

Contribuții la dezvoltarea tehnicilor de achiziție, prelucrare și interpretare a datelor geofizice utilizate în arheologie

Autor: Ștefan Călin Dan

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. Paul Georgescu

Structura tezei și subcapitole principale

1 INTRODUCERE

2 CERCETAREA GEOFIZICĂ ÎN ARHEOLOGIE: NECESITATE, CERINȚE, OBIECTIVE

3 STRUCTURI ARHEOLOGICE

- 3.1 Artefact. Context. Complex. Monument. Sit arheologic
- 3.2 Procese de formare a siturilor arheologice
- 3.3 Tipuri de structuri arheologice

4 ISTORICUL CERCETĂRILOR GEOFIZICE PENTRU ARHEOLOGIE

- 4.1 Dezvoltarea în timp a cercetărilor geofizice în arheologie
- 4.2 Studii geofizice în situri arheologice din România

5 METODE GEOFIZICE APLICATE ÎN ARHEOLOGIE

- 5.1 Magnetometrie
- 5.2 Electrometrie
- 5.3 Georadar
- 5.4 Metode electromagnetice de inducție
- 5.5 Alte metode

6 ACHIZIȚIA DATELOR GEOFIZICE. STRATEGII DE LUCRU ÎN TEREN

- 6.1 Măsurători în domeniul spațiu și în domeniul timp
- 6.2 Documentarea topografică a lucrărilor de teren
- 6.2 Tehnici de bază pentru achiziția datelor
- 6.3 Adaptarea procedurilor de achiziție a datelor geofizice la scara la care se desfășoară cercetarea.
- 6.4 Adaptarea procedurilor de achiziție a datelor geofizice în la specificul cercetării arheologice.
- 6.5 Aplicarea metodelor geofizice pentru situri arheologice aflate în condiții de mediu speciale

7 PRELUCRAREA DATELOR GEOFIZICE UTILIZATE ÎN ARHEOLOGIE

- 7.1 Prelucrarea interactivă a datelor cu ajutorul limbajelor de programare de nivel înalt
- 7.2 Vizualizarea datelor geofizice
- 7.3 Transformări
- 7.4 Filtrarea
- 7.5 Metode adaptive de prelucrare a datelor geofizice
- 7.6 Inversia
- 7.7 Prelucrarea datelor georadar

8 INTERPRETAREA DATELOR GEOFIZICE UTILIZATE ÎN ARHEOLOGIE

- 8.1 Interpretarea calitativă a datelor geofizice pentru arheologie
- 8.2 Interpretarea cantitativă a datelor geofizice pentru arheologie
- 8.3 Analiza sensibilității și a raportului semnal-zgomot
- 8.4 Rezoluția spațială. Limita de interpretare
- 8.5 Limitarea ambiguității
- 8.6 Integrarea seturilor de date (data fusion)

9 STRATEGII DE CERCETARE GEOFIZICĂ ÎN ARHEOLOGIE. STUDII DE CAZ

- 9.1 Detectarea structurilor arheologice. Studiul geofizic al proceselor de formare a siturilor arheologice
- 9.2 Integrarea datelor cu ajutorul Sistemelor Informatice Geografice (GIS)
- 9.3 Alegerea metodelor geofizice
- 9.4 Studii de caz

10 CONCLUZII

REFERINȚE

ANEXE

VOLUMUL II

Planșe

Cap. 1. INTRODUCERE

Structura discontinuă și eterogenă a elementelor geologice determină o diferențiere a proprietăților ce pot fi observate și înregistrate prin mijloace fizice la nivelul scoarței terestre. Evidențierea variațiilor acestor proprietăți stă la baza identificării structurii discrete a pământului cu ajutorul metodelor dezvoltate în domeniul geofizicii aplicate. Atunci când interesul cercetărilor geofizice este concentrat la nivelul superior al scoarței terestre strategiile și metodele aplicate sunt dezvoltate în domeniul particular al geofizicii de mică adâncime. Stratul superior și superficial al scoarței terestre este în fapt acela în care activitățile umane din trecut și din prezent se împletesc și lasă urme în evoluția naturală a pământului.

Obiectivele prezentei lucrări sunt acelea de a organiza într-o formă logică cunoștințele din domeniul aplicării în arheologie a conceptelor și metodelor geofizice și de a propune contribuții proprii la dezvoltarea tehnicilor de achiziție, prelucrare și interpretare a datelor specifice acestui domeniu.

Organizarea logică a cunoștințelor a fost realizată prin apel la două surse majore de cunoaștere, disponibile în literatura de specialitate: (1) contribuțiile importante care au marcat în timp progresul din acest domeniu și (2) contribuțiile recente cele mai promițătoare și care se constituie în state of the art în domeniu. Pe acest fundament ce reflectă nivelul actual de dezvoltare teoretică și practică au fost inițiate de către autor dezvoltări și optimizări ale tehnicilor de achiziție, prelucrare și interpretare a datelor geofizice în arheologie.

Demersul teoretic a fost însoțit de un intens efort de colectare de date geofizice în importante situri arheologice din România și de utilizare a acestor date pentru rezolvarea unor probleme concrete ridicate de către colectivele de cercetare din aceste situri. Seturile de date geofizice ce ilustrează tematica abordată și soluțiile propuse provin din numeroase proiecte derulate în teren în perioada 2008-2011 și acoperă o arie geografică mai vastă, din Macedonia și nordul Greciei și până la limita nordică a României. În marea lor majoritatea aceste proiecte au fost inițiate și conduse de către autor, realizarea efectivă a acestor proiecte nu ar fi fost însă posibilă fără ajutorul a numeroși colegi. Alegerea acestor studii de caz a pornit de cele mai multe ori de la probleme arheologice diverse, dar precis formulate, tematica fiind astfel temeinic ancorată în evoluțiile actuale din domeniul arheologiei.

Cap. 2. CERCETAREA GEOFIZICĂ ÎN ARHEOLOGIE: NECESITATE, CERINȚE, OBIECTIVE

Arheologia este știința despre oamenii care au trăit cândva. Obiectivul cercetării arheologice este acela de a dobândi cunoștințe despre societățile umane din trecut. Există strânse legături între arheologie, istorie și antropologie culturală.

Rolul geofizicii în arheologie

Cercetarea arheologică prin săpătură transformă arheologia într-o disciplină distructivă. Un sit arheologic excavat este în același timp sistematic distrus. Pentru a afla și înțelege ce se află mai jos trebuie să distrugi ce se află deasupra. De aceea săpătura arheologică, scumpă și cel mai adesea distructivă, nu mai reprezintă de mult singura opțiune de reconstrucție a trecutului îndepărtat. Geofizica, prin eficiența și acuratețea metodelor sale, oferă în cercetarea arheologică instrumente alternative, nedistructive și repetabile. Datorită progreselor tehnologice din ultimele decenii este acum posibilă achiziția de informații geofizice pentru suprafețe foarte mari și într-un timp scurt. Studiul geofizic al siturilor arheologice cunoaște două direcții majore de dezvoltare:

- (1) investigarea non invazivă a vestigiilor arheologice aflate în subsol și
- (2) studierea proceselor de formare și evoluție a siturilor arheologice.

În primul caz geofizica este o componentă specifică pentru etapa inițială a cercetării arheologice, orientată către diagnoză și cercetare de suprafață. În cel de-al doilea caz geofizica poate fi utilizată în toate etapele cercetării. Există multe variabile care condiționează decizia de utilizare a metodelor geofizice în arheologie în locul sau în asociere cu alte metode, influențând alegerea acestor metode și intensitatea utilizării lor. Amintim aici doar câteva:

- tipul și mărimea siturilor arheologice;
- caracteristicile petrofizice ale substratului din microzona în care sunt amplasate siturile arheologice cercetate;
- scara de investigație (microregiune, sit, detaliu);
- adâncimea de investigație;
- rezoluția necesară;
- eficiența economică a cercetărilor geofizice.

Utilizarea judicioasă a tehnicilor geofizice în arheologie este necesară și benefică, cunoscându-se faptul că aceste tehnici:

- preced și orientează excavațiile arheologice (scumpe și de durată);
- înlocuiesc în anumite situații săpăturile arheologice;
- sunt nedistructive și repetabile;
- contribuie semnificativ la acumularea de cunoștințe pentru un domeniu particular al cunoașterii ce investighează relația dintre comunitățile umane din trecut și mediul ambiant (Landscape Archaeology).

Cap. 3. STRUCTURI ARHEOLOGICE

Terminologie

Arheologii obișnuiesc să denumească obiectele sau operele de artă ce au fost create de către om **artefacte**. Etimologia termenului este latină (*arte factum* – făcut prin artă). În științele

exacte însă acest termen desemnează o eroare (de obicei vizuală) creată prin metoda sau echipamentul utilizate în prelucrarea unor date. Dat fiind această dihotomie, în prezenta lucrare termenul va fi evitat; vom folosi în loc sintagma *obiecte de interes arheologic*.

Contextul arheologic este locul și cadrul în care dovezile materiale despre activitățile umane din trecut apar. Săparea unui mormânt este un context distinct, în timp ce depunerea defunctului și a inventarului funerar și, în fine, sigilarea (acoperirea cu pământ a mormântului) pot fi considerată contexte distincte. Din punct de vedere arheologic contextul este deci o situație ce poate fi identificată stratigrafic, rezultată în urma uneia sau mai multor acțiuni naturale ori activități antropice concrete, ce nu poate fi divizată în subdiviziuni mai mici.

Ansamblul format dintr-unul sau mai multe contexte arheologice ce au caracteristici comune și ocupă poziții adiacente în spațiu este denumit **complex arheologic** (în engleză – *feature*).

Monumentele pot fi considerate, într-o definiție largă, realizări ale oamenilor ce se detașează prin valoarea lor artistică și/sau tehnică și care cumulează totodată și o valoare simbolică (socială, istorică, memorială, etc.)¹.

Siturile arheologice sunt locuri în care se păstrează urme ale prezenței și activităților umane din trecut. Siturile arheologice pot fi considerate opere complexe la realizarea cărora au contribuit atât comunitățile umane cât și natura. Delimitarea unui sit arheologic este dificilă fiind acceptate de obicei limite topografice stabilite convențional.

Există o anumită variabilitate a utilizării termenilor mai sus definiți. De exemplu, un mormânt poate fi considerat un complex arheologic dar și un monument. Un tumul poate fi considerat în același timp și monument dar și sit arheologic (în cazul în care ne referim la un tumul izolat).

Procese de formare a siturilor arheologice

Seturile de date, inclusiv geofizice, colectate într-un sit arheologic nu reflectă obiecte și structuri arheologice funcționale. Cel mai adesea parametrii geofizici mășurați sunt influențați de structuri degradate. De exemplu, un mormânt de curând construit poate produce un puternic contrast al mărimilor geofizice, în timp ce un mormânt din neolitic ar putea să rămână nedetectabil. Este de aceea necesară o evaluare a acelor procese ce determină nașterea și evoluția unui sit arheologic:

- condiții naturale ce oferă matricea sitului arheologic;
- procese depoziționale:

¹ Există, bineînțeles, și monumente naturale dar nu ne vom referi la acestea în prezenta lucrare.

- naturale - sunt cele ce caracterizează evoluția naturală a microzonei sitului arheologic, independent de activitatea umană; studiul acestor procese intră în mod tradițional în sfera de preocupări a sedimentologiei;
- antropice - sunt în general contemporane perioadei de funcționare a siturilor arheologice; acestea rezultă din acțiuni concrete ale agenților umani (depozitarea resturilor menajere, redistribuții de materiale, nivelări, etc.);
- degradarea și colapsul structurilor arheologice:
 - în timpul funcționării sitului și structurilor arheologice;
 - în perioada imediat următoare abandonului unui sit, sau a unui sector dintr-un sit - aceasta este etapa în care au loc procese accelerate de degradare a structurilor urmate de reducerea volumului prin colaps;
- procese post-depoziționale – transformări ale obiectelor și structurilor, ulterioare perioadei de funcționare a acestora; în această etapă procesele de degradare și colaps continuă, dar cu o intensitate mai mică; în paralel, există o activitate de transport și relocare a sedimentelor formate; procesele post-depoziționale pot fi graduale (degradare, îngropare sub sedimente, transport eolian) sau rapide (prăbușiri, catastrofe, antrenări); cauzele acestor procese pot fi naturale sau antropice (intervenții, poluare etc.).

Categoriile de structuri arheologice

- construcții cu zid de piatră și/sau cărămidă;
- locuințe;
- gropi;
- fortificații preistorice;
- fortificații antice și medievale;
- instalații de foc (vetre, cuptoare);
- morminte (plane);
- tumuli; morminte în tumuli.

Cap. 4. ISTORICUL CERCETĂRILOR GEOFIZICE PENTRU ARHEOLOGIE

Primele aplicații geofizice în arheologie au fost făcute încă din anii 1946, odată cu experimentele de măsurare a rezistivității solului întreprinse de către Dr. Roger Atkinson în situl neolitic Big Rings din Anglia. În prezent prospecțiunile geofizice însoțesc cea mai mare parte dintre proiectele de cercetare din arheologia vest-europeană.

Dezvoltarea în timp a cercetărilor geofizice în arheologie

Metodele și tehnicile geofizice utilizate pentru detectarea și caracterizarea vestigiilor și siturilor arheologice nu sunt noi, ele sunt mai degrabă metode dezvoltate pentru alte domenii, a căror aplicare în arheologie cunoaște aspecte tehnice particulare. Această adaptare și rafinare a tehnicilor geofizice cunoaște acum un istoric considerabil.

În 1893 August Pitt Rivers raportează descoperirea șanțului unei fortificații în Anglia la Handley Down, Dorset. Descoperirea a fost posibilă prin observarea variației sunetului produs de un vârf metalic lovit cu un ciocan (Clark 1997). Cu toate că acest experiment a fost realizat fără echipamente speciale putem remarca acest debut al unei tehnici de detectare a vestigiilor arheologie bazat pe principii geofizice (în acest caz, propagarea undelor elastice).

În 1929, chimistul suedez Olof Arrhenius pune la punct metode geochimice de detectare a activității umane în subsol (Arrhenius 1931). Aceste metode sunt folosite și în prezent în arheologie dar răspândirea lor este limitată.

Primele încercări electrometrice sunt cunoscute încă din anii 1930 la Williamsburgh, dar rezultatele obținute au fost departe de a fi impresionante (Bevan 2000). Măsurătorile de rezistivitate electrică din 1946 de la Dorchester-on-Thames conduse de către Richard Atkinson (1953) au permis detectarea unor șanțuri săpate în terasa râului și umplute cu sediment. Echipamentul utilizat a fost un Megger la care a fost adăugat un sistem de comutare a electrozilor.

Utilizarea metodelor magnetice în arheologie a debutat odată cu prospecțiunile pe care Martin Aitken le-a inițiat în Marea Britanie (Aitken 1961). În 1964 Beth Ralph utilizează pentru prima dată un magnetometru cu pompaj optic cu rubidiu într-o campanie de cercetări în orașul antic grecesc Sybaris (Italia). În același an John Aldred descrie și construiește un gradiometru *fluxgate* ce va fi utilizat în arheologie. Sensorii au fost montați la o distanță de 1.22 m (4 ft). Un al treilea detector a fost montat la 0.30 m de detectorul inferior (această direcție utilă nu a fost continuată).

În deceniul 1970 cercetarea geofizică devine o componentă importantă a dezvoltării noii arheologii² în Marea Britanie și, cu o întârziere de aproape un deceniu, în SUA.

Prima utilizare a metodei GeoRadar în arheologie este, probabil, cea condusă de către Roger Vickers, în 1974, în Hongo Pavi – Chaco Canyon National Monument în New Mexico. După 1990, prospecțiunile geofizice prin metoda georadar se vor generaliza în arheologia Nord Americană în timp ce în Europa, unde s-au folosit în mod tradițional metode magnetice și electrice, prospecțiunile prin această metodă se vor răspândi doar după anii 2000.

Studii geofizice în situri arheologice în România

Evaluare generală a stadiului cercetărilor geofizice în arheologia românească este necesară pentru a stabili experiența obținută de către alți cercetători în mediul natural și cultural-

² *New Archaeology*, cunoscut și prin termenul *arheologie procesuală*, curent de gândire ce a apărut în urma unei celebre analize a lui Lewis R. Binford (Binford 1962), document programatic ce inițiază studiul proceselor arheologice prin recurs la metode de studiu din domeniul științelor exacte. În ultimele decenii această abordare pozitivistă se confruntă cu opoziția unui curent de gândire "post-procesualist", reflex al criticii postmoderniste în arheologie.

istoric specific din România, experiență ce poate fi extrapolată cu mici corecții la o scară regională ce cuprinde Nordul Peninsulei Balcanice, Europa Centrală și Europa de Sud-est.

În prezent prospecțiunile geofizice însoțesc cea mai mare parte dintre proiectele de cercetare din arheologia vest-europeană. Acest lucru nu este însă valabil și pentru România. În Anglia au fost publicate până acum mai mult de 10 000 de rapoarte de prospecțiune geofizică pentru arheologie, iar la nivelul anului 2001, numărul acestora depășea 550 pe an. Din nefericire, proiectele de cercetare arheologică din România ce au făcut apel la prospecțiuni geofizice nu sunt mai numeroase de câteva zeci, în cele mai multe dintre acestea fiind vorba doar despre încercări preliminare. Într-un studiu realizat de către autor în anul 2009 dedicat inventarierii a 36 de proiecte de cercetare geofizică în situri arheologice din România a fost posibilă evidențierea principalelor caracteristici ale fenomenului cercetării arheologice românești prin metode geofizice.

Cap. 5. METODE GEOFIZICE APLICATE ÎN ARHEOLOGIE

În acest capitol sunt analizate metodele geofizice ce își găsesc cea mai largă aplicare în arheologie, metode utilizate și de autor în studiile de caz prezentate, cu o specială privire asupra formelor particulare de utilizare a acestora în arheologie.

Metodele geofizice utilizate pentru studierea vestigiilor arheologice nu au fost special dezvoltate pentru acest domeniu. Acestea sunt mai degrabă comune și altor sfere de interes, în special din domeniul geofizicii de mică adâncime. Pentru a fi utile în arheologie, metodele geofizice au suferit numeroase optimizări și adaptări la specificul cercetării arheologice și la obiectivele acestora atât în ceea ce privește tehnicile, cât și echipamentele geofizice disponibile.

Din punct de vedere al modului de interacțiune cu mediul, metodele geofizice pot fi clasificate în *active* – bazate pe emisia unui semnal sau a unui câmp și măsurarea unui semnal de răspuns ce reflectă interacțiunea mediului studiat cu semnalul primar sau *pasive* – bazate pe înregistrarea unor proprietăți geofizice (mărimi fizice) ce se manifestă în punctul de măsură atât în prezența, cât și în absența echipamentului de măsură.

O serie de proprietăți fizice specifice rocilor și mineralelor stau la baza aplicării metodelor geofizice în arheologie dar și în alte domenii. Evidențierea variației spațiale a mărimilor geofizice constituie doar un prim pas în studiul structurilor și obiectelor arheologice. În general, interesul nostru este de a pune în evidență, variații ale acelor proprietăți fizice ce pot să descrie într-o mai mare măsură vestigiile arheologice. Este rezonabil să considerăm că datele geofizice sunt rezultatul unor conjuncturi determinate de valorile mai multor proprietăți fizice ale mediilor studiate. De exemplu, diferența de rezistivitate electrică ce individualizează umplutura unui complex arheologic adâncit față de matricea solului este determinată de mai mulți parametri: natura și concentrația componentelor mineralogici solizi, configurația geometrică a porilor, particularitățile texturale și structurale, gradul de umplere cu electrolit a porilor, compoziția chimică și concentrația electrolitului, temperatura, presiunea (Georgescu 1982).

5.1 MAGNETOMETRIE

La fel ca și în alte domenii, utilizarea în arheologie a magnetometriei se bazează pe observarea variațiilor de intensitate a câmpului magnetic terestru datorate *magnetizării* diferențiate a ruinelor vestigiilor arheologice, în special a acelor care conțin fier sau oxizi de fier. Aceste fenomene de magnetizare diferențiată, percepute ca *anomalii* în câmpul magnetic terestru, sunt produse la rândul lor atât de variații ale *susceptibilității magnetice* dar și de fenomene din trecut ce au determinat o *remanență* a stării de magnetizare.

Configurații de măsură și soluții constructive instrumentale utilizate în arheologie

Încă de la începutul utilizării lor în arheologie, magnetometrele au fost folosite atât în configurație clasică: instrument mobil + o stație de bază, necesară pentru eliminarea variațiilor diurne ale câmpului geomagnetic, cât și în configurație diferențială (*gradiometru*): doi senzori între care există o anumită separație verticală.

Configurația de gradiometru asigură fie măsurarea directă a gradientului vertical al câmpului total sau a componentei verticale a acestuia fie calcularea acestor valori (prin diferență). Printre primii susținători ai utilizării gradiometrelor în arheologie au fost Irwin Scholar, încă din 1960 (Clark 1997) și J.C. Aldred pentru gradiometre *fluxgate* (Allred 1964). Irwin Scholar a fost de altfel unul dintre autorii care au sistematizat principalele tehnici de prelucrare computerizată a datelor de gradient magnetic pentru arheologie (Scollar, Weidner, and Segeth 1986). În general se consideră că largă utilizare a tehnicii de măsură a gradientului vertical în arheologie are următoarele avantaje:

- a) elimină necesitatea raportării la o stație de referință pentru extragerea variațiilor diurne ale câmpului geomagnetic din datele înregistrate în teren;
- b) răspuns foarte bun la domeniul de adâncimi la care se găsesc cele mai multe vestigii arheologice, concomitent cu eliminarea perturbațiilor magnetice de natură geologică ce își au originea la adâncimi mai mari;
- c) viteza de măsură foarte ridicată a gradiometrelor *fluxgate*, ce asigură un flux cvasicontinuu de date și, în consecință, randament foarte mare de lucru în teren (~ 1 Ha/zi la o densitate foarte mare, în condiții favorabile de teren).

Cu toate acestea este evident că practica utilizării aproape exclusive a măsurătorilor de gradient magnetic vertical în arheologie, în special atunci când aceasta este singura opțiune instrumentală, sacrifică mult din calitatea datelor în favoarea randamentului de achiziție. La o analiză mai atentă devine evident că predominanța metodei de măsurare a gradientului magnetic vertical în arheologie are la bază motive ce provin din tradiția anilor 1960. În plus, furnizorii principali de gradiometre adaptate pentru arheologie (în special prin implementarea unui *firmware* special conceput pentru lucrul pe situri arheologice) folosesc tehnica substrației semnalului de la cei doi senzori *fluxgate* înainte de conversia analog digitală, înregistrând direct valoarea gradientului magnetic vertical. Această abordare, care își are rădăcini în nivelul de dezvoltare a electronicii anilor 1980, simplifică complexitatea circuitelor electronice și mărește

sensibilitatea instrumentului. Din nefericire, prin această simplificare instrumentală sunt limitate dramatic opțiunile de interpretare a datelor.

În prezent, considerentele tehnice din trecut nu mai sunt valabile. Noua generație de magnetometre cu pompaj optic permite cicluri de măsură foarte scurte (de ex. magnetometrele cu cesiu Geometrics G-858 pot realiza 10 cicluri de măsură pe secunda). În plus, în configurație de gradiometru este disponibil semnalul de câmp total de la fiecare dintre senzori. Adăugăm la aceasta și flexibilitatea de a modifica separația verticală a senzorilor sau de a executa măsurătorile doar cu un senzor (cu sau fără stație de bază). În cazul în care este aleasă formula utilizării unui singur senzor pentru măsurarea câmpului total, gradientul vertical dar și oricare dintre celelalte componente ale câmpului magnetic și derivatele acestora pot fi obținute prin calcul. Într-unul din puținele studii comparative publicate, autorii apreciază superioritatea măsurării câmpului total față de gradientul vertical al acestui câmp pentru studii magnetometrice în arheologie (Johnson, Johnson 2005).

Aplicații ale metodelor magnetice în arheologie

După cum am văzut în capitolul dedicat istoricului cercetărilor, magnetometria are de multă vreme un rol important în detectarea și caracterizarea vestigiilor arheologice. Eficiența aplicării metodelor magnetice în arheologie se bazează pe următoarele aspecte fundamentale:

1. procesele de pedogeneză conduc la acumularea în nivelul superior al solului de oxizi de fier, fiind favorizate în anumite condiții fizico-chimice transformări ale oxizilor slab magnetici (hematit, limonit) în oxizi de fier, caracterizați de o susceptibilitate magnetică mai ridicată (magnetit, goetit).
2. numeroase activități umane – agricultură, depozitare de materiale organice, evacuare de deșeuri accentuează această creștere cantitativă a proporției de oxizi de fier în solul adiacent siturilor arheologice
3. alte categorii de activități umane ce presupun utilizarea de temperaturi ridicate în instalații de foc special amenajate ori improvizate sau prin incendieri provocate ori accidentale conduc la demagnetizarea totală sau parțială a microparticulelor de oxid de fier distribuite în volumul materialelor odată cu depășirea pragului termic specific (*punctul Curie*) urmată de remagnetizarea acestor microparticule pe măsură ce temperatura scade
4. activitățile umane de amenajare și de construcție de noi structuri presupune mutarea din locul de origine a materialelor de construcție și/sau a solului către alte locații caracterizate de valori medii diferite ale proprietăților magnetice; în acest fel apar contraste magnetice ce pot fi puse în evidență prin măsurători
5. activitățile metalurgice din trecut au condus la crearea de numeroase obiecte din fier ce se regăsesc în număr mai mic sau mai mare în siturile arheologice.

După cum se observă, în aproape toate situațiile contrastele magnetice ce pot fi identificate geofizic au drept cauză primară concentrația variabilă a particulelor de fier sau de

oxid de fier în cuprinsul siturilor arheologice. Pentru un studiu detaliat asupra oxizilor de fier poate fi consultată lucrarea lui U. Schwertman și R.M. Cornell (2000). O evaluare a rolului oxizilor de fier în procesul de pedogeneză poate fi consultată lucrarea lui R.M. Cornell și U. Schwertman (2003).

Alte informații referitoare la stadiul aplicării magnetometriei în arheologie pot fi consultate în (Smekalova, Voss, Smekalov 2008; Aspinall, Gaffney, Schmidt 2008).

5.2 ELECTROMETRIE

O gamă largă de tehnici și procedee de investigare a subsolului sunt reunite în domeniul vast de cercetare și aplicare al *prospecțiunilor electrice* (sau *electrometrie*). Toate acestea abordări au în comun studiul proprietăților și structurii subsolului pe baza măsurătorilor electrice și electromagnetice efectuate asupra mediului cercetat. Metodele, dezvoltate prin intense cercetări încă de la începutul secolului XX, sunt atât pasive dar mai ales active.

Cele mai frecvente aplicații ale metodelor electrice în arheologie au avut în general în vedere determinarea distribuției de rezistivitate în subsol, ca principal mijloc de caracterizare structurală a siturilor arheologice. *Rezistivitatea electrică* este o caracteristică de material ce descrie capacitatea acestuia de a se opune trecerii curentului electric. Variația capacității de a reține fluide, determinată la rândul ei de particularitățile mineralogice, texturale și structurale ale sedimentelor ce compun siturile arheologice, stau la baza aplicării electrometriei în arheologie.

Și în acest caz este necesară o permanentă adaptare și rafinare a tehnicilor de lucru, echipamentelor și a tehnicilor de prelucrare și de interpretare dezvoltate în alte domenii de aplicare ale electrometriei la obiectivele cercetării și specificul siturilor arheologice.

Instrumente de măsură specifice cercetării geofizice în arheologie

Evoluția în timp a instrumentelor de măsură prin metode galvanice a rezistivității a fost favorizată de apariția semiconductoarelor, a circuitelor integrate și a *microcontroller*-elor. Instrumentele utilizate în arheologie sunt în general de putere mică și medie. Tensiunile maxime standard de ieșire sunt 36 V sau 48 V. Unele instrumente oferă însă și tensiunea maximă de ieșire de 100 V. Amplificatoarele diferențiale bazate pe tranzistoare cu efect de câmp asigură o rezistență internă pentru etajul de intrare al instrumentului de ordinul sutelor de megohmi. Sunt evitate în acest fel influențele instrumentale asupra mediului studiat. O cerință importantă pentru asigurarea eficienței colectării datelor din situri arheologice este asigurarea unui ciclu scurt de măsură (sub 1 s) la care mai putem adăuga rejectia semnalelor nedorite.

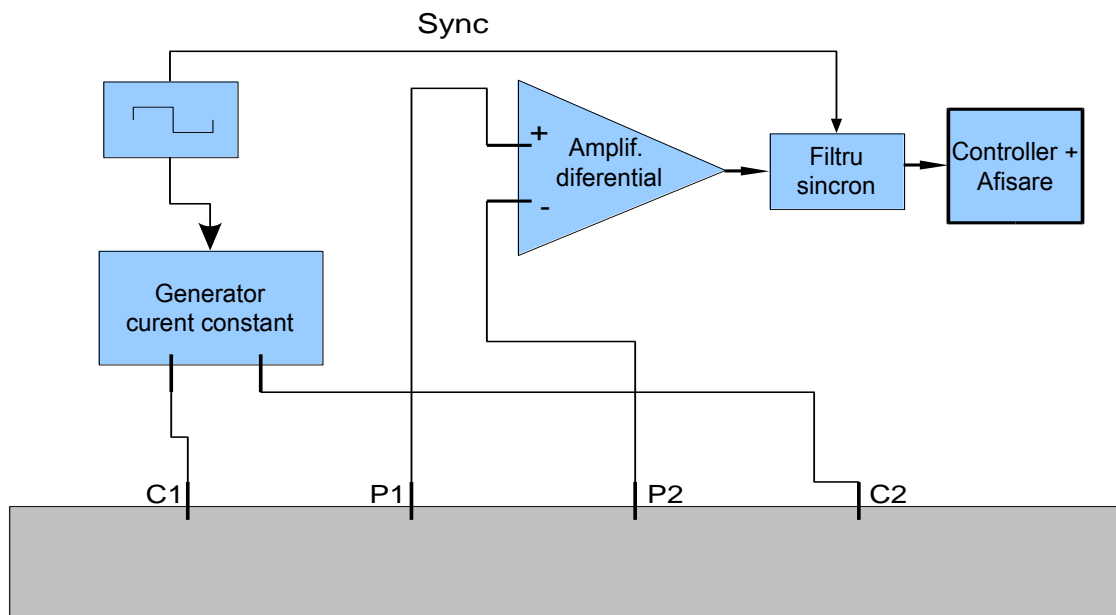


Figura 1 Schema bloc a unui instrument de măsurare a rezistivității electrice

Cu toate că metoda de măsură a rezistivității solului este considerată a fi o metodă de curent continuu trebuie menționat că încă de la primele instrumente a fost utilizat curentul alternativ (pulsatoriu) pentru alimentarea circuitului de curent, fapt care asigură schimbarea alternativă a polarității pentru evitarea polarizării electrozilor.

În Figura 1 este prezentată schema bloc a unui instrument de măsură a rezistivității electrice construit și testat cu bune rezultate de către autor. Etalonarea echipamentului construit de către autor și datele de electrometrie măsurate cu acesta au fost comparate cu cele obținute cu un echipament industrial (Metrel MI3123).

Prospectarea electrică a siturilor arheologice prin metoda profilării de rezistivitate

Achiziția datelor de electrometrie în arheologie este la adaptată la întinderea în spațiu a siturilor arheologice, la domeniul de adâncimi (cel mai adesea $0.3 \div 1.5$ m), la tipul și dimensiunile preconizate ale structurilor arheologice cercetate și, nu în ultimul rând, la condițiile concrete ce caracterizează momentul achiziției datelor.

Dispozitivul Wenner care are o largă răspândire în alte domenii de aplicare a electroemtriei nu este recomandat pentru erheologie datorită sensibilității laterale reduse și a răspunsului caracteristic ce determină apariția a 2 sau 3 maxime pentru anumite categorii de artefacte. Cel mai utilizat dispozitiv a fost special conceput pentru arheologie și este denumit *twin-electrodes*. Din punct de vedere practic este asemănător cu dispozitivul pole-pole prin faptul ca folosește 2 electrozi plasați la infinit. Dispozitivul twin este compus de fapt din două perechi de electrozi CP. Perechea C2P2 este considerată referință și este plasată în afara gridului de măsură la o distanță suficientă încât să nu schimbe semnificativ valoarea factorului geometric.

Electrozii din perechea C1P1 sunt montați pe un cadru rigid care este deplasat succesiv în toate stațiile de măsură ce compun un grid. Analiza funcționării dispozitivului *twin* relevă faptul că valoarea potențialului la electrozii P1P2 va fi în mod evidentă de proprietățile electrice locale din imediata apropiere a perechii C1P1 și, respectiv C2P2. Această din urmă pereche fiind fixă pe toata durata sesiunii de lucru rezultă că doar variațiile structurale din imediata vecinătate a perechii de măsură vor determina variații ale potențialului din setul de date. În felul acesta pot fi vizualizate variațiile de potențial din gridul măsurat așat în legătura cu structura din subsol.

În general configurația de electrozi rămâne fixă pe parcursul unei sesiuni de lucru în teren dar situații mai complexe pot să determine utilizarea unei geometrii variabile (vezi secțiunea următoare). O valoare uzuală a distanței dintre electrozi este de 0.5 m. Atunci când se folosește cadrul de măsură, sunt rare situațiile în care distanța dintre electrozi este mai mare de 1 m.

Stabilirea densității de realizare a măsurătorilor este făcută printr-un compromis între eficiență și rezoluție. O densitate uzuală este de 2 înregistrări / m în direcția de înaintare pe profil și o distanță între profile de 1 m.

Tomografia de rezistivitate electrică. Aplicații în arheologie

Ultimele două decenii au marcat o evoluție semnificativă a echipamentelor de măsurare a rezistivității electrice prin apariția instrumentelor multicanal și prin utilizarea dispozitivelor de comutare automată a electrozilor. A devenit astfel posibilă măsurarea într-un timp scurt a unei cantități foarte mari de date utilizând tehnica combinată de sondaj vertical și profilare de rezistivitate (2D sau 2.5D). Achiziția datelor electrice pentru caracterizarea 3D a subsolului este realizată prin distribuția electrozilor de măsură într-un grid orizontal. În acest din urmă caz este utilizat un algoritm complex de comutare a electrozilor. Autorul a construit și a utilizat pentru achiziția datelor de tomografie de rezistivitate electrică prezentate în lucrare un dispozitiv de comutare experimental pentru 10 electrozi urmat de un dispozitiv de comutare cu 36 de electrozi.

Interpretarea datelor se bazează pe modelarea directă și inversă descrisă prin algoritmi de inversie computerizată, 2D și 3D, dezvoltată în anii 1990 (Sasaki 1994; Loke, Barker 1996a; Loke, Barker 1996b; Yi et al. 2001).

Tomografia de rezistivitate s-a dovedit a fi în ultimii ani un puternic instrument de cercetare geofizică în arheologie (Polymenakos, Papamarinopoulos 2005; Tonkov, Loke 2006b; Astin, Eckardt, Hay 2007; Papadopoulos et al. 2010). Tomografia de rezistivitate oferă cele mai bune rezultate în studiul siturilor arheologice de complexitate medie (tumuli, fortificații, clădiri cu zid de piatră și cărămidă, etc.).

Un domeniu interesant de experimentare îl combinarea tehnicii de achiziție a datelor cu ajutorul unui cadru fix (la fel ca în practica profilării) cu tehnica de achiziție multielectrod, cadrul fiind prevăzut cu mai mulți electrozi ce vor fi comutați la fiecare stație conform unui algoritm prestabilit. Datele pot fi apoi vizualizate individual, pe *layer*-e de rezistivitate aparentă.

O posibilitate chiar mai interesantă este interpretarea datelor prin inversie, la fel ca în cazul tomografiei de rezistivitate.

5.3 GEORADAR

În ansamblul metodelor geofizice destinate aplicațiilor de mică adâncime, investigarea structurilor geologice cu ajutorul undelor electromagnetice de înaltă frecvență ocupă un loc aparte. Utilizarea undelor electromagnetice în geofizică a fost favorizată de acumularea cunoștințelor din domeniul identificării și localizării obiectelor prin tehnologia RADAR (RADAR – Radio Detection And Ranging). Această metodă a fost brevetată la începutul sec. XX de către inginerul german Christian Hülsmeier iar echipamentul descris de el purta numele de Telemobiloskop (Hülsmeier, Christian, 1904). În anii 1920 sunt efectuate primele observații asupra stratului de gheață din regiunile polare cu ajutorul undelor electromagnetice (Stern, Walter, 1929).

Tehnologia GeoRadar este una dintre cele mai complexe metode de explorare geofizică. În arheologie, GeoRadar oferă promisiunea unor rezultate de excepție, în special datorită abilității de a furniza informații despre adâncimea structurilor arheologice investigate. Ca orice altă metodă, GeoRadar nu este un panaceu universal, și de aceea este necesară o corectă apreciere a caracteristicilor geomorfologice specifice pentru fiecare sit în care metoda urmează a fi aplicată.

5.4 METODE ELECTROMAGNETICE DE INDUCȚIE

Echipamentele din această clasă își bazează funcționarea pe existența fenomenului de inducție electromagnetică. Instrumentele sunt prevăzute cu o bobină ce este alimentată de către un oscilator și un amplificator cu energie electromagnetică. Semnalul electric ce excită bobină creează un câmp electromagnetic în jur. O parte a acestui câmp, pe care îl denumim câmp primar, pătrunde în subsol și induce un curent electric alternativ care la rândul său produce un câmp electric secundar. O parte din câmpul electric secundar induce un semnal electric de mică amplitudine într-o a doua bobină a echipamentului de măsură. Semnalul indus este apoi amplificat și apoi sunt înregistrate amplitudinea și faza acestuia. Diferențele de amplitudine și fază dintre semnalul inițial și semnalul secundar recepționat sunt apoi folosite pentru a calcula parametri geofizici ai subsolului – conductivitatea electrică (în mS/m) și susceptibilitatea magnetică (în ppm).

Echipamentele electromagnetice de inducție au numeroase aplicații în arheologie, în special la nivel regional și microregional pentru detectarea siturilor arheologice și a componentelor acestora.

5.5 ALTE METODE

Pe lângă metodele mai sus expuse sunt cunoscute aplicații, mai puțin numeroase, realizate și prin alte metode geofizice. Dintre acestea, amintim aici utilizarea seismometriei în

studiul unor monumente de epocă romană (Cardarelli, Filippo 2009), aplicarea metodei seismice de refracție pentru detectarea indirectă a mormintelor în trei tumuli de mari dimensiuni din nordul Greciei (Tsokas et al 2005), dar și unele aplicații ale gravimetriei în arheologie (Fajklewicz 1976; Batayneh et al 2007).

Cap. 6. ACHIZIȚIA DATELOR GEOFIZICE. STRATEGII DE LUCRU ÎN TEREN

În cadrul acestui capitol sunt analizate tehnicile de achiziție a datelor geofizice în situri arheologice precum și factorii care condiționează buna aplicare a acestora. Sunt prezentate formule particulare de achiziție a datelor, în funcție de scara la care se desfășoară cercetarea, tipul de sit, condițiile de mediu din momentul achiziției, etc.

Achiziția datelor geofizice pentru arheologie are multe elemente comune cu achiziția datelor geofizice practică pentru alte domenii de interes. Ceea ce particularizează însă achiziția datelor geofizice pentru arheologie este densitatea ridicată a măsurătorilor precum și suprapunerea, intercalarea și lipsa de coerență a structurilor investigate. Adăugăm la aceasta adâncimea redusă la care se află aceste ținte. În general interesul arheologilor se îndreaptă către vestigiile ce se găsesc la adâncimi cuprinse între 0.3 m și 2 m.

Criteriile generale care trebuie avute în vedere pentru alegerea atât a metodei/metodelor geofizice cât și a procedurilor practice de lucru în teren sunt sintetizate mai jos:

- problematica arheologică;
- rezultatele cercetărilor anterioare (arheologice, geofizice, observații și înregistrări aeriene, studii interdisciplinare, etc.);
- tipul de relief ce caracterizează zona cercetată;
- caracteristicile petrofizice ale zonei cercetate;
- utilizarea terenului în trecut;
- utilizare terenului în prezent;
- gradul de acces la zona de interes;
- numărul de persoane ce compun echipa de lucru din teren

Documentarea topografică a lucrărilor de teren

Încă de la început trebuie arătat că oricare ar fi operațiunile executate în teren este de dorit ca acestea să fi însoțite de suport topografic calificat.

Pentru o mai bună înțelegere a semnificației seturilor de date geomagnetice și a interpretărilor propuse au fost realizate măsurători microtopografice de precizie pentru toate studiile de caz prezentate în prezenta lucrare.

Tehnici de bază pentru achiziția datelor geofizice pentru arheologie sunt: sondajul vertical, profilarea, măsurarea în suprafață realizată prin profile succesive egal distanțate și măsurarea în suprafață realizate în manieră nesistematică. Vom exemplifica în cele ce urmează

prin analiza tehnicii de măsură în suprafață prin profile succesive egal distanțate. Profilele sunt organizate printr-o rețea (grid) a cărei densitate și structură sunt atent planificate. Această organizare este convenabilă atât în cazul în care se dorește a fi acoperite doar anumite porțiuni de teren dar mai ales în cazul în care se urmărește măsurarea sistematică la nivelul unor largi suprafețe de teren.



Figura 2 Trasarea gridului de măsură pentru măsurătorile geofizice de la Moigrad - Dealul Pometului jud. Sălaj, în imediata apropiere a castrului roman Porolissum. Celulele gridului au dimensiunea de 40 x 40 m. Ruinele castrului roman sunt vizibile în partea de Sud a imaginii aeriene.

Valorile uzuale pentru mărimea celulelor gridului sunt:

- 10 x 10 m – utilizat în condiții de teren accidentat, cu schimbări frecvente ale direcției de măsură sau atunci când sunt utilizate instrumente lente de achiziție și/sau fără *data-logger* (de exemplu, magnetometru cu precizie protonică fără *data-logger*, sau echipament de măsură a susceptibilității magnetice cu instrumente de tip K-metru)
- 20 x 20 m – utilizat în general pentru profilare laterală în electrometrie
- 30 x 30 m – utilizat atât pentru profilare laterală pentru electrometrie cât și pentru magnetometrie
- 40 x 40 m – utilizat pentru profilare laterală pentru magnetometrie cu instrumente de mare randament (de ex, magnetometre sau gradiometre duale sau multisensor)

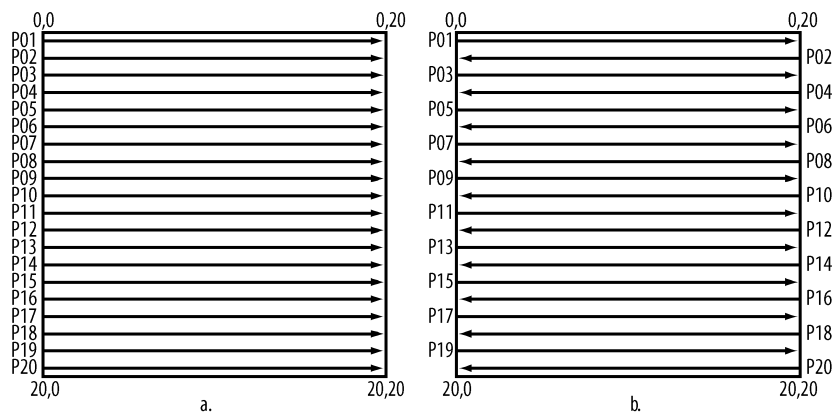


Figura 3 Procedura standard de parcurgere a unei celule de grid de 20 x 20 m; a.) Profilele de măsură sunt orientate în aceeași direcție; Profilele de măsură au direcții alternativ opuse (zig-zag)

În parcurgea unei celule de grid, în arheologie sunt uzuale următoarele convenții (Figura 3):

- direcția primei traverse poate fi oricare față de direcția Nordului geografic dar reprezentarea grafică în coordonate locale este întotdeauna cu prima traversă situată sus și de orientată de la stânga la dreapta
- consecința convenției de mai sus este amplasarea originii în colțul din dreapta sus; această este opusă convenției carteziene care reprezintă originea în stânga jos; pentru vizualizarea datelor cu ajutorul programelor ce respectă convenția carteziană (de ex. Golden Software Surfer, Oasis Montaj, etc.) este necesară aplicarea unei transformări
- profilele de măsură pot fi parcurse:
 - în aceeași direcție – datele sunt mai ușor de aliniat dar efortul în teren este mai mare
 - în direcții alternativ opuse – economisește timp și efort dar poate să producă erori de aliniere (*stagger*) și amplifică efectul de componentă continuă (*stripe*)

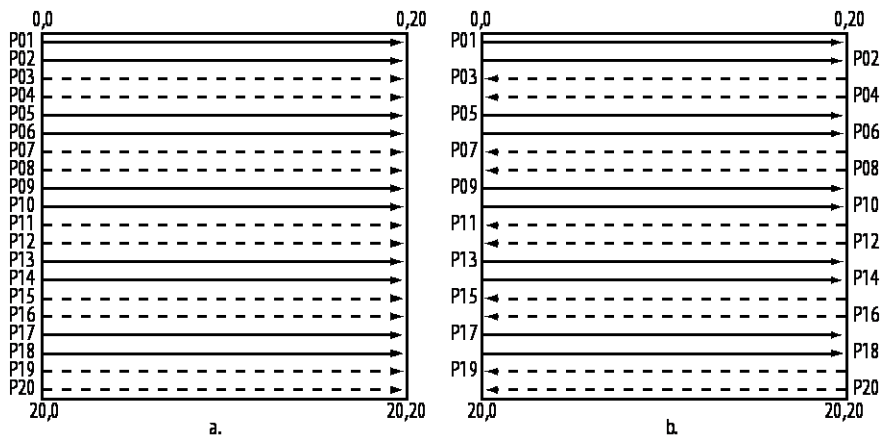


Figura 4 Procedura standard de parcurgere a unei celule de grid de 20 x 20 m pentru un instrument dual sensor.

În cazul în care se folosește un instrument dual sensor (de exemplu un gradiometru dual) atunci procedura standard rămâne aceeași dar traversele vor fi efectuate la un interval dublu față de intervalul de măsură.

Măsurătorile în suprafață pot să fie executate atât prin profile paralele ce asigură acoperirea uniformă a fiecărei celule din rețea dar și prin profile radiale al căror centru corespunde cu centrul celulei din rețea. Alegerea procedurii de măsură prin profile radiale poate să fie justificată în cazul unor anumite obiective cum sunt tumulii sau în cazul unor structuri arheologice a căror poziție este anterior cunoscută și care sunt relativ izolate față de alte vestigii arheologice.

Densitatea de înregistrare de-a lungul fiecărui profil poate să difere în funcție de metodă, de specificul sitului arheologic studiat și de condiționările economice. Aceste condiționări vor fi detaliate în următoarele subcapitole. Pentru moment este suficient să precizăm că densitatea rareorii este mai mică de 1 valoare măsurată / m și poate să ajungă până la 10 valori / m. Măsurătorile pot fi executate:

- stație cu stație – în acest caz operatorul se oprește la fiecare stație pentru a executa operațiunile de măsurare și înregistrare
- cvasicontinuu – în acest regim operatorul parcurge profilele fără pauză dar instrumentul folosit eșantionează valorile măsurată cu o densitate prestabilită; acesta este regimul de lucru cel mai des utilizat în prezent
- continuu – în acest regim operatorul parcurge profilele fără pauză, instrumentul permite un flux continuu de măsură și de înregistrare a datelor (sau la o viteză de eșantionare extrem de mare)

Cap. 7. PRELUCRAREA DATELOR GEOFIZICE UTILIZATE ÎN ARHEOLOGIE

Prelucrarea datele geofizice utilizate în arheologie este o etapă esențială în care măsurătorile din teren sunt transformate într-o manieră controlată cu ajutorul unor algoritmi matematici, riguros definiți, în scopul puneri în evidență a unor caracteristici relevante pentru interpretare și pentru diminuarea efectelor nedorite generate de zgomot, de limitele instrumentale sau de erorile de operare. Implementarea algoritmilor de transformare este realizată astăzi aproape integral prin mijloace informatice.

Prelucrarea interactivă a datelor cu ajutorul limbajelor de programare de nivel înalt

Dezvoltarea limbajelor de programare a fost delimitată în etape sau generații ce marchează prin paradigme specifice evoluția tehnologiei informatice:

1. limbaj mașină – prima generație
2. paradigma procedurală – limbaje de nivel înalt din generația a 2-a
3. paradigma obiectuală – limbaje de nivel înalt de generația a 3-a

O nouă generație de limbaje de programare încearcă să reorienteze procesul de dezvoltare de aplicații dinspre computer către utilizator.

Datele geofizice utilizate în prezenta lucrare au fost prelucrate de către autor într-unul sau în mai multe dintre mediile de dezvoltare de mai sus, în funcție de specificul datelor și a problemelor de rezolvat. Totuși, pentru a asigura unitate prezentului capitol, cele mai multe dintre exemplele ce ilustrează metodele de prelucrare a semnalului geofizic pentru arheologie vor fi discutate în baza unor secvențe de cod realizate în Matlab. Acest demers este totodată o pledoarie pentru o nouă abordare în tehnica de procesare a datelor geofizice cu aplicabilitate atât în arheologie cât și în problematica mai largă a geofizicii de mică adâncime.

Prelucrarea informatizată a datelor, singura abordare aplicabilă în geofizica modernă, devine treptat un exercițiu posibil doar prin exploatarea funcționalităților oferite de un număr restrâns de aplicații software, mai mult sau mai puțin specializate. Această tendință are certe avantaje referitoare la calitatea implementării algoritmilor de prelucrare, la eficiența și standardizarea proceselor de prelucrare. Cu toate acestea, dependența crescândă de un număr restrâns de soluții ce s-au impus ca standarde tehnice dar și comerciale aduce cu sine unele neajunsuri:

- restrângerea flexibilității
- reducerea componentei de cercetare în aplicarea proceselor de prelucrare a datelor geofizice în favoarea soluțiilor ce se impun ca standarde
- număr restrâns de opțiuni în alegerea aplicației software – în acest moment există subdomenii importante în care oferta de aplicații software este limitată. De exemplu, în prelucrarea datelor de electrometrie pentru tomografia de rezistivitate electrică (ERT) există o singură aplicație dominantă la care putem adăuga câteva soluții software ale furnizorilor de echipamente și foarte puține soluții alternative. În domeniul prelucrării datelor de electrometrie și magnetometrie prin profilare laterală, a existat timp de mai multe decenii o singură soluție software specializată pentru arheologie: GeoPlot de la Geoscan Research, urmată doar în ultimul deceniu de Archeosurveyor, aplicație software realizată de DW Consulting.
- costuri ridicate de licențiere

Numeroase exemple de implementarea a algoritmilor de prelucrare a datelor geofizice și chiar listingul complet al unei routine scrise în Matlab este prezentat în teză. Cu toate că la prima vedere un astfel de listing pare complex, pentru un cercetător care deprinde limbajul de scripting și devine familiar cu funcțiile din domeniul de interes crearea de astfel de rutine sau adaptarea unor rutine anterior create devin exerciții relativ simple. În exemplu furnizat este parcursă întreaga procedură de uniformizare a datelor de electrometrie dintr-un sector al orașului antic Maroneia din Grecia (Tsokas et al. 2008), de prelucrare a acestor date, de stabilire a tuturor parametrilor de afișare și în final de creare a imaginilor de înaltă rezoluție cu adnotările necesare (axe de coordonate, scală de valori, unități de măsură, titluri, etc.). Toate acestea sunt posibile cu

mai puțin de 100 de linii de cod în care sunt incluse și comentariile ce sporesc inteligibilitatea cosului. Odată ce acest proces de lucru devine familiar, întregul flux de prelucrare pornind de la date instrumentale și până la ilustrație publicabilă în rapoarte geofizice sau articole științifice poate fi parcurs în mai puțin de o oră.

Vizualizarea datelor geofizice

Datele înregistrate sunt redade sub forma unor profile (1D) hărți (imagini) (2D) sau prin proiecții și/sau secțiuni ale unei reprezentări 3D. Pentru fiecare valoare înregistrată (sau interval de valori) este asociată o culoare sau o nuanță de gri. Variațiile de culoare sau de nuanțe de gri din imaginile obținute reflectă variațiile proprietăților magnetice ale structurilor naturale și antropice din subsol, permițând astfel identificarea și caracterizarea anomaliilor geofizice.

Pentru cazul studiului geomagnetic al siturilor arheologice este de așteptat ca o parte din anomaliile magnetice identificate să fie produse datorită materialelor antropice și a structurilor construite de către om.

De cele mai multe ori simpla asociere, printr-o funcție lineară, dintre valorile de gradient magnetic înregistrate și culori, nu permite observarea (tuturor) anomaliilor magnetice din teren și caracterizarea acestora. De aceea, în procesul de prelucrare sunt utilizate abordări complexe descrise de algoritmi matematici. În baza acestor algoritmi acționăm fie asupra seturilor de date înregistrate din teren (în fapt, copii ale acestora), fie asupra imaginilor anterior obținute. Imaginile finale sunt referențiate topografic realizând în acest fel corespondența între anomaliile identificate analitic și coordonatele lor reale din teren.

Tehnici de reprezentare uzuale sunt: reprezentarea prin profile succesive (B-Scan), reprezentarea prin linii de nivel (contour map), reprezentare prin tonuri de gri sau paletă de culori, reprezentare prin tehnici de umbrire (*shaded relief map*), reprezentarea 3D

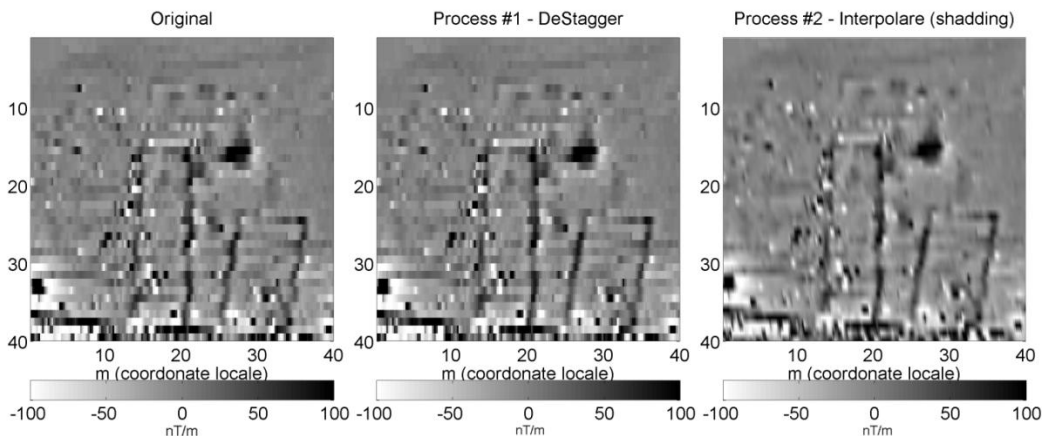


Figura 5 Rezultatul afișării grafice (2D) a unui subset din datele de gradient magnetic vertical măsurate în situl arheologic de la Porolissum (stânga). În centru au fost aplicate corecții de realiniere a liniilor de măsură (destagger). În dreapta a fost aplicat un algoritm de interpolare în procesul de afișare.

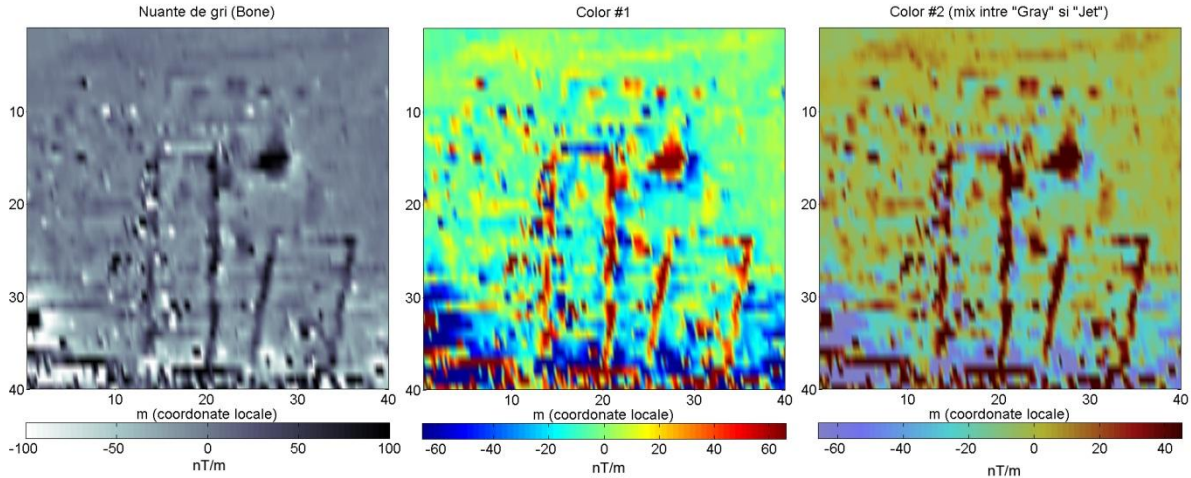


Figura 6 Redarea grafică a rezultatelor geofizice cu ajutorul mai multor scale de culori

Transformări

O largă categorie de tehnici de prelucrare a datelor geofizice se bazează pe transformări ale datelor măsurate. Redăm în cele ce urmează un exemplu de aplicare a unei transformări Hilbert asupra unui set de date magnetice.

Transformata Hilbert este în esență convoluția (*) unui semnal $x(t)$ cu un semnal $1/\pi t$. Dacă notăm transformata Hilbert cu $\hat{x}(t)$, atunci:

$$\hat{x}(t) = \mathbf{H}[x(t)] = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (1)$$

După cum se știe, convoluția este definită ca integrala produsului dintre una din funcțiile afectate și reversul defazat al celeilalte. Acest produs este comutativ așa că funcțiile sunt interschimbabile. În cazul nostru funcția $h(t) = 1/\pi t$ nu este integrabilă datorită unei singularități la $t = 0$. În acest fel aplicarea definiției convoluției asupra transformatei Hilbert conduce la o *integrală improprie*. Această integrală poate fi totuși definită cu ajutorul unei *valori principale în sens Cauchy* (notată *v. p.*):

$$\hat{x}(t) = \mathbf{H}[x(t)] = \frac{1}{\pi} \cdot v. p. \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

sau, în detaliu:

$$\hat{x}(t) = \mathbf{H}[x(t)] = \frac{1}{\pi} \left[\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{-\infty}^{t-\varepsilon} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau + \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{t+\varepsilon}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \right] \quad (3)$$

Ansamblul format din $x(t)$ și $\hat{x}(t)$ formează o *pereche Hilbert*.

Transformata Hilbert are numeroase aplicații în matematică dar și în inginerie. În teoria semnalelor transformata Hilbert este utilizată pentru sinteza *semnalului analitic* în procesul de

modulare a semnalelor. În geofizică transformata Hilbert a fost larg utilizată în interpretarea datelor de seismometrie (Claerbout 1985) dar și a datelor magnetice și gravimetrice (Nabighian 1972; Stanley and Green 1976; Mohan, Sundararajan, and S. V.S Rao 1982; Sundararajan et al. 1985; Feng-Xu et al. 2005).

Calcularea transformatei Hilbert poate fi ușor realizată în MatLab prin apelul funcției `hilbert()` inclusă în `Signal Processing Toolbox`. O aplicație interesantă a transformatei Hilbert în procesarea și interpretarea datelor magnetice pune în valoare caracteristica de translație a fazei componente imaginare cu 90° față de componenta reală (aceeași cu semnalul inițial). Prin utilizarea *modulului* numerelor complexe rezultate după transformare, variația semnalului magnetic poate fi transpusă în domeniul numerelor pozitive. Rezultatul astfel obținut este o versiune pseudogravimetrică a semnalului magnetic inițial.

Vom exemplifica acest algoritm pe un set de date sintetice obținut pe baza unui model geofizic cu următoarele caracteristici:

- valorile modelate: gradientul componentei verticale a câmpului magnetic
- înălțimea instrumentului: 0.2 m
- dimensiunile obiectului ce crează contrastul magnetic: 0.2 m x 0.2 m
- adâncimea obiectului: 0.2 m
- contrast de susceptibilitate magnetică: $dk = 10^{-3}$ SI

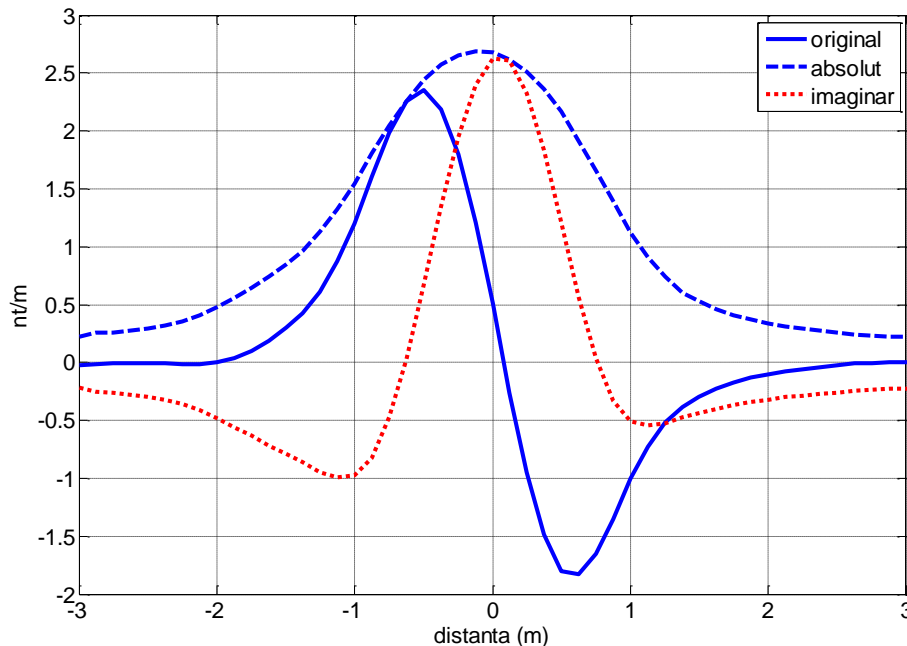


Figura 7 Reprezentarea unei anomalii magnetice (linia continuă, albastră), a valorilor imaginare după transformarea Hilbert (linia punctată, roșie) și a modulului dintre componenta reală și cea imaginară după transformarea Hilbert (linia întreruptă, albastră).

Exemplul de mai sus ilustrează proprietățile transformatei Hilbert și sugerează domeniul de utilizare a acesteia în interpretarea datelor de câmp de potențial. Se observă defazajul cu 90^0 al componenteii imaginare față de argumentul funcției. Se observă totodată că *modulul* aplicat perechii Hilbert transformă anomalia bipolară într-o anomalie unipolară pozitivă cu aspect *gaussian*. Evident, transformarea a fost aplicată în domeniul spațiu chiar dacă definirea ei fost făcută în domeniul timp.

Prin renunțarea la informația dată de semnul valorilor din datele inițiale pierdem o importantă sursă de informație ce derivă din caracterul vectorial al datelor magnetice. De ce ne-am dori atunci această formă de transformare a semnalului magnetic din formă bipolară în semnal unipolar pozitiv (transformare denumită uneori și *pseudo-gravimetrică*, prin analogie cu forma scalară a semnalului gravimetric)? Unul dintre motive este acela că o clasă largă de algoritmi de prelucrare a datelor nu funcționează corespunzător în cazul anomaliilor bipolare. Acesta este în general cazul prelucrărilor ce clasifică statistic anomaliile în funcție de amplitudinea semnalului, de dimensiunile în plan sau în spațiu ale acesteia sau în funcție de alte caracteristici. Un al doilea motiv este acela că prin caracterul său aditiv, transformata Hilbert contribuie la evidențierea semnalului produs de către obiectele discrete față de zgomotul generat în matricea solului. Vom prezenta în cele urmează un exemplu simplu ce ilustrează, în baza aceluiasi set de date de la *Porolissum*, cele două motive mai sus enunțate.

Acum este posibilă aplicarea unui algoritm simplu ce delimitează printr-un prag predefinit anomaliile considerate de interes față de zgomotul produs în matricea solului. Rezultatul grafic al acestei clasificări este prezentat în Figura 8 (dreapta) și a fost obținut prin parametrizarea algoritmului local adaptiv ce va fi discutat în secțiunea următoare.

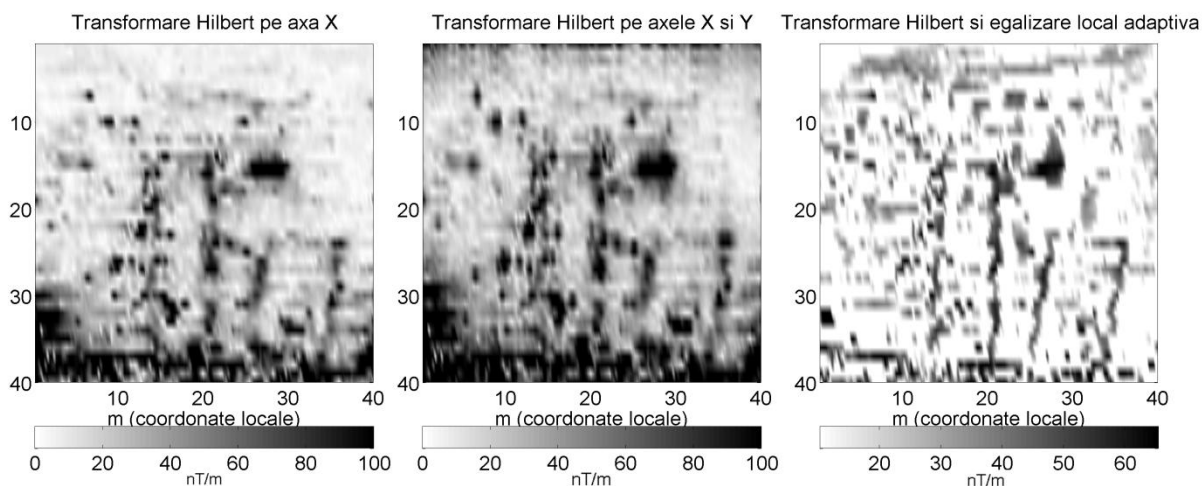


Figura 8 Reprezentarea grafică 2D a semnalelor geofizice după aplicarea unei Transformări Hilbert pe una sau pe două axe. În Centru este reprezentat semnalul prelucrat prin Transformata Hilbert pe axa X; în Mijloc transformarea a fost aplicată pe axele X și Y. În Dreapta anomaliile au fost conturate conturarea anomaliilor magnetice

Filtrarea

Filtrarea este o transformare aplicată datelor geofizice caracterizată de eliminarea sau atenuarea unei părți dintre datele măsurate. Filtrarea poate să fie făcută:

- în domeniul de măsură – filtru *blur* (echivalent cu un filtru trece jos), filtru *sharp* (echivalent cu un filtru trece sus), etc.
- în domeniul frecvență – un exemplu de utilizare a unui filtru *notch* construit în domeniul frecvență pe baza unui filtru eliptic Buterworth a fost prezentat în subcapitolul dedicat utilizării Transformatei Fourier pentru procesarea datelor geofizice pentru arheologie.

Metode adaptive de prelucrare a datelor geofizice

Prelucrarea seturilor de date geofizice pentru arheologie este realizată, în cele mai multe cazuri, prin aplicarea unor transformări asupra datelor inițiale ce au ca scop atingerea a cel puțin unuia dintre următoarele obiective:

- evidențierea componentelor utile din semnalul inițial;
- atenuarea componentelor nedorite sau nerelevante din semnalul inițial;
- corelarea cu valori disponibile în alte seturi de date.

Aplicarea algoritmilor de transformare poate fi realizată într-o formă fixă atunci când transformările afectează în mod egal un set de valori date sau poate să fie adaptivă. Printr-un **algoritm adaptiv** înțelegem o listă finită de instrucțiuni destinată calculării unei funcții ce are capacitatea să își modifice parametrii de transformare inițiali sau chiar structura logică a listei de instrucțiuni în funcție de datele de intrare (argumentul funcției).

O problemă des întâlnită în prelucrarea datelor geofizice este aceea a adaptării gamei dinamice a semnalului în vederea unei afișări grafice convenabile. În general este necesară o reducere a gamei dinamice a datelor inițiale pentru a evidenția variațiile subtile generate de prezența vestigiilor în matricea solului. Această reducere este tradițional asigurată fie prin limitarea valorilor extreme (*clipping*) fie prin aplicarea unei transformări logaritmice asupra datelor (ambele tehnici au fost anterior discutate). O abordare interesantă se bazează pe calculul distribuției de valori ce caracterizează setul de date analizat urmată apoi de o transformare a acestor date. Transformarea este adaptată la curba de distribuție anterior calculată, scopul final este acela de a asigura o egalizare a probabilității de distribuție a valorilor de-a lungul unui domeniu de valori dat. Algoritmul utilizat este în acest fel adaptat, prin parametrizare, datelor inițiale.

O primă ilustrarea a principiilor și avantajelor prelucrării datelor geofizice prin metode adaptive va fi realizată cu ajutorul unui set de date de electrometrie înregistrate din situl

arheologic de la Doriskos, din Grecia³. Doriskos a fost un oraș fortificat antic localizat în sudul Traciei, în câmpia omonimă ce desparte râurile Nestos și Hebros (Maritsa). Acum, ruinele orașului antic se află în zona administrativă Feres din esul Greciei. Datele de electrometrie au fost colectate după cum urmează:

- metoda: măsurarea variației de rezistență electrică (*lateral mapping*);
- configurație de măsură: *twin electrodes*, $a = 0.5$ m
- suprafață totală măsurată: 9200 mp; 23 de giduri de măsură cu suprafața de 20 m x 20 m;
- echipament: GeoPlot RM15
- densitatea de înregistrare: în direcția axei x: 1 valoare/m; în direcția axei y: 1 valoare/m.

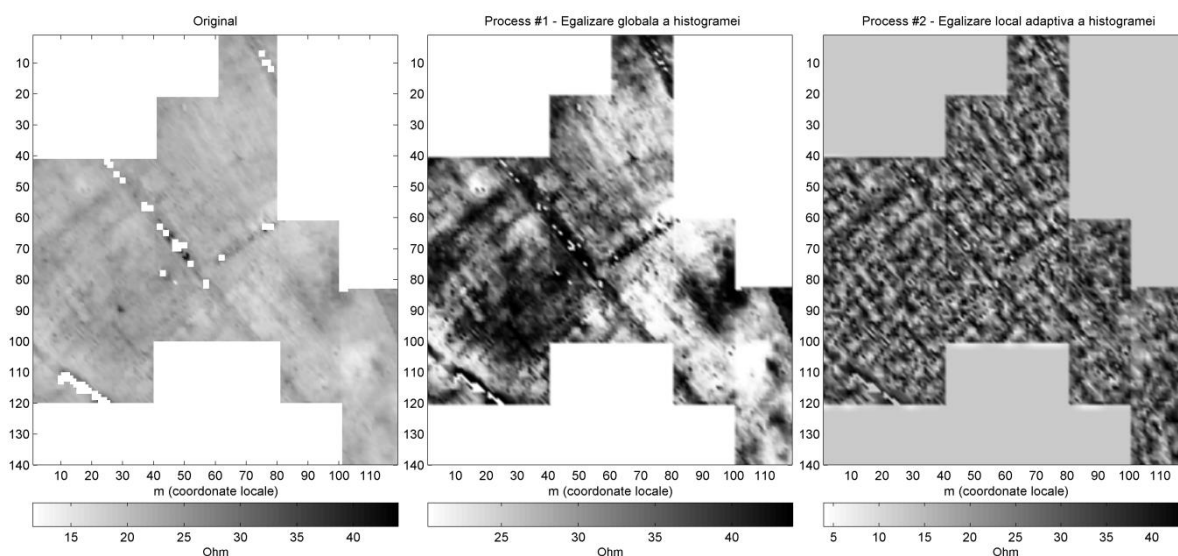


Figura 9 Rezultatul prelucrării adaptive a histogramei pentru un set de date de rezistivitate electrică din orașul antic Doriskos, Grecia. Stânga: imagine obținută pe baza datelor originale. Centru: imagine obținută prin procesarea datelor în scopul egalizării globale a histogramei. Dreapta: imagine obținută prin procesarea datelor în scopul egalizării local adaptive a histogramei.

Datele originale sunt reprezentate grafic în figura de mai sus (stânga). În această reprezentare contrastul este scăzut și detaliile din domeniul de variație de interes sunt puternic estompate. Distribuția de valori a datelor originale poate fi observată în histograma din Figura 10 (stânga). După cum se observă distribuția este una normală dar se concentrează într-un domeniu limitat (între 15 Ω și 28 Ω).

O rezolvare elegantă a egalizării curbei de distribuție a valorilor ce urmează a fi afișate grafic este asigurată de funcția `histeq` inclusă în `toolbox > images` în Matlab. Algoritmul dorit poate fi implementat prin următoarele linii de cod:

$$Z_red = Z / \max(\max(Z)) \cdot \frac{255}{\max(Z)}$$

³ Datele de electrometrie de la Doriskos mi-au fost puse la dispoziție cu multă generozitate de către Prof. Gregory N. Tsokas de la Universitatea din Salonic.

```
Zheq = histeq(Z_red, 160);
Zheq = Zheq * max(max(Z));
```

- Z este matricea bidimensională ce conține valorile originale.
- Z_{red} asigură normalizarea datelor în domeniul $[0 \ 1]$. Această normalizare este necesară pentru funcționarea corectă a funcției `histeq`.
- Z_{heq} este o matrice bidimensională în care sunt stocate datele după procesare și după refacerea domeniului inițial de variație a datelor.

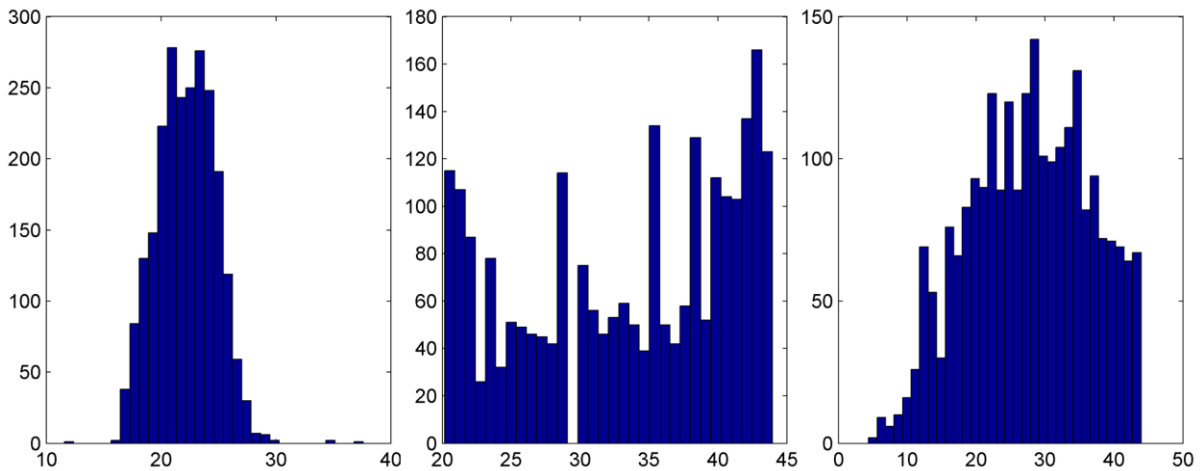


Figura 10 Histograme pentru setul de date (original și prelucrări) din Figura 9

Rezultatul egalizării distribuției de valori pentru datele de electrometrie de la Doriskos este reprezentat în Figura 9 (centru) și histograma corespunzătoare în Figura 10 (centru). Posibilitățile de interpretare vizibile în reprezentarea grafică sunt evident îmbunătățite prin această prelucrare. Sunt acum vizibile zone în care rezistența măsurată a solului este ridicată (și în mod echivalent, rezistivitatea). Acestea sunt zone în care materialele de construcție sunt acumulate în cantitate mai mare la suprafață și la adâncimea la care configurația de măsură este sensibilă sau pot avea cauze geologice sau topografice (posibil zone ușor elevate, cu mai puțină umiditate). Sunt vizibile totodată și câteva detalii liniare, de mai mică amplitudine, pe direcția NV – SE sau perpendiculare pe acestea. Aceste detalii pot să fie generate de arhitectura orașului antic de la Doriskos.

Cu toate că reprezentarea grafică analizată mai sus oferă mult mai bune posibilități de interpretare se poate observa că beneficiile egalizării curbei de distribuție a valorilor sunt diminuate de contrastele mari, de $15 \div 20\Omega$ între zone. Contrastele generate de zidurile îngropate ale clădirilor sunt în general cu un ordin de mărime mai mici. Din nefericire, egalizarea globală a histogramei nu poate să conducă la o mai mare finețe a detaliilor. Rezultate mai bune pot să fie obținute în cazul în care același procedeu este aplicat succesiv pe submatrici ale matricei inițiale. Pentru aceasta vom construi o strategie de procesare a datelor bazată pe un algoritm local adaptiv.

Ilustrarea influenței parametrizării dimensiunii blocurilor în procesarea local adaptivă și a avantajelor utilizării limbajului de nivel înalt disponibil în MatLab pentru prelucrarea datelor geofizice va fi realizată cu ajutorul unui set de date de electrometrie înregistrate din situl arheologic de la Maroneia, din Grecia.

Orașul antic Maroneia (*Μαρόνεια*) a fost o importantă colonie grecească din sudul Traciei. În acest sit arheologic au fost realizate măsurători de electrometrie și magnetometrie de către echipa Laboratorului de Geofizică a Facultății de Geologie (Tsokas et al. 2008).

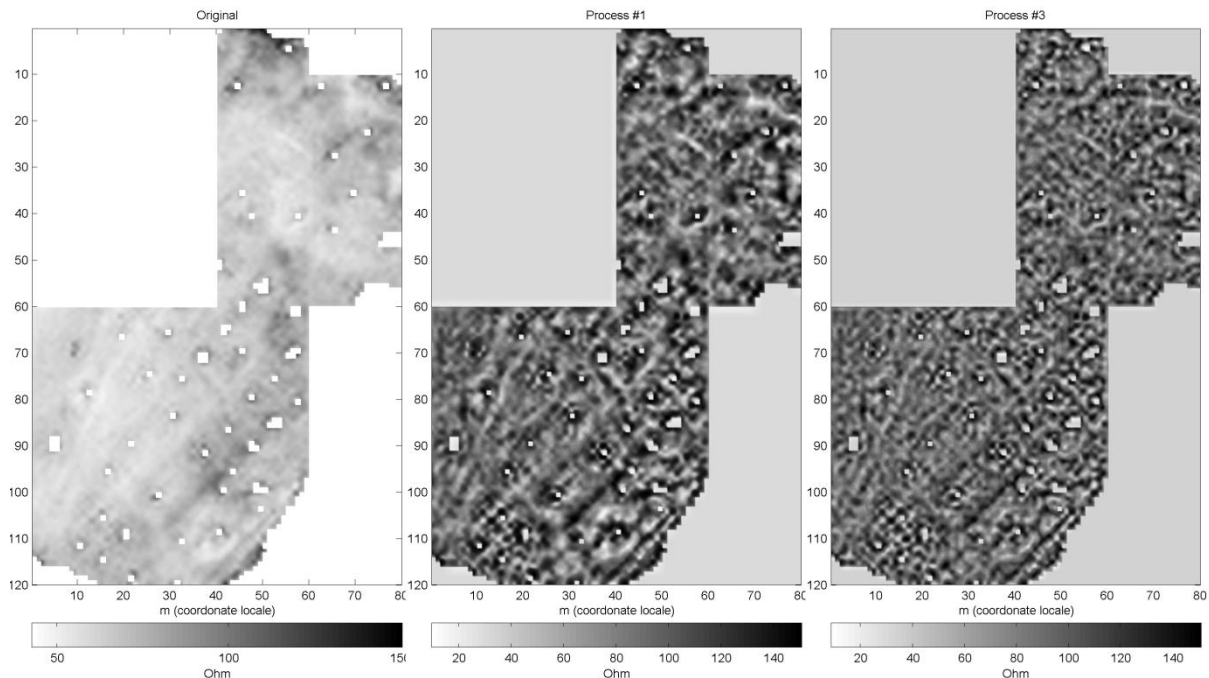


Figura 11. Rezultatul prelucrării adaptive a histogramei pentru un set de date de rezistivitate electrică de la Maroneia, zona teatrului antic. Stânga: imagine obținută pe baza datelor originale. Centru și Dreapta: imagine obținută prin prelucrarea adaptivă a histogramei (cele două rezultate diferite prin parametrizare).

Cap. 8. INTERPRETAREA DATELOR GEOFIZICE UTILIZATE ÎN ARHEOLOGIE

Eforturile depuse în teren în etapa de achiziție, continuate mai apoi prin aplicarea unor procedee complexe de prelucrare, converg către un obiectiv final, acela ca printr-o interpretare calificată a datelor geofizice să poată fi formulate ipoteze sau certitudini referitoare la comunitățile umane din trecut și la relația acestora cu mediul natural.

Departate de a fi un simplu proces linear: achiziție → procesare → interpretare, procesul cognitiv dezvoltat presupune multe reveniri, formulări și testări de ipoteze, fiind permanent ajustat prin evaluări și reevaluări metodologice. Din acest motiv principiile de interpretare expuse în prezentul capitol sunt strâns legate de conceptele dezvoltate în capitolele anterioare.

Demersul este totodată continuat și detaliat în capitolul următor destinat definirii de strategii complexe în cercetarea geofizică pentru arheologie.

Pentru domeniul particular al arheologiei, interpretarea datelor geofizice nu se detașează semnificativ de problematica general valabilă pentru geofizica aplicată care se confruntă în problema raportului dintre semnalul util și zgomotul perturbator pe de o parte și cu problema inversă a geofizicii pe de altă parte (Constantinescu 1974).

O altă problemă este aceea de a răspunde la întrebarea: ce semnifică datele geofizice înregistrate? Legătura dintre date și structuri arheologice este evident indirectă. Metodele geofizice nu permit în general să se obțină rezultate directe. Este de aceea necesară derularea procesului de interpretare în două registre: interpretarea geofizică, ce construiește relația date ↔ modele geofizice, și interpretarea de natură arheologică, ce explică rezultatele geofizice în termeni arheologici.

La cele de mai sus trebuie să mai reamintim o importantă verigă. Datele geofizice înregistrate la suprafață nu sunt direct legate de cultura materială din trecut. Ele sunt de fapt un răspuns al stadiului actual, mult distorsionat, al acestei culturi materiale. Pentru a interpreta de exemplu un context geofizic dat drept un mormânt de incinerare cu ardere pe loc din epocă romană nu este suficientă o bună cunoaștere a tipologiei monumentelor funerare romane. Este necesară totodată și o bună intuiție asupra transformărilor ce au afectat de-a lungul mileniilor aceste structuri. Această ultimă problemă întărește odată în plus necesitatea ca interpretarea geofizică să fie însoțită de interpretarea arheologică pentru explicarea rezultatelor studiilor geofizice.

Analiza raportului dintre semnalul util și zgomotul ambiant

O discuție asupra raportului semnal zgomot poate să aibă ca punct de pornire estimarea amplitudinii contrastelor geofizice produse de structuri de mici dimensiuni dar importante din punct de vedere arheologic. În felul acesta pot fi stabilite cerințele minimale pentru parametrii instrumentali (sensibilitate, raport semnal zgomot specifici instrumentului) pentru metoda geofizică utilizată (puterea de separare). Analiza raportului dintre amplitudinea anomaliilor geofizice utile și amplitudinea anomaliilor produse de diferitele categorii de turbării ce se regăsesc în siturile arheologice este de asemenea de cea mai mare importanță.

Așa cum am văzut gropile conțin cel mai adesea o umplutură ce se diferențiază printr-un contrast de susceptibilitate magnetică de matricea solului. Uzual, acest contrast este pozitiv dar de mică intensitate. Formele în care au fost săpate gropile sunt extrem de diverse, cu toate că este posibilă o clasificare a acestor forme pe criterii funcționale, culturale și cronologice. O estimare acceptabilă a răspunsului magnetic al acestui tip de structură se poate face pe baza analogiei cu o sferă ce conține un număr foarte mare de particule cu susceptibilitate magnetică diferită (cel mai

adesea mai ridicată) față de solul din exteriorul gropii. Putem considera că o astfel de sferă este uniform magnetizată.

Cele mai numeroase tipuri de gropi (cele rămase de la parii de susținere ai locuințelor, gropile utilizate pentru exploatarea de material de construcție, gropile de mormânt și chiar gropile menajere, etc.) oferă un contrast de susceptibilitate redus. Valorile uzuale pentru Δk sunt de ordinul $0.3 \div 0.5 \times 10^{-3}$ SI. Bazându-ne pe idealizarea propusă mai sus putem calcula ușor momentul magnetic și intensitatea maximă a anomaliei aproximată printr-o sferă cu un diametru comparabil.

Vom alege valori tipice pentru o groapă de par de locuință cu diametru $D = 0.3$ m, contrastul de susceptibilitate $dk = 0.4 \times 10^{-3}$ SI. Presupunând că groapa se conturează după primii 0.15 m și că măsurătorile se fac în imediata apropiere a solului (0.2 m) rezultă o distanță între centrul gropii și senzorul magnetometrului $d = 0.5$ m. Dacă alegem câmpul magnetic ambiant $B = 48\,000$ nT și considerăm scenariul cel mai favorabil în care sfera ce aproximează groapa de par de locuință este vertical magnetizată ($i=90^\circ$), obținem o intensitate maximă a anomaliei:

$$F_{\max} = 0.3456 \text{ nT}$$

Evident, câmpul magnetic ambiant nu este vertical și prin aceasta intensitatea anomaliei unei gropi tipice va fi mai mică. Pentru gropi ce se conturează la adâncimi mai mari, pentru înălțimi de măsură mai mari sau pentru contrast de susceptibilitate mai mic, toate acestea fiind scenarii frecvente, vom obține valori mai mici. Practic, intensitatea anomaliilor magnetice produse de gropile de mici dimensiuni care nu conțin metale sau materiale cu remanență trebuie plasată undeva în domeniul $50 \div 100$ pT. La acest nivel, detectarea magnetică a acestor gropi începe să fie limitată de sensibilitatea și stabilitatea instrumentelor de măsură. Magnetometrele cu precesie protonică nu pot să asigure acest nivel de sensibilitate. Magnetometrele *fluxgate*, cu pompaj optic și Overhauser au sensibilitatea nominală cu aprox. un ordin de mărime mai bună dar nu trebuie să uităm că problemele de calibrare, derivă termică, aliniere față de axa de măsură (la senzorii *fluxgate*) diminuează în condiții practice de exploatare această sensibilitate.

În concluzie, putem observa că detectarea magnetică a unor importante structuri se află la limita posibilităților magnetometrelor uzual folosite în arheologie și în aplicații de mică adâncime. Există autori care privesc această problemă cu un optimism mai accentuat (Evans, Heller 2003, 237) sau mai ponderat (Schmidt 2007c, 28) Nu trebuie pierdut din vedere că raționamentul de mai sus a fost idealizat ignorând zgomotul din mediul ambiant lucru care în practică nu poate fi acceptat, sursele utile de semnal fiind cel mai adesea mascate de surse nedorite mai puternice.

Rezoluția

O altă problemă uzuală este estimarea limitei de separație a metodei magnetice pentru diverse structuri arheologice. Perturbația rezultantă din câmpul magnetic ce este produsă de două sau mai multe obiecte învecinate este convoluția perturbațiilor individuale. Atunci când aceste obiecte sunt situate la o distanță euclidiană mai mică de o anumită limită nu mai este posibilă distincția grafică (pe profil sau în plan) dintre obiecte. În figura următoare este redat răspunsul unui modul compus din două gropi.

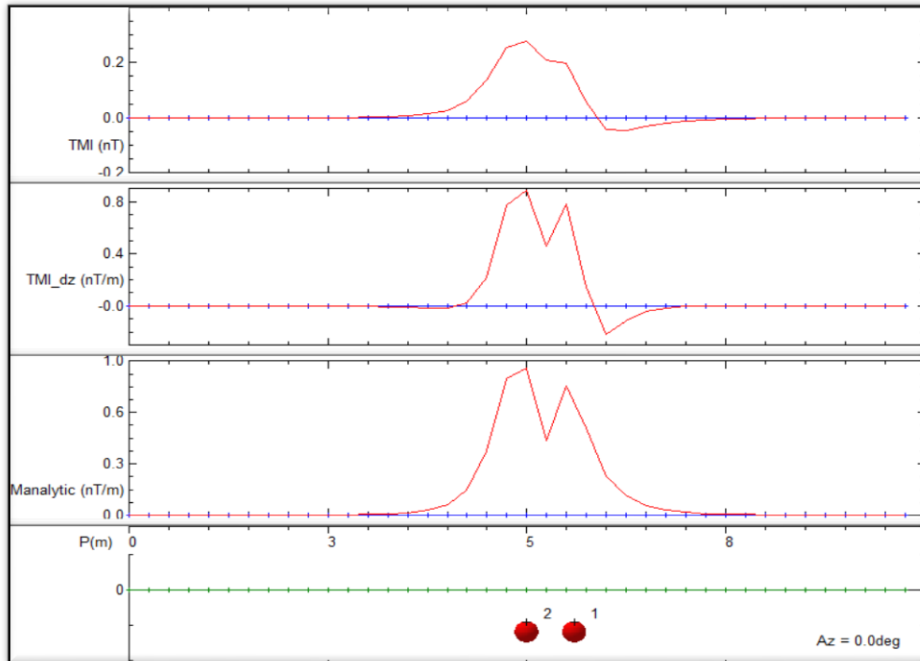


Figura 12 Răspunsul magnetic provocat de două gropi aproximare prin 2 sfere uniform magnetizate. Sus: câmpul magnetic total; centru-sus: prima derivată a componentei verticale a câmpului magnetic; centru-jos: semnalul analitic (pseudo-gravitație); jos: poziția sferelor magnetizate.

În cazul vizualizării în plan (2D) la scară largă distincția dintre cele două sfere este și mai greu de făcut.

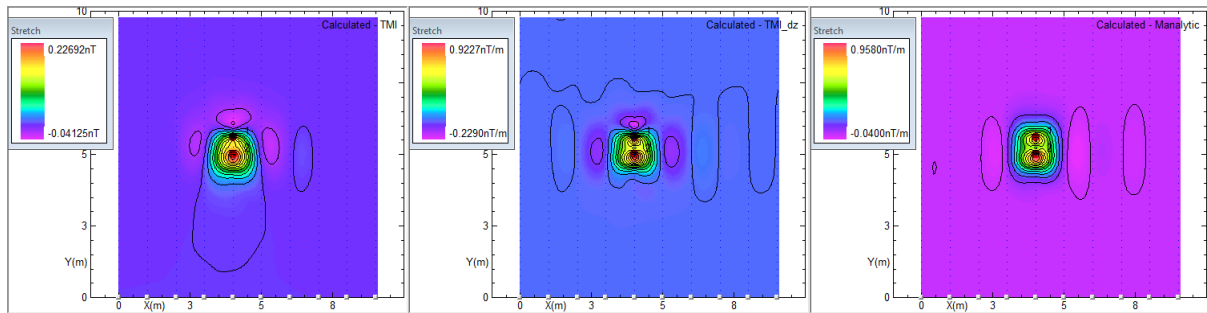


Figura 13 Răspunsul magnetic provocat de două gropi approximate prin 2 sfere uniform magnetizate. Stânga: câmpul magnetic total; Mijloc: prima derivată a componentei verticale a câmpului magnetic; Dreapta: semnalul analitic (pseudo-gravitație).

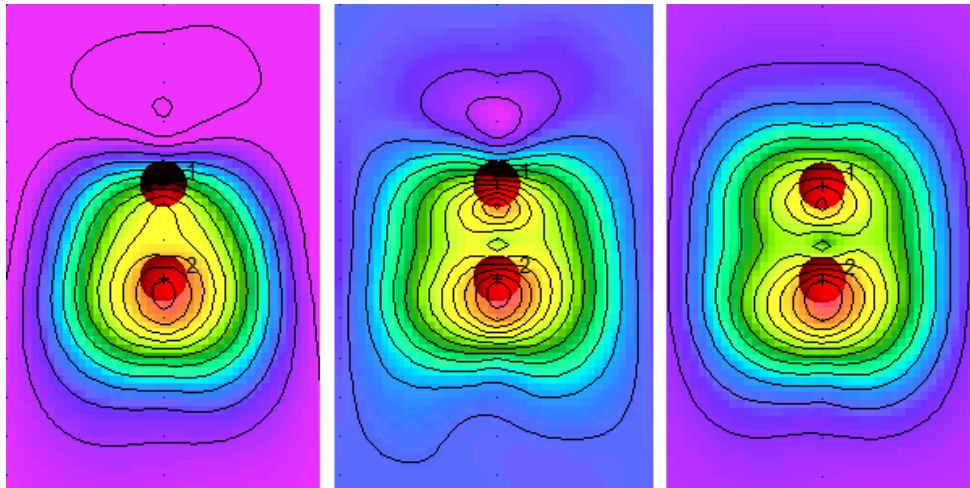


Figura 14 Răspunsul magnetic provocat de două gropi approximate prin 2 sfere uniform magnetizate, detaliu

Un alt factor ce influențează limita de separație este distanța dintre sursa de perturbație a câmpului magnetic și senzorul (sau senzorii) de măsură. Acest lucru poate fi observat în modelul prezentat în figura următoare.

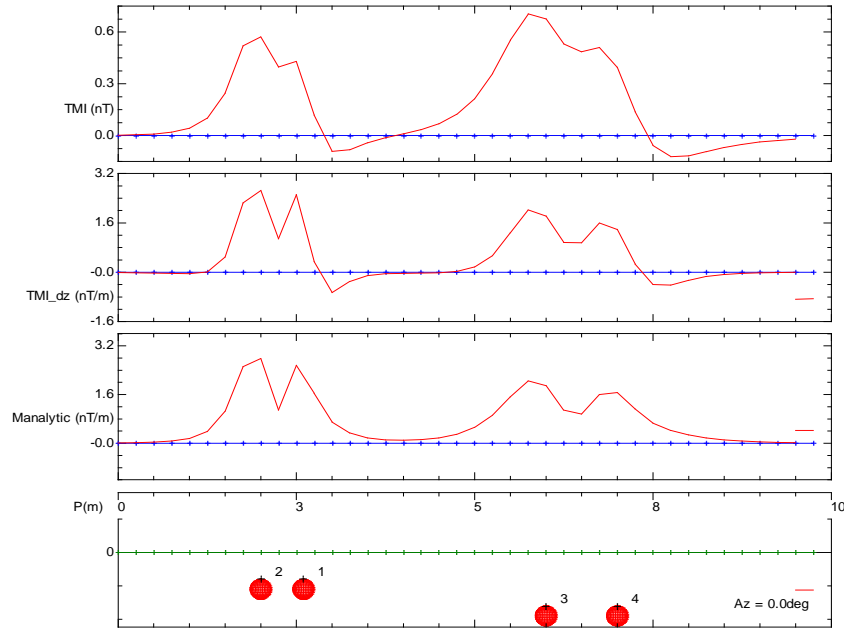


Figura 15 Răspunsul magnetic provocat de două grupuri cu câte două gropi approximate prin sfere uniform magnetizate.

Separarea pe verticală poate fi îmbunătățită prin filtrarea în domeniul frecvență, prin utilizarea primei derivate a componentei verticale sau prin utilizarea metodelor de continuare în sus sau în jos. Utilizarea unora dintre metode, cum ar fi: continuarea în sus sau derivatele de ordin mai mare poate să conducă la soluții instabile din punct de vedere matematic și să creeze rezultate geofizice marcate de prezența unor anomalii ce nu au corespondent în teren. Rezoluția pe orizontală poate fi îmbunătățită prin utilizarea derivatelor componentelor orizontale, prin filtrarea în frecvență sau prin utilizarea tehnicilor de reliefare (vezi studiul de caz din teză de la Gemele, jud. Brăila).

Cap. 9. STRATEGII DE CERCETARE GEOFIZICĂ ÎN ARHEOLOGIE. STUDII DE CAZ

Organizarea logică, în cuprinsul capitolelor anterioare, a cunoștințele din domeniul aplicării în arheologie a conceptelor și metodelor geofizice ne permite acum definirea unui model de cercetare geofizică dedicat unei clase particulare de probleme din arheologie. Acest model este materializat prin parcurgerea unor etape specifice:

Tipologia structurilor arheologice ↔ procese de formare a siturilor arheologice ↔ evoluția postdepozițională a siturilor arheologice ↔ principii fizice ce fundamentează metodele geofizice ↔ practica utilizării metodelor geofizice ↔ achiziția datelor ↔ procesarea datelor ↔ interpretarea geofizică a datelor ↔ interpretarea arheologică a rezultatelor geofizice.

O primă obiecție asupra modelului de mai sus ar putea să fie adresată reprezentării liniare a etapelor, știut fiind că în practică sunt posibile salturi între oricare dintre etape. Acest lucru este evident și a fost subliniat de mai multe ori de către autor în cuprinsul prezentei lucrări. Cu toate acestea este de limpede că sensul de parcurgere de la stânga spre dreapta, marcat de reveniri înapoi cu una sau două etape și reluat către un obiectiv final este cel mai probabil. Revenirile tranșante către etapele de început, atunci când au loc, nu sunt de fapt o simplă ciclare în procesul de dobândire de noi cunoștințe. Aceste reveniri sunt mai degrabă expresia unei spirale evolutive bazate pe reevaluări metodologice.

La problemele anterior analizate adăugăm unele aspecte ce fundamentează strategia de cercetare:

- Formularea temei de cercetare
 - o Identificarea geofizică de structuri arheologice necunoscute
 - o Caracterizarea evoluției naturale și antropice a siturilor arheologice (*site formation processes*) cu ajutorul metodelor geofizice
- Integrarea datelor
 - o Integrarea datelor geofizice multisensor
 - o Integrarea datelor geofizice cu date provenite din alte domenii de cercetare. Indiferent de natura lor, aceste date sunt caracterizate de o importantă componentă spațială. În acest moment rezultatele cele mai bune pentru integrarea și administrarea datelor din multiple domenii pot fi obținute prin utilizarea conceptelor și tehnologiilor GIS
- Alegerea și utilizarea metodelor geofizice în funcție de contextul arheologic investigat

Detectarea structurilor arheologice. Studiul geofizic al proceselor de formare a siturilor arheologice

În prezent se manifestă un interes general pentru utilizarea metodelor geofizice în scopul identificării structurilor arheologice îngropate. Această direcție de dezvoltare a cercetării a fost adoptată odată cu primele aplicații geofizice în arheologie (Atkinson 1952; Aitken, Webster, Rees 1958; Aitken 1959) și a fost în mod clar pusă în evidență de lucrări ulterioare dedicate acestui subiect (Aitken 1961; Clark 1997; Schmidt 2002; Smekalova, Voss, Smekalov 2008). Avansul înregistrat în ultimele decenii în geofizica de suprafață (*near-surface geophysics*) a condus la creșterea eficienței și preciziei în colectarea datelor geofizice. A devenit posibilă investigarea geofizică de suprafețe mari în scopul obținerii de profile, hărți geofizice 2D și analize 3D, cu o bună rezoluție, nu doar în interiorul siturilor arheologice dar și în teritoriile adiacente. De aceea explorările geofizice pot fi considerate un prețios instrument în cercetarea de tip *Landscape Archaeology* (Kvamme 2003).

Cu toate că fascinația și nevoia descoperirii de noi situri și structuri arheologice vor continua să influențeze prioritățile cercetării geofizice, reconstrucția proceselor de formare a siturilor și evoluția lor postdepozițională, în relație strânsă cu mediul ambiant, ar trebui să fie

considerate de asemenea de o primă importanță. În această ultimă direcție accentul este orientat pe analiza și înțelegerea aspectelor geomorfologice ale siturilor în conjuncție cu evoluția lor antropogenică, chiar dacă detectarea și cartarea structurilor subterane și a obiectelor îngropate rămân în continuare obiective semnificative.

Spre deosebire de situația generală în care colectarea datelor geofizice este un proces desfășurat o singură dată, investigațiile geofizice realizate în scopul reconstrucției siturilor se constituie într-un proces mai complicat, în care măsurătorile geofizice sunt împletite cu excavația arheologică, măsurători topografice precise și rezultate ale altor studii interdisciplinare. Integrarea tuturor acestor seturi de date se poate face prin sisteme „multistrat”, fiind rafinate prin tehnici de „*data fusion*” (Kvamme 2007).

Integrarea datelor

Datele geofizice pot în puține situații să furnizeze, prin ele însele, suficiente elemente necesare interpretării. La nivel elementar este necesară corelarea seturilor de date geofizice cel puțin cu datele topografice și cartografice ce descriu aria cercetată și, eventual, microregiunea. Dacă sunt disponibile date rezultate în urma aplicării altor metode de cercetare este necesară integrarea întregii informații la ansamblul anterior definit. Adăugăm la aceasta cunoștințele arheologice disponibile la momentul studiului.

Abordarea corectă ce asigură integrarea seturilor de date provenite din multiple domenii de cercetare este asigurată prin recurs la Sisteme Informaționale Geografice (acronimul echivalent în lb. română este SIG dar ele este rar utilizat; GIS, echivalentul din lb. engleză cunoaște în acest moment o circulație cvasiunanim acceptată). Această abordare extinde conceptul de baze de date și baze de cunoștințe prin adăugarea unei componente spațiale informației disponibile.

Alegerea metodelor geofizice

Caracterul și calitatea rezultatele studiilor geofizice sunt influențate și în arheologie, ca și în alte domenii de aplicare, de tipul și numărul de metode geofizice utilizate și de gradul de adecvare a acestora la contextul arheologic investigat. Acest lucru poate fi cu ușurință observat în tabelul următor, ce prezintă sintetic potențialul metodelor geofizice în relație cu tipologia structurilor arheologice.

Tabelul 9-1 Rezultate obținute și gradul de utilitate în aplicarea metodelor geofizice pentru diferite structuri/monumente arheologice

	Magnetometru – câmp total	Gradiometru	Susc. Mag. – în plan	Susc. Mag. – profil	EM – susc. Mag.	EM - conductivitate	Rezistivitate – lat. mapping	ERT	GPR
Nivele culturale	x	x	x	xxx	x	x	xx	xx	x
Absență/prezență vestigii	xxx	xxx	xx	xx	xxx	xxx	xxx	xx	x
Morminte plane	xx	xx	-	-	x	x	xx	x	xx
Morminte plane – rug busta	xxx	xxx	-	-	xxx	xxx	x	x	xx
Morminte tumulare (tumuli mici/medii)	xxx	xxx	-	-	xx	xx	x	xxx	xx
Tumuli monumentali	xxx	x	x	x	x	xx	xx	xxx	x
Locuințe de suprafață	xx	xx	x	x	x	xx	xx	x	x
Locuințe de suprafață incendiate	xxx	xxx	x	x	xxx	xx	x	x	x
Locuințe de suprafață (pari de colț)	xxx	xxx	x	x	x	x	x	-	-
Gropi	xxx	xxx	-	xx	x	x	xxx	xx	x
Vetre și alte instalații de foc casnice	xxx	xxx	x	x	xxx	x	x	x	x
Cuptoare	xxx	xxx	xx	xxx	xxx	xxx	xx	xx	xxx
Fortificații preistorice	xxx	xxx	x	xxx	xxx	xxx	xx	xxx	xxx
Fortificații antice și medievale	xxx	xxx	x	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Clădiri cu zid	xxx	xxx	-	x	xx	xx	xxx	xxx	xxx

- rezultate posibile dar este există metode mai bune; x – rezultate posibile; xx – rezultate bune; xxx – rezultate foarte bune

Tabelul 2 Studii de caz realizate în cadrul proiectului doctoral (2008-2011)

Sit	An	Metode	Verificare
Adamclisi, j. Constanța	2009 ⁴	Gradient magnetic vertical	c
Brăila – Grădina Publică	2011	Gradient magnetic vertical ERT GPR	sc
Cârlomănești, j. Buzău – "Platou"	2010	Gradient magnetic vertical Rezistivitate (lat.map) ERT GPR	

⁴ În anul 2009 a mai fost realizată o campanie de studii geofizice la Adamclisi sub coordonarea Prof. Dr. Ing D. Ioane și la care au mai participat Florina Chitea, Matei Mezincescu, George Gârbacea și autorul, dar rezultatele acestei campanii nu sunt discutate în prezenta lucrare.

Cârlomănești, j. Buzău – "Terasa I"	2010	ERT	c
Cotoroca, j. Ialomița	2010	ERT	
Autostrada A2	2010	Gradient magnetic vertical	s
Autostrada A2	2010	Gradient magnetic vertical	s
Băile Figa, j. Bistrița Năsăud	2010	Gradient magnetic vertical ERT GPR	c
Telița - Celic Dere. j. Tulcea	2008, 2009, 2010	Gradient magnetic vertical ERT GPR Susceptibilitate magnetică Difracție X	s
Gemelele	2011	Gradient magnetic vertical GPR Susceptibilitate magnetică	
Isaccea- <i>Noviodunum</i>	2010	Gradient magnetic vertical ERT GPR	sc
Mangalia – "Movila Documaci"	2011	ERT	c
Mediesu Aurit, j. Satu Mare	2008, 2009, 2010	Gradient magnetic vertical Susceptibilitate magnetică	sc
Moigrad, j. Sălaj - <i>Porolissum</i>	2011	Gradient magnetic vertical GPR	
Piscu Crăsani, j. Ialomița		Gradient magnetic vertical GPR Susceptibilitate magnetică	c
Păuleni Ciuc - Ciomortan	2010	Gradient magnetic vertical	c
Slava Rusă	2011	Gradient magnetic vertical, ERT, Susceptibilitate magnetică	c

Sit: Numele localității și județul. Au fost evidențiate cu bold siturile în care autorul este membru în colectivul de cercetare arheologică

Verificat: s = săpături de verificare ulterioare studiilor geofizice și care eventual au folosit rezultatele interpretării geofizice; sc = săpături în curs ce utilizează rezultatele interpretării geofizice; c = rezultatele geofizice sunt consistente cu cercetările arheologice și datele interdisciplinare anterioare.

Cap. 10. CONCLUZII

Cercetarea geofizică în arheologie poate fi considerată un domeniu tradițional prin vechimea preocupărilor, dar datorită evoluțiilor recente în plan teoretic, tehnic și metodologic putem plasa acest domeniu în avangarda cercetării. Avantajele și caracteristicile aplicării tehnicilor geofizice în arheologie au fost reiterate și analizate într-un capitol special, fiind reluate în conținutul lucrării atunci când a fost necesar.

Abordarea tradițională orientează cercetarea geofizică către detectarea și caracterizarea de noi situri și vestigii arheologice. O nouă direcție de cercetare, identificată de către autor atât la nivel metodologic, dar și prin studiile de caz prezentate în lucrare, se adresează studierii proceselor de formare și evoluție a siturilor arheologice.

Descrierea în termeni arheologici a structurilor ce fac obiectul investigației geofizice a fost realizată într-un capitol special. În diferite subcapitole a fost analizată succesiv legătura dintre caracteristicile structurale ale siturilor arheologice și parametrii petrofizici și geofizici ce stau la baza aplicării tehnicilor geofizice în arheologie.

Metodele geofizice utilizate în arheologie nu au fost special dezvoltate pentru acest domeniu. Particulară este însă forma în care au fost adaptate și dezvoltate pentru a servi studiului siturilor arheologice. Acest aspect a fost arătat cu claritate în lucrare în capitolul dedicat metodelor geofizice și în capitolul dedicat tehnicilor de achiziție a datelor. Ilustrarea procesului de adaptare a tehnicilor geofizice pentru arheologie a fost realizată și prin construcția de către autor a unor instrumente și subansambluri utilizabile în procesul de achiziție a datelor.

Prelucrarea datelor geofizice este realizată astăzi exclusiv prin apel la instrumente informatice. Cel mai adesea, este preferată utilizarea unor aplicații software specializate, relativ puține la număr, scumpe și uneori instabile. Fără a contesta în vreun fel valoarea sau calitatea aplicațiilor software consacrate, în prezenta lucrare am încercat să oferim o alternativă în abordarea prelucrării informatizate a datelor geofizice pentru arheologie. Evoluția din ultimele decenii a limbajelor de programare specializate (4GL, DSLs) și, în special, a celor destinate calcului numeric și statistic, face posibilă prelucrarea informatizată a datelor geofizice prin secvențe de cod create adhoc și interpretate într-unul din mediile de dezvoltare de ultimă generație. În prezenta lucrare mediul de dezvoltare ales este Matlab. Sunt însă prezentate succint și alternative (în special pentru tehnologia open source).

Eforturile depuse în etapele de achiziție și prelucrare a datelor converg către un obiectiv final: acesta presupune interpretarea calificată a datelor geofizice în scopul formulării de ipoteze sau certitudini referitoare la comunitățile umane din trecut și la relația acestora cu mediul natural. Procesul de interpretare este realizat în două etape: interpretarea geofizică, ce construiește relația date ↔ modele geofizice, și interpretarea de natură arheologică, ce explică rezultatele geofizice în termeni arheologici.

La fel de importante ca și demersul teoretic și practic, ce constituie substanța prezentei lucrări, sunt rezultatele obținute în studiile geofizice conduse de autor în timpul proiectului doctoral de cercetare. Au fost astfel obținute unele rezultate în premieră, în timp ce alte rezultate au condus la importante descoperiri și concluzii arheologice. Redăm mai jos doar câteva dintre acestea:

- au fost descoperite prin cercetări magnetometrice, desfășurate în anii 2008, 2009, 2010 și 2011, cel puțin 250 de cuptoare de ars ceramica, stabilind astfel la Medieșul Aurit, jud. Satu Mare, locația celui mai important centru meșteșugăresc pentru manufactura vaselor ceramice din Europa, din afara lumii greco-romane; anterior acestei descoperiri, situl de la Zofipole din sudul Poloniei fusese considerat cel mai important centru de produs ceramică din *barbaricum* (Dobrzanska and Herbich 2003);
- în necropola traco-scitică de la Celic Dere, jud. Tulcea, au fost realizate cercetări geofizice prin magnetometrie, tomografie de rezistivitate electrică și georadar, pe baza cărora s-a realizat localizarea precisă a tumulilor de mici dimensiuni (invizibili la suprafață), precum și stabilirea locației mormintelor principale și secundare în tumulii cunoscuți; prin studii geofizice combinate cu analize pedologice și mineralogice a fost posibilă reconstrucția formării și a evoluției sitului arheologic;
- în așezarea neolitică, suprapusă de o așezare fortificată din epoca bronzului și epoca fierului, de la Păuleni Ciuc - Ciomortan "Dâmbul Cetății", jud. Harghita, a fost studiată prin mijloace geofizice fortificația complexă a așezării. În urma integrării prin mijloace GIS a rezultatelor cercetării arheologice cu datele obținute prin teledetecție și prin cercetare geofizică a fost posibilă formularea unei propuneri de reconstituire tridimensională a sistemului de fortificație.
- în zona adiacentă spre nord-vest a orașului roman *Porolissum* au fost realizate cercetări geofizice prin magnetometrie și georadar în urma cărora s-a realizat localizarea exactă a unor clădiri auxiliare din epoca romană; urmare a acestui demers, zona în care au fost identificate structurile amintite a fost inclusă în aria protejată, investițiile destinate unui complex de agrement ce urmau să fie derulate în zonă fiind relocate.

Prezenta lucrare este prima integrare la nivel internațional a problematicii aplicării metodelor geofizice în cercetarea arheologică din ultimii 14 ani. Ultima lucrare comparabilă prin tematică și forma de tratare a subiectului a fost publicată în 1997 (Clark 1997)⁵. În România, este prima lucrare ce sistematizează domeniul vast al geofizicii aplicate în arheologie.

⁵ *Lucrarea lui Anthony Clark este adresată mai degrabă unui cititor non-tehnic. Mai semnalăm aici cartea lui Vladimir Hašek (1999) care abordează o tematică restrânsă și centrată pe evoluția domeniului în Cehia și cartea publicată de către John Oswin (2009), dar aceasta din urmă este doar o introducere în domeniu destinată nespecialiștilor. Alte cărți apărute sunt fie colecții de articole, de exemplu, cartea editată de către Stefano Piro și Salvatore Campano (2008,) fie cărți dedicate aplicării în arheologie a unei singure metode geofizice (Conyers 2004; Aspinall, Gaffney, Schmidt 2008).*

REFERINȚE

- Aitken, MJ. 1959. "Magnetic Prospecting: An Interim Assessment." *Antiquity* 33: 205–207.
- Aitken, MJ. 1961. *Physics and Archaeology*. New York, London: Interscience Publisher Inc.
- Aitken, M, G. Webster, A. Rees. 1958. "Magnetic prospecting." *Antiquity* 32: 270–271.
- Allred, J. C. 1964. "A *Fluxgate* Gradiometer for Archaeological Surveying." *Archaeometry* 7 (1): 14-19. doi:10.1111/j.1475-4754.1964.tb00589.x.
- Angelescu, Mircea, Carmen Bem, Irina Oberländer-Târnoveanu, Florela Vasilescu, eds. 2010. *Cronica cercetărilor arheologice din România, Campania 2009*. București: CIMEC.
- Annan, A.,P. 2005. "Ground Penetrating Radar". In: *Near Surface Geophysics*, SEG, pp.357-471.
- Arrhenius, O. 1931. "Die Bodenanalyse im dienst der Archäologie." *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 10 (27-29): 427–439.
- Aspinall, A., Chris F. Gaffney, Armin Schmidt. 2008. *Magnetometry for archaeologists*. AltaMira Press, May.
- Aspinall, A., Chris F. Gaffney, Armin Schmidt. 2008. *Magnetometry for archaeologists*. AltaMira Press, May.
- Astin, T., H. Eckardt, S. Hay. 2007. "Resistivity imaging survey of the Roman barrows at Bartlow, Cambridgeshire, UK." *Archaeological Prospection* 14 (1): 24–37.
- Atkinson, R. J. C. 1952. Méthodes électriques de prospection en Archéologie. In *La découverte du passé*, ed. A. Laming, 59-79. A. Laming. Paris: Picard.
- Atkinson, R. J.C. 1953. *Field archaeology*. II. Methuen.
- Babeș, Mircea, și colectiv. 2004. "Cârlomănești." *Cronica Cercetărilor Arheologice din România* 2003.
- Batayneh, A., J. Khataibeh, H. Alrshdan, U. Tobasi, N. Al-jahed. 2007. "The Use of Microgravity, Magnetometry and Resistivity Surveys for the Characterization and Preservation of an Archaeological Site at Ummer-Rasas, Jordan." *Archaeological Prospection* 14: 60-70.
- Bailey, Douglass Whitfield. 2000. *Balkan prehistory: exclusión, incorporation and identity*. Routledge.
- Bevan, Bruce W. 2000. "An early geophysical survey at Williamsburg, USA." *Archaeological Prospection* 7 (1)
- Binford, Lewis R. 1962. "Archaeology as Anthropology." *American Antiquity* 28 (2)
- Binningsbo, J., E. S. Eide, and J. F. Hjelmstad. 2000. 3D migration of GPR array-antenna data. In: *Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar*. SPIE, pp.459-463.
- Blakely, Richard J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge University Press.

- Botezatu, Radu, Gheorghe Gherea, Romanescu Dragomir, Vasile Vâjdea, Marius Visarion. 1976. *Prospectarea geofizică a zăcămintelor de minereuri*. București: Ed. Tehnică.
- Buza, Dan, M. Cotruță, B. Briewig. 2008. "Experimental Archaeology. The construction of a fire installation (hearth) on the model of those discovered at Păuleni Ciuc - Ciomortan "Dâmbul Cetății", Harghita County." *Acta Terrae Septemcastrensis* VII: 217-232.
- Campana, Stefano, S. Piro. 2008. *Seeing the unseen: geophysics and landscape archaeology*. Taylor and Francis.
- Cardarelli, Ettore, Gerardina Di Filippo. 2009. "Integrated geophysical methods for the characterisation of an archaeological site (Massenzio Basilica — Roman forum, Rome, Italy)." *Journal of Applied Geophysics* 68 (4).
- Cavruc, Valeriu. 2005. "The Ciomortan Group in the light of New-Researches." *Marmatia* 8 (1): 81-123.
- Cavruc, Valeriu, Dan Buza. 2002. "Noi cercetări privind epoca bronzului în așezarea Păuleni (Ciomortan). Campaniile din anii 2001 - 2002. Raport preliminar." *Angustia* 7: 41-48.
- Cavruc, Valeriu, Anthony F. Harding. 2008. Noi cercetări arheologice privind exploatarea sării în nord-estul Transilvaniei. Raport preliminar. In *Sarea, de la prezent la trecut*, ed. Dan Monah, Gheorghe Dumitroaia, and Daniel Garvăn. Bibliotheca Memoriae Antiquitatis XX. Iași.
- Chianese, Domenico, Mariagrazia D'Emilio, Saverio Di Salvia, Vincenzo Lapenna, Maria Ragosta, Enzo Rizz. 2004. "Magnetic mapping, ground penetrating radar surveys and magnetic susceptibility measurements for the study of the archaeological site of Serra di Vaglio (southern Italy)", *Journal of Archaeological Science* 31: 633-643.
- Claerbout, J. F. 1985. *Fundamentals of geophysical data processing*. Blackwell Scientific Publication.
- Clark, Anthony. 1997. *Seeing Beneath the Soil, Prospecting methods in archaeology*. Routledge, June 3.
- Constantinescu, Liviu. 1974. *Mesaje ale pământului în interpretări actuale*. București: Ed. Științifică.
- Conyers, Lawrence B. 2004. *Ground-penetrating radar for archaeology*. Rowman Altamira, November 28.
- Conyers, Lawrence, B. Eileen, G. Ernenwein, and Leigh-Ann Bedal. 2002. "Ground-Penetrating Radar (GPR). Mapping as a method for planning excavation strategies, Petra, Jordan." *E-tiquity*. 1.
- Cornell, R. M, U. Schwertmann. 2003. *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences, and uses*. Vch Verlagsgesellschaft Mbh.
- Courtillot, V., J. L Le Mouél. 2007. "The study of Earth's magnetism (1269–1950): A foundation by Peregrinus and subsequent development of geomagnetism and paleomagnetism." *Reviews of Geophysics* 45 (3).

- Dalan, Rinita A. 2008. "A Review of the Role of Magnetic Susceptibility in Archaeogeophysical Studies in the USA: Recent Development and Prospects." *Archaeological Prospection* 15: 1-31.
- Daniels, D.J. 2004. *Ground Penetrating Radar*. IET.
- Dobrzanska, Halina, Thomasz Herbich. 2003. "Zofipole interdisciplinary research project: fieldwork result." *Archaeologia Polona* 41: 91-103.
- Dumitraşcu, Sever, Tiberiu Bader. 1967. *Aşezarea dacilor liberi de la Medieşul Aurit*. Vol. I. Satu Mare: Muzeul de istorie Satu Mare.
- Evans, M. E, F. Heller. 2003. *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Vol. 86. Academic Pr.
- Fajkiewicz, Z. J., 1976, "Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geological and anthropogenic forms". *Geophysics*, 41: 1016-1030.
- Feng-Xu, Z., M. Ling-Shun, Z. Feng-Qin, L. I. U. Cai, W. Shi-Yu. 2005. "Calculating normalized full gradient of gravity anomaly using Hilbert Transform." *Chinese Journal of Geophysics* 48 (3).
- Forte, E., M. Pipan. 2008. "Integrated seismic tomography and ground-penetrating radar (GPR) for the high-resolution study of burial mounds (tumuli)." *Journal of Archaeological Science* 35 (9).
- Găvat, I., Radu Botezatu, Marius Visarion. 1973. *Interpretarea geologică a prospecţiunilor geofizice*. Bucureşti: Ed. Academiei.
- Georgescu, Paul. 1982. *Prospecţiuni electrice*. Bucureşti: Ed. Universităţii din Bucureşti.
- Gubbins, D., E. Herrero-Bervera. 2007. *Encyclopedia of geomagnetism and paleomagnetism*. Kluwer Academic Pub.
- Hašek, Vladimír. 1999. *Methodology of geophysical research in archaeology*. Archaeopress.
- Haită, Constantin. 2003. *Sedimentologie şi Micromorfologie. Aplicaţii în Arheologie*. Targoviste: Ed. Cetatea de Scaun.
- Harris, E. C. 1975. "The stratigraphic sequence: a question of time." *World Archaeology* 7 (1).
- Hülsmeier, Christian. 1904. Patent US: 165,546.
- Ioane, Dumitru, Sorin Anghel, Alexandra Dudu. 2009. "Magnetic Prospection of a Tumulus in the Ancient Histria Necropolis." *Geo-Eco-Marina* 15: 161-165.
- Johnson, DW, WJ Johnson. 2005. *Comparison of Total Magnetic Field to Vertical Magnetic Gradient Data from Effigy Mounds National Park, Iowa*. Archaeological Geophysics Consulting.
- Johnson, JK, University of Mississippi. Center for Archaeological Research, JCSS Center, and U of MG Center. 2006. *Remote sensing in archaeology: an explicitly North American perspective*. University of Alabama Press.

- Kalokerinos, G., E. Kokinou, A. Sarris, F. Vallianatos. 2004. GPP: a program to automate the geophysical data processing. In *First International Conference on Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology (AMIREG 2004), Chania, Crete*.
- Kamermans, Hans, Martijn van Leusen, Philip Verhagen. 2010. *Archaeological Prediction and Risk Management: Alternatives to Current Practice*. Amsterdam University Press.
- Kono, Masaru. 2009. *Geomagnetism (treatise on geophysics, vol. 5)*. Vol. 5. Treatise on Geophysics.
- Kovesi, P. D. 2000. MATLAB Octave Functions for Computer Vision and Image Processing. Centre for Exploration Targeting, School of Earth and Environment, The University of Western Australia.
- Kvamme, K. 2007. Integrating Multiple Geophysical Datasets. In *Remote Sensing in Archaeology*, 345-374.
- Kvamme, KL. 2003. "Geophysical Surveys as Landscape Archaeology." *American Antiquity* 68 (3) (July): 435-457.
- Linford, N., P. Linford, L. Martin, A. Payne. 2007. "Recent Results from the English Heritage Caesium Magnetometer System in Comparison with Recent Fluxgate Gradiometers." *Archaeological Prospection* 14: 151-166.
- Loke, M. H. 2010. "Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys." *Geotomo Software, Malaysia*.
- Loke, M. H., R. D. Barker. 1996a. "Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion." *Geophysical Prospecting* 44: 499-523.
- Loke, M. H., R. D. Barker. 1996b. "Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo-sections using quasi-Newton method." *Geophysical Prospecting* 48: 152-181.
- Marescot, Laurent. 2008. *Imagerie électrique pour géologues. Acquisition, traitement, interprétation*. Zurich: ETH - Swiss Federal Institute of Technology.
- Melton, B., S. 1937. Electromagnetic prospecting method. Patent US: 2,077,707.
- Mohan, N. L., N. Sundararajan, S. V.S Rao. 1982. "Interpretation of some two-dimensional magnetic bodies using Hilbert transforms." *Geophysics* 47 (3): 376.
- Morintz, Alexandru, Cristian Schuster. 2004. *Aplicatii ale topografiei si cartografiei in cercetarea arheologica*. Târgoviște: Editura "Cetatea de Scaun".
- Nabighian, M. N. 1972. "The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation." *Geophysics* 37 (3): 507-517.
- Orton, Clive. 2000. *Sampling in Archaeology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oswin, John. 2009. *A Field Guide to Geophysics in Archaeology*. Springer, July.

- Păunescu, Alexandru. 1980. "Evoluția istorică pe teritoriul României din paleolitic până la începutul Neoliticului." *Studii și Cercetări de Istorie Veche și Arheologie* 31 (4): 519-545.
- Panaiotu, Cristian George. 2006. *Geomagnetism*. București: Ed. Ars Docendi.
- Papadopoulos, Nikos G., M-J Yi, J-H Kim, Panagiotis Tsourlos, Gregory N. Tsokas. 2010. "Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D Electrical Resistivity Tomography." *Journal of Applied Geophysics* 70 (3) (March): 192-205.
- Pennock, Steve and Miles Redfern. 2002. Ground Penetrating Radar System for locating Buried Utilities. In: P., D. Smith and S., R. Cloude, (eds). *Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 5*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp.267-274.
- Polymenakos, L., SP Papamarinopoulos. 2005. "Exploring a prehistoric site for remains of human structures by three-dimensional seismic tomography." *Archaeological Prospection* 12 (4): 221-233.
- Polymenakos, L., S Papamarinopoulos, A. Liosis, Ch. Koukouli-Chryssanthaki. 2004. "Investigation of a monumental Macedonian tumulus by three-dimensional seismic tomography." *Archaeological Prospection* 11 (3): 145-158.
- Sîrbu, Valeriu. 2003. "Arheologia funerară și sacrificiile: o terminologie unitară."
- Sîrbu, Valeriu, D Ștefan, MM Duțescu. 2008. Telița - Celic Dere, Tulcea County. Landscape Studies. In *Funerary Practices in Central and Eastern Europe (10th c. BC - 3rd c. AD) - Proceedings of the 10th International Colloquium of Funerary Archaeology. Tulcea, 10th - 12th of October 2008*, ed. Valeriu Sărbu and Radu Ștefănescu. Braila, Brașov: Muzeul Brăilei - Editura Istros.
- Sasaki, Y. 1994. "3D Inversion using the Finite Element Method." *Geophysics* 59: 1839-1848.
- Schiffer, Michael. 1996. *Formation processes of the archaeological record*. Salt Lake City: University of Utah Press.
- Schmidt, A. 2007. "Archaeology, magnetic methods." *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, New York*: 23–31.
- Schmidt, Armin. 2002. *Geophysical data in archaeology: a guide to good practice*. Oxbow Books, July 1.
- Schwertmann, U., R. M Cornell. 2000. *Iron oxides in the laboratory*. Vol. 188. Wiley Online Library.
- Scollar, I., A. Tabbagh, A. Hesse, I. Herzog. 1990. *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge.
- Scollar, Irwin. 1986. "Display of archaeological magnetic data." *Geophysics* 51 (3): 623.
- Scollar, Irwin, Bernd Weidner, Karel Segeth. 1986. "Display of archaeological magnetic data." *Geophysics* 51 (3) (March): 623-633.

- Shennan, S. 1997. *Quantifying archaeology, 2nd revised edition*. Edinburgh: Edinburgh University Press.
- Simion, Gavrilă. 2000. Tombes tumulaires dans la necropole de Celic-Cere. In *Tombes tumulaires de l'Age du Fer dans le Sud-est de l'Europe Actes du II Colloque International d'Archéologie Funéraire, Tulcea Septembre 1995*, ed. Gavrilă Simion and Vasilica Lungu. Tulcea.
- Smekalova, N. Tatyana, Olfert Voss, Sergey L. Smekalov. 2008. *Magnetic surveying in archaeology*. 2nd ed. Wormianum.
- Stanley, J. M, R. Green. 1976. "Gravity gradients and the interpretation of the truncated plate." *Geophysics* 41 (6): 1370.
- Ștefan, Dan. 2009. Aplicații magnetometrice în arheologia epocii fierului. In *Geo2009 - București: Fac. de Geologie și Geofizică, UniBuc*.
- Ștefan, Dan. 2009b. "Geophysics as an aid in funerary Site interpretation." *Mousaios* XIV: 175-185.
- Ștefan, Dan. 2010. "Some Statistical Remarks on Classification of Weapons Deposited in Graves." *Istros* (XVI): 283-292.
- Ștefan, Dan, M-M Ștefan, Cătălin Petre Constantin. 2010. "Studiul geomagnetic al fortificațiilor din epoca bronzului de la Păuleni Ciuc - Ciomortan "Dâmbul Cetății", jud. Harghita." *Angustia* 14.
- Ștefan, Dan, Maria-Magdalena Duțescu. 2005. Abordări teoretice și cercetări interdisciplinare. In *Incinta dacică fortificată Pietroasa Mică - Gruiu Dării (II)*, by Valeriu Sîrbu, Sebastian Matei, and Vasile Dupoi, 119-138. Buzău.
- Ștefan, Dan, M-M Duțescu. 2006. Topografia arheologică și modele de analiză spațială. In *Augustin – Tipia Ormenișului. Monografie Arheologică*, by Florea Costea, Angelica Bălos, Lucica Savu, Radu Ardevan, Adrian Ursuțiu, Ioan Șoneriu, Georgeta El Susi, Beatrice Ciută, Dan Ștefan, and M.-M. Duțescu, 253-257. Brașov.
- Ștefan, Dan, Florin Gârbacea, Dumitru Ioane. 2011. "Geophysical Survey of a Flattened Mound Located in Braila's Plain (submitted)." *Istros* 18.
- Ștefan, Dan, Valeriu Sîrbu. 2010. "Statistical Tools in Landscape Archaeology." *Archeologia e Calcolatori* 21: 359-356.
- Streit, Katie. 2001. 2D Frequency Domain Filtering and the 2D DFT.
http://www.clear.rice.edu/elec301/Projects01/image_filt/matlab.html.
- Sundararajan, N., N. L Mohan, M. S. Vijaya Raghava, S. V. Seshagiri Rao. 1985. "Hilbert transform in the interpretation of magnetic anomalies of various components due to a thin infinite dike." *Pure and Applied Geophysics* 123: 557-566.
- Székely, Zoltan. 1970. "Cultura Ciomortan." *Aluta*: 71-76.
- Tonkov, N., M. H. Loke. 2006. "A resistivity survey of a burial mound in the 'Valley of the Thracian Kings'." *Archaeological Prospection* 13 (2): 129-136. doi:10.1002/arp.273.

- Tsokas, Gregory N. 1995. "The detection of monumental tombs buried in tumuli by seismic refraction." *Geophysics* 60 (6): 1735.
- Tsokas, Gregory N., C.B. Papazachos, A. Vafidis, M.Z. Loucoyannakis, MZ Vargemezis, K. Tzimeas. 1995. "The detection of monumental tombs buried in tumuli by seismic refraction." *Geophysics* 60 (6): 1735-1742.
- Tsokas, Gregory N., G Vargemezis, Alexandros Stampolidis, Hr. Karadimas, Dumitru Ioane. 2008. Geofysikí diaskópisi stin evrýteri periochí tou archaíou theátrou sti thési Kampána tis Maróneias. In *Io Sympósio Archaíologikí Éreyna kai Nées Technologies*. Kalamata.
- Tsokas, Gregory N., A. Sarris, M. Pappa, M. Bessios, C. B. Papazachos, P. Tsourslos, A. Gannopoulos. 1997. "A Large-scale Magnetic Survey in Makrygialos (Pieria), Greece" *Archaeological Propection* (4): 123-137
- Upadhyay, S. K. 2004. *Seismic reflection processing: with special reference to anisotropy*. Springer Verlag.
- Vafidis, A., Gregory N. Tsokas, M.Z. Loucoyannakis, M.Z. Vasiliadis, C.B. Papazachos, MZ Vargemezis. 1995. "Feasibility study on the use of seismic methods in detecting monumental tombs buried in tumuli." *Archaeological Propection* (2): 119-128.
- Verhagen, Philip. 2007. *Case studies in archaeological predictive modelling*. Archaeological Studies Leiden University. Leiden University Press.
- Vickers, R., L. Dolphin, and D. Johnson. 1976. Archeological Investigations at Chaco Canyon Using a Subsurface Radar. In: *Cultural Resource Studies: Non-Destructive Methods of Archeological Exploration, Survey, and Analysis*, Albuquerque, NM: Chaco Center. National Park Service and University of New Mexico, pp.81-101.
- Wiseman, James, Farouk El-Baz. 2007. *Remote sensing in archaeology*. Springer.
- Yi, M, J Kim, Yoonho Song, Seong-Jun Cho, Seung-Hwan Chung, Jung-Hee Suh. 2001. "Three-dimensional imaging of subsurface structures using resistivity data." *Geophysical Prospecting* 49 (4) (July 1): 483-497.