

# Magnetometria – metodă de investigare folosită în arheologie

Ovidiu Păraușanu  
oparausanu@yahoo.com

## 1. Introducere

Metodele geofizicii au fost dezvoltate inițial în vederea studiului structurilor geologice ale subsolului, dar, în ultimii ani, sondajele geofizice au devenit din ce în ce mai importante în vederea investigării siturilor arheologice.

Investigarea magnetometrică este una dintre cele mai eficiente și moderne metode ale geofizicii aplicate în arheologie, deoarece o mare parte a materialelor arheologice pot fi depistate datorită anomaliilor magnetice pe care le creează.

În condiții favorabile, prospecțiunile magnetice sunt cele mai eficiente, rapide și absolut non-distructive metode de investigare a siturilor arheologice, iar informațiile ce pot fi obținute prin prospecțiuni magnetice sunt foarte apropiate de rezultatele relevate ulterior în urma săpăturilor arheologice.

Activitățile omului din trecut, în special folosirea focului pentru încălzit, pentru prepararea hranei, fabricarea uneltelor și a armelor, au schimbat proprietățile magnetice ale argilei, rocilor și solului, prin urmare, apar anomalii ale câmpului magnetic al pământului, detectabile cu instrumente sensibile specifice numite **magnetometre**.

Diferențele de susceptibilitate magnetică între sol, subsol și roci (solul este în mod normal mai magnetizat decât subsolul) afectează câmpul magnetic terestru local, făcând posibilă detectarea de șanțuri, gropi și a altor zone atipice solului și subsolului.

Putem concluziona că magnetometria reprezintă o tehnică pasivă a geofizicii, bazată pe răspunsuri la condițiile naturale și detecția contrastelor proprietăților magnetice apărute în diferite materiale.

## 2. Câmpul magnetic al Pământului

Câmpul magnetic al Pământului este aproximativ constant pe toată suprafața ariilor largi situate în aceeași zonă a planetei.

Cel mai simplu model este acela care consideră o mare bară magnetică situată în centrul Pământului, orientată cu polul pozitiv (+) spre Nord și înclinată sub un unghi de aproximativ  $10^\circ$  față de axa de rotație.

Liniile de câmp magnetic au forma și orientarea unui câmp generat de un magnet obișnuit, de aceeași formă (vezi fig. 1).

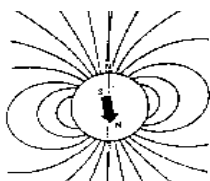


Fig. 1

Direcția liniilor de câmp magnetic este verticală la polii magnetici și orizontală la ecuatorul magnetic. Aceste amănunte sunt foarte importante pentru interpretarea anomaliilor magnetice.

**Intensitatea câmpului magnetic terestru** este de două ori mai mare în regiunile polare (aproximativ 60.000 nT), față de regiunile situate la ecuator (30.000 nT).

Atât *intensitatea câmpului magnetic terestru*, cât și *înclinarea* acesteia sunt egale pe suprafețe situate în aceeași zonă geografică.

#### **Anomaliile magnetice**

Într-un sol a cărui compoziție este uniformă, liniile de câmp magnetic terestru vor avea direcția polilor magnetici ai Pământului, iar pe suprafețe mici direcțiile acestora sunt paralele.

În cazul existenței în pământ a unei game variate de materiale, liniile câmpului magnetic terestru vor fi distorsionate. (vezi fig. 2)

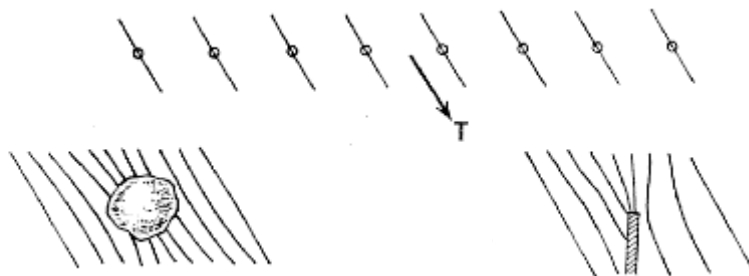


Fig. 2

Distorsiunile câmpului magnetic terestru se numesc **anomalii**.

Fierul intră în constituția scoarței terestre într-un procent de 6%. O mare parte din fier este dispersată în sol, argile și roci, sub formă de compuși chimici ai acestuia, care au un caracter magnetic foarte slab. După cum spuneam anterior, activitățile trecute ale omului au schimbat proprietățile magnetice ale solului, producând o serie de anomalii magnetice, care pot fi detectate de aparate sensibile magnetic, numite magnetometre.

Anomaliile datorate materialelor arheologice, pietrelor sau mineralelor aflate în sol, sunt datorate în principal celui mai comun material magnetic – *magnetita* – sau mineralelor înrudite cu aceasta. Toate rocile conțin într-o oarecare măsură magnetite, în concentrații mai mari sau mai mici.

Anomaliile câmpului magnetic terestru sunt cauzate de un **câmp magnetic indus** sau de un **câmp magnetic remanent**.

Apariția *câmpului magnetic indus* denotă faptul că un element se magnetizează sub influența câmpului magnetic terestru (fig. 3).

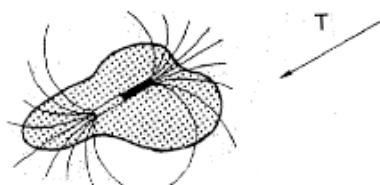


Fig. 3

*Câmpul magnetic remanent* ne arată pur și simplu existența magnetismului unui obiect, chiar și în absența câmpului magnetic terestru.

Ambele forme de magnetism sunt foarte importante în arheologie.

Magnetizarea indusă este direct proporțională cu intensitatea câmpului magnetic exterior și cu abilitatea materialului de a mări câmpul magnetic local, proprietate numită susceptibilitate magnetică (notată  $\mu$ ).

Susceptibilitatea diferitelor tipuri de roci, este redată în tabelul de mai jos, dar poate varia în funcție de situații:

Tipuri de roci	Susceptibilitate magnetică (ae $10^{-3}$ ISO)
Piroxenite, dunite, serpentinite și altele	100 – 10.000
Bazalt	100 - 1000
Granit	10 - 1000
Andezit	100
Șisturi și alte roci metamorfe	1 - 100
Majoritatea rocilor sedimentare	1 - 10
Calcar	1

Variațiile susceptibilității magnetice între sol, subsol și rocă (solul, în mod normal, prezintă un câmp magnetic mai mare decât subsolul), afectează câmpul magnetic local al pământului, făcând posibilă detectarea de șanțuri, gropi și a altor zone nămolose care au fost săpate din timpuri străvechi și apoi colmatate sau reumplute cu sol. Acestea produc un semnal magnetic pozitiv. Spre deosebire de aceste concavități, în cazul unor tipuri de zidărie, cum ar fi pereți calcaroși, se produce un semnal magnetic negativ și pot fi detectați datorită efectului de scădere a câmpului magnetic.

*Magnetizarea remanentă* este în strânsă legătură cu efectele datorate căldurii, încălzirea naturală în cazul pietrelor sau încălzirea artificială, cum este cazul chirpiciului ars, ceramicii și al altor obiecte făcute de mâna omului, găsite în siturile arheologice.

În timpul încălzirii, în particular, la temperaturi înalte, regiuni mici de material, numite domenii, tind să se alinieze mai mult sau mai puțin pe direcția câmpului magnetic contemporan arderii, apărând astfel un fenomen de polarizare magnetică ce se conservă în timp. Acest fenomen de polarizare generează un câmp magnetic semnificativ, care poate fi uneori chiar de 10 ori mai puternic decât polarizarea indusă (fig. 4).

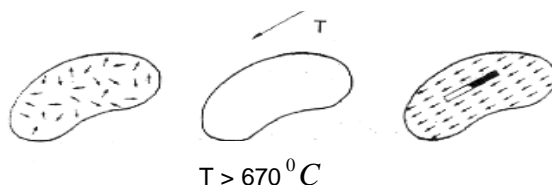


Fig. 4

Obiectele arheologice cum ar fi: cuptoare, vetre, bucăți de zgură, creuzete și altele, posedă o magnetizare destul de puternică. Dacă sunt situate încă *in situ*, este posibilă chiar datarea lor prin determinarea direcției de polarizare sau prin analiza anomaliilor magnetice.

Pentru datarea arheologică, este foarte important de știut **curba principală a variațiilor pe secole a declinării și înclinării câmpului magnetic terestru** (fig. 5).

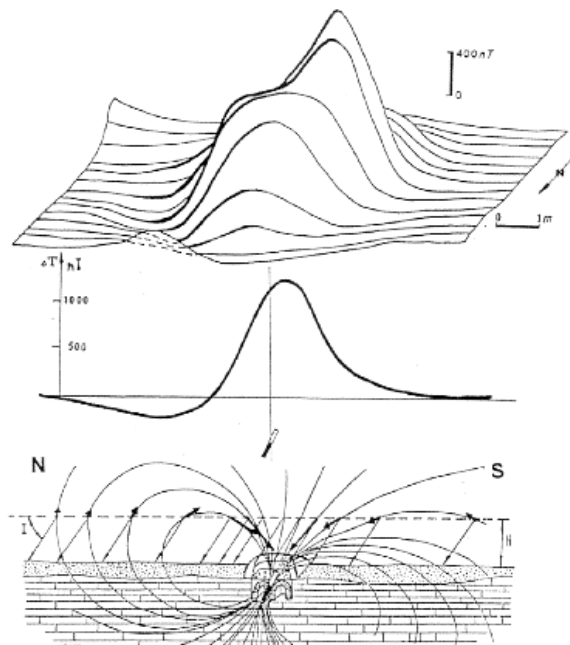


Fig. 5

Structurile arheologice tipice prezintă anomalii ale câmpului magnetic situate între valorile 1-20 nT, mai rar întâlnite, structurile arse 10 – 100 nT și foarte rar obiectele arheologice metalurgice feroase, aici incluzând și bucăți de zgură, prezintă anomalii mari, de 20 – 2000 nT. Zidurile calcaroase situate în sol pot genera anomalii negative, având valori cuprinse între 2 – 12 nT (fig. 6, fig. 7)

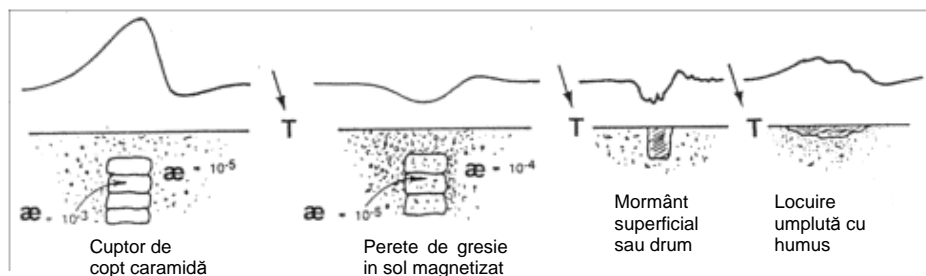


Fig. 6

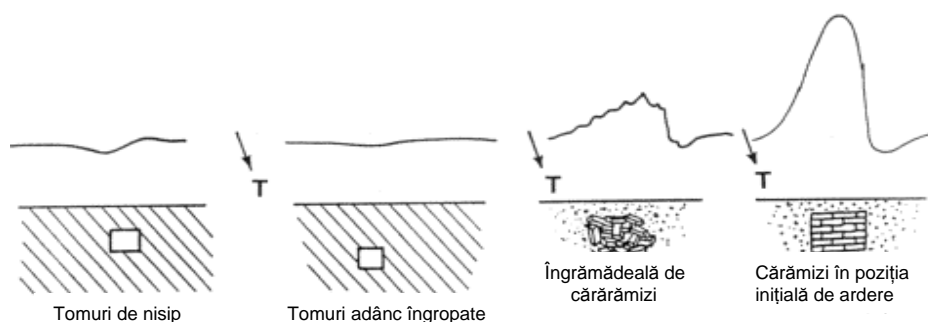


Fig. 7

Utilizând instrumente sensibile, câmpul magnetic terestru poate fi măsurat cu o mare acuratețe și mare precizie, de până la 1 nT.

Situația poate deveni însă complicată, din punct de vedere al interpretării imaginilor rezultate în urma scanării, în cazul în care pe o zonă restrânsă se găsesc laolaltă materiale care generează anomalii pozitive cât și negative (fig. 8).

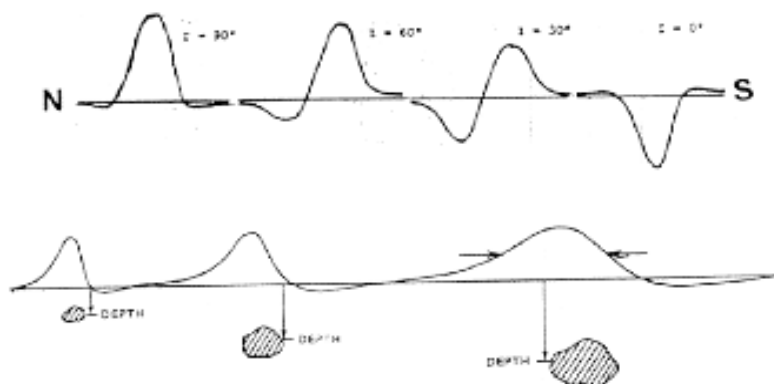


Fig. 8

Apariția anomaliilor este dată de asimetria caracteristicilor grafice înregistrate de aparat.

Dezavantajul acestei metode constă în faptul că, magnetometrele depistează numai iregularitățile câmpului magnetic terestru, iar efortul computațional aferent interpretează datele numai ca formă de anomalie. Anomaliile pot fi însă generate și de cauze naturale (roci ce conțin un procent mare de magnetită, furtuni solare, descărcări electrice în atmosferă, pungi de apă în sol, etc.), precum și din cauze artificiale (construcții, conducte, linii electrice, obiecte moderne mici de metal, etc.).

Prin urmare, anomaliile nu pot fi interpretate ca fiind materiale arheologice. Originea anomaliilor poate fi însă sugestionată sau speculată,

crescând foarte mult probabilitatea găsirii de material arheologic în urma unei escavații ulterioare măsurărilor magnetometrice.

### 3. Magnetometre

După cum am specificat anterior, magnetometrele reprezintă instrumentele de mare precizie utilizate în geofizică, în vederea explorării non-distructive a scoarței terestre. Acestea măsoară cu mare exactitate valorile câmpului magnetic al Pământului și stabilesc anomaliile de câmp care apar datorită unor cauze diverse pe anumite suprafețe de interes științific.

Au fost create de către geofizicieni, în vederea prospecțiunilor geofizice, dar, ulterior, s-a constatat că au o destul de bună aplicabilitate și în arheologie.

Acestea pot avea diferite forme și caracteristici de funcționare, fiind folosite în funcție de tipul de material arheologic ce se dorește a fi descoperit, formele de relief ale zonelor de interes arheologic și caracteristicile dielectrice ale solurilor din acele zone (fig. 9).



Fig. 9

Pentru investigații arheologice, cele mai adaptate și des folosite tipuri de magnetometru, care, după caz, se mai întâlnesc și sub denumirea de gradiometre (gradiometers) sunt magnetometrele protonice (proton magnetometer).

**3.1 Magnetometrul protonic**, este denumit astfel, deoarece utilizează ca principiu de funcționare, fenomenul de precesie a spinilor protonici (sau nuclee de hidrogen), prin imersia acestora în soluții simple de hidrocarburi (alcool, kerosen, apă, etc.), pentru a măsura intensitatea totală a câmpului magnetic.

Spinii protonici (protoni aflați în mișcare de rotație sau pe traiectorii curbilinii), formează dipoli magnetici microscopici care sunt temporar polarizați, prin aplicarea unui câmp magnetic uniform puternic, generat de curentul electric dintr-o bobină. Când curentul electric este decuplat, dipolii protonici astfel generați tind să se orienteze pe direcția câmpului magnetic terestru exterior. Reorientarea acestora produce un mic semnal electric, care este captat de aceeași bobină folosită la polarizare, frecvența acestui semnal fiind direct

proporțională cu intensitatea totală a câmpului magnetic exterior, care poate fi măsurată cu o precizie de până la 1 nT.

Magnetometrele protonice prezintă două dezavantaje:

- erorile de observare pot avea un gradient de 300 – 100 nT pentru fiecare metru măsurat;
- după terminarea fiecărei măsurători, timp de aproximativ trei secunde, este destul de lent.

**3.2 Magnetometrul de tip – OVERHAUSER** – reprezintă o variantă a magnetometrului protonic. Spre deosebire de magnetometrul protonic, acest tip de magnetometru folosește radicali liberi în imersie, iar polarizarea acestora este generată de bombardarea soluției cu impulsuri de radiofrecvență.

Se formează astfel o cuplare a dipolilor generați de spinul unui proton din lichidul solvent și spinul unui electron al radicalului liber. În acest caz, datorită creșterii foarte mari a polarizării (de 4000 – 5000 ori), cantitatea de soluție folosită trebuie să fie foarte mică. Sensibilitatea acestui aparat este de aproximativ 0,01 nT, deci implicit mai mare, acesta fiind mult mai indicat pentru a fi folosit în practică.

### **3.3 Magnetometrul pe bază de CESIUM**

Principiul de funcționare este mult mai complex decât al unui magnetometru protonic. Acesta operează la nivel atomic sau chiar nuclear al substanței. Posedă o lampă folosită pentru polarizare, care emite lumină monocromatică. Atunci când lumina monocromatică traversează un câmp magnetic printr-un material adecvat, ia naștere o interacție între spinii substanței și caracteristicile electromagnetice ale luminii. Ca material, este folosit *cesium 133*. Polarizarea circulară produsă de lumină excită electronii din atomii de cesium. Electronii se dezexcită rapid, trecând pe nivelul energetic inițial, dar sunt în permanență excitați de impulsurile luminoase. Astfel, vectorii magnetici ai atomilor, apăruiți în urma excitărilor și dezexcitărilor succesive și rapide ale electronilor acestora, se vor orienta în jurul vectorului magnetic al câmpului extern, în cazul nostru câmpul magnetic terestru, în momentul în care se ajunge la rezonanță. Rezultanta momentului magnetic al acestora va fi direct proporțională cu valoarea câmpului magnetic extern. Orice variație sesizabilă a câmpului magnetic extern va putea fi astfel pusă în evidență.

Sensibilitatea mare a acestui tip de magnetometru derivă din precizia bună a frecvențelor folosite, foarte importantă în vederea înregistrării semnalelor impulsurilor mici. Un alt avantaj îl reprezintă faptul că are o mare toleranță la înregistrare, făcând posibilă sesizarea materialelor arheologice puternic magnetizate aflate la mare adâncime.

Viteza de procesare a datelor este foarte mare, deoarece se produce practic un semnal continuu. Prezintă o bună sensibilitate, de aproximativ 0,1 nT.

## **4. Etapele investigării arheologice prin metoda magnetometrică**

- se stabilește cu exactitate zona de interes arheologic ce urmează să fie scanată;
- se stabilesc coordonatele zonei de interes arheologic cu *teodolitul* sau *tahimetrul* (Tahimetru - instrument geodezic pentru determinarea pe cale optică a distanțelor și diferențelor de nivel de pe teren);

- se parcelează zona în sectoare (de exemplu 20 m x 40 m) sau, după caz, pentru o mai bună exactitate;
- se determină coordonatele fiecărui sector în parte cu teodolitul sau tahimetrul;
- se carioază fiecare sector în parte (2 m x 20 m) în vederea scanării acestora cu magnetometrul;
- se pune magnetometrul pe zero la început (magnetometrul prezintă două benzi de înregistrare: prima bandă, care măsoară diferența relativă a câmpului magnetic extern provenit de la Soare; a doua bandă, care măsoară diferența relativă a câmpului magnetic extern generat de Pământ );
- se reglează magnetometrul, pentru a lua date în funcție de viteza de deplasare stabilită (de exemplu, pași de 0,5 m la fiecare 0,5 s) și de capacitatea de stocare a datelor (de exemplu, 30.000 de măsurători pe zi, ceea ce înseamnă o suprafață de 0,5 ha);
- se descarcă datele înregistrate de magnetometru în calculator (cel mai cunoscut program de procesare a acestor date se numește GEOPLOT);
- cu ajutorul programului informatic se procesează datele descărcate, transformându-le în cadre de imagine gri (de exemplu, fiecărui pixel de pe ecranul calculatorului îi corespunde o suprafață de 12,5 cm x 50 cm) (fig. 10);

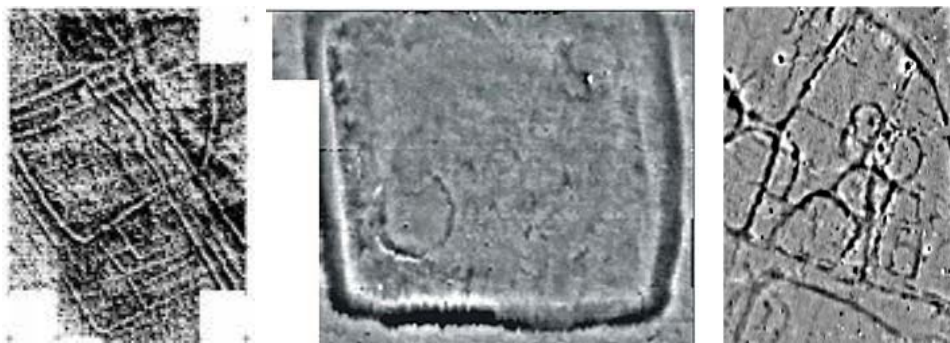


Fig. 10

- se interpretează imaginile cadrelor astfel obținute și, în funcție de intensitatea nuanței de gri, se stabilesc anomaliile care merită investigate;
- după concluzionarea anomaliilor, se stabilesc în sistemul G.I.S., pe computer, coordonatele fiecărei anomalii în parte;
- se revine în teren, unde, cu ajutorul tahimetrului sau teodolitului, se identifică coordonatele anomaliilor și se marchează locul fiecărei anomalii;
- se fac sondaje pe locul fiecărei anomalii, cu ajutorul unor burghie speciale, tubulare, care ne indică și stratigrafia solului și se stabilește care dintre anomalii merită a fi cercetate;
- se recurge la escavarea locurilor anomaliilor care prezintă interes arheologic, prin metode clasice de săpătură.



## Summary

Archaeology is the study of the extraordinary diversity of human experience and long-term human culture, through the material remains left by ancient societies and individuals, and evidence of their past environments.

Physics is about the fundamental laws of the universe that govern living as well as non-living systems. It is a fundamental science involving a deep understanding of nature derived from experimental and mathematical insights.

Lately it feels the need for new interdisciplinary programs that allow a real understanding of natural phenomena and the dynamics of interaction of physical and geological processes and applications in archeology.

This article emphasises some of fundamental physical theory, computational methods and applications in the Earth and atmospheric sciences which allow archaeological investigations to conduct more systematic and complete.

## Bibliografie

1. Lazarovici Gh., *Metode si tehnici moderne de cercetare în arheologie*, Bucureşti, 1998. Biblioteca Studii Clasice.
2. *Science In Archaeology. A Survey of Progress and Researche* (ed. D. Brothwell, E. Higgs), Thames and Hudson, Bristol, 1969.
3. Aitken, MJ, and MS Tite 1962 Proton magnetometer surveying - Paper presented at the 1965 Second Conference on Underwater Archeology, Toronto.
4. Roberto Lanza, Antonio Meloni, *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*, October 2006, Conference Hardcover.