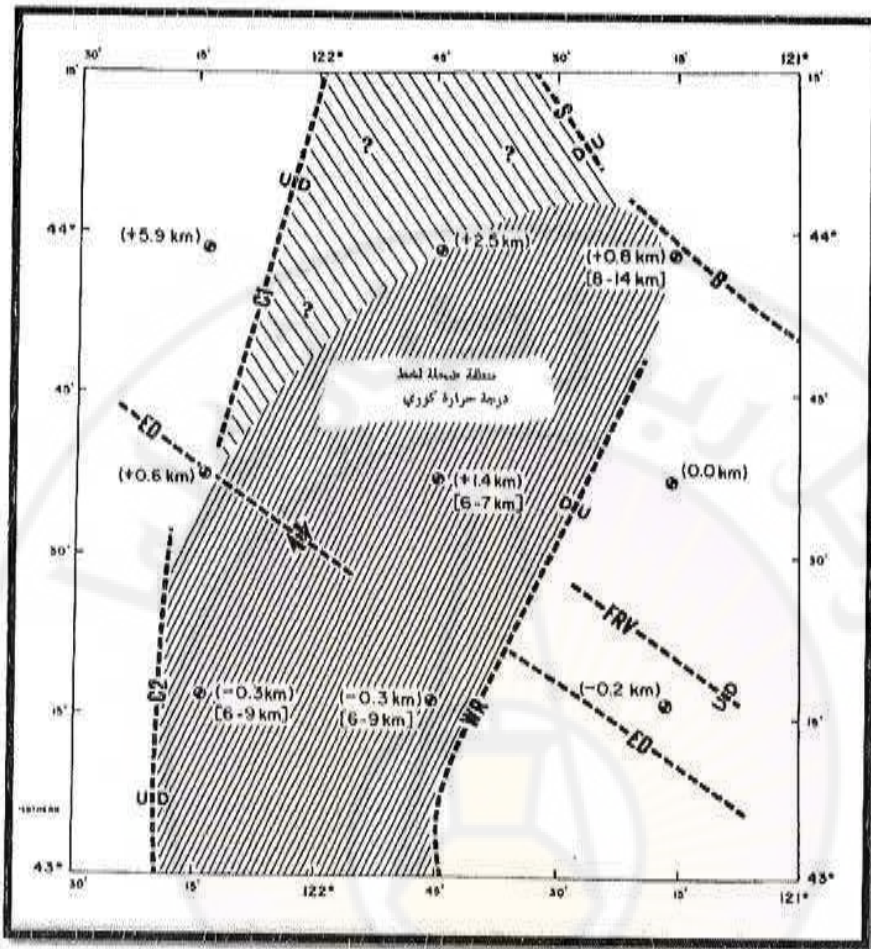
درس باطاكرييا وليو (Bhattacharyya and Leu, 1975) التغيرات الفراغية لمستوى خط تساوي درجة حرارة كوري في منطقة يلوستون (Yellowstone) الأمريكية، بتحليل معطيات المسح المغناطيسي الجوي، مما سمح بتعيين العمق إلى أسفل القشرة المغناطيسية، وهو ما يدعى "خط تساوي درجة حرارة كوري". ربطت الدراسة بشدة العلاقة بين خط تساوي درجة حرارة كوري الضحل، ومواقع الينابيع الحارة والتغيرات الهيدروثرمالية. (الشكل 5-70).



الشكل (5-70): خريطة عمق خط تساوي درجة حرارة كوري الضحل في منطقة بلوستون. تمثل الدوائر والمثلثات مواقع مراكز الشواذ الحرارية المنعزلة.

(حسب دوبرن 1988 Dobrin)

كما درس كونراد وزملاءه (Connrad et al., 1983) التدرج الحراري لمنطقة جبال كاسكيد في وسط ولاية أوريغون الأمريكية من خلال مسح مغناطيسي جوي، واقترحوا بناء على الشواذ المغناطيسية بأن منطقة الهاي كاسكيدز (High Cascades) واقعة فوق خط تساوي درجة حرارة كوري ضحل، عمقه بحدود 9 كيلومتراً (الشكل 5-71). يقترح هذا العمق بأن التدرج الحراري للمنطقة أعلى من 50 درجة مئوية بالكيلومتر، والتدفق الحراري أعلى من 100 mW/m^2 ، مما جعل المنطقة منطقة أمل لاستخراج الطاقة الجيوحرارية.

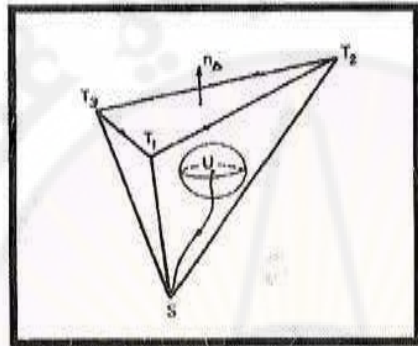


الشكل (5-71): منطقة الهاي كاسكيدز محدده بها المنطقة حيث يكون خط تساوي درجة حرارة كوري ضحلاً.
(حسب كونراد وزملاءه 1983 Conrad et al., 1983)

5-6-6- مثال على التتابع نحو الأعلى:

نقاس شواذ المغنطيسية والجاذبية على مستويات متغيرة، بوجود تأثير طبوغرافية المنطقة المحيطة بنقاط القياس، وخاصة في المناطق ذات الطبوغرافيا المتغيرة جداً. مما دفع بالعديد من الباحثين (Henderson and Cordell 1971, Syberg 1972, Parker and Klitgord 1972, Ducruix, LeMouel and Courtillot 1974, and Ivan 1986) لتخفيف هذا التأثير بحساب قيم الحقل على مستوى أعلى باستخدام القيم المقاسة على سطح الأرض.

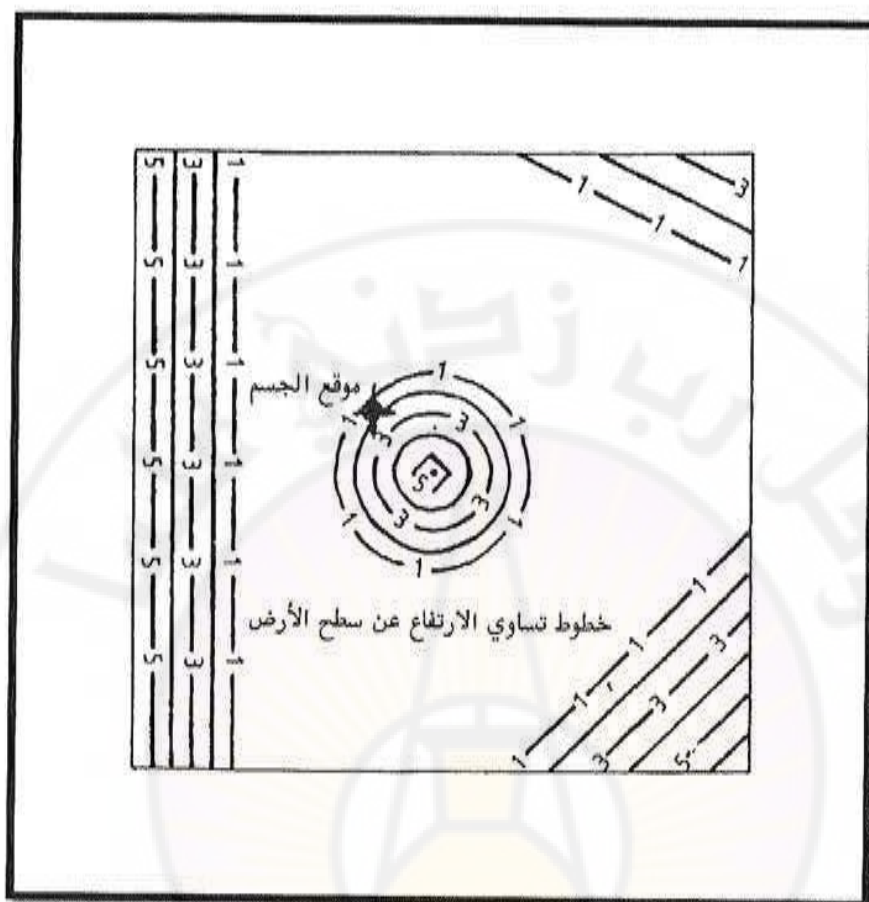
درس العديد من الباحثين التأثير الوارد من ثنائيات أقطاب منعزلة في مواقع واتجاهات متعددة. وبهدف تحسين الدقة استخدم هنسين وميازাকা (Hansen and Miyazaka, 1984) طبقة مستمرة مقربة إلى مجموعة متوازي مستطيلات بقيم ثابتة، متمركزة على عقد شبكة القياس. قام إيفان (Ivan, 1994) بصياغة معادلة جديدة للتتابع نحو الأعلى، باستخدام طبقة من ثنائيات الأقطاب واقعة على السطح الطبوغرافي المقرب إلى متعدد الوجوه المثلثانية (الشكل 5-72). تتوجه ثنائيات الأقطاب بشكل معامد للسطوح، ويتم القياس في رؤوس متعدد الوجوه المثلثانية.



الشكل (5-72): شكل متعدد الوجوه المثلثانية، حيث S هي نقطة القياس و T_1 , T_2 , T_3 ثلاث محطات مجاورة.

(حسب إيفان 1994, Ivan)

وقد طبق إيفان المعادلة على طبقة سطحية ثنائية الاستقطاب وسطحها العلوي متعرج، كما يظهر في الشكل (5-73)، الذي يمثل خريطة طبوغرافية لسطح الأرض حيث الارتفاع الأعظمي لسطح الأرض هو 6 وحدات مسافة شبكية في الجزء المركزي من الخريطة، و 7 وحدات مسافة شبكية على حواف الخريطة. الجسم المغنطيسي هو كرة مطمورة على عمق 10 وحدات مسافة شبكية من السطح المرجع (أي السطح الذي ارتفاعه صفر وحدة مسافة شبكية)، ويقع مركزه السطحي تحت إشارة التصلب (+) في شكل (5-73)، وعزمه المغنطيسي 0.4 nT، وواقع في حقل مغنطيسي يتجه نحو الشمال، ويميل بزاوية 60 درجة. تم الحساب على شبكة مربعة مؤلفة من 32 عموداً، و 32 سطرأ.



الشكل (5-73): خريطة طبوغرافية لسطح الأرض. تعطي الأرقام ارتفاع السطح بدلالة وحدة المسافة الشبكية فوق السطح المرجع. يحدد التصلب (+) المركز السطحي للجسم المغنطيسي.
(حسب إيفان 1994 , Ivan)

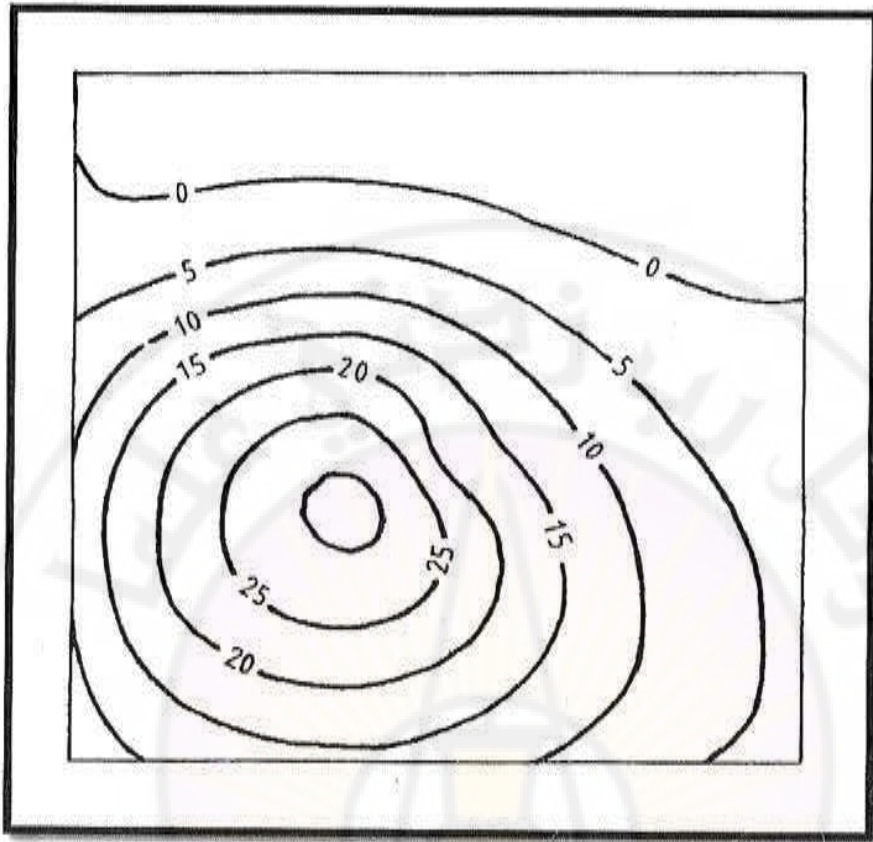


الشكل (5-74): الخريطة المغنطيسية المقاسة على السطح الطبوغرافي الظاهر في شكل (5-20). تعطي الأرقام شدة المغنطيسية بالنانوتسلا. قيم خطوط تساوي الشدة من مضاعفات الـ 25 نانوتسلا.

(حسب إيفان 1994 , Ivan)

نتراوح شدة المغنطيسية المحسوبة على السطح الطبوغرافي بين 37- نانوتسلا و 159 نانوتسلا (الشكل 5-74).

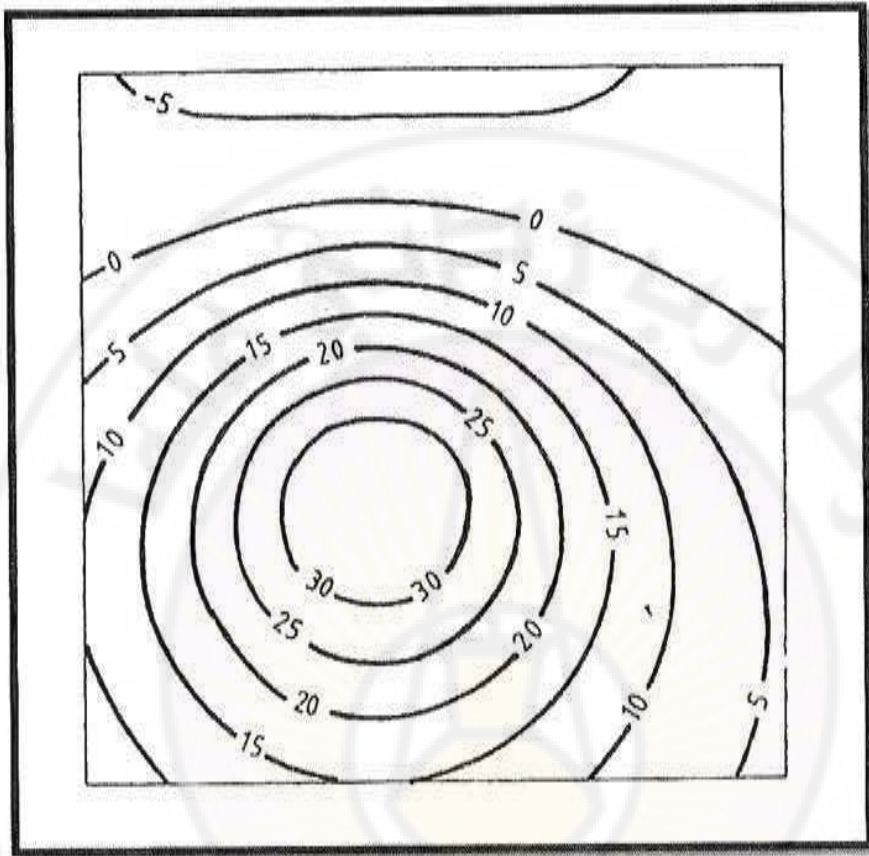
تم تطبيق معادلة إيفان للتتابع نحو الأعلى إلى ارتفاع 8 وحدات مسافة شبكية فوق السطح المرجع، فأعطت الخريطة الظاهرة في الشكل (5-75). وفيه تبدو خطوط تساوي الشدة المغنطيسية متناظرة، فيما لو أخذنا بالحسبان ميل الحقل المغنطيسي بـ 60° تحت الأفق.



الشكل (5-75): خريطة المغنطيسية بعد تطبيق التتابع نحو الأعلى إلى ارتفاع 8 وحدات مسافة شبكية فوق السطح المرجع. قيم خطوط تساوي الشدة من مضاعفات الـ 5 نانوتسلا.
(حسب إيفان 1994 , Ivan)

وللتأكد من صحة المعادلة التي وضعها إيفان، تم حساب الشدة المغنطيسية على ارتفاع 18 وحدة مسافة شبكية ورُسمت الخريطة كما في الشكل (5-76). يظهر من الخريطة التناظر المتوقع من جسم كروي، ويلاحظ التوافق الكبير (بفارق صغير بحدود 5 نانوتسلا) بين خريطة التتابع نحو الأعلى والخريطة المحسوبة لجسم واقع على بعد 18 وحدة مسافة شبكية. مما يؤكد صحة معادلة إيفان المقترحة، وأن خريطة التتابع نحو الأعلى تعطي خريطة أقل تعقيداً من

الخريطة المقاسة على السطح، لأنها تزيل تأثير الاجسام السطحية (في هذه الحالة هي الطبقة السطحية المغنطة).



الشكل (5-76): خريطة المغنطيسية المحسوبة على ارتفاع 8 وحدات مسافة شبكية من سطح الأرض، أو 18 وحدة مسافة شبكية من الجسم المغنطيسي. قيم خطوط تساوي الشدة من مضاعفات الـ 5 نانوتسلا.

(حسب ايفان 1994 , Ivan)



الفصل السادس
المغناطيسية الأثرية
التقيب المغناطيسي الأثري
المغناطيسية البيئية

Archaeomagnetism
Archaeomagnetic Prospecting
Environmental Magnetism

6-1- مقدمة:

تستخدم مقاييس المغنطيسية المحمولة للبحث عن الأجسام المدفونة، أو الغارقة، أو المخبأة. وقد تكون هذه الأجسام مغنطيسية، أو غير مغنطيسية، لكنها تقع في وسط متجانس المغنطيسية، وتشمل الأجسام الحديدية والفولاذية، والمعالم الأثرية مثل الأجر، أو الفخار، أو المدافن والأنابيب المعدنية والسفن الغارقة، كما استخدمت في كشف مكبات القمامة والمواد المطمورة، التي تلوث البيئة.

وسنعالج في هذا الفصل الاستخدامات المهمة التالية:

المغنطيسية الأثرية.

التنقيب المغنطيسي الأثري.

المغنطيسية البيئية.

يقتضي تطبيق هذه الاستخدامات توافر العوامل التالية:

1- أن تكون المسافة الفاصلة بين المقياس والجسم صغيرة، بحيث تحقق العلاقة:

$$H_T = \frac{M}{r^3} \quad (6-1)$$

حيث M العزم المغنطيسي للجسم.

r المسافة الفاصلة بين المقياس والجسم.

H_T قيمة شواذ الحقل المغنطيسي الكلي.

2- توافر تباين محسوس بالمتأثرية المغنطيسية بين الجسم والوسط المحيط. لذا يصعب

كشف جسم مغنطيسي مطمور بين صخور بركانية، أو في التربة ذات المتأثرية

المغنطيسية العالية الناتجة عن تلك الصخور، بينما يسهل الأمر عندما يوجد الجسم

بين صخور رسوبية ذات متأثرية مغنطيسية منخفضة.

6-2- المغنطيسية الأثرية:

المغنطيسية الأثرية هي المغنطيسية التي تشكلت خلال الزمن الأثري ويمتد من الزمن

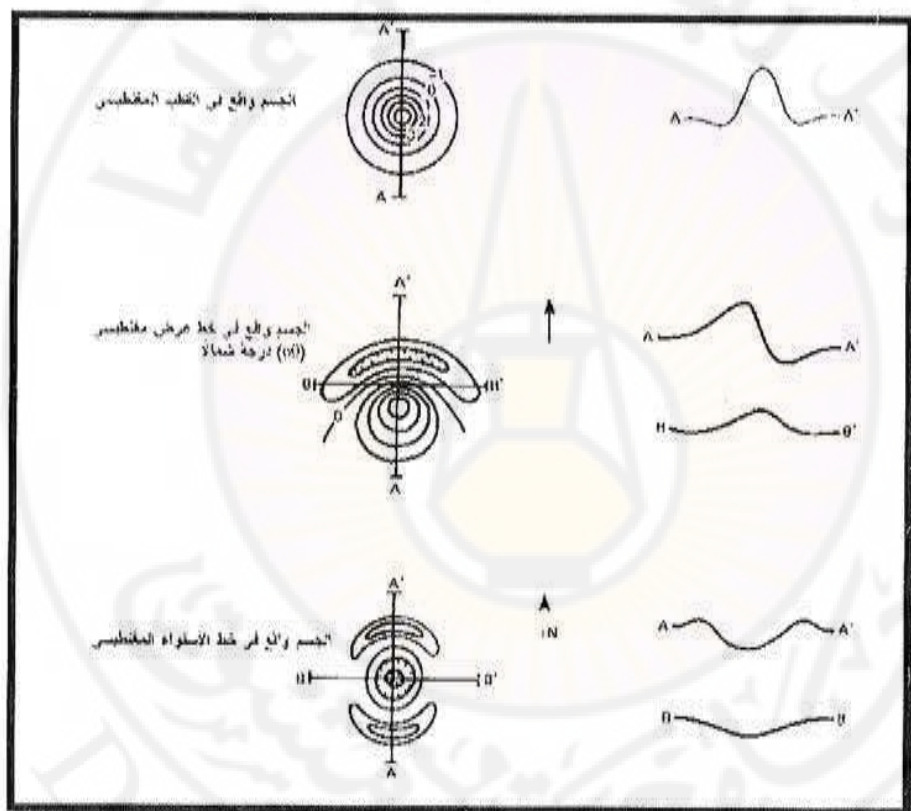
الحاضر، وحتى 10000 سنة مضت. لا تختلف هذه المغنطيسية عن المغنطيسية القديمة إلا

بالمدة الزمنية التي تمتد بالمغنطيسية القديمة إلى مليارات السنين. ويفرض هذا الاختلاف

الزمني بين هذين النوعين من المغنطيسية وقصر المدة في المغنطيسية الأثرية تحديد الزمن بدقة كبيرة لا تتجاوز عشرات السنين.

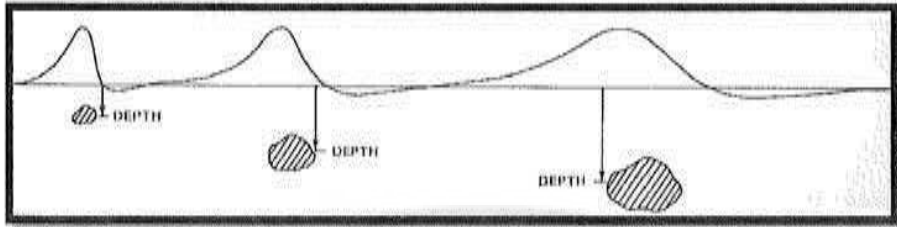
6-2-1- التأثير المغنطيسي للأجسام الأثرية المدفونة:

يشبه تأثير الجسم المغنطيسي الصغير التأثير الناتج عن ثنائي قطب. فيتغير منحنى الشواذ بتغير خط العرض (الشكل 6-1)، كما تتغير سعة الشواذ بتغير عمق الجسم (الشكل 6-2). ويؤدي وجود مغنطيسية متبقية مع المغنطيسية المتحرضة إلى تغير شكل منحنى الشواذ (الشكل 6-3).

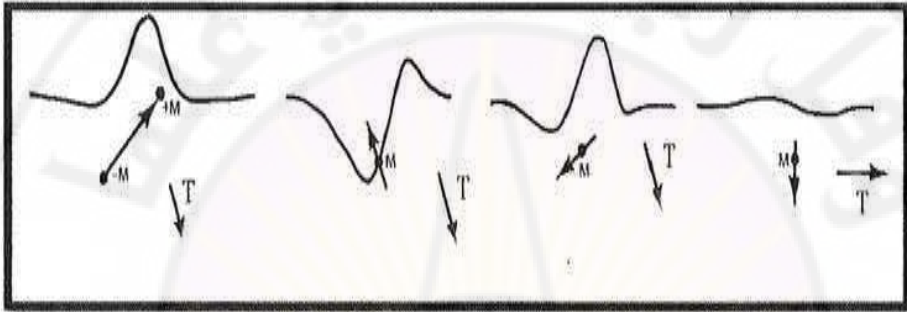


الشكل (6-1): منحنيات الشواذ المغنطيسية المتحرضة الناتجة عن ثنائي قطب واقع في خطوط عرض مختلفة.

(حسب بريئر 1973 Breiner)



الشكل (6-2): تغير سعة الشواذ المغناطيسية مع تغير عمق الجسم.
(حسب بريئر 1973 Breiner)



الشكل (6-3): المنحنيات المغناطيسية الناتجة عن مغناطيسية متحيزة في حقل شدته (T) ومغناطيسية (M) متبقية، واقع في خطوط عرض مغناطيسية متغيرة.
(حسب بريئر 1973 Breiner)

6-2-2- المواد الأثرية:

تتشكل المغناطيسية الأثرية في المواد الأثرية بطرائق مختلفة، وقد تكون حرارية، أو ترسيبية، أو كيميائية، كما يلي:

6-2-2-1- المغناطيسية الأثرية الحرارية:

أ- تكتسب الصخور البركانية التي تصلبت خلال الزمن الأثري مغناطيسية حرارية في أثناء تبردها.

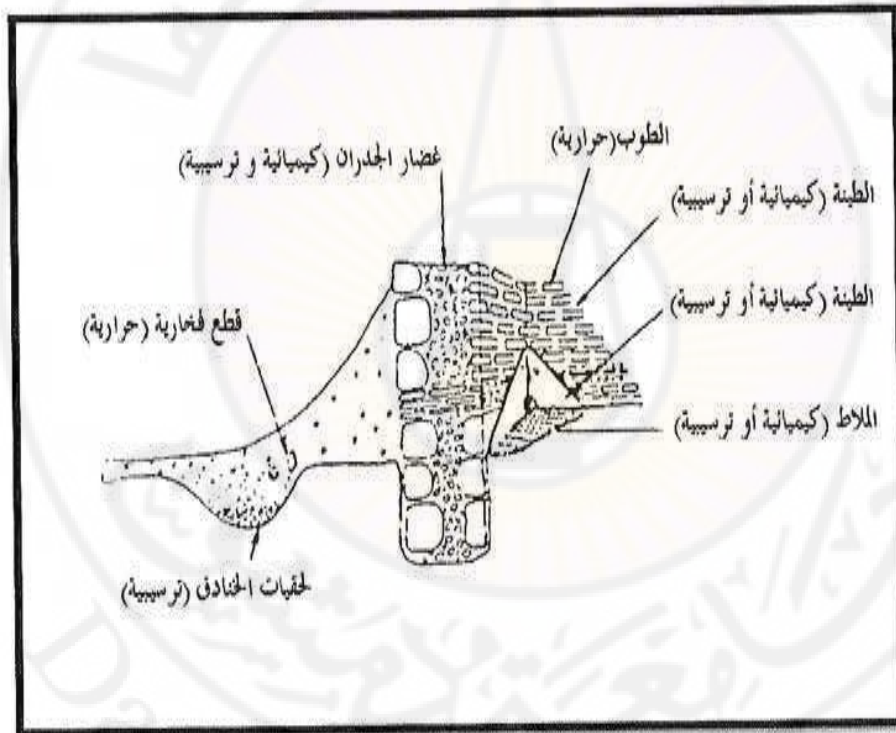
ب- تكتسب المواد الأثرية الحاوية على 1% من المواد المغناطيسية، فيما لو تعرضت للتسخين، اتجاه الحقل المغناطيسي الأرضي المسيطر في أثناء تبردها.

ث- تكتسب الخضاريات المشوية، مثل البلاط والقرميد والقطع الفخارية ومواقع الحرق، مثل الأتون والتتور والفرن على مغنطيسية حرارية (الشكل 4-6).

ث- كما تكتسب مواد مسخنة أخرى، مثل النقود ومعادن الصب وطبقات الرماد وأكوام الخبث مغنطيسية حرارية (الشكل 5-6).

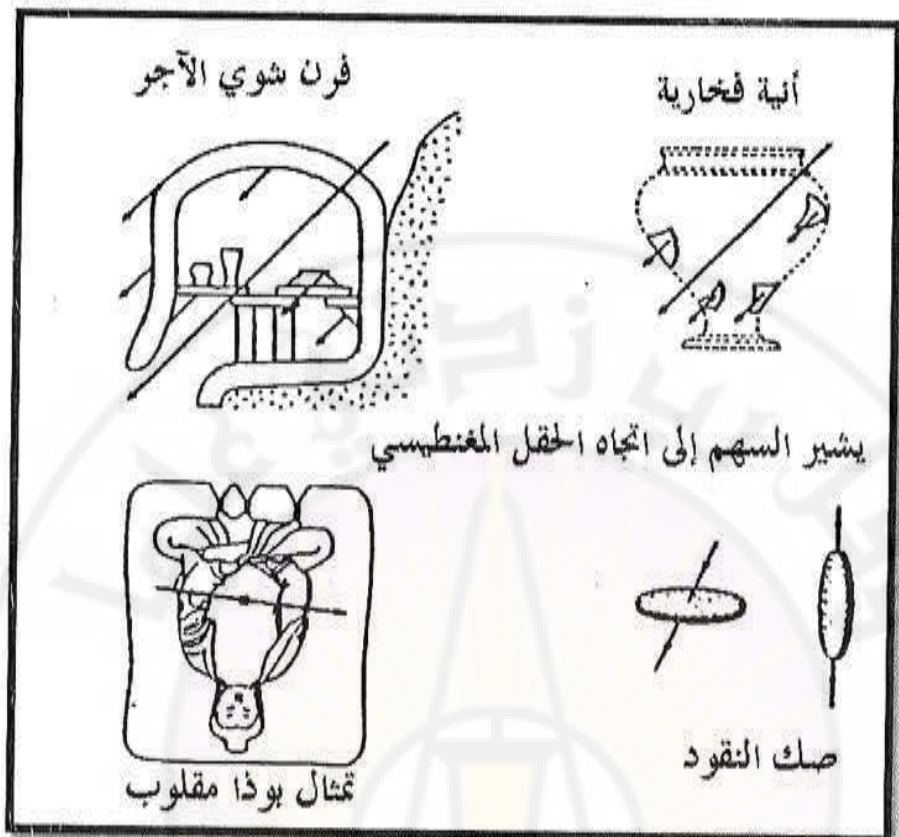
ج- يتم الحصول على أفضل النتائج من المواد التي تحتوي على ذرات حديدية، أو أكاسيد حديدية صغيرة جداً، لأن الذرات الكبيرة أقل ثباتاً من الناحية المغنطيسية، وبالتالي تفقد مغنطيسيتها مع الزمن.

ح- يمكن أيضاً استخدام المواد التي سخنت إلى أقل من درجة حرارة كوري، لأن ذلك سيكسب المادة مركبة مغنطيسية إضافية، يمكن عزلها، وقد تكون أهم من المركبة الأولية.



الشكل (4-6): أمثلة على المغنطيسية الأثرية في بقايا مستوطنة بشرية.

(حسب تارلينغ 1991 (Tarling)



الشكل (5-6): أمثلة على المغنطيسية الأثرية الحرارية.
(حسب تارلينغ 1990 (Tarling, 1990))

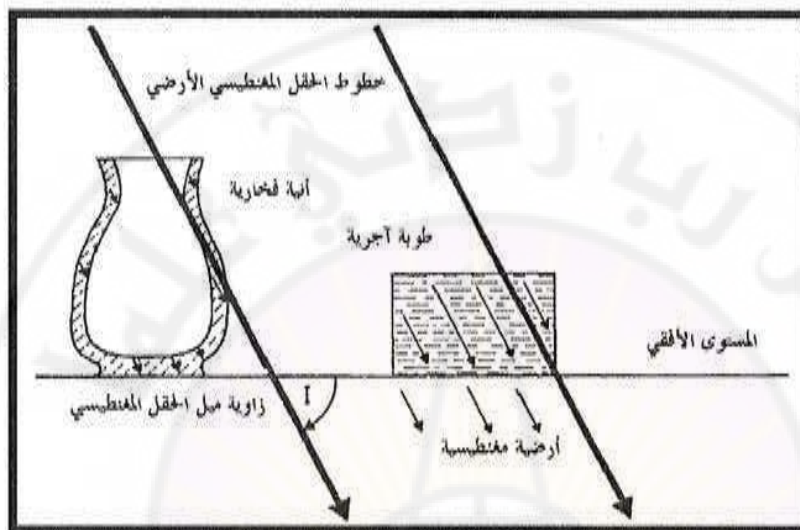
6-2-2-2- المغنطيسية الأثرية الترسيبية:

تشمل هذه المغنطيسية المواد الواردة فيما يلي:

- أ- المواد المترسبة في الزمن الأثري التي يمكن أن تكتسب مغنطيسية الحقل المغنطيسي المسيطر في أثناء ترسب هذه المواد أو بعدها مباشرة: مثل رسوبيات الحفر والخنادق والكهوف والبرك والملاط والطين المستخدم في البناء (الشكل 4-6).
- ب- المواد المصنعة، كالقرميد المجفف بحرارة الشمس (الشكل 6-6) التي يمكن أن تكتسب مغنطيسية الحقل المغنطيسي المسيطر.

ت- الرسوبيات البحرية الناعمة التي تستخرج بطرائق خاصة، وتقاس مغنطيسيتها (الشكل 12-6) بأجهزة خاصة أيضاً.

ث- وكذلك الرسوبيات الجليدية الناعمة التي اكتسبت مغنطيسيتها أثناء توضعها في مواقع ذوبان الجليدية.



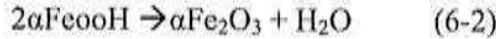
الشكل (6-6): أمثلة على المغنطيسية الأثرية الترسيبية المتشكلة في المواد المجمدة بحرارة الشمس.
(حسب سوفيل 1991, Soffel)

ولقد ساد الاعتقاد سابقاً أن المغنطيسية المكتسبة بهذه الطريقة هي كيميائية، لكن الاعتقاد الحالي يميل إلى قبول أن وجود الماء في الطين يساعد الذرات المغنطيسية على الدوران باتجاه الحقل المغنطيسي المسيطر، وينطبق هذا على الملاط الغضاري، الذي يوضع ضمن الجدران، وكذلك الطين الذي تطلّى به الجدران (الشكل 4-6).

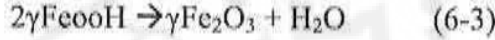
6-2-2-3- المغنطيسية الأثرية الكيميائية:

إن أي تغير كيميائي يطرأ على المواد الأثرية وينتج عنه، كما في الظروف الجيولوجية الأخرى، نموّ لمواد مغنطيسية جديدة يطلق عليها اسم مغنطيسية أثرية كيميائية (الشكل 4-6)، مثل التحولات التي يخضع لها هيدروكسيد الحديد ويتحول إلى أكاسيد حديدية وفق ما يلي:

يتحول الغونيت (goethite) إلى هيماتيت (haematite) وفق المعادلة:



يتحول الليبدوغروسيت (lepidocrocite) إلى ماغيميت (maghemite) وفق المعادلة:



يتم ذلك لأن النمو البلوري بدرجة حرارة ثابتة مماثل لتشكل المغناطيسية الحرارية. عندما تكون الذرات صغيرة جداً تتصرف البلورات الناتجة كأنها مادة مغناطيسية طردية فائقة (superparamagnetic)، وعندما تكبر الذرات، وبالتحديد عند الحجم الحرج، أو حجم الحجز (blocking volume) تتصرف البلورات كأنها مادة مغناطيسية عادية، وعندما يزداد الحجم تتغير المغناطيسية بشكل غير متوقع.

ففي الهيماتيت يكون حجم الحجز في درجة الحرارة العادية $0.003\mu\text{m}$ ، وفي التيتانومغنيتيت يكون $0.015\mu\text{m}$ ، وفي التيتانوماغيميت يكون $0.04\mu\text{m}$ ، وعندما يصبح الحجم بحدود $1\mu\text{m}$ تفقد المواد مغناطيسيتها.

6-3- التتقيب المغناطيسي الآثاري:

6-3-1- المسح المغناطيسي الآثاري:

يقتضي التتقيب المغناطيسي الآثاري وضع خطة للمسح الحقلية بناء على مساحة المنطقة المدروسة والأجسام المتوقعة كشفها وأعماقها المحتملة، وتحدد المسافة الشبكية المعتمدة في المسح بدقة بناء على المعطيات الحقلية المتوفرة وعلى حساسية المقياس المستخدم وشدة الشواذ المغناطيسية المتوقعة، إذ يجب أن تكون شدة الشواذ أكبر بعدة مرات من حساسية المقياس ومن مستوى التشويش المحيط، فلو كانت حساسية المقياس (0.25) نانوتسلا ومستوى التشويش الناتج عن التربة السطحية هو (0.5) نانوتسلا، فيجب أن تكون شدة الشواذ الناتجة عن الجسم المغناطيسي (1) نانوتسلا حتى يكون بالإمكان تسجيلها.

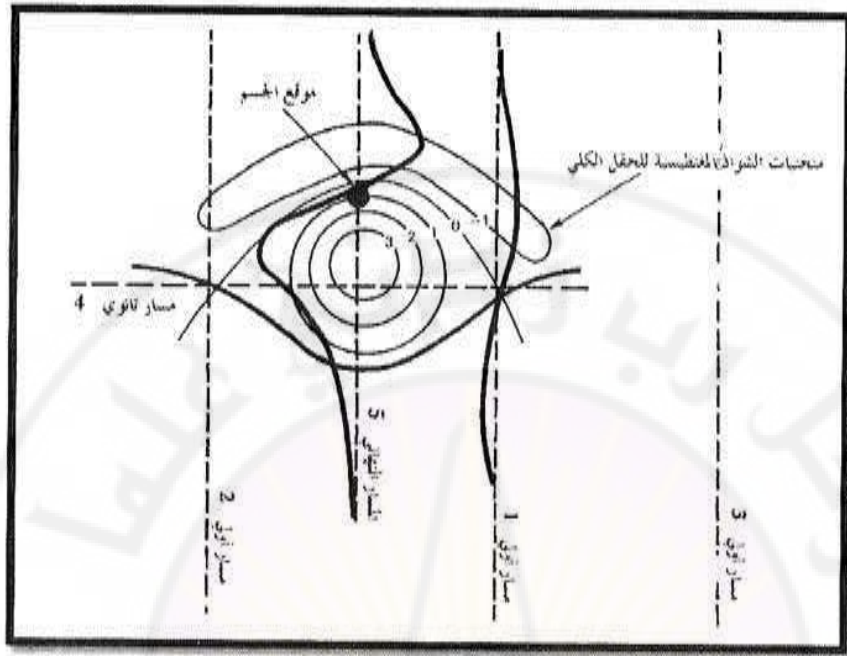
أما إذا ازداد عمق الجسم فمن الممكن الخلط بين تأثير الجسم وبين تأثير الخلفية المغناطيسية الناتجة عن الصخور العميقة. فإذا كان الجسم المغناطيسي على عمق (1) متراً وعرض الشواذ على سطح الأرض بحدود (1-3) متراً، فيجب أن تكون شدة مغناطيسيته (2-3) نانوتسلا. أما إذا كان عمق الجسم (10) أمتار فمن الممكن أن يكون عرض الشواذ على سطح الأرض بحدود (15-30) متراً، ويجب أن تكون شدة مغناطيسيته بحدود (10) نانوتسلا.

ولقد اتبعت عدة مخططات لتوزيع مسارات الاستكشاف، لكن يفضل استخدام شبكة مربعة ثابتة الأبعاد، بحيث تتجه المسارات باتجاه شمال-جنوب، لكن في حالة البحث عن جسم مغناطيسي طويل (مثلاً: أنبوب أفقي طويل)، فيجب المسح على مسارات عمودية على الاتجاه المحتمل للأنبوب.

ويجب حمل حساس المقياس على ارتفاع بحدود (1) متر من سطح الأرض، لكن عندما يرتفع مستوى التشويش المغناطيسي الناتج عن التربة السطحية، أو يتجاوز عمق الجسم عدة أمتار، فيجب أن يحمل الحساس على ارتفاع مترين من سطح الأرض، مما يؤدي إلى انخفاض مستوى التشويش إلى $1/20$ أو $1/30$ من قيمته على السطح، بينما تنخفض سعة الشواذ إلى الثلث فقط.

وفي حال المسح المغناطيسي بحثاً عن أجسام صغيرة وفق مسارات تتجه شمالاً-جنوباً (1 و 2 و 3) (الشكل 6-7)، وتسجيل شواذ مغناطيسية على مسار أولي (مسار 1) ونظراً لاحتمال عدم وقوع الجسم المطمور مباشرة تحت أحد المسارات الأولية يتم المسح وفق ما يلي:

يتم القياس على مسار ثانوي (مسار 4) متعامد مع المسار الأولي (مسار 1)، الذي تم تسجيل الشواذ عليه، ويقطعه في نقطة الانعطاف (A)، غالباً ما تكون سعة الشواذ على المسار الثانوي (4) أعلى من سعة الشواذ على المسارات الأولية (1 و 2 و 3)، مما يدل على الاقتراب من موقع الجسم المطمور. بعدها يتم التسجيل على مسار مواز للمسارات الأولية (مسار 5) ويمر من القيمة العظمى لمنحني الشواذ المغناطيسية المسجل على المسار الثانوي (مسار 4)، ثم يرسم منحني الشواذ النهائي على هذا المسار، وتحدد نقطة الانعطاف على منحني الشواذ النهائي (نقطة B) المركز السطحي لموقع الجسم.



الشكل (6-7): تتابع تحديد المسارات لتحديد موقع الجسم المظلمور.
(حسب بريئر 1973 , Breiner)

يهدف المسح المغناطيسي إلى تحديد عمق الجسم وحجمه، ولهذا تتم دراسة بعض الحالات الخاصة:

أ- الأجسام الحديدية والفولاذية:

تستخدم العلاقة التالية لحساب قيمة الشواذ العظمى $H_{T,max}$ الناتجة عن أجسام صناعية، عزمها المغناطيسي M يتراوح بين $10^5 - 10^6$ cgs unit بالطن الواحد.

$$H_{T,max} = \frac{M}{r^3} \quad (6-4)$$

حيث $H_{T,max}$ مقاسة بالغاوص.
 r بعد الجسم بالسنتيمتر.

غالباً ما تحتوي المواد الحديدية والفولاذية على مركبة مغناطيسية متبقية ومركبة متحرضة، وما يقيسه المقياس هو محصلة هاتين المركبتين. قد تبلغ شدة المركبة المتبقية في بعض أنواع الفولاذ القاسي عشرة أضعاف المركبة المتحرضة، لكن نظراً لصعوبة تحديد اتجاه المركبة المتبقية وشدتها في الجسم المطمور، تؤخذ الشدة المقاسة على أنها شدة المركبة المتحرضة. يعطي الجدول (1-6) الشواذ المغناطيسية الناتجة عن أجسام حديدية وفولاذية مختلفة.

الجدول (1-6): شدة الشواذ المغناطيسية الناتجة عن أجسام حديدية وفولاذية مختلفة.
(حسب برينر 1973 Breiner)

الشدة الناتجة عن أجسام بعيدة		الشدة الناتجة عن أجسام قريبة		الجسم المغناطيسي
البعد/ الشدة/ نانوتسلا	البعد/ الشدة/ نانوتسلا	البعد/ الشدة/ نانوتسلا	البعد/ الشدة/ نانوتسلا	
33	1	40	10	سيارة (وزنها 1 طن)
330	0.7 - 0.3	700 - 300	33	سفينة (وزنها 1000 طن)
17	2 - 0.5	30 - 10	7	طائرة خفيفة
3	10 - 5	100 - 50	1.5	مبرد (طوله 20 سم)
3	1 - 0.5	10 - 5	1.5	مفك براغي (طوله 12 سم)
3	2 - 1	20 - 10	1.5	مسدس
3	10 - 2	50 - 10	1.5	بندقية
8	2 - 1	15	3	سياج حديدي
17	50 - 12	200 - 50	8	أنبوب قطره 30 سم
330	50 - 1	200 - 5	170	قطار كهربائي
170	5 - 2	500 - 200	17	أنبوب إكساء بئر

ب- الأنابيب المغنطيسية الأفقية:

تحمل معظم الأنابيب مغنطيسية مثبتة عالية جداً، وتختلف هذه المغنطيسية من قطعة إلى أخرى من قطع الأنبوب لاختلاف التاريخ الحراري والميكانيكي للقطع، كما تظهر الصمامات المرتبطة بهذه الأنابيب شواذ مختلفة عن الأنابيب المجاورة. يعتبر الأنبوب خطأً من ثنائيات الأقطاب الموزعة على أعلى الأنبوب وأسفله، وتعطى شدة الشواذ العظمى بالعلاقة التقريبية التالية:

$$H_{T,max} = \frac{M}{r^2} = \frac{k.T.A}{r^2} = \frac{kT.\pi Dt}{r^2} \quad (6-5)$$

حيث: r المسافة بين محور الأنبوب والمقياس.

A مساحة المقطع الوسطي للأنبوب.

D قطر الأنبوب.

t سماكة جدار الأنبوب.

T شدة الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي.

أما بالنسبة للقضبان أو (الكابلات) الفولاذية، أو الحديدية، فتعطى شدة الشواذ العظمى بالعلاقة التقريبية التالية:

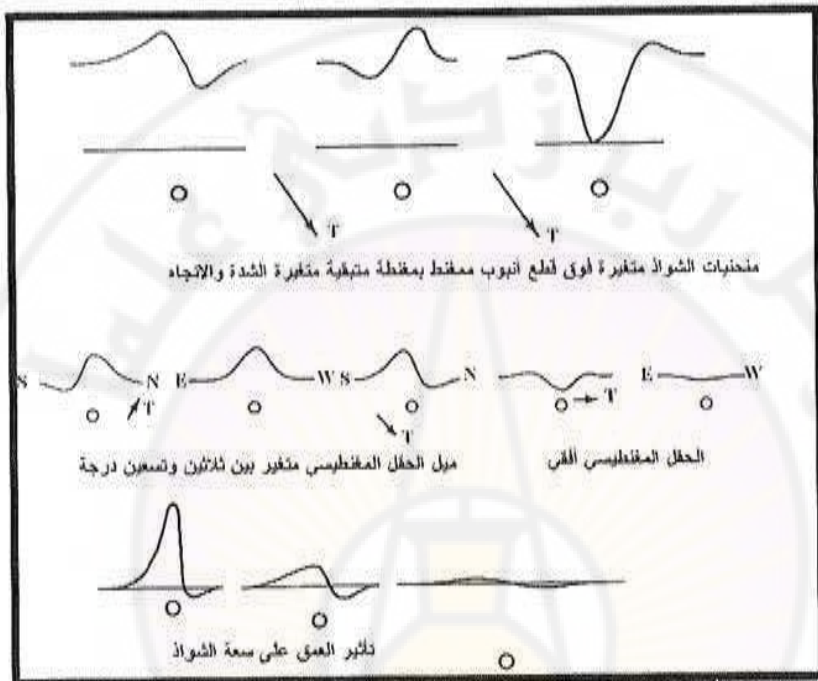
$$H_{T,max} = \frac{k.T.A}{r^2} = \frac{k.T.\pi R^2}{r^2} \quad (6-6)$$

حيث R نصف قطر القضيب.

يعطي الشكل (6-8) منحنيات الشواذ المغنطيسية فوق أنابيب في أوضاع مختلفة، وميول مختلفة للحقل المغنطيسي الأرضي.

إن اكتشاف الأنابيب سهل جداً، ويزداد الأمر سهولة إذا كان بالإمكان إمرار تيار كهربائي مستمر عالي الشدة في الأنبوب، إذ يؤدي ذلك إلى ازدياد شدة الحقل المغنطيسي حول الأنبوب. تستخدم هذه الطريقة عند محاولة التعرف على مكان أنبوب معدني موجود مع مجموعة من الأنابيب، لذا يمرر التيار الكهربائي المستمر باتجاه ونقاس الشدة المغنطيسية

فوقه، ثم يمرر التيار الكهربائي بالاتجاه الآخر ونقاس الشدة المغناطيسية مرة أخرى. وتحدد الشواذ المغناطيسية بأخذ الفرق بين القياسين، ويزداد الفرق كلما اقترب الأنبوب من المقياس. (يؤدي مرور تيار كهربائي شدته 1 أمبير إلى شواذ مغناطيسية مقدارها 10 نانوتسلا على بعد 20 متراً).



الشكل (6-8): منحنيات الشواذ المغناطيسية الناتجة عن الأخابيب.
(حسب بريئر 197 Breiner)

6-3-2- Archaeological Applications

نظراً لأن كل المواد الأثرية تحتوي على ذرات مغناطيسية كشوائب، فتكتسب خواص مغناطيسية، يمكن استخدامها بعدد من الطرائق. ونظراً لتغير شدة الحقل المغناطيسي الأرضي واتجاهه مع الزمن، يمكن تحديد زمن اكتساب مغناطيسية الأجسام الأثرية، بمقارنة مغناطيسية هذه الأجسام مع السجلات المغناطيسية المنجزة للمنطقة المدروسة، أي تاريخ هذه الأجسام.

يمكن تطبيق التاريخ المغنطيسي على عينات غير موجهة، باستخدام "منحنى شدة المغنطيسية" أو على عينات موجهة باستخدام "منحنى شدة المغنطيسية" و "منحنى اتجاه المغنطيسية". ويمكن أيضاً تأريخ الأجسام الأثرية بالنسبة لبعضها بعضاً في حال عدم توفر سجلات مغنطيسية للمنطقة المدروسة، فلو تشابهت المركبات المغنطيسية المقاسة للأجسام تكون من عمر واحد والعكس صحيح.

6-3-2-1- التاريخ المغنطيسي:

حسبت التغيرات القرونية للشدة والاتجاه من تسجيلات المراصد المغنطيسية، فتبين أنها تساوي في لندن وباريس بحدود $0.25''/\text{yr}$ بالاتجاه، و $0.05\%/\text{yr}$ بالشدة، خلال الـ 150 سنة الماضية (الشكال 6-9، 6-10، 6-11، 6-12). فلو اعتبرت هذه التغيرات نموذجية يمكن استخدامها في التأريخ حتى سنة 1600 ميلادية. ولقد مددت تسجيلات المراصد، باستخدام عينات مؤرخة بوسائل أخرى حتى 5000 سنة قبل الميلاد (الشكل 6-14). يظهر الشكل (6-10) منحنيات تغير الشدة المغنطيسية من عام 2000 قبل الميلاد إلى عام 450 بعد الميلاد لمواقع في جنوب-شرق أوروبا.

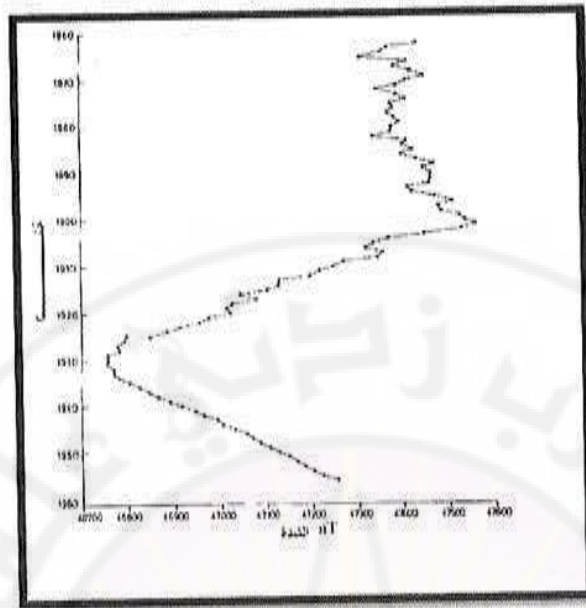
1- التأريخ بالشدة:

تستخدم الشدة للتأريخ عند وجود عينات غير موجهة، وهي كثيرة في المواقع الأثرية، نظراً لكثرة وجود الغضار المحروقة، وقد تعطي دقة في تحديد العمر بحدود $\pm 20-50$ سنة. لتحديد شدة الحقل المغنطيسي القديم (F_{anc}) الذي اكتسبت عينة مغنطيسيتها فيه، تقاس شدة المغنطيسية الأثرية (M_{anc})، ثم يطبق في المخبر حقل مغنطيسي على العينة شدته (F_{lab})، وتقاس بعدها شدة المغنطيسية المكتسبة في المخبر (M_{lab}). وتطبق العلاقة التالية:

$$\frac{M_{anc}}{M_{lab}} = \frac{F_{anc}}{F_{lab}} \quad (6-7)$$

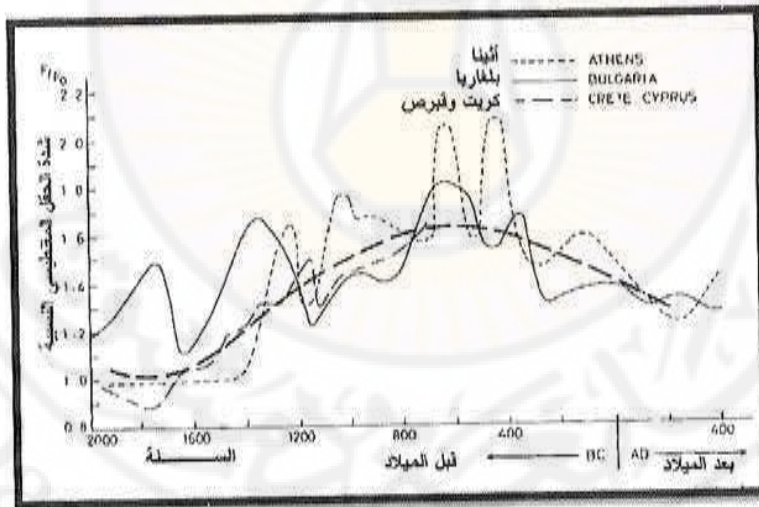
ومنه

$$F_{anc} = F_{lab} \times \frac{M_{anc}}{M_{lab}} \quad (6-8)$$



الشكل (6-9): التغيرات القارية، في لندن وباريس من عام 1850 إلى عام 1950، لشدة المغنطيسية بعد دمج القيم المسجلة.

(حسب تارلينغ 1983, Tarling)



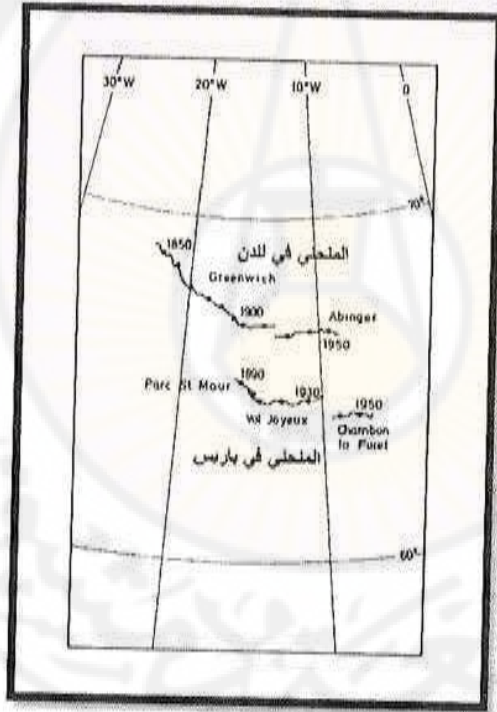
الشكل (6-10): تغيرات شدة المغنطيسية من عام 2000 قبل الميلاد إلى عام 450 بعد الميلاد في جنوب-شرق أوروبا.

(حسب تارلينغ 1990, Tarling)

2- التاريخ بالاتجاه:

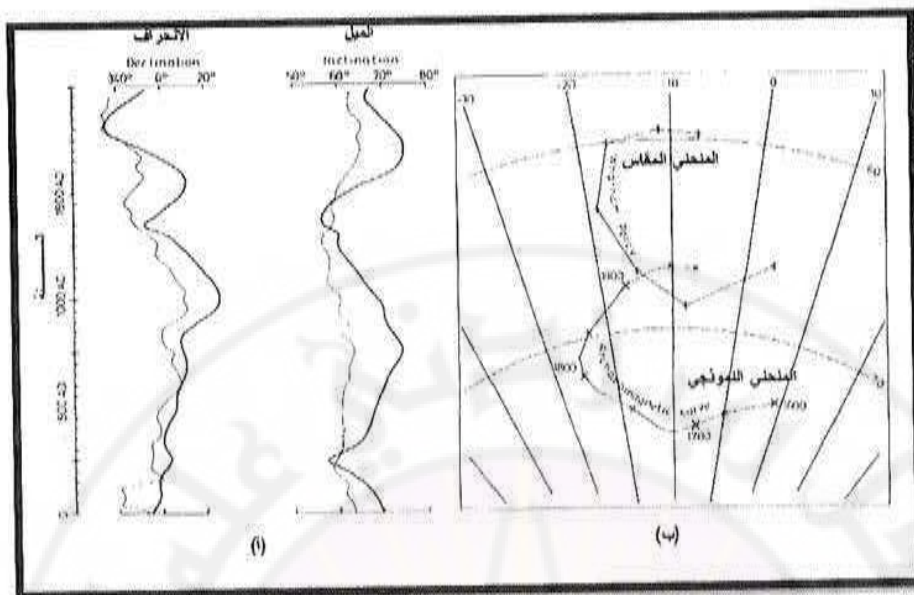
يشمل الاتجاه انحراف الحقل المغنطيسي، أو ميله (الشكلين 6-12- آ و ب)، أو كلاهما معاً (الشكل 6-10)، ويجب توفر منحنيات نموذجية للاتجاه خاصة بالمنطقة المدروسة، ويستخدم في التاريخ عند وجود عينات موجهة قبل اقتلاعها من الحقل (الشكل 6-13). ويجب أن تكون العينة ثابتة في مكانها والتأكد من أنها لم تنقل من مكانها الأصلي. أما إذا كانت قد نقلت وعُرف مكانها جزئياً (مثل صنع أنية فخارية كانت قاعدتها بوضع أفقي) يمكن قياس ميل المغنطيسية فيها فقط دون الانحراف.

قد يعطي هذا التاريخ دقة في تحديد العمر بحدود 5-20 سنة، لكن نظراً لتكرار الاتجاه في أثناء التاريخ الأثري، فقد تنسب العينة إلى أكثر من عمر لذا يفضل استخدام الاتجاه والشدة في التاريخ.



الشكل (6-11): التغيرات القرنية، في لندن وباريس من عام 1850 إلى عام 1950، للانحراف والميل المغنطيسيين.

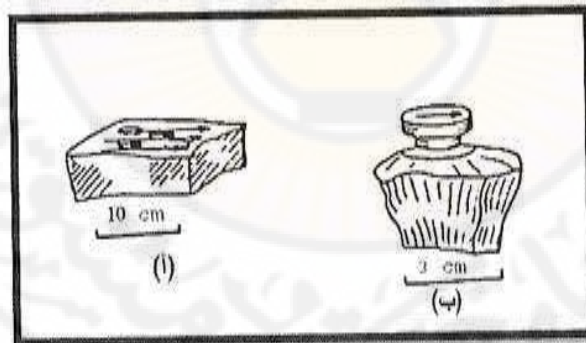
(حسب تارلينغ 1983 Tarling)



الشكل (6-12): منحنيات المغنطيسية الأثرية للمواد المسخنة والرسوبيات.

- أ- مقارنة قياسات الرسوبيات البحرية (المنحني الرفيع) مع المنحنيات النموذجية لبريطانيا (المنحني السميك)،
 ب- مقارنة قياسات رسوبيات البرك (المنحني العلوي) مع المنحني النموذجي لبريطانيا (المنحني السفلي).

(حسب تارلينغ 1983, Tarling)

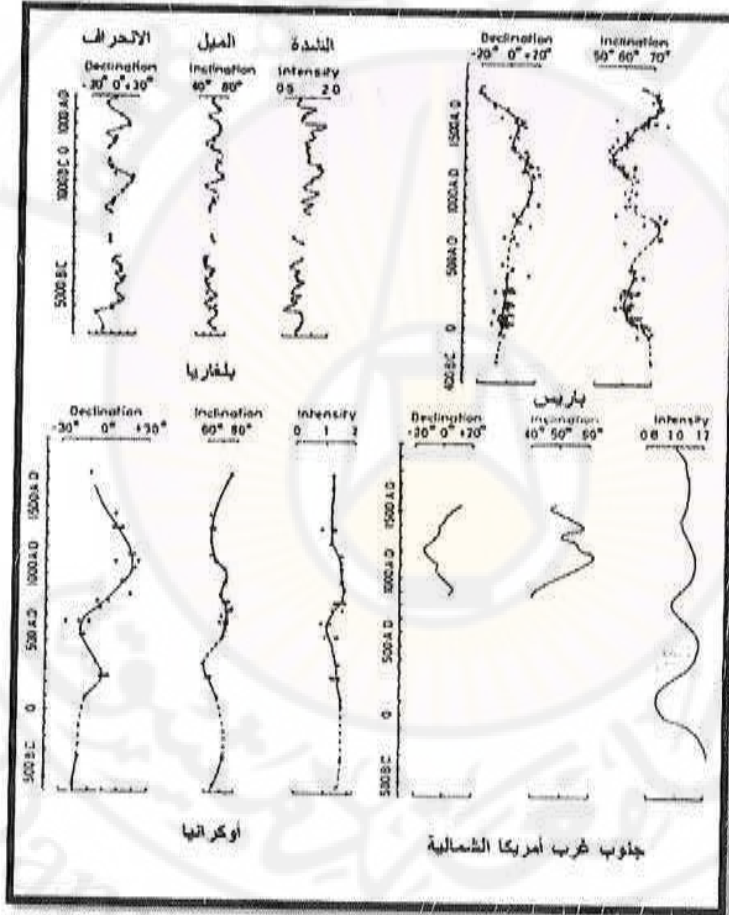


الشكل (6-13): طريقة أخذ العينات الموجهة (أ) - عينة كبيرة، (ب) - عينة صغيرة تلتصق على قرص بلاستيكي ويرسم عليه اتجاه الشمال، قبل فصل العينة عن الأرض.

(حسب تارلينغ 1991, Tarling)

3- المنحنيات النموذجية:

ونظراً لأن تسجيلات المراصد المغناطيسية تعود إلى عام 1600 ميلادية، فقد تطلب إنجاز المنحنيات النموذجية استخدام عينات جيدة التاريخ، وقد تم ذلك لبعض دول أوروبا وجنوب غرب الولايات المتحدة الأمريكية وأوكرانيا واليابان (الشكل 6-14). واستخدمت التسجيلات المغناطيسية للعينات الأسطوانية المطولة المأخوذة من الرسوبيات البحرية لتمديد المنحنيات النموذجية إلى حوالي 15000 سنة، كما استخدمت الرسوبيات الجليدية glacial varves.

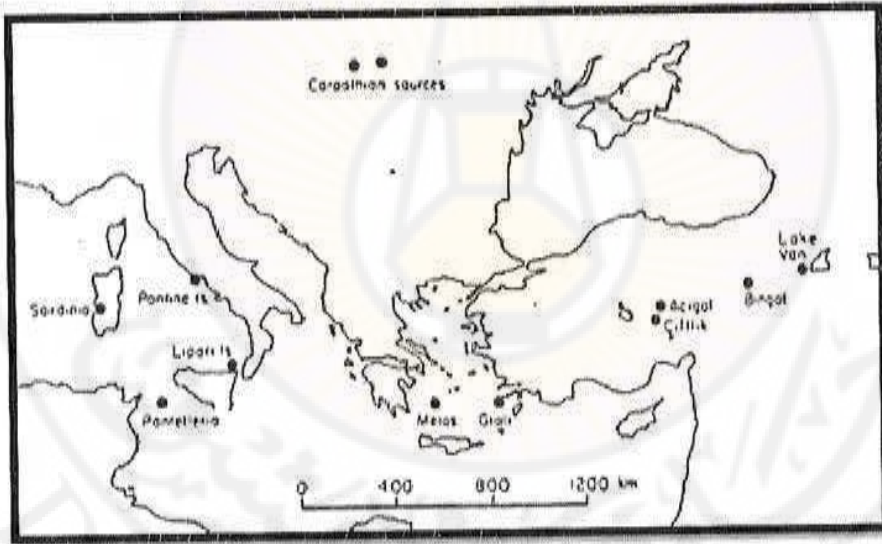


الشكل (6-14): المنحنيات النموذجية لتغير الانحراف والميل والشدة المغناطيسية لعدة مواقع في العالم.
(حسب تارلينغ 1983, Tarling)

6-3-2-2- تحديد مصدر المواد الأثرية:

يعتبر تحديد مصدر المواد الأثرية ذو أهمية خاصة في تعيين طرق التجارة القديمة، أو انتقال الإنسان القديم بين المناطق المختلفة. وتكمن أهمية طرائق المغنطيسية الأثرية في أنها سريعة، وغير مخربة للمواد، وقليلة التكاليف، وتطبق على حجوم صغيرة من المادة (عدة ميليمترات) (الشكل 6-13). لقد استُخدمت سابقاً طريقة صهر المعادن كهربائياً لتحديد الشوائب، وبالتالي مصدر المعادن مثل النقود، لكن هذا يقتضي تخريب جزء من المادة. كما أن تحليل العناصر غير دقيق جداً، ما عدا تحليل العناصر الأثر *trace elements*، التي تعتبر دقيقة، لكنها مكلفة وبطيئة ومخربة للمادة.

الابوسيديان (obsidian) هو زجاج بركاني ذو مكسر محاري، يوجد في حوالي 20 موقعاً (الشكل 6-15) في مناطق شمالي البحر الأبيض المتوسط، وقد استخدمه الإنسان القديم في صنع رؤوس السهام والسكاكين وغيرها. وقد وجدت الأدوات المصنوعة منه في كثير من المواقع الأثرية الأوروبية.

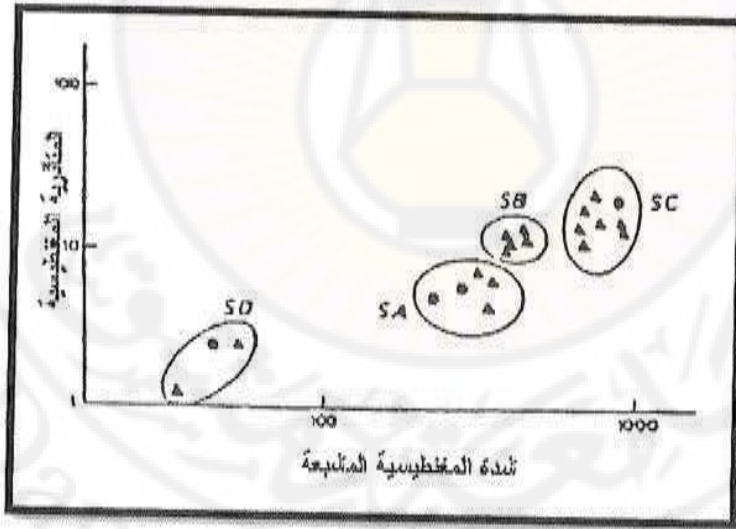


الشكل (6-15): مصادر الابوسيديان في أوروبا والشرق الأدنى.

(حسب مكدوجل 1983, McDougall et al.)

ونظراً لكون الأوبسيديان من الصخور الاندفاعية سريعة التبرد، فإنه يحتوي على شوائب مغناطيسية، مما يؤدي لاحتمال اختلاف الخواص المغناطيسية للصبات المختلفة منه (شكل 6-16)، لأن سلسلة التيتانومغنيتيت وسلسلة اليمينوهيماتيت لم تجدا الوقت الكافي للوصول إلى نهايتي السلسلة، مما يسمح باختلاف التركيب وحجم الحبيبات وتركيز هذه المركبات، وبالتالي اكتساب الأوبسيديان لمغناطيسية الحقل المغناطيسي الأرضي المسيطر. ولقد وجد بأنه يمكن أن تميز خواص أوبسيديان شرق البحر المتوسط وشماله بما يلي:

- أ- شدة المغناطيسية المتبقية الأصلية.
 - ب- المتأثرية المغناطيسية في درجات الحرارة العادية.
 - ت- المغناطيسية المكتسبة في حقل مغناطيسي مستمر شدته 350 ميلي تسلا.
 - ث- ثبات المغناطيسية المتبقية عند تعرضها لحقل مغناطيسي متناوب، أي عند إزالة المغناطيسية.
- يظهر الشكل (6-16) تمثيلاً لتغير شدة المغناطيسية المشبعة في المخبر مع تغير المتأثرية المغناطيسية لعينات من أوبسيديان جزيرة ساردينيا، ويبدو واضحاً تماثل الخواص للعينات المأخوذة من الموقع الواحد، واختلافها من موقع لآخر.



الشكل (6-16): تمثيل خواص الأوبسيديان لأربعة مواقع من ساردينيا، ويبدو واضحاً تماثل الخواص للعينات المأخوذة من موقع واحد.

(McDougall et al., 1983 حسب مكدوجل)

6-3-2-3- تاريخ الأبنية بناء على توجهها:

لقد بُنى العديد من الأبنية بتوجيهها نحو الشمال بواسطة البوصلة، لذا يؤخذ اتجاهها على أنه اتجاه الشمال المغنطيسي في أثناء بنائها، وبما أنه لم يعرف إلا سنة 1600 ميلادية أن البوصلة تغير اتجاهها مع الزمن، لذا يمكن معرفة التغير الذي حدث لاتجاه الحقل المغنطيسي منذ بناء هذه الأبنية. وقد طبقت هذه الطريقة بنجاح على الكنائس الرومانية في الدنمارك.

6-3-2-4- تحديد درجة حرارة الحرق:

نظراً لأن المغنطيسية المكتسبة بواسطة المواد المغنطيسية التالية: الجبوتيت αFeOOH ، أو المغنيتيت Fe_3O_4 ، أو الهيماتيت $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ، الموجودة في الرسوبيات التي تعرضت للحرق، يمكن أن تزول عند تعرض هذه الرسوبيات لدرجة حرارة أعلى قليلاً من درجة حرارة الحرق، فلو سخنت عينة من الرسوبيات التي تعرضت للحرق تدريجياً، وبردت بالمخبر بخطوات محددة في مجال لا مغنطيسي، تعتبر الدرجة التي تزول عندها المغنطيسية درجة حرارة الحرق أو الشوي التي تعرضت لها الرسوبيات. ولا يمكن طبعاً معرفة درجة الحرارة الأعلى من 675 درجة مئوية التي تعرضت لها الرسوبيات، لأنها درجة حرارة كوري للهيماتيت.

6-3-2-5- إعادة بناء الأبنية أو الأدوات:

يمكن تحديد مواقع الأجزاء بشكل نسبي أو مطلق.

- تحديد الموقع النسبي:

عند عدم معرفة الأمكنة الحقيقية لأجزاء إناء فخاري مكسور، يمكن تحديد اتجاه المغنطيسية في الأجزاء المختلفة وإعادة تركيب الإناء (الشكل 5-6). كذلك الحال بالنسبة لأجزاء فرن أو تنور مكسور، يمكن إعادته إلى وضعه السابق (الشكل 5-6).

ولوحظ أن النقود البرونزية الرومانية عندما توضع بوضع أفقي ورأس الإمبراطور نحو الأسفل، يكون اتجاه المغنطيسية فيها شاقولياً تقريباً مما يدل على أنها تبردت في

وضع أفقي (الشكل 5-6). أما النقود الفضية المصبوبة في نفس الزمن واتجاه مغنطيسيتها يكون في مستواها، فقد تبردت في وضع شاقولي (الشكل 5-6).

- تحديد الموقع المطلق:

إذا عُلِم اتجاه الحقل المغنطيسي الأرضي في مكان ما وزمان ما، يمكن معرفة الموقع الذي كانت فيه أداة تم تسخينها في ذلك الزمان والمكان، بإدارة الأداة لتأخذ اتجاه الحقل المعروف. (مثال تمثال بوذا الهندي الذي يبدو أنه قد صُنِب وهو في الوضع المقلوب) (الشكل 5-6).

6-3-2-7- كشف التزييف:

بمقارنة اتجاه المغنطيسية في الأشياء التي تم تسخينها مع اتجاه المغنطيسية في الزمن المزعوم (القديم)، يمكن معرفة ما إذا كانت هذه الأشياء حقيقية أو مزيفة، مثل النقود والقطع الفخارية.

1. تحديد المواقع الأثرية المطمورة:

تستخدم مقاييس المغنطيسية الحساسة جداً، مثل مقياس الضخ البصري، لتحديد المواقع الأثرية المطمورة، مثل المستوطنات والقبور والجدران وغيرها (الشكل 6-17)، إذ يتم التأكد من وجود الموقع الأثري قبل اللجوء إلى الحفر المكلف مادياً وزمناً، وقد يكون في المكان الخطأ.

كمثال على كيفية حساب شدة الشواذ الأعظمية الناتجة عن مكعب من الصخور يمثل تمثالاً مطموراً تطبق العلاقة التالية :

$$H_{T,max} = \frac{k.T.D^3}{r^3} \quad (6-9)$$

حيث k الثباين بالمتأثرية في واحدة الحجم .

T شدة الحقل المغنطيسي الأرضي بالنانوتسلا.

D طول ضلع المكعب بوحدة المسافة.

r المسافة بين المقياس ومركز المكعب مقاسة بوحدة المسافة.

نطبقاً لذلك نأخذ تمثالاً مكعبي الشكل من الصخور الاندفاعية، طول ضلعه 60 cm، ومتأثيرته المغنطيسية $k = 10^{-2}$ موجود في تربة متأثيرتها المغنطيسية $k = 10^{-4}$ ، وشدة الحقل المغنطيسي الأرضي 50000 nT، ويقع على عمق (150 cm)، وبما أن $k = 10^{-4}$ صغيرة جداً بالنسبة لـ $k = 10^{-2}$ نطبق العلاقة السابقة :

$$H_{T,max} = 10^{-2} \times 5 \times 10^4 \left(\frac{60}{150}\right)^3$$

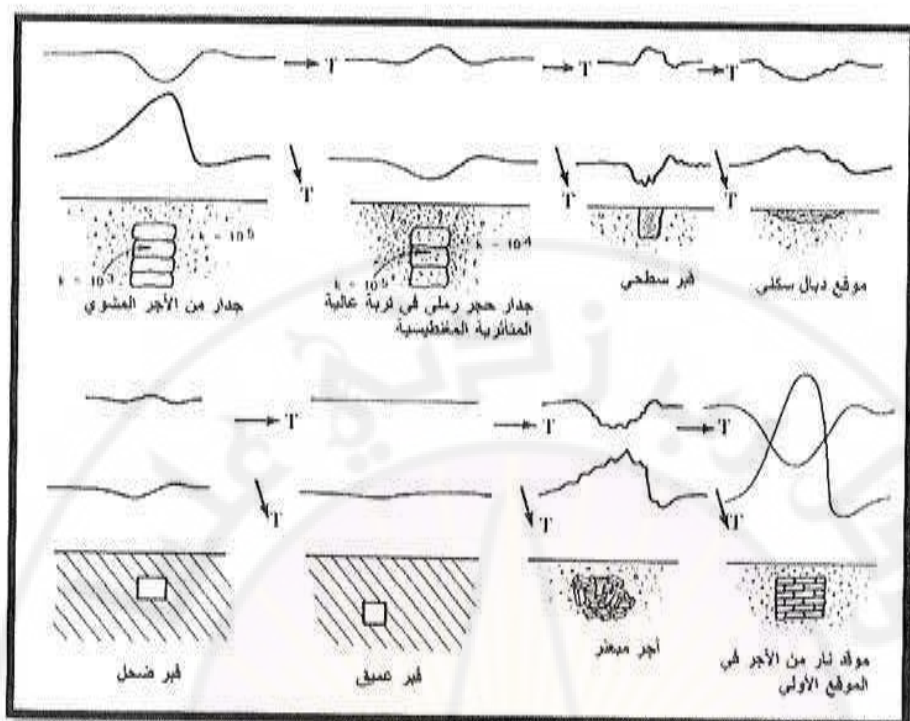
$$= 32 \text{ nT}$$

كمثال آخر نفرض وجود فجوة أو قبر له الأبعاد السابقة نفسها، وواقع بالتربة نفسها، أي أن لها متأثيرية سالبة $k = -10^{-4}$ ، تكون قيمة الشواذ الناتجة عن الفجوة:

$$H_{T,max} = -10^{-4} \times 5 \times 10^4 \times \left(\frac{60}{150}\right)^3$$

$$= -0.32 \text{ nT}$$

نلاحظ أن قيمة الشواذ الناتجة عن الفجوة سالبة، لأن الفجوة هي غياب المواد المغنطيسية، كما نلاحظ بأنه من الصعب كشف هذه الفجوة، خاصة في حال كون المسافة بين مركز الفجوة والمقياس أكبر من قطر الفجوة، لذا حتى يتم اكتشاف الفجوة يجب أن تكون مغنطيسية التربة المحيطة عالية جداً.



الشكل (6-17): المنحنيات النموذجية لبعض الأجسام الأثرية.
(حسب برينر 1973 , Breiner)

4-6- المغنطيسية البيئية:

4-6-1- مقدمة:

أدى التطور الصناعي الذي عم العالم إلى تأثيرات كبيرة على البيئة، فكثر النفايات الصناعية وتعددت في أشكالها وتركيبها وتأثيرها، مما دعا لقرع ناقوس الخطر على مستقبل الكرة الأرضية. وكثرت المؤتمرات والندوات وورش العمل، التي هدفت إلى تخفيف هذه التأثيرات. تركّز العمل على اكتشاف مواقع النفايات المسببة القديمة، وتخفيف أضرارها، وكذلك على المواقع الجديدة التي تحتاجها الصناعة لإلقاء نفاياتها بها، واعتمدت بعض الدول على إبعاد الخطر عن أراضيها بتهريب نفاياتها إلى دول أخرى، باستخدام وسائل الإغراء للأفراد، أو الحكومات.

سعى العلماء إلى إيجاد الطرائق التي يمكن استخدامها لاكتشاف مقالب النفايات القديمة، أو لدراسة المواقع الجديدة المقترحة لتكون مقالب للنفايات. وتركّز الموضوع على إيجاد أفضل السبل لتحقيق الهدف بأقل التكاليف. فكان التركيز على الطرائق الجيوفيزيائية السريعة، وقليلة الكلفة. وقد ساعد على نجاح العمل بهذه الطرائق عددها الكبير واستخدامها للخواص الفيزيائية المتعددة للمواد. وظهر علم جديد هو الجيوفيزياء البيئية، الذي رافقه تطوير للأجهزة وطرائق التفسير، التي اعتمدت بشكل أساسي على الحواسيب وبرمجياتها.

لذا تعددت الطرائق الجيوفيزيائية المطبقة، حسب الخاصة الفيزيائية المستخدمة ونقسياتها العريضة، كما يلي:

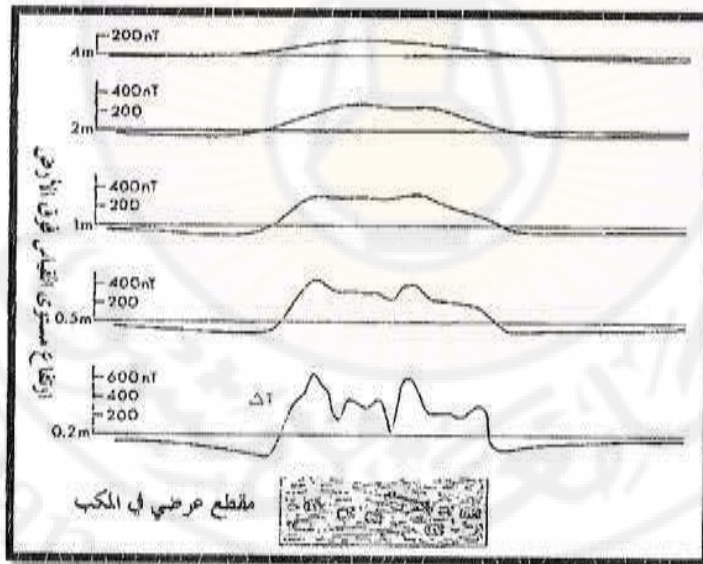
- | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1- الطرائق الكهربائية | 4- الطرائق المغنطيسية | 7- الطرائق الحرارية |
| 2- الطرائق الكهروطيسية | 5- الطرائق الإشعاعية | 8- الطرائق السيسمية |
| 3- طرائق الجاذبية | 6- الطرائق الكيميائية | 9- طرائق السبر البثري |

لم يكن من الضروري دوماً تصنيع أجهزة جديدة لاستخدامها في المسح البيئي، بل تطبيق طرائق مسح جديدة، لأن تأثير النطاق السطحي من الأرض، الذي كان التلخص منه في الدراسات التفقيبية أمراً ضرورياً، أصبح هو موضوع البحث. سنستعرض فيما يلي كيفية استخدام الطريقة المغنطيسية في هذا المجال:

6-4-2- استخدام الطريقة المغناطيسية:

تقوم الطرائق المغناطيسية على قياس شواذ الحقل المغناطيسي الأرضي الناتجة عن التباين في مغناطيسية الصخور، أو الانزلاقات الأرضية، أو مقالب النفايات، والتي تنتج من تباين كميات المواد المغناطيسية (مثل أكاسيد الحديد أو كبريتته). يختلف تأثير هذه المواد على الحقل المغناطيسي المقاس على سطح الأرض، حسب نسب وجودها، ونوعها، وتباين مائثرتها المغناطيسية عن صخور المنطقة، وكذلك حسب عمقها تحت سطح الأرض، إذ تتناقص شدة التأثير عكساً مع مكعب المسافة بين مكان وجود المواد والمقياس، وهي الخاصية الأكثر أهمية هنا.

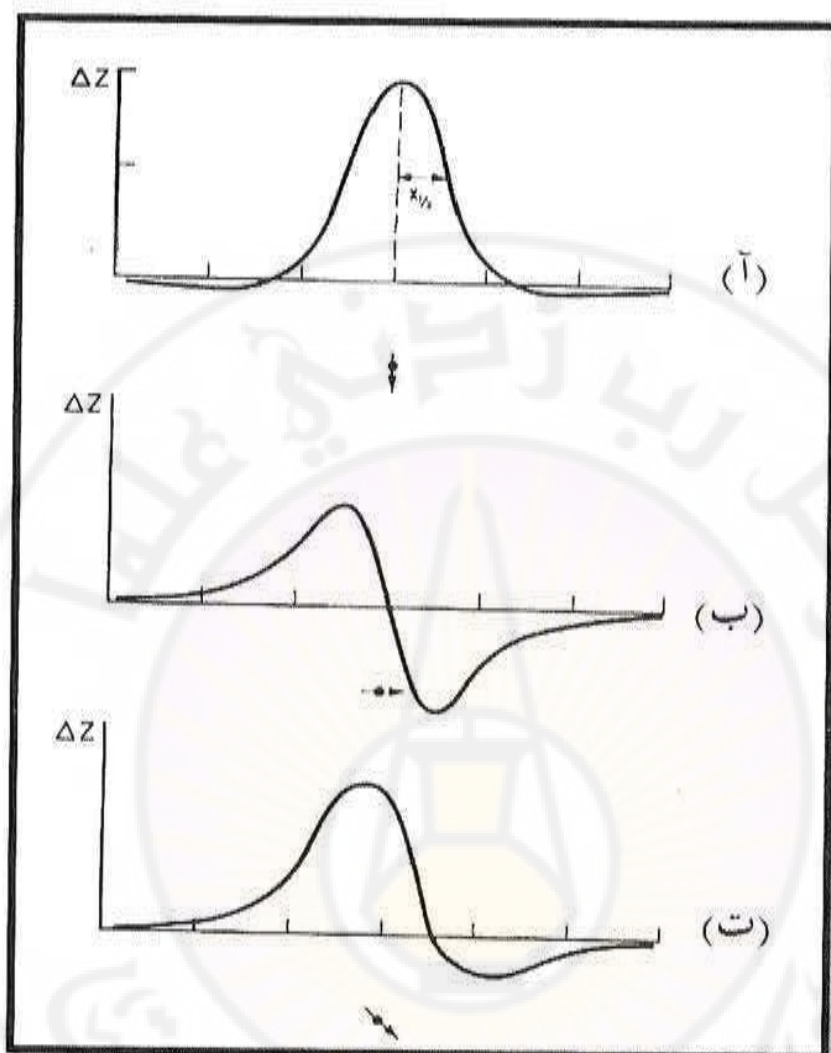
وتؤدي سرعة تناقص الشواذ المغناطيسية مع تزايد المسافة بين المواد والمقياس إلى تسطح شكل منحنى الشواذ، كما يبدو في الشكل (6-18)، الذي يظهر تناقص شدة الشواذ الناتجة عن مكب نفايات متنوعة، عند ارتفاع المقياس فوق الأرض من عشرين سنتيمتر إلى أربعة أمتار.



الشكل (6-18): تناقص شدة الشواذ المغناطيسية مع ارتفاع المقياس عن سطح الأرض.
(حسب فوغلسانغ 1995 (Vogelsang, 1995))

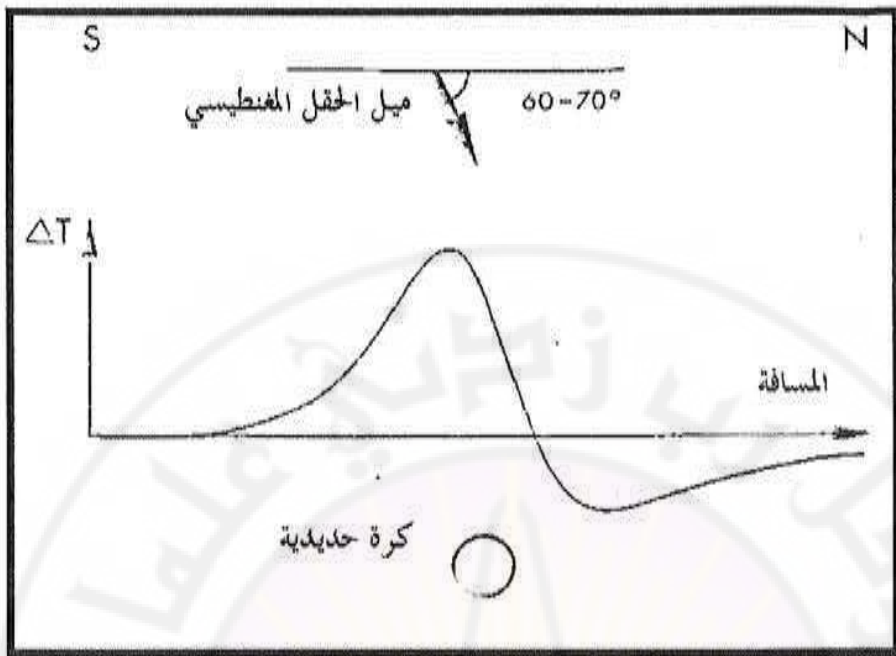
ويختلف التأثير المغنطيسي لكل جسم من النفايات بحيث يخفّي تأثير الأجسام الصغيرة تدريجياً مع تزايد المسافة وبالنّهاية يبقى تأثير المكب ظاهراً دون تفاصيل.

كما يختلف التأثير المغنطيسي للجسم مع ميل الحقل المغنطيسي الأرضي المسيطر في المنطقة، أي مع خط عرض الموقع المدروس (الشكل 6-19). فلو كان الجسم المغنطيسي متطولاً ويمكن تمثيله بثنائي قطب، يكون منحنى الشواذ المغنطيسية في القطب المغنطيسي كما في (أ)، وفي خط الاستواء المغنطيسي كما في (ب)، وفي خط عرض مغنطيسي 45 درجة كما في (ت). كما يبدو في الشكل (6-20) الذي يعطي شكل منحنى الشواذ فوق كرة حديدية معتبرة كقطب معزول واقعة في خط عرض 65 درجة شمالاً.



الشكل (6-19): تغير شكل منحني الشواذ المغنطيسية مع تغير ميل الحقل المغنطيسي الأرضي فوق جسم متطاوول معتبر كثائتي قطب.

(حسب غريفت وكينغ 1976 Griffiths & King)



الشكل (6-20): منحنى الشواذ المغنطيسية لكرة حديدية معتبرة كقطب معزول واقعة في خط عرض 65 درجة شمالاً.

(حسب فوغلسانغ 1995 (Vogelsang))

نظراً لوقوع سورية بين خطي عرض مغنطيسيين 48 و 55 درجة شمالاً، يجب أن نتوقع شكل منحنى الشواذ المغنطيسية كما في الشكل (6-19 ت) أو (6-20)، أي يجب استبعاد فكرة وجود الجسم تحت القيمة العظمى للشواذ.

6-4-3- الأجهزة المستخدمة:

يمكن استخدام مقاييس مغنطيسية مختلفة في المسح المغنطيسي البيئي. مثل المقاييس الميكانيكية (مقياس شميت أو مقياس الفتل) التي تقيس المركبتين الشاقولية والأفقية، لكن نظراً لطول مدة القياس يفضل استخدامها في الحالات التي يتوفر فيها معطيات خاصة لشكل الجسم المغنطيسي وبنيته.

ويمكن استخدام المقاييس الكهربائية كمقياس التدفق المغنطيسي الذي يمكن استخدامه لقياس المركبة الشاقولية، أو الأفقية، حسب توجه حساس المقياس، بدقة 1 نانوتسلا.

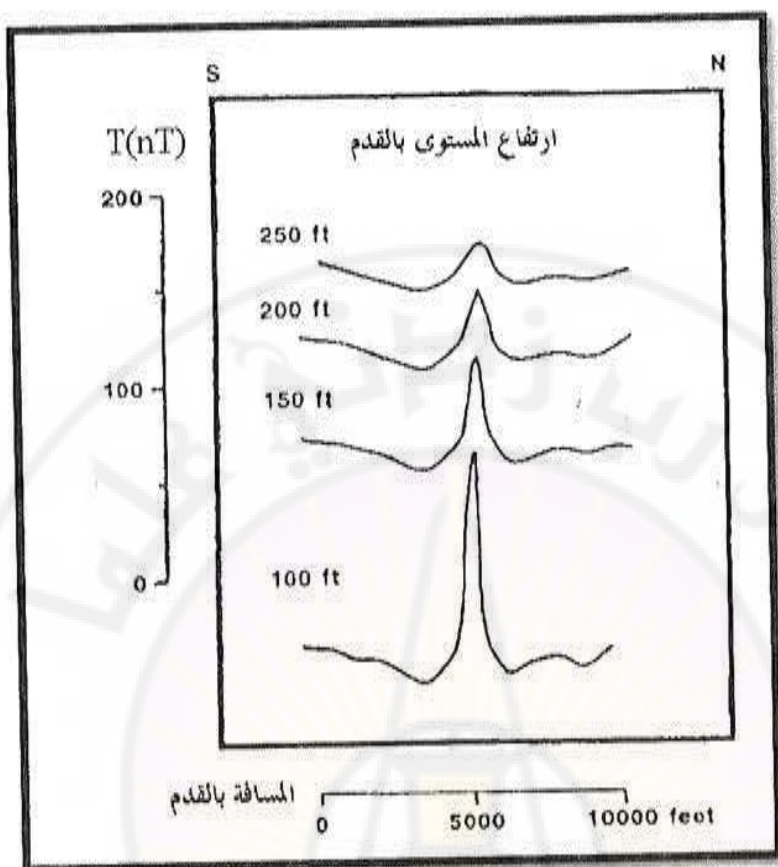
لكن المقياس الأكثر استخداماً هو مقياس البروتون الذي يقيس الحقل الكلي (T)، أو تغيره (ΔT) بدقة 0.5 nT. وغالباً ما يستخدم مقياس التدرج المغنطيسي المؤلف من حساسين على ارتفاعين مختلفين (مثلاً، 1 متر أو 2 متر)، مما يساعد في حساب عمق الجسم المغنطيسي بدقة أعلى.

وعند استخدام المقياس ذو الحساس الواحد يجب قياس التغيرات اليومية لإجراء التصحيحات اليومية على التسجيلات الحقلية، أما في حال استخدام مقياس التدرج المغنطيسي، فلا حاجة لذلك لأن المقياس يعطي حاصل طرح تسجيلي الحساسين، وبالتالي تطرح التغيرات اليومية من القياس.

ويجب أن تتناسب المسافة الشبكية للمسح المغنطيسي القاري مع مساحة المنطقة المدروسة، ومع أبعاد الأجسام المتوقع إيجادها، وقد تتراوح بين 1 و 5 أمتار، وأن تتجاوز المنطقة المدروسة حدود منطقة المقلب، حيث يتم تحديد موقع المقلب المطلوب بدقة.

يمكن أيضاً تطبيق المسح الجوي من الطائرة، أو من الهليكوبتر باستخدام مقياس البروتون، أو مقياس الضخ البصري. وكما في المسح الجوي التثقيبي يوضع الحساس على جسم الطائرة، أو يجر بحبل يتراوح طوله بين 20 إلى 30 متراً. يجب إجراء المسح على مسارات رئيسة متوازية، يتراوح البعد بينها بين 50 و 200 متر، ويستدعي ذلك أيضاً المسح على مسارات معترضة، تبعد عن بعضها بمسافة تتراوح بين 5 إلى 10 أضعاف البعد بين المسارات الرئيسية. ويجب أن تتوافق قيم الحقل المقاسة في نقاط تقاطع المسارات الرئيسية مع المسارات المعترضة.

كما يجب إجراء المسح على ارتفاع ثابت فوق سطح الأرض، يتراوح بين 30 و 50 متراً، ويتم تحديد هذا الارتفاع بواسطة مقياس الارتفاع الراداري الذي دقته بحدود 5% من ارتفاع الطيران. ويعتبر ثبات الارتفاع في المسح الجوي أحد الشروط الأساسية، نظراً لتغير شدة التأثير المغنطيسي باختلاف الارتفاع كما يظهر في الشكل (6-21)، الذي يعطي تغير شدة شواذ الحقل المغنطيسي الكلي فوق إكساء بئر في بيني غريك بكولورادو - أمريكا، مع تغير ارتفاع الطائرة من 100 إلى 150 إلى 200 إلى 250 قدماً. ويقتضي المسح الجوي تسجيل التغيرات اليومية في محطة مرجع أرضية، ثم إجراء التصحيحات اليومية على التسجيلات، كما في حال المسح القاري.



الشكل (6-21): تناقص شدة الشواذ المغناطيسية مع ازدياد ارتفاع الطائرة عن سطح الأرض في المسح البيئي الجوي.

(حسب فريشكناشت وراي، 1984، Frischknecht & Raab)

6-4-4- تفسير النتائج:

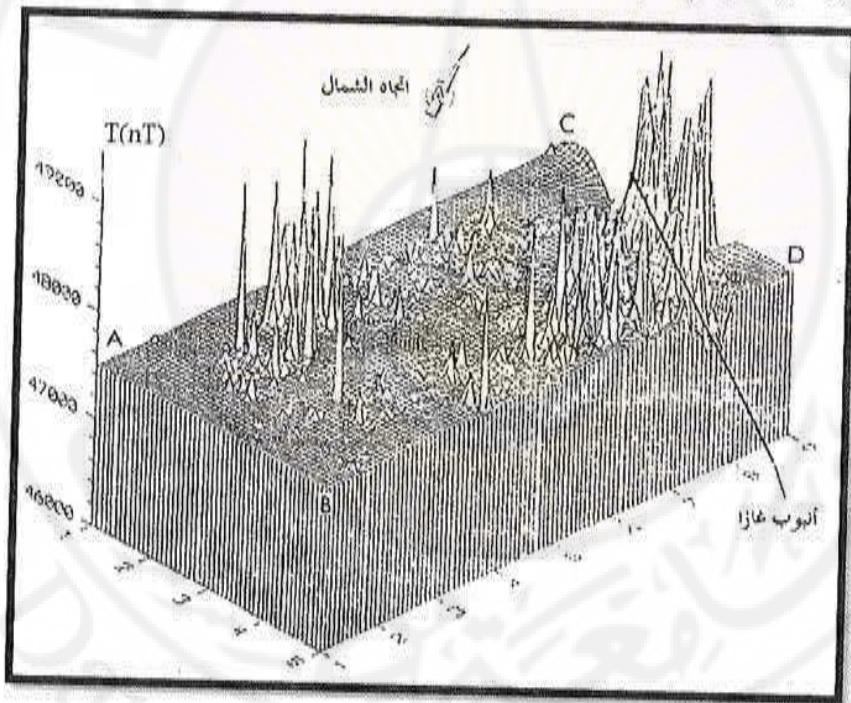
يمكن حساب عمق الجسم المغناطيسي بطريقة نصف عرض الشواذ، كما يمكن استخدام برامج حاسوبية خاصة لحساب عمق الجسم وشكله. فمثلاً يمكن بسهولة تعيين حدود مكب للنفايات المنزلية، وكذلك موقع مكب نفايات حديدية، كما يمكن تحديد مواقع الأبنية القديمة الحاوية على قضبان حديدية.

ويمكن أيضاً تحديد مواقع براميل معدنية، خاصة تلك الحاوية على نفايات سامة، أو ملوثة للمياه الجوفية، في وسط مغلب نفايات لا مغناطيسية.

6-4-5- أمثلة على المسح المغناطيسي البيئي:

تم استخدام مقياس البروتون لقياس الحقل المغناطيسي الكلي في معظم الحالات، نظراً للسرعة والسهولة وانخفاض كلفة المسح به.

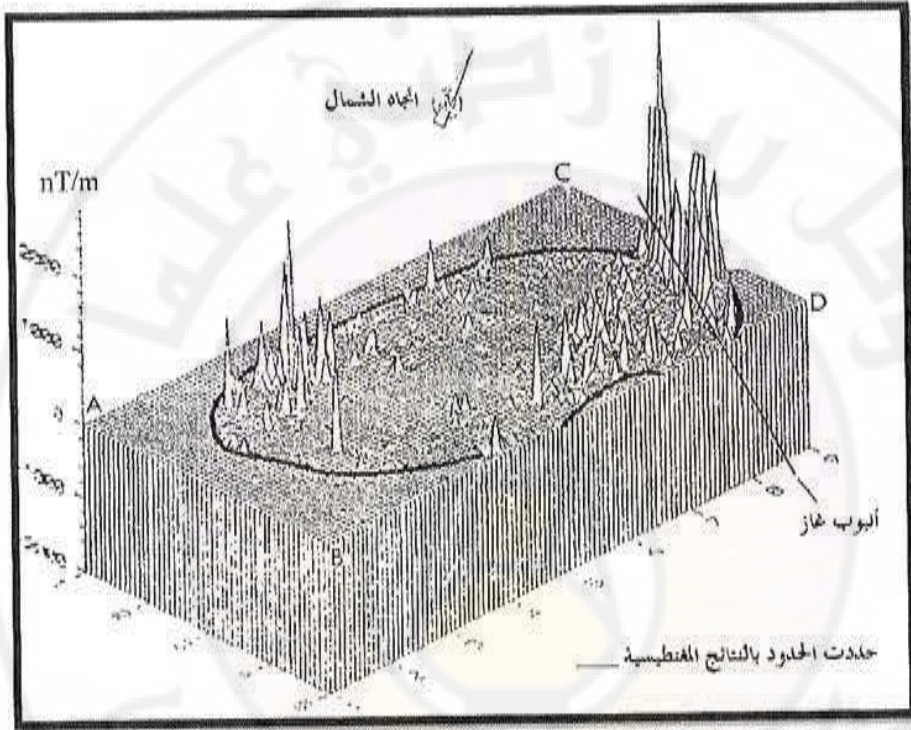
وتم قياس الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي فوق منطقة طمر نفايات منزلية وصناعية خطرة على شبكة مربعة مسافتها الشبكية 2 x 2 متراً، ثم رسمت الشواذ بشكل ثلاثي الأبعاد (الشكل 6-22). يلاحظ تركيز الشواذ الناتجة عن تجمع علب فارغة وأسلاك وقطع سيارات في الجنوب الغربي والشمال الشرقيين كما يعزز هذه الشواذ مرور أنبوب فولاذي مغمور لنقل الغاز عبر ممر في الغابة.



الشكل (6-22): شكل ثلاثي الأبعاد لشدة الحقل المغناطيسي الأرضي الكلي فوق منطقة طمر النفايات المنزلية والصناعية الخطرة.

(حسب فوجلسانغ 1995 (Vogelsang, 1995))

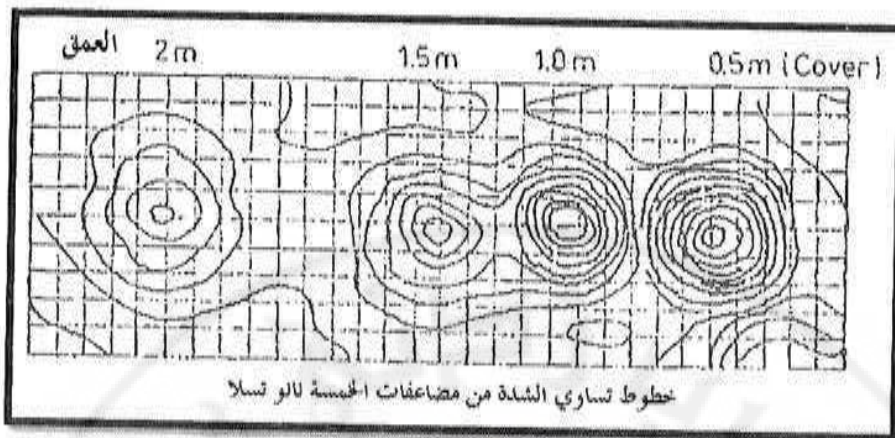
تم حساب التدرج الشاقولي لشواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق المنطقة من قياسات بمقياس التدرج الشاقولي، وضع حساساه على ارتفاعين 0.65 متر و 1.65 متر، ورسمت بشكل ثلاثي الأبعاد (الشكل 6-23). قورنت النتائج مع بعضها فلو حظ انخفاض بقم التدرج الشاقولي في المناطق منخفضة الشواذ، في حين تعزرت الشواذ الناتجة عن مواد حديدية المغنطة.



الشكل (6-23): شكل ثلاثي الأبعاد للتدرج الشاقولي لشواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق منطقة طمر النفايات المنزلية والصناعية الخطرة.

(حسب فوغلانغ 1995 Vogelsang)

ولبيان تأثير العمق على شدة الشواذ المغنطيسية، قيس الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق منطقة طمر بها أربعة براميل فولاذية على مستويات متزايدة العمق من اليمين إلى اليسار (0.5 و 1 و 1.5 و 2 متر) كما في الشكل (6-24)، الذي يظهر بوضوح كيف تخف حدة الشواذ مع ازدياد عمق البرميل.

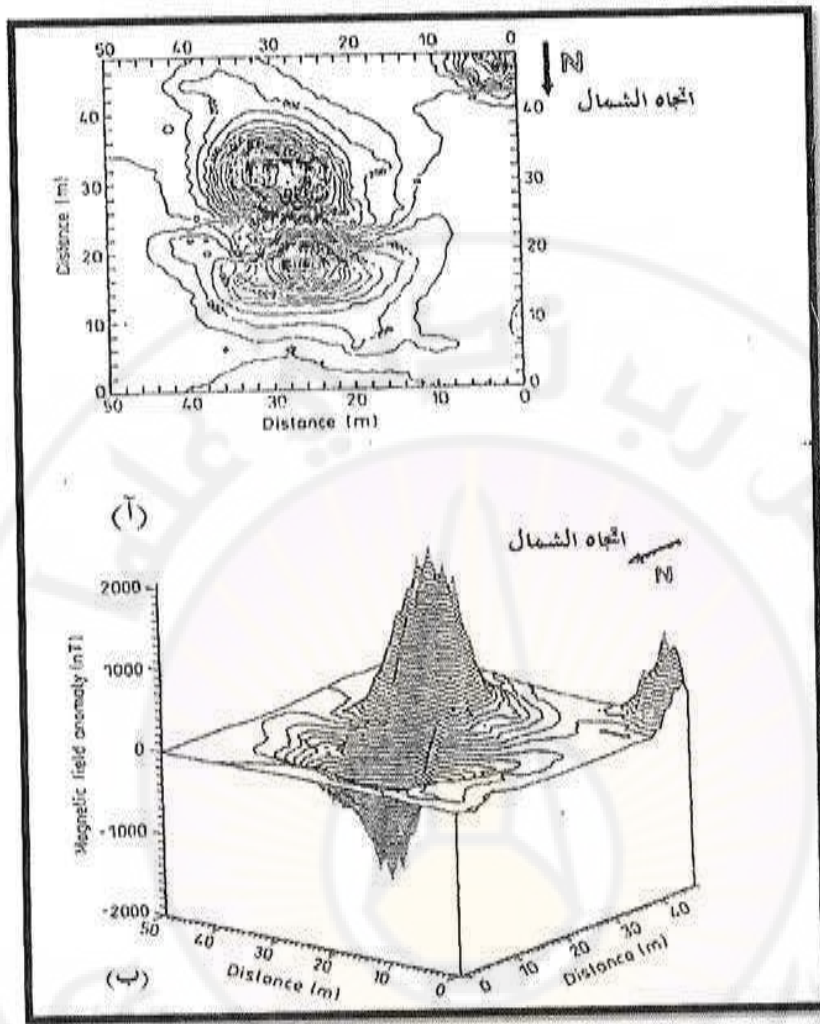


الشكل (6-24): انخفاض شدة شواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي مع تزايد العمق فوق منطقة طمر بها أربعة براميل فولاذية.

(حسب فوغلسانغ 1995, Vogelsang)

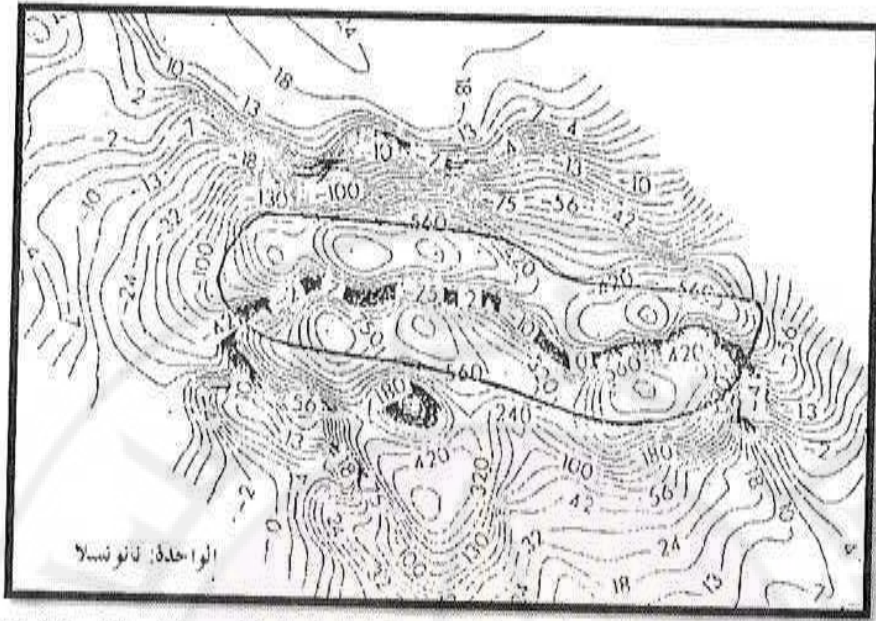
وتم قياس الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق منطقة طمر بها ملجأ ضد الغارات الجوية مبني بالإسمنت المسلح. ومعلوم بأن هذا الملجأ كان يحوي أوعية تحتوي على مواد ملوثة، والشواذ ناتجة عن حديد التسليح للملجأ، وليس من الأوعية نفسها. لم يكن موقع الملجأ محدداً بشكل مؤكد إنما كان يشك بأنه واقع تحت غابة كثيفة الأشجار، مما اقتضى المسح بين الأشجار على شبكة مربعة مسافتها الشبكية 2 متراً.

ورسمت خريطة تساوي شدة الحقل المغنطيسي الكلي ثنائية البعد (الشكل 6-25-أ) وثلاثية البعد (الشكل 6-25-ب). يظهر في الشكلين منطقة شواذ موجبة في الجنوب ومنطقة شواذ سالبة في الشمال، نظراً لوجود الموقع في خط عرض مغنطيسي 55 درجة شمالاً، وقد أمكن تحديد مكان الملجأ بشكل دقيق.



الشكل (6-25): أ- خريطة تساوي شدة الحقل المغنطيسي الكلي فوق الملجأ،
 ب- شكلاً ثلاثي الأبعاد لشواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي فوق الملجأ.
 (حسب فوغلسانغ 1995 (Vogelsang, 1995))

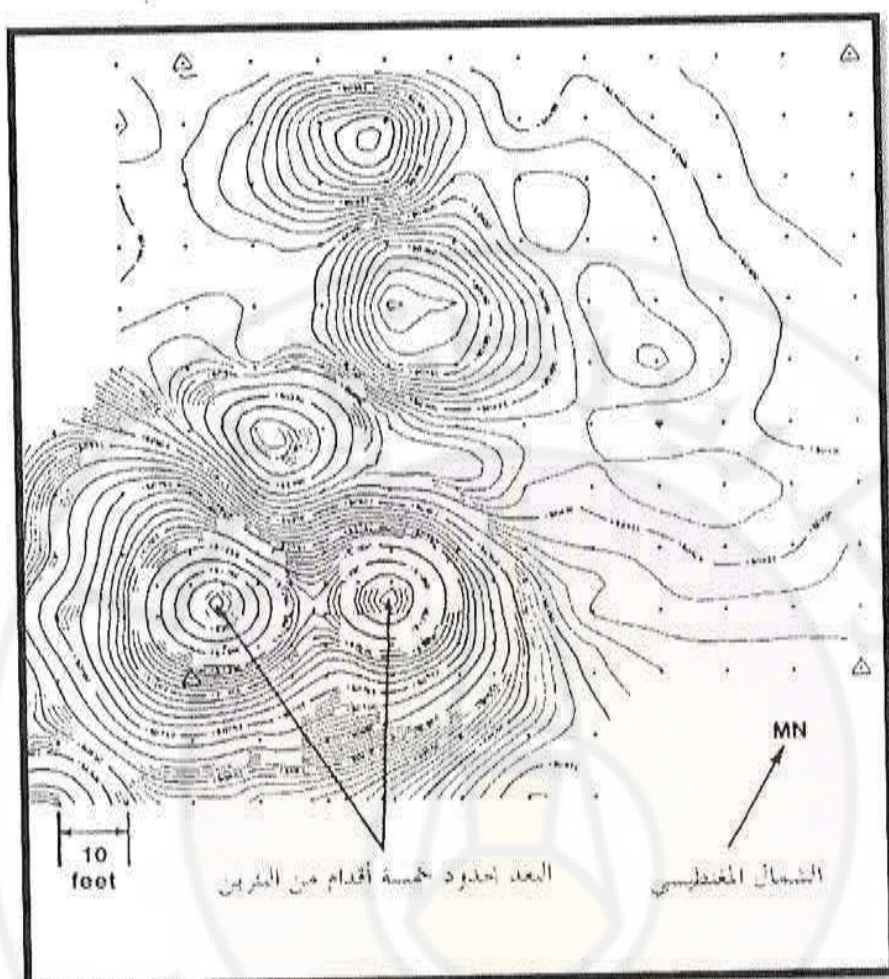
وتم قياس الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي بواسطة هليوكوبتر، حُلِّقت على ارتفاع 30 متراً فوق منطقة طمرت بها نفايات منزلية، بلغت شدة الشواذ العظمى في الجنوب 750 nT، بينما هبطت في الشمال إلى قيمة صغرى سالبة (560 nT)، لذا تشير المنطقة الوسطى من الشكل (6-26)، حيث تكون شدة الشواذ مساوية للصفر، إلى منتصف مكب النفايات.



الشكل (6-26): يظهر الشكل الخريطة الجوية لتساوي شدة الحقل المغنطيسي الكلي فوق مكب نفايات منزلية.

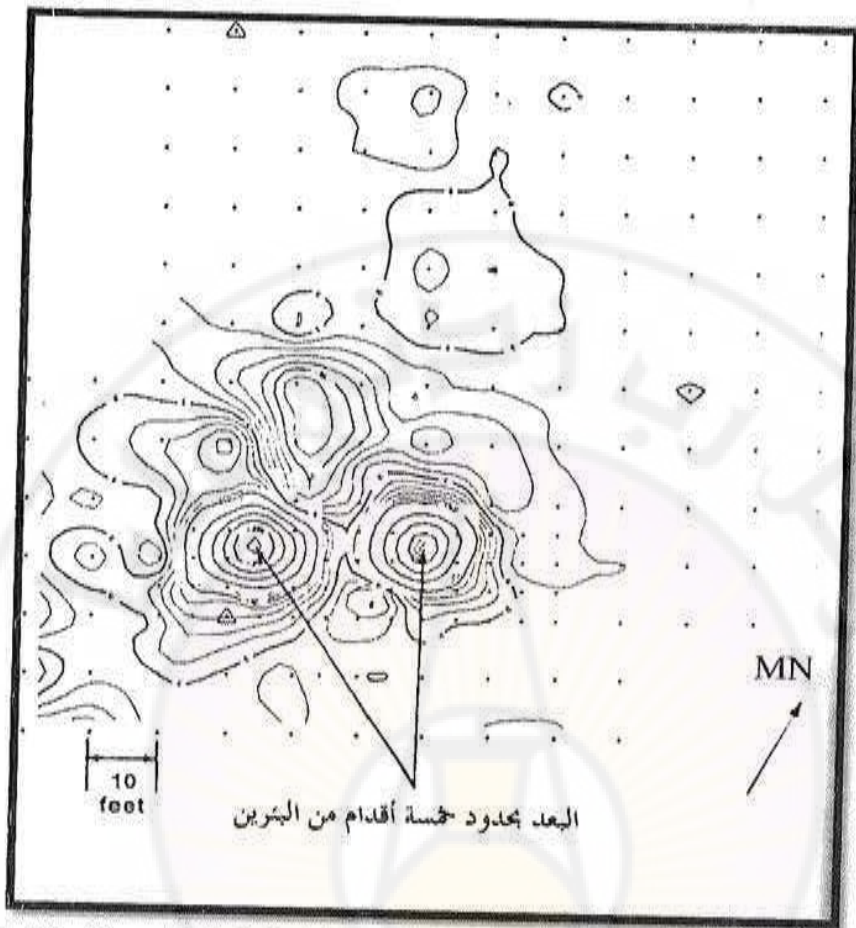
(حسب فوغلسانغ 1995 (Vogelsang))

تم قياس الحقل المغنطيسي الكلي (الشكل 6-27) والتدرج المغنطيسي الشاقولي (الشكل 6-28) فوق إكساء بئرين مهجورين في وادي سانتا كلارا في كاليفورنيا- أمريكا، وتم تحديد مكان البئرين، ثم تم حساب الشواذ الناتجة عن نموذج مقترح لإكساء يمتد من عمق 1.2 إلى 90 متراً (الشكل 6-29)، ويبدو من تماثل الشواذ المقاسة والمقترحة صحة الموقع المحدد لمكان البئرين.

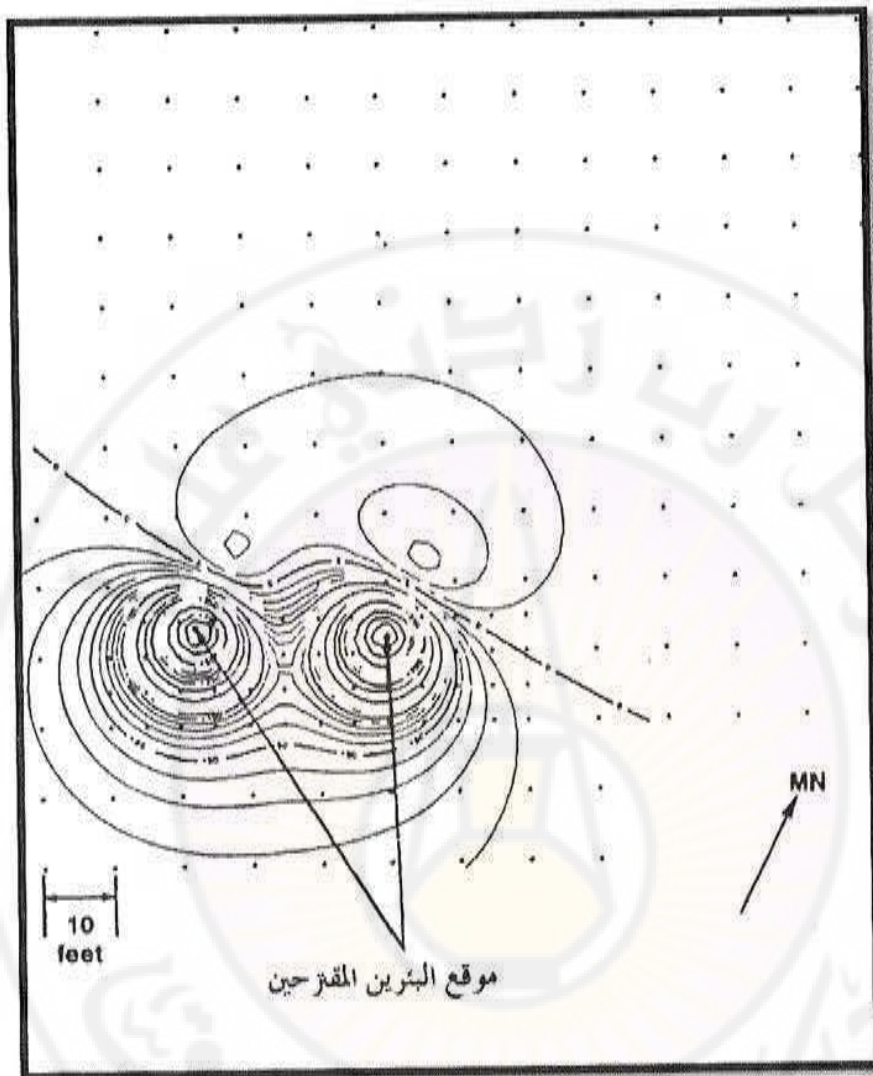


الشكل (6-27): يظهر الشكل الخريطة الجوية لتساوي شدة الحقل المغنطيسي الكلي فوق إكساء بنزين مهجورين في وادي سانتا كلارا.

(حسب وارد 1990 Ward)



الشكل (6-28): يظهر الشكل خريطة تساوي شدة التدرج الشاقولي للحقل المغناطيسي الكلي فوق إكساء بترين مهجورين في وادي سائنا كلارا.
(حسب وارد 1990 Ward)



الشكل (6-29): يظهر الشكل خريطة تساوي شواذ الحقل المغناطيسي الكلي فوق إكساء نموذج مقترح لبئر
ميجورين في وادي سانتا كلارا.

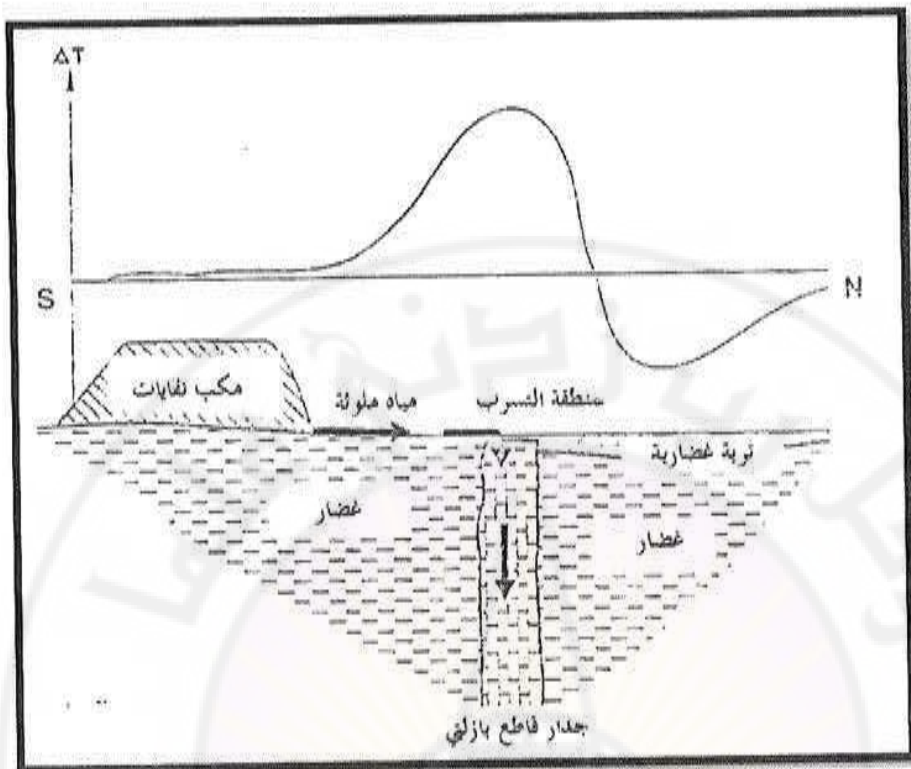
(حسب وارد 1990 Ward)

وقد رأينا فيما سبق كيف يمكن أن نحدد أماكن مقالب النفائات القديمة المختلفة،
بإستخدام الطرائق الجيوفيزيائية حسب طبيعة المقلب وعمقه. لكننا في أشد الحاجة لاستخدام

هذه الطرائق مع المعطيات الجيولوجية والبيئية المعلومة لتحديد أماكن المقالب الجديدة، وبشكل خاص التأكد من عدم إمكانية تسرب السوائل وغيرها إلى الطبقات الحاملة للماء الجوفي. لذا علينا من أجل بيئة سليمة، أن نطبق الطريقة أو الطرائق الممكنة، قبل السماح بإلقاء النفايات في أي مكان، التي تسمح لنا بالتأكد من أن هذا المقلب لن يكون له تأثير ملوث للبيئة، وخاصة الطبقات الحاملة للماء، والتي قد تؤدي إلى أضرار بشرية، أو نباتية أو حيوانية.

ويجب من أجل هذا الهدف أن نطبق الطرائق المختلفة لتحديد هذه المواقع، لكن هذا لا يكفي لأن علينا خلق الوعي الثقافي والاجتماعي لدى الناس للمشكلة التي تواجه العديد من دول العالم، والتي لا بد ستنشر في كل بلدان العالم. ولخلق هذا الوعي يجب أن نُسخر وسائل الإعلام جميعها للتعريف بالمشكلة التي قد تؤدي إلى كارثة بيئية في أية دولة، لكن إلى جانب الإعلام والتعريف يجب أن نؤمن الرادع المادي لدى الناس، مما يستوجب وضع التشريعات القانونية الصارمة بحق من لا يلتزم منهم، لأن ما يبدو لنا الآن مشكلة بسيطة سيصبح في المستقبل مشكلة قاتلة لها منعكساتها المحلية والعالمية على مستقبل البشرية، خاصة وقد بدأنا نشعر بالمشكلة التي تتجلى في الانحباس الحراري وذوبان الجليد وتقلبات الطقس.

لهذا تمت دراسة منطقة لبيان مدى صلاحيتها لاستخدامها كمكب للنفايات (Vogelsang, 1995)، فبين المسح المغنطيسي للمنطقة وجود جدار قاطع بازلتي مغطى بطبقة من تربة زراعية، تم تحديد مكانه بدقة تحت القيمة العظمى لشواذ الحقل المغنطيسي الأرضي الكلي، حيث يميل الحقل بمقدار 55 درجة (الشكل 6-30)، وتبين بأن وجود الجدار القاطع سيؤدي إلى تسرب السوائل الناتجة من المقلب المقترح إلى الطبقات الحاملة للمياه العذبة في منطقة الجدار القاطع، فحظر من اختيار هذا الموقع كمقلب نفايات.



الشكل (6-30): يظهر الشكل منحنى شواذ الحقل المغناطيسي الكلي فوق منطقة وجود جدار قاطع بازلتي مغطى بطبقة من تربة زراعية.
(حسب فوغلسانغ 1995 (Vogelsang, 1995))



References المراجع

1. Abou-Deeb, J. (1987). The International Geomagnetic Reference Field in Syria for the year 1987. Damascus University Journal, Vol. 2, No. 8, 29 - 52.
2. Abou-Deeb, J. (1994). The International Geomagnetic Reference Field in Syria for the year 1995 and the secular variations in the last fifty years. Damascus University Journal, Vol. 10, No. 37-38, 41 - 66.
3. Abou-Deeb, J. (2001). The International Geomagnetic Reference Field at the beginning of the year 2001 and the secular variations in the 20th Century. Damascus University Journal, Vol. 17, No. 1, 237 - 263.
4. Abou-Deeb, J. (2009). The International Geomagnetic Reference Field in Syria at the beginning of the year 2008. Damascus University Journal, Vol. 25, No. 1, 53 - 72.
5. Abou-Deeb, J. Azraq, W and Alghosine, T (2009). The Geomagnetic Field and its records in the Syrian Magnetic Observatory (SYR). The Second Syrian Geological Conference, 26-28 October 2009, Damascus.
6. Allen, T.D. (1969). Review of marine geomagnetism. Earth Sci. Rev. 5, 217-254.
7. Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo - gravimetric anomalies. Geophysics, Vol. 22, No. 2, 359 - 383.
8. Baranov, V. and H. Naudy (1964). Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. Geophysics, Vol. 29, No. 1, 67 - 79.
9. Barnett, C. T. (1976). Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrarily shaped three - dimensional body. Geophysics, Vol. 41, 1353 - 1364.
10. Bhattacharyya, B. K. and Lei-Kuang Leu (1975). Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone National Park: mapping of Curie Point Isothermal surface for geothermal reconnaissance. J. Geophys. Res. Vol. 80, 4461- 4465.
11. Blackett, P. M. S. (1952). A negative experiment relating to magnetism and the earth's rotation. Phil. Trans. R. Soc., London. A245, 309-370.

12. Bott, M. H. P. (1963). Two methods applicable to computers for evaluating magnetic anomalies due to finite three - dimensional bodies. *Geophysical Prospecting*, Vol . 11, 292 - 299.
13. Breiner, S. (1973). Application manual for portable magnetometers. Geometries.
14. Cady, J. W. (1980). Calculation of magnetic anomalies of finite length right polygonal prisms. *Geophysics*, Vol. 45, 1507 - 1512.
15. Collinson, D. W. (1983). *Methods in Palaeomagnetism and Rock Magnetism*. Chapman and Hall. London. p. 500.
16. Collinson, D. W. and L. Molyneux (1967). An instrument for the measurement of isotropic initial susceptibility of rock samples. In: *Methods in palaeomagnetism* (Collinson et al.,). Elsevier, Amsterdam. p. 368 - 371.
17. Connrad, G., R. W. Couch, and M. Gemperle (1983). Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in Central Oregon, *Geophysics*, Vol. 48, 376- 390.
18. Dobrin, M. B. (1976). *Introduction to Geophysical prospecting*. McGraw - Hill, New York.
19. Dobrin, M. B. (1983). *Introduction to Geophysical prospecting*. International Student Edition. McGraw - Hill, New York.
20. Dobrin, M. B. and Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical prospecting*. McGraw - Hill, New York.
21. Ducruix, J., LeMouel J.L. and Courtillot V. (1974). Continuation of three-Dimensional potential fields measured on uneven surface. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, Vol. 38, 299 -314.
22. Elkins, T. A. (1951). The second vertical derivative method of gravity interpretation. *Geophysics*, Vol. 16, 39 - 56.
23. Frischknecht, F. C., and P. V. Raab (1984). Location of abandoned wells with geophysical methods. E.P.A.-600/4-48-085.
24. Gauss, C. F. (1839). *Algemaine threorie des erdmagnetismus*.
25. Gay, S. Parker, Jr. (1967). Standard curves for interpretation of magnetic anomalies over long tabular bodies. *Mining Geophysics*, Vol. 2, 512-548.
26. Gilbert, W. (1600). *De magnete*.
27. Griffiths, L. H. and R. F. King (1976). *Applied Geophysics for engineers and Geologists*. Pergamon (London).
28. Hansen, R. O. and Y. Miyazaki (1984). Continuation of potential fields between arbitrary surfaces. *Geophysics*, Vol. 49, 787-795.

29. Hartman, R. R., Teskey, D. J. and J. L. Friedberg (1971). A system for rapid digital aeromagnetic interpretation *Geophysics*, Vol. 36, 891-918.
30. Henderson, R. G. and Cordell L. (1971). Reduction of unevenly spaced potential field data to a horizontal plane by means of finite harmonic series. *Geophysics*, Vol. 36, 856-866.
31. Henderson, R. G. and I. Zietz (1949). Computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. *Geophysics*, Vol. 14, 517-534.
32. Henderson, R. G. and I. Zietz (1967). The computation of second vertical derivatives of geomagnetic fields. In: *Mining Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Vol. II, 606-614.
33. Hutchison, R. D. (1958). Magnetic analysis by logarithmic curves. *Geophysics*, Vol. 23, 744-769.
34. Ivan, M. (1986). On the upward continuation of potential fields data between irregular surface. *Geophysical Prospecting*. Vol. 34, 735-742.
35. Ivan, M. (1994). Upward continuation of potential fields from a polyhedral surface. *Geophysical Prospecting*. Vol. 42, 391-404.
36. Jankowski, J. and Sucksdorff, C. (1996). Guide for magnetic measurements and observatory practice. International Association of Geomagnetism and Aeronomy. p. 235.
37. Kearey, Ph., Brooks, M. and Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science. Third Edition.
38. Larochelle, A. (1965). The design of a spinner-type remanent magnetometer. *Geol. Surv. Canada, Paper 64-43*, p. 25.
39. Logn, O. (1964). Exploration for deep magnetite ore. *Geo-exploration*, Vol. 2 (2), 74-106.
40. Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press. Second Edition.
41. McDougall, J. M., Tarling, D. H. and Warren, S.E. (1983). The magnetic sourcing of Obsidian samples from the Mediterranean and Near Eastern sources, *Journal of Archaeological Sciences*, Vol. 10, 441-452.
42. McElhinny, M. W. (1973). *Palaeomagnetism and plate tectonics*. Cambridge University Press. p. 358.
43. Milsom, J. (2004). *Field Geophysics*. Wiley. Third Edition.
44. Molyneux, L. (1971). A complete result magnetometer for measuring the remanent magnetization of rocks. *Geophys. J. R. ast. Soc.*, 24, 429-433.

45. Naudy, H. (1971). Automatic determination of depth on aeromagnetic profile. *Geophysics*, Vol. 36, No. 4, 717-722.
46. Nettleton, L. L. (1962). Gravity and magnetics for geologists and geophysicists, *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, Vol. 48, No. 10, 1815-1838.
47. Nettleton, L. L. (1976). Gravity and magnetics in oil prospecting. McGraw-Hill, New York.
48. Newitt, L.R., Barton, C.E. and Bitterly, J. (1996). Guide for magnetic repeat station surveys. *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*. p. 112.
49. Packard, M. and R. Varian (1954). *Phys. Rev.*, Vol. 93, p. 941.
50. Parasnis, D. S. (1975). *Mining Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics*, No. 3, Elsevier, Amsterdam.
51. Parasnis, D. S. (1972). *Principles of Applied Geophysics*. Chapman and Hall.
52. Parker, R. L. and K.D. Klitgord (1972). Magnetic upward continuation from uneven track. *Geophysics*, Vol. 37, 662-668.
53. Peckett, G. R. (1970). Applications for boreholes geophysics in geophysical exploration. *Geophysics*, Vol. 35, 81-92.
54. Peters, L. J. (1949). The direct approach to magnetic interpretation and its practical applications. *Geophysics*, Vol. 14, 290-320.
55. Platt, N. H. and S. Walter (1995). Integrated seismic, gravity and magnetic modeling: examples from the Central North Sea. *First Break*, Vol. 13, No. 10, 409-418.
56. Riddell, P. A. (1966). Magnetic observations at the Dayton iron deposits, Lyon County, Nevada. In: *Mining Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, Vol. I, p. 427.
57. Rosenbach, O. (1953). A contribution to computation of second derivative from gravity data. *Geophysics*, Vol. 18, 894-912.
58. Rudman, A. J. and R. F. Blakely (1965). A geophysical study of a basement anomaly in Indiana (USA). *Geophysics*, Vol. 30, 745-761.
59. Ruotoistenmaki, T. (1993). The magnetic anomaly of 3D sources having arbitrary geometry and magnetization. *Geophysical prospecting*, Vol. 41, 413-433.
60. Schonemann, A. (1972). Magnetic investigation of some diabase dykes on Bornholm. Graduate thesis, University of Copenhagen, p. 86.
61. Scintrex (1996). *Operations Manual of SMARTMAG Gradiometer Models SM-4/4G*.

62. Sharma, P. V. (1976). *Geophysical Methods in Geology*. Elsevier, Amsterdam.
63. Shuey, R. T. and J. E. Matthews (1972). Two dimensional modelling with inhomogenously magnetized bodies. *Geo-exploration*, Vol. 10, 229-238.
64. Soffel, H. (1991). *Palao-magnetismus und Archaomagnetismus*, Springer-Verlag Berlin, p. 86.
65. Steenland, N. C. (1965). Oil fields and aeromagnetic anomalies. *Geophysics*, Vol. 30, No. 5, 706-739.
66. Syberg F. J. R. (1972). Potential field continuation between general surfaces, *Geophysical prospecting*, Vol. 20, 267-282.
67. Talwani, M. (1965). Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape In: *Geophysics*, Vol. 30, 797-817.
68. Talwani, M. and J. Heirtzler (1964). Computation of magnetic anomalies caused by two dimensional structure of arbitrary shape In: *Computers in the mineral industries, I*, Geological Sciences Vol. 9, 464-480, Stanford University publications.
69. Tarling, D.H. (1971). *Principles and applications of palaeomagnetism*. Chapman and Hall, p. 164.
70. Tarling, D. H. (1983). *Palaeomagnetism*, Chapman and Hall, p. 380.
71. Tarling, D. H. (1990). Some uses of the magnetic properties of materials in archaeological sites, *Geological Society of America, Centennial Special Volume 4*, 597-602.
72. Tarling, D. H. (1991). *Archaeomagnetism and Palaeomagnetism, I-Principles*. Gokso, H. Y. et al. (eds.), *Scientific Dating Methods*, 217-236.
73. Tarling, D. H. (1991). *Archaeomagnetism and Palaeomagnetism, II-Magnetic Dating and other Applications*. Gokso, H. Y. et al. (eds.), *Scientific Dating Methods*, 237-250.
74. Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Combridge University Press, p. 726.
75. Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (2004). *Applied Geophysics*. Digital Edition. Combridge University Press, p. 860.
76. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and D.A. Keys (1976). *Applied Geophysics*. Combridge University Press, p. 860.
77. Vine, F.J. and Matthews, D.H. (1963). Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 199, 947-949.

78. Vogelsang, D. (1995). Environmental Geophysics. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, p. 173.
79. Ward, S. H. (1990). Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Vol. 1, 389.
80. Water, G. S. and Phillips, G. (1956). A new method of measuring the earth's magnetic field. Geophysical Prospecting, Vol. 4, 1-9.
81. WDC. (2008). Data Catalogue. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japan. No. 28. April 2008. P. 182.
82. Wilcke, J. C. (1777). On magnet - nalene arliga och dageliga i Stokholm svenck. vet. Acad. Handl., 38, 273-300.
83. Zeitz, I. and G.E. Andreassen (1967). Remnant magnetization and aeromagnetic interpretation. In: Mining Geophysics, Society of Exploration Geophysicists, Vol. II, 569-590.
84. Zeyen, H.J., Banda, E. and E. Klingele (1988). Aeromagnetic reconnaissance of Catalonia, Spain. First Break, Vol. 6, No. 7, 217-222.

جدول المصطلحات العلمية

مرتبة وفق الهجائية العربية

-آ-

Direction	اتجاه
Strike	اتجاه
Polarization	استقطاب
Magnetic polarization	استقطاب مغنطيسي
Saturation	إشباع
Radioactivity	إشعاعية
Ulvospinel	إلفوسبينيل
Ilmenite	إلمينيت
Radio waves	أمواج راديو
Microwaves	أمواج ميكروية
Declination	انحراف
Magnetic declination	انحراف مغنطيسي
Continental drift	انزياح القارات
Obsidian	أوبسيديان
Oersted	أورستد

-ب-

Suprabasement	بروزات الركيزة
Pseudobrookite	بسيديوبروكيت
Sun spots	بقع شمسية

Top

بلبل (خزوف)

Permalloy

بيرمالوي (سبكة عالية النفوذية المغنطيسية)

Pyrhotite

بيروتيت

Pyrite

بيريت

-ت-

Nuclear magnetic resonance

تجاوب نووي مغنطيسي

Magnetic induction

تحريض مغنطيسي

Vertical gradient

تدرج شاقولي

Flux

تدفق

Larmor precession frequency

تردد تجاوب لارمور

Long wave radio frequency

تردد راديوي طويل الموجة

Very High Frequency

تردد عالي جداً

Ultra High Frequency

تردد فوق العالي

Trolite

تروليت

Tesla

تسلا

Magnetic noise

تشويش مغنطيسي

Elevation correction

تصحيح الارتفاع

Terrain correction

تصحيح الطبوغرافيا

Normal corrections

تصحيات نظامية

Diurnal corrections

تصحيات يومية

Commercial Frequency Modulation

تضمين التردد التجاري

Archaeological application

تطبيق آثاري

Pitch

تغريق

Plunge

تغريق

Secular variations

تغيرات قارية

Diurnal variations

تغيرات يومية

Solar diurnal variations

تغيرات يومية شمسية

Lunar diurnal variations

تغيرات يومية قمرية

Magnetic data interpretation

تفسير المعطيات المغناطيسية

Quantitative interpretation

تفسير كمي

Qualitative interpretation

تفسير كيفي

Radio Detection and Ranging

التقاط راديوي وتحديد مجال

Curvature

تقوس (تحدب)

Plate tectonics

تكتونيك الصفائح

Sea floor Spreading

تمدد قاع البحر

Archaeological prospecting

تنقيب آثاري

Titanomagnetite

تيتانومغنتيت

Titanohaematite

تيتانوهماتيت

-ث-

Universal gravitational constant

ثابت الجاذبية العالمي

Planck's constant

ثابت بلانك

Dipole

ثنائي قطب

Magnetic dipole

ثنائي قطب مغناطيسي

Convolution

ثلي

-ج-

Dike

جدار قاطع

Root mean square

جذر متوسط المربعات

Transponder

جهاز مرسل مستجيب

-ح-

Tripod

حامل ثلاثي الأرجل

Lodestone

حجر المغناطيس

Blocking volume	حجم الحجز
Knife edge	حد السكين
Terms of spherical harmonics	حدود توافقية كروية
Ferromagnetic	حديدية المغنطة
Blocking temperature	حرارة الحجز
Thermal	حراري
Larmor precession	حركة لارمور الترنحية
Sensor	حساس
Force field	حقل القوة
Dipole field	حقل ثنائي القطب
Total field	حقل كلي
Potential field	حقل كمون
Non-dipole field	حقل لا ثنائي القطب
Magnetic field	حقل مغناطيسي
International Geomagnetic Reference Field	الحقل المغناطيسي الأرضي المرجع

-خ-

Isogonic map	خريطة تساوي الانحراف المغناطيسي
Isoclinic map	خريطة تساوي الميل المغناطيسي
Magnetic contour map	خريطة خطوط تساوي المغناطيسية
Line of force	خط قوة
Line of poles	خط من الأقطاب
Line of dipoles	خط من ثنائيات الأقطاب
Line of sight	خط نظر
Declination error	خطا الاتجاه
Inclination error	خطا الميل
Field lines	خطوط الحقل

United States Coast Guard

خفر السواحل الأمريكية

Canadian Coast Guard

خفر السواحل الكندية

Background

خلفية

Absorption cell

خلية امتصاص

Photo cell

خلية ضوئية

Torsion fiber

خيوط فتل

-د-

Curie point

درجة حرارة كوري

Curie temperature

درجة حرارة كوري

Eddies

دوامات

-ر-

Continental shelf

رصيف قاري

Basement

ركيزة

-ز-

Solid angle

زاوية مجسمة

Spin angular momentum

زخم دوراني

Thermal relaxation time

زمن الاسترخاء الحراري

-س-

Well logging

سبر بئري

Magnetic susceptibility log

سجل المتأثرية المغنطيسية

Electrical resistivity log

سجل المقاومة الكهربائية

Relative γ -ray intensity log

سجل شدة إشعاع غاما النسبي

Thin bed

سرير رقيق

Fourier's series

سلسلة فورييه

Slate

سليت

Seismic

سيزمي

--ش--

Intensity of magnetization

شدة المغنطة

Magnetic anomaly

شواذ مغنطيسية

Chert

شيرت

--ص--

Basement rocks

صخور الركيزة

Profile smoothing

صقل المنحنى

--ض--

Optical pumping

ضخ بصري

--ط--

Paramagnetic

طردية المغنطة

Reduction to the pole method

طريقة الإرجاع إلى القطب

Radioactivity method

الطريقة الإشعاعية

Satellite navigation method

طريقة الأقمار الصناعية

Continuation method

طريقة التتابع

Downward continuation method

طريقة التتابع نحو الأسفل

Upward continuation method

طريقة التتابع نحو الأعلى

Trial and error method

طريقة التجريب والخطأ

Radio-frequency method

طريقة التردد الراديوي

Thermal method

الطريقة الحرارية

Radar method

طريقة الرادار

Seismic method

الطريقة السيزمية

Electrical method

الطريقة الكهربائية

Electromagnetic method

الطريقة الكهرومغناطيسية

Chemical method	الطريقة الكيميائية
Second derivative method	طريقة المشتق الثاني
Magnetic method	الطريقة المغناطيسية
Slop method	طريقة الميل
Thalen rule	طريقة تالين
Tiburg rule	طريقة تيبورغ
Doppler method	طريقة دوبلر
Shoran method	طريقة شوران
Least square method	طريقة مربع الخطأ الأصغري
Slop distance rule	طريقة مستقيم الميل
Error curve method	طريقة منحنى الخطأ
Naudy method	طريقة نودي
Werner method	طريقة ورنر
Strike length	طول الاتجاه

-ع-

Magnetic storm	عاصفة مغناطيسية
Phase-comparison meter	عداد مقارنة الطور
Wave number	عدد موجي
Width	عرض
Oceanic ridge	عرف محيطي
Spin	عزم دوراني
Magnetic moment	عزم مغناطيسي
Diamagnetic	عكسية المغنطة
Planck's relation	علاقة بلانك
Poisson's relation	علاقة بواسون
Trace element	عنصر أثر

Rubidium

عنصر الربيديوم

Cesium

عنصر السيزيوم

-غ-

Ionosphere

الغلاف المتأين

-ف-

Split

فصم

Ferrite

فيريت (خام حديدي مغناطيسي)

-ق-

Coulomb's Law

قانون كولومب

Salt dome

قبة ملحية

Magnitude

قدر

Pole

قطب

Magnetic pole

قطب مغناطيسي

Strength

قوة

Magnetic force

قوة مغناطيسية

Borehole measurements

قياسات بئر

Vector measurements

قياسات شعاعية

-ك-

Quantum

كم (كوانتوم ضوئي)

Spontaneous potential

كمون ذاتي

Electrical

كهربائي

Electromagnetic

كهرومغناطيسي

Chemical

كيميائي

-ل-

Lepidocrocite

ليبيدو غروسييت

Ferromagnetic material

مادة حديدية المغنطة

Paramagnetic material

مادة طردية المغنطة

Diamagnetic material

مادة عكسية المغنطة

Maghemite

ماغيميت

Susceptibility

متأثرية

Magnetic susceptibility

متأثرية مغنطيسية

Weighed mean

متوسط موزون

Optical range

مجال بصري

Visible range

مجال مرئي

Base station

محطة مرجع

Locus

محل هندسي

Oscillator

مردد

Magnetic observatory

مرصد مغنطيسي

Profile

مسار، خط قياس، منحنى

Noise level

مستوى التشويش

Exited level

مستوى التهيج أو الإثارة

Zero level

مستوى الصفر

Normal level

مستوى نظامي

Magnetic survey

مسح مغنطيسي

Marine magnetic survey

مسح مغنطيسي بحري

Aeromagnetic survey

مسح مغنطيسي جوي

Collimator

مسددة

Interference filter

مصفاة تداخلية

Laplace equation

معادلة لابلاس

Magnetic data

معطيات مغنطيسية

Diapiric feature	معلم انبثاقي
Primary magnetization	مغنطة أولية
Secondary magnetization	مغنطة ثانوية
Residual magnetization	مغنطة متبقية
Post-depositional remnant magnetization	مغنطة متبقية بعد الترسيب
Crystallization remnant magnetization	مغنطة متبقية بلورية
Depositional remnant magnetization	مغنطة متبقية ترسيبية
Thermo-remnant magnetization	مغنطة متبقية حرارية
Shock remnant magnetization	مغنطة متبقية صدمية
Piezo-remnant magnetization	مغنطة متبقية ضغطية
Natural remnant magnetization	مغنطة متبقية طبيعية
Chemical remnant magnetization	مغنطة متبقية كيميائية
Viscous remnant magnetization	مغنطة متبقية لزجة
Isothermal remnant magnetization	مغنطة متبقية متساوية الحرارة
Induced magnetization	مغنطة متحرضة
Transverse magnetization	مغنطة معترضة
Magnetic	مغناطيسي
Archaeomagnetism	مغناطيسية أثرية
Environmental magnetism	المغناطيسية البيئية
Superparamagnetic	مغناطيسية طردية فائقة
Palaeomagnetism	مغناطيسية قديمة
Magnetite	مغنييت
Circular polarizer	مقطب دائري
Fluxgate magnetometer	مقياس التدفق المغناطيسي
Nuclear precession magnetometer	مقياس الترنج النووي المغناطيسي
Optical pumping magnetometer	مقياس الضخ البصري

Optically pumped vapor magnetometer	مقياس الضخ البصري
Torsion fiber magnetometer	مقياس الفتل المغنطيسي
Magnetic gradiometer	مقياس تدرج مغنطيسي
Schmidt magnetometer	مقياس شميت
Schmidt horizontal balance	مقياس شميت للمركبة الأفقية
Schmidt vertical balance	مقياس شميت للمركبة الشاقولية
Voltmeter	مقياس فولط
Magnetometer	مقياس مغنطيسية
Short Range Navigation	ملاحاة قصيرة المدى
Scarp	منحدر شديد
Master curve	منحني نموذجي
Magnetic anomaly curves	منحنيات الشواذ المغنطيسية
Intrabasement	منخفضات الركيزة
Satellite Based Augmentaion System	منظومة الزيادة القائمة على الأقمار الصناعية
Self-excited dynamo	مولد ذاتي التحريض
Dip	ميل
Inclination	ميل
Magnetic inclination	ميل مغنطيسي
Ilmeno-rutile	المينوروتيل
Mu-Metal	ميوميتال (سبكة عالية النفوذية المغنطيسية)

-ن-

NanoTesla	نانوتسلا
Magnetite percentage	النسبة المئوية للمغنيتيت
Differential Global Positioning System	نظام تعيين المواقع التفاضلي
International System	النظام الدولي
System Internationale	النظام الدولي للوحدات

Permeability

نفوذية

Magnetic permeability

نفوذية مغناطيسية

Inflection point

نقطة انعطاف

Gyromagnetic ratio

نسبة جيرومغناطيسية

-ه-

Metastable Helium

هليوم شبه مستقر

-و-

Pickup coil

وشبعة لاقطة

Polarizing coil

وشبعة مقطببة

جدول المصطلحات العلمية

مرتبة وفق الهجائية الإنجليزية

- A -

Absorption cell	خلية امتصاص
Aeromagnetic survey	مسح مغنطيسي جوي
Archaeological application	تطبيق أثاري
Archaeological prospecting	تنقيب أثاري
Archaeomagnetism	مغنطيسية أثرية

- B -

Background	خلفية
Base station	محطة مرجع
Basement	ركيزة
Basement rocks	صخور الركيزة
Blocking temperature	حرارة الحجز
Blocking volume	حجم الحجز
Borehole measurements	قياسات بئرية

- C -

Canadian Coast Guard	خفر السواحل الكندية
Cesium	عنصر السيزيوم
Chemical	كيميائي
Chemical method	الطريقة الكيميائية
Chemical remnant magnetization	مغنتية متبقية كيميائية
Chert	شيرت

Circular polarizer	مقطب دائري
Collimator	مسددة
Commercial Frequency Modulation	تضمين التردد التجاري
Continental drift	انزياح القارات
Continental shelf	رصيف قاري
Continuation method	طريقة التتابع
Convolution	ثني
Coulomb's Law	قانون كولومب
Crystallization remnant magnetization	مغنطة متبقية بلورية
Curie point	درجة حرارة كوري
Curie temperature	درجة حرارة كوري
Curvature	تقوس (تحدب)

- D -

Declination	انحراف
Declination error	خطأ الاتجاه
Depositional remnant magnetization	مغنطة متبقية ترسبية
Diamagnetic	عكسية المغنطة
Diamagnetic material	مادة عكسية المغنطة
Diapiric feature	معلم انبثاقي
Differential Global Positioning System	نظام تعيين المواقع التفاضلي
Dike	جدار قاطع
Dip	ميل
Dipole	ثنائي قطب
Dipole field	حقل ثنائي القطب
Direction	اتجاه
Diurnal corrections	تصحيات يومية

Diurnal variations

تغيرات يومية

Doppler method

طريقة دوبلر

Downward continuation method

طريقة التتابع نحو الأسفل

- E -

Eddies

دوامات

Electrical

كهربائي

Electrical resistivity log

سجل المقاومة الكهربائية

Electrical method

الطريقة الكهربائية

Electromagnetic

كهرومغناطيسي

Electromagnetic method

الطريقة الكهرومغناطيسية

Elevation correction

تصحيح الارتفاع

Environmental magnetism

المغناطيسية البيئية

Error curve method

طريقة منحنى الخطأ

Exited level

مستوى التهيج أو الإثارة

- F -

Ferrite

فيريت (خام حديدي مغناطيسي)

Ferromagnetic

حديدية المغنطة

Ferromagnetic material

مادة حديدية المغنطة

Field lines

خطوط الحقل

Flux

تدفق

Fluxgate magnetometer

مقياس التدفق المغناطيسي

Force field

حقل القوة

Fourier's series

سلسلة فورييه

- G -

Gamma

غاما

Gauss

غاوص

Geomagnetic field
Geomagnetic field reversal
Glacial varves
Global Positioning System
Goethite
Gravitational
Gravitational method
Gravitational potential
Ground based transmitter
Ground penetrating radar
Gyromagnetic ratio

حقل مغنطيسي أرضي
إنقلاب الحقل المغنطيسي الأرضي
رسوبيات جليدية
نظام تعيين المواقع
غوثيت
جاذبي
الطريقة الجاذبية
كمون جاذبي
جهاز إرسال أرضي
رادار ثاقب أرضي
نسبة جيرومغنطيسية

- H -

Hacmatite
Half width
Half width rule
Hannel rule
Horizontal
Horizontal gradient
Hotchison method
Hyperbola
Hysteresis loop

هيماتيت
نصف عرض الشواذ
طريقة نصف عرض الشواذ
طريقة هانيل
أفقي
تدرج أفقي
طريقة هوتشيسون
قطع زائد
أنشطة البطء المغنطيسي

- I -

Ilmenite
Ilmeno-rutile
Inclination
Inclination error

إلمينيت
المينوروتيل
ميل
خطأ الميل

Induced magnetization	مغنطة متحرضة
Inflection point	نقطة انعطاف
Interference filter	مصفاة تداخلية
International Geomagnetic Reference Field	الحقل المغنطيسي الأرضي المرجع
International System	النظام الدولي
Intrabasement	منخفضات الركيزة
Ionosphere	الغلاف المتأين
Isoclinic map	خريطة تساوي الميل المغنطيسي
Isogonic map	خريطة تساوي الانحراف المغنطيسي
Isothermal remnant magnetization	مغنطة متبقية متساوية الحرارة
Intensity of magnetization	شدة المغنطة

- K -

Knife edge	حد السكين
------------	-----------

- L -

Laplace equation	معادلة لابلاس
Larmor precession	حركة لارمور الترنحية
Larmor precession frequency	تردد تجاوب لارمور
Least square method	طريقة مربع الخطأ الأصغري
Lepidocrocite	ليبيدوغروسيت
Line of dipoles	خط من ثنائيات الأقطاب
Line of force	خط قوة
Line of poles	خط من الأقطاب
Line of sight	خط نظر
Locus	محل هندسي
Lodestone	حجر المغنطيس
Long wave radio frequency	تردد راديوي طويل الموجة

- M -

Maghemite	ماغيميت
Magnetic	مغناطيسي
Magnetic anomaly	شواذ مغناطيسية
Magnetic anomaly curves	منحنيات الشواذ المغناطيسية
Magnetic contour map	خريطة خطوط تساوي المغناطيسية
Magnetic data	معطيات مغناطيسية
Magnetic data interpretation	تفسير المعطيات المغناطيسية
Magnetic declination	انحراف مغناطيسي
Magnetic dipole	ثنائي قطب مغناطيسي
Magnetic field	حقل مغناطيسي
Magnetic force	قوة مغناطيسية
Magnetic gradiometer	مقياس تدرج مغناطيسي
Magnetic inclination	ميل مغناطيسي
Magnetic induction	تحريض مغناطيسي
Magnetic method	الطريقة المغناطيسية
Magnetic moment	عزم مغناطيسي
Magnetic noise	تشويش مغناطيسي
Magnetic observatory	مرصد مغناطيسي
Magnetic permeability	نفوذية مغناطيسية
Magnetic polarization	استقطاب مغناطيسي
Magnetic pole	قطب مغناطيسي
Magnetic storm	عاصفة مغناطيسية
Magnetic survey	مسح مغناطيسي
Magnetic susceptibility	متأثرية مغناطيسية

Magnetic susceptibility log

سجل المتأثرية المغنطيسية

Magnetite

مغنيتيت

Magnetite percentage

النسبة المئوية للمغنيتيت

Magnetometer

مقياس مغنطيسية

Magnitude

قدرة

Marine magnetic survey

مسح مغنطيسي بحري

Master curve

منحني نموذجي

Metastable Helium

هليوم شبه مستقر

Microwaves

أمواج ميكروية

Mu-Metal

ميوميتال (سبكة عالية النفوذية المغنطيسية)

- N -

NanoTesla

نانوتسلا

Natural remnant magnetization

مغنطة متبقية طبيعية

Naudy method

طريقة نودي

Noise level

مستوى التشويش

Non-dipole field

حقل لا ثنائي القطب

Normal corrections

تصحیحات نظامية

Normal level

مستوى نظامي

Nuclear magnetic resonance

تجاوب نووي مغنطيسي

Nuclear precession magnetometer

مقياس الترنج النووي المغنطيسي

- O -

Obsidian

أوبسيديان

Oceanic ridge

عرف محيطي

Oersted

أورستد

Optical pumping

ضخ بصري

Optical pumping magnetometer

مقياس الضخ البصري

Optical range

مجال بصري

Optically pumped vapor magnetometer

مقياس الضخ البصري

Oscillator

مردد

- P -

Palaeomagnetism^١

مغناطيسية قديمة

Paramagnetic

طرديّة المغنطة

Paramagnetic material

مادة طردية المغنطة

Permalloy

بيرمالوي (سبيكة عالية النفوذية المغناطيسية)

Permeability

نفوذية

Phase-comparison meter

عداد مقارنة الطور

Photo cell

خلية ضوئية

Pickup coil

وشية لاقطة

Piezo-remnant magnetization

مغنطة متبقية ضغطية

Pitch

تغريق

Planck's constant

ثابت بلانك

Planck's relation

علاقة بلانك

Plate tectonics

تكتونيك الصفائح

Plunge

تغريق

Poisson's relation

علاقة بواسون

Polarization

استقطاب

Polarizing coil

وشية مقطبة

Pole

قطب

Post-depositional remnant magnetization

مغنطة متبقية بعد الترسيب

Potential field

حقل كمون

Primary magnetization

مغنطة أولية

Profile

مسار، خط قياس، منحنى

Profile smoothing
Pseudobrookite
Pyrrhotite
Pyrite

صقل المنحني
بسيڊوبروكيت
بيروتيت
بيريت

- Q -

Qualitative interpretation
Quantitative interpretation
Quantum

تفسير كيفي
تفسير كمي
كم (كوانتوم ضوئي)

- R -

Radar method
Radio-frequency method
Radio Detection and Ranging
Radio waves
Radioactivity
Radioactivity method
Reduction to the pole method
Relative γ -ray intensity log
Residual magnetization
Root mean square
Rubidium

طريقة الرادار
طريقة التردد الراديوي
التقاط راديوي وتحديد مجال
أمواج راديو
إشعاعية
الطريقة الإشعاعية
طريقة الإرجاع إلى القطب
سجل شدة إشعاع غاما النسبي
مغنطة متبقية
جذر متوسط المربعات
عنصر الربيديوم

- S -

Salt dome
Satellite Based Augmentaion System
Satellite navigation method
Saturation
Scarp

قبة ملحبة
منظومة الزيادة القائمة على الأقمار الصناعية
طريقة الأقمار الصناعية
إشباع
منحدر شديد

Schmidt horizontal balance	مقياس شميت للمركبة الأفقية
Schmidt magnetometer	مقياس شميت
Schmidt vertical balance	مقياس شميت للمركبة الشاقولية
Sea floor Spreading	تمدد قاع البحر
Second derivative method	طريقة المشتق الثاني
Secondary magnetization	مغطة ثانوية
Secular variations	تغيرات قرنية
Seismic	سيسي
Seismic method	الطريقة السيسمية
Self-excited dynamo	مولد ذاتي التحريض
Self-reversed remnant magnetization	مغطة متبقية ذاتية الانعكاس
Sensor	حساس
Shock remnant magnetization	مغطة متبقية صدمية
Shoran method	طريقة شوران
Short Range Navigation	ملاحة قصيرة المدى
Slate	سليت
Slop distance rule	طريقة مستقيم الميل
Slop method	طريقة الميل
Solar diurnal variations	تغيرات يومية شمسية
Solid angle	زاوية مجسمة
Spin	عزم دوراني
Spin angular momentum	زخم دوراني
Split	فصم
Spontaneous potential	كمون ذاتي
Strength	قوة
Strike	اتجاه

Strike length	طول الاتجاه
Sun spots	بقع شمسية
Superparamagnetic	مغناطيسية طردية فائقة
Suprabasement	بروزات الركيزة
Susceptibility	متأثرية
System Internationale	النظام الدولي للوحدات

- T -

Terms of spherical harmonics	حدود توافقية كروية
Terrain correction	تصحيح الطبوغرافيا
Tesla	تسلا
Thalen rule	طريقة تالين
Thermal	حراري
Thermal method	الطريقة الحرارية
Thermal relaxation time	زمن الاسترخاء الحراري
Thermo-remnant magnetization	مغطة متبقية حرارية
Thin bed	سرب رقيق
Tiburg rule	طريقة تيبورغ
Titanomagnetite	تيتانومغنيتيت
Titonohaematite	تيتانوهيماتيت
Top	بلبل (خزروف)
Torsion fiber	خيط فتل
Torsion fiber magnetometer	مقياس الفتل المغناطيسي
Total field	حقل كلي
Trace element	عنصر أثر
Transponder	جهاز مرسل مستجيب
Transverse magnetization	مغطة معترضة

Trial and error method

طريقة التجريب والخطأ

Tripod

حامل ثلاثي الأرجل

Trolite

ترولايت

- U -

Ultra High Frequency

تردد فوق العالي

Ulvospinel

إلفوسبينيل

United States Coast Guard

خفر السواحل الأمريكية

Universal gravitational constant

ثابت الجاذبية العالمي

Upward continuation method

طريقة التتابع نحو الأعلى

- V -

Vector measurements

قياسات شعاعية

Vertical gradient

تدرج شاقولي

Very High Frequency

تردد عالي جداً

Viscous remnant magnetization

مغطة متبقية لزجة

Visible range

مجال مرئي

Voltmeter

مقياس فولط

- W -

Wave number

عدد موجي

Width

عرض

Weighed mean

متوسط موزون

Well logging

سبر بئر

Werner method

طريقة ورنر

- Z -

Zero level

مستوى الصفر

اللجنة العلمية:

الأستاذ الدكتور سليمان رماح
الأستاذ الدكتور نديم أحمد
الأستاذ المساعد الدكتور رعدان المؤيد العظم

المدقق اللغوي:

الدكتورة سامة حباس

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات

جامعة دمشق
Damascus University

