

ΠΡΟΣΦΑΤΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ

Τσόκας, Γ.Ν.

Εργαστήριο Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης,
54006 Θεσσαλονίκη, Μακεδονία, Ελλάδα.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

Παρουσιάζεται η ανάπτυξη των γεωφυσικών μεθόδων στον τομέα της εξερεύνησης αρχαιολογικών χώρων η οποία υπήρξε σημαντική κατά την τελευταία δεκαετία. Η περιγραφή των συγχρόνων τάσεων γίνεται κατά μέθοδο και συζητούνται κριτικά οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται. Επιχειρείται η σύγκριση της αποτελεσματικότητας και εφαρμοσιμότητας κάθε μεθόδου ως προς συγκεκριμένους στόχους. Δίνονται παραδείγματα εφαρμογών κυρίως από την Ελλάδα και τονίζεται η ο σημασία τους στην αρχαιολογική έρευνα.

DEVELOPMENT AND FUTURE TRENDS OF GEOPHYSICAL METHODS
IN ARCHAEOLOGICAL RESEARCH

Tsokas, G.N.

A B S T R A C T

The evolution of the geophysical methods employed in the archaeological exploration is presented. The modern trends of each method are described and the techniques used are discussed. The suitability and effectiveness of the methods are compared with respect to specific targets. The examples which are mainly from Greece show the impact of the methods in Archaeology.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σύνολο των μεθόδων και τεχνικών των θετικών επιστημών οι οποίες βρίσκουν κάποια εφαρμογή στην Αρχαιολογία αποτέλεσε μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο μια αυτοτελή επιστημονική οντότητα. Αρχικά ονομάστηκε "Αρχαιοφυσική", αλλά σύντομα επικράτησε ο γενικότερος και σωστότερος όρος "Αρχαιομετρία". Η νέα αυτή οντότητα αποτέλεσε ουσιαστικά ένα amalgama τεχνικών και μεθόδων, οι οποίες ήταν περισσότερο ή λιγότερο γνωστές αλλά είχαν όμως χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη λύση άλλων προβλημάτων και προφανώς συνέβαλαν επιτυχώς στη λύση αρχαιολογικών προβλημάτων. Με τον καιρό όμως φάνηκε ότι δεν ήταν αρκετή η επιτυχής προσαρμογή τους στην Αρχαιολογία, ότι έπρεπε οι ίδιες αυτές μέθοδοι να εξελιχθούν στη βάση της επιστήμης την οποία επικουρούν και ότι έπρεπε επίσης να αναπτυχθούν νέες. Ετσι, από το στάδιο του υβριδισμού περάσαμε στο στάδιο της αυτοτελούς ανάπτυξης, η πράγμα που έδωσε μεγάλη ώθηση στην Αρχαιομετρία. Ταυτόχρονα, η

επιτυχής εμπλοκή της στην επίλυση ιστορικών, αρχαιολογικών, ανθρωπολογικών, εθνολογικών κ.λ.π. προβλημάτων της προσέδωσε κύρος και την κατέστησε ευρέως γνωστή. Δεν πρέπει όμως να παραγνωρίζεται και το αντίστροφο γεγονός, δηλαδή ότι αρκετές μέθοδοι έχουν την ζωτική ανάγκη της Αρχαιολογίας παρά την βοήθου. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο αρχαιομαγνητισμός όπου τα αρχαιολογικά δεδομένα είναι αναγκαία στην κατασκευή των καμπύλων μεταβολής των στοιχείων του γεωμαγνητικού πεδίου. Από την άλλη μεριά όμως, η ακρίβεια που παρέχει η μέθοδος στις χρονολογήσεις είναι πολύ μικρότερη απ' ότι άλλων μεθόδων και συνήθως πολύ μικρότερη απ' ότι η ακρίβεια των καθαρά αρχαιολογικών μεθόδων (π.χ. αισθητική της εποχής).

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις έχουν τιμητική θέση στην ιστορία της ανάπτυξης της Αρχαιομετρίας, γιατί ήταν αυτές που σηματοδότησαν την εκκίνηση της νέας επιστημονικής ενότητας. Η ηλεκτρική διασκόπηση εφαρμόσθηκε για πρώτη φορά το 1946 και η μαγνητική το 1958 σε τοποθεσίες της Αγγλίας (Aitken, 1974). Οι δύο αυτές μέθοδοι έτυχαν ευρείας εφαρμογής και μέχρι σήμερα είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην αρχαιολογική εξερεύνηση. Εκτός από τις δύο αυτές μεθόδους και όλες οι άλλες μέθοδοι διασκόπησης έχουν τύχει κάποιας εφαρμογής στη λύση συγκεκριμένων αρχαιολογικών προβλημάτων. Η περιορισμένη χρήση των υπολοίπων αυτών μεθόδων οφείλεται στο μεγάλο χρόνο εκτέλεσης της διασκόπησης, στην οικονομική επιβάρυνση των έργων και στα δαπανηρά όργανα που απαιτούνται. Το κύριο όμως μειονέκτημα τους είναι ότι δε μπορούν να εφαρμοστούν σε συνηθισμένες αρχαιολογικές εξερευνησεις ρουτίνας γιατί περιορίζονται από το σχετικά μεγάλο μήκος κύματος ως προς τις διαστάσεις του στόχου.

Ο Wynne (1986) εισήγαγε τον όρο "γεωφυσικές διασκοπήσεις μεγάλης διακριτικής ικανότητας" ως γενική περιγραφή. Ο όρος αυτός είναι πράγματι δόκιμος, γιατί οι ανωμαλίες που καταγράφονται στην αρχαιολογική εξερεύνηση είναι κατά πολύ μικρότερου μήκους κύματος αυτών που συνήθως συναντώνται στις άλλες εξερευνησεις (π.χ. μεταλλευτική έρευνα, τεχνική Γεωφυσική κ.ο.κ.). Το γεγονός αυτό, δίνει, και την πραγματική διάσταση των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογία. Τα σήματα που λαμβάνονται στους φορατές των οργάνων είναι μικρού μήκους κύματος και μικρού πλάτους. Δηλαδή, βρίσκονται λίγο ψηλότερα από τη στάθμη του θαλάσσιου και απαιτούν πολύ μικρό βήμα δειγματοληψίας για να αποδοθούν χωρίς σφάλματα.

Σε αντιδιαστολή με οποιαδήποτε άλλη συμβατική επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων, στις "αρχαιολογικές διασκοπήσεις" χρησιμοποιούνται περισσότερο οι τεχνικές οπτικής ενίσχυσης και επεξεργασίας εικόνων. Επομένως οι τεχνικές παρεμβολής, ενίσχυσης γραμμικών στοιχείων, τεχνικού φωτισμού και σύμπτυξης εικόνων εφαρμόζονται ευρέως με σκοπό την παρουσίαση των γεωφυσικών χαρτών σε μορφή τέτοια που να προσομοιάζουν το αποτέλεσμα της ανασκαφής (Scollar et al., 1986, 1990). Το σχήμα (1) δείχνει ένα παράδειγμα τέτοιου χάρτη της Ακροπόλης της αρχαίας Ευρωπού (Tsokas et al., 1993).

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας επιχειρείται μια ανασκόπηση των εφαρμογών των αρχαιολογικών διασκοπήσεων που έχουν γίνει στην Ελλάδα. Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι πρόσφατες εξελίξεις της ηλεκτρικής και της μαγνητικής μεθόδου. Οι δύο αυτές μέθοδοι είναι οι κατ' εξοχήν χρησιμοποιούμενες στην αρχαιολογική έρευνα και έχουν τη δυνατότητα διασκόπησης μεγάλων εκτάσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα. Στο τέταρτο κεφάλαιο

δίνεται η εξέλιξη των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων συνεχούς (CW) και παροδικής (TEM) κυματομορφής. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η εξέλιξη της μεθόδου του υπεδάφειου ραντάρ και γίνεται μια εκτίμηση των δυνατοτήτων και της εφαρμοσιμότητας της μεθόδου. Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μια πολύ σύντομη αναφορά εφαρμογών όλων των βαρυτομετρικών και σεισμικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης σε προβλήματα εντοπισμού αρχαιοτήτων. Η χρήση των μεθόδων αυτών γίνεται σε πολύ ειδικές περιπτώσεις.



Σχ.1. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην Ακρόπολη της αρχαίας Ευρωπού. Η εικόνα συνίσταται σε 16 τόνους του γκρι και έχει υποστεί επεξεργασία για την ενίσχυση των γραμμικών δομών (Tsokas et al., 1993).

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ "ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ" ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι πρώτες εφαρμογές των γεωφυσικών μεθόδων στην εξερεύνηση Ελληνικών αρχαιολογικών χώρων έγιναν από ξένους επιστήμονες για λογαριασμό των ξένων αρχαιολογικών αποστολών που είναι μόνιμα εγκατεστημένες στη χώρα μας. Με την αρχή της δεκαετίας του 1980 άρχισε να γίνεται ευρεία χρήση των μεθόδων αυτών από Έλληνες επιστήμονες, κυρίως από το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και το Εργαστήριο Γεωφυσικής και Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών. Εντεταμένη αναφορά των θέσεων που εξερευνήθηκαν αλλά και των μέχρι τότε γνωστών αποτελεσμάτων έχει δοθεί από τον Τσόκα (1988). Επίσης, οι Tsokas

και Rocca (1986) επιχείρησαν να δώσουν μία σύνοψη των συμπερασμάτων της Ελληνικής εμπειρίας και επίσης παρουσίασαν πρόταση διαδικασίας εκτέλεσης γεωφυσικής διασκοπήσης αρχαιολογικών χώρων. Οι ίδιοι ερευνητές στην ίδια εργασία, αποτίμησαν τους πιθανούς αποπλανητικούς παράγοντες σε τέτοιου είδους διασκοπήσεις.

Πρέπει να αναφερθεί επίσης ότι αρκετοί Έλληνες είχαν ειδικευθεί στο θέμα με σπουδές επιπέδου σε ξένα Πανεπιστήμια αλλά δυστυχώς δεν ασχολήθηκαν στη συνέχεια. Μεταξύ αυτών οι Grigorίου (1979) και Παρακυριακού (1980) εφάρμοσαν την τετραγωνική διάταξη και μελέτησαν το δείκτη ανισοτροπίας σε αρχαιολογικούς χώρους της Αγγλίας. Οι Sarris και Vassiliadis (1978) εξερεύνησαν τον αρχαιολογικό χώρο του Αμαθούντα στην Κύπρο και ο Srahos (1979) παρουσίασε στη διδακτορική του διατριβή το αναμενόμενο αποτέλεσμα των δομών που συναντώνται πιο συχνά σε αρχαιολογικούς χώρους.

Οι Βλάχος και Λιβιεράτος (1981) αναφέρουν εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου σε τμήμα του χώρου της αρχαίας Πέλλας. Στη συνέχεια ο Paramiropoulos και οι συνεργάτες του (1985, 1988) δημοσίευσαν τα αποτελέσματα διασκοπήσεων που έγιναν στο διάστημα 1983-1985 στην Μυτιλήνη και τη Στύμφαλο. Το ίδιο χρονικό διάστημα έγιναν οι εξερευνήσεις του Μανδάλου και τμημάτων του Δίου, της Βεργίνας και της Πύδνας από το συγγραφέα και τους συνεργάτες του (Tsokas et al., 1986b; 1986c; Tsokas and Saatsoglou-Paliadeli, 1988; Tsokas et al., 1989).

Οι πρώτες αυτές διασκοπήσεις σε αρκετά γνωστούς αρχαιολογικούς χώρους συνετέλεσαν στο να αποκτηθεί ένα επίπεδο εμπειρίας το οποίο ήταν αναγκαίο για την παραπέρα δουλειά. Ακολούθησε η εκτεταμένη εφαρμογή σε τοποθεσίες στην Κω, στη Νάξο, στη Βάρκιζα, στα Ισθμια και τους Λουσσούς από τον Παπαμαρινόπουλο (προσωπική επικοινωνία). Επίσης, ο Λιβιεράτος και οι συνεργάτες του (1985, προσωπική επικοινωνία) εξερεύνησαν μια εκτεταμένη περιοχή στην Ιαλυσσό της Ρόδου και ο Μακρογιαννάκης την τοποθεσία Φαλάσαρνα της Κρήτης (1985, προσωπική επικοινωνία).

Οι Tsokas και Liritzis (1990) πραγματοποίησαν το 1986 ένα εκτεταμένο πρόγραμμα διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους στο κέντρο της Αθήνας. Την ίδια χρονιά οι Paramiropoulos και Tsokas (1988) εξερεύνησαν τον Μινωϊκό οικισμό στην Ψείρα (Κρήτη). Οι ίδιοι ερευνητές εξερεύνησαν επίσης τον πρωτογεωμετρικό οικισμό στο Καβούσι στην Κρήτη την ίδια εποχή.

Σχετικά πρόσφατα, συνεργεία υπό την επίβλεψη του συγγραφέα διεξήγαγαν εκτεταμένες έρευνες στους αρχαιολογικούς χώρους της Αιανής, του Ορφανίου, της Θέρμης, του Αρχοντικού Πέλλας, της Ευρωπού και του Γυναικαστρου (Κιλκίς). Επίσης, έρευνες διεξήχθησαν στην Μαντινεία, τα Νέα Ρόδα, την Τριταία, την Κύπρο και τη Σαντορίνη από τον Παπαμαρινόπουλο (προσωπική επικοινωνία). Οι Katsambalos και Tsioumis (1988) αναφέρουν εφαρμογές μεθόδων σε τοποθεσίες της Ρόδου και της Βεργίνας και ο Katsambalos και οι συνεργάτες του, (1991) εφαρμογή στο κάστρο του Πλαταμώννα.

Γενικά, οι Έλληνες ερευνητές, εκτός των εξερευνήσεων που διεξήγαγαν στη χώρα μας, είχαν και ένα αξιοσημείωτο μέρος στην παγκόσμια προσπάθεια βελτίωσης των μεθόδων και τεχνικών, δηλαδή στη βασική έρευνα στο συγκεκριμένο θέμα.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η γεωηλεκτρική μέθοδος είναι από τις πιο δημοφιλείς στις διασκοπήσεις αρχαιολογικών χώρων. Είναι επίσης από τις πλέον αξιόπιστες, γιατί οι αρχαιότερες παρουσιάζουν συνήθως μεγάλη διαφορά στην τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ως προς αυτή των ιζημάτων που τις φιλοξενούν. Επειδή όμως απαιτούνται πάρα πολλές μετρήσεις, προτιμήθηκαν οι διατάξεις δύο κινουμένων ηλεκτροδίων. Επίσης έγινε προσπάθεια να αναπτυχθούν συστήματα κατά το δυνατόν συμπαγή, ελαφρά, τα οποία να απαιτούν ελάχιστο αριθμό ατόμων για τους χειρισμούς και κυρίως να παρουσιάζουν ορισμένα γεωφυσικά πλεονεκτήματα. Τα τελευταία εστιάζονται στην άμεση αντανάκλαση των διαστάσεων του διατραπεζιού αιτίου στο εύρος της μετρούμενης ανωμαλίας (Aspinall and Lynam, 1968).

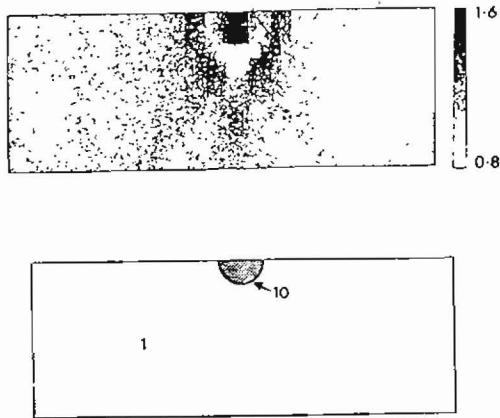
Οι Hesse et al. (1986), έχοντας υπ' όψη τα σοβαρά μεθοδολογικά πλεονεκτήματα της τετραγωνικής διάταξης (Habberjam, 1979) πρότειναν ένα αυτοματοποιημένο σύστημα συλλογής γεωηλεκτρικών δεδομένων σε αρχαιολογικούς χώρους (R.A.T.E.A.U.).

Το παραπάνω σύστημα παρουσιάζει το μεγάλο επίσης πλεονέκτημα της ταχύτητας διεξαγωγής της διασκόπησης και του μικρού βήματος δειγματοληψίας κατά τη διεύθυνση της όδευσης. Μειονεκτεί όμως στο γεγονός ότι δεν υπάρχει τρόπος επανάληψης μετρήσεων όταν παρουσιάζονται υψηλές αντιστάσεις επαφής (stake resistance). Πρέπει να σημειωθεί ότι σε Ελληνικά εδάφη οι αντιστάσεις επαφής είναι μάλλον υψηλές, ιδίως κατά τις ξηρές περιόδους.

Η μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει πρόσβαση για το όχημα που ρυμουλκεί το σύστημα. Δηλαδή, άκρες χωραφιών, δρόμων, θαμνώδεις εκτάσεις κ.λ.π. είναι έξω από τις δυνατότητες της μεθόδου.

Οι Noel και Walker (1989) και Noel and Xu (1991) πρότειναν μια μέθοδο διασκόπησης που αντιστρέφει την ψευδοτομή των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων η οποία κατασκευάζεται με ένα συγκεκριμένο τρόπο και ονομάζεται "γεωηλεκτρική τομογραφία". Η βασική ιδέα του συστήματος είχε εφαρμοστεί πρόσφατα στην ιατρική με σκοπό τον εντοπισμό καταγμάτων των οστών. Η εφαρμογή της μεθόδου στη διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων δεν είχε επιτυχία στο βαθμό που είχε στην Ιατρική. Βασικός λόγος γι' αυτό είναι το γεγονός ότι δε μπορούμε να έχουμε μετρήσεις του όγκου που περιλαμβάνει την ανώμαλη δομή απ' όλες τις πλευρές, γιατί περιοριζόμαστε σε μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης μόνο. Αντίθετα, αν π.χ. θέλουμε να εντοπίσουμε κάταγμα στο καρπό του χεριού, μπορούμε να πάρουμε μετρήσεις περιμετρικά του καρπού. Το γεγονός της "έλλειψης μετρήσεων" έτσι ώστε να συντεθεί μια πλήρης τομογραφική εικόνα οδηγεί σε συγκεχυμένη απεικόνιση του στόχου. Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι η μέθοδος σχεδιάστηκε έτσι ώστε να δίνει τομές σε βάθος και κατά συνέπεια δεν είναι κατάλληλη για γρήγορες επεμβάσεις ούτε για αποτύπωση μεγάλων εκτάσεων. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος είναι πρωτοποριακή, επιδέχεται βελτιώσεις (Tsourlos, 1992) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολύ καλά αποτελέσματα για ορισμένους στόχους. Εισάγει κυρίως δύο καινοτομίες που αφορούν τον τρόπο λήψης των μετρήσεων και τον αλγόριθμο αντιστροφής. Δεν χρησιμοποιείται καμιά από τις γνωστές διατάξεις αποκλειστικά αλλά ένας συνδυασμός των διατάξεων διπόλου-διπόλου και βαθμίδας. Ως προς τον αλγόριθμο αντιστροφής ο οποίος ονομάστηκε οπισθοπροβολή (back projection), είναι η πρώτη φορά που αυτός χρησιμοποιείται

σε γεωφυσικά δεδομένα.



Σχ.2. Ανακατασκευή του χώρου των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων (α) που οφείλονται σε ημισφαίριο (β) με τη μέθοδο της "ηλεκτρικής τομογραφίας και χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο οπισθοπροβολής (Noel and Xu, 1991). Οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις της δομής και του περιβάλλοντος φαίνονται στο σχήμα.

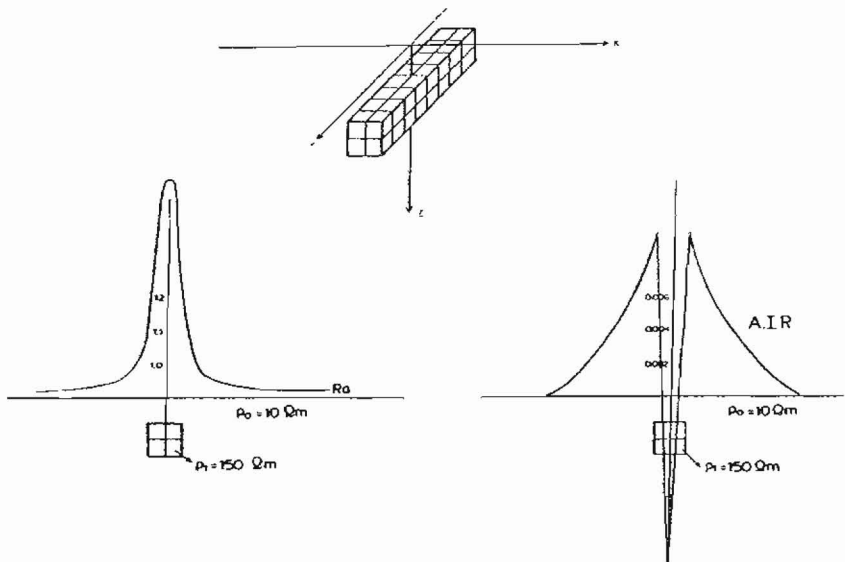
Στο σχήμα (2) φαίνεται ένα συνθετικό παράδειγμα γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Noel and Walker, 1989). Στο παράδειγμα αυτό φαίνεται η εικόνα που κατασκευάζεται με τη συγκεκριμένη μέθοδο (α) και αποδίδει το μοντέλο που σχεδιάστηκε στο (β). Το μοντέλο αποτελείται από ένα ημισφαίριο με υψηλότερη ειδική ηλεκτρική αντίσταση από το περιβάλλον, και ευρίσκεται στην επιφάνεια της Γης.

Λύσεις του διδιάστατου και τρισδιάστατου ευθέως προβλήματος στη γεωηλεκτρική διασκόπηση με σκοπό την εφαρμογή τους σε αρχαιολογικές εξερευνησεις προτάθηκαν από τους Glasunov και Esmokhin (1992). Οι λύσεις αυτές στηρίζονται στην θεώρηση της ηλεκτρικής πόλωσης ως ποσότητας ανάλογης της μαγνητικής επαγωγής. Επίσης οι ερευνητές αυτοί υποθέτουν ότι το μέσο αποτελείται από πάρα πολλές κυψελίδες διαφορετικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και έτσι κατασκευάζουν ένα σύστημα εξισώσεων το οποίο λύνεται με την μέθοδο των διαδοχικών προσεγγίσεων.

Οι Dittmer και Szymanski (1992) πρότειναν μια άλλη διαδικασία διδιάστατης προσομοίωσης η οποία στηρίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (F.E.M.). Η διαδικασία αυτή παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα και είναι αρκετά ευέλικτη έτσι ώστε να επιτρέπει προσομοιώσεις δομών με οποιοδήποτε σχήμα. Έχει την δυνατότητα χρήσης με οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων και έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα στις δοκιμές που διεξήγαγαν οι ερευνητές που την πρότειναν. Επίσης, τα αποτελέσματα είναι

συμβατά με προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με την μέθοδο της επίλυσης ολοκληρωτικών εξισώσεων. Το μόνο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο σχετικά μεγάλος χρόνος αποσχόλησης του υπολογιστή που απαιτείται. Το γεγονός αυτό αφορά προφανώς τους επιτραπέζιους και τους φορητούς υπολογιστές.

Είναι γνωστό ότι με οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων τοποθετημένη στην επιφάνεια του εδάφους μπορούμε να μετρήσουμε μόνο τρεις διαφορετικές αντιστάσεις (Carpenter and Habberjam, 1956). Αν οι μετρήσεις αυτές γίνουν με μη γραμμικές διατάξεις, π.χ. με την τετραγωνική διάταξη, τότε μπορεί κανείς να έχει ένα μέτρο της φαινόμενης ηλεκτρικής ανισotropίας. Ένα τέτοιο μέτρο της ανισotropίας του εδάφους είναι ο δείκτης γωνιακής ανομοιομεγένειας (A.I.R., Azimuthal Inhomogeneity Ratio) που προτάθηκε από τους Habberjam και Watkins (1967). Τη χρήση του μέτρου αυτού σε διασκοπήσεις αρχαιολογικών χώρων, καθώς και την



Σχ.3. Ανωμαλία ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με την διάταξη Schlumberger και την τετραγωνική (αριστερά) η οποία προκαλείται από πρίσμα πεπερασμένων διαστάσεων και αντίστασης υψηλότερης του περιβάλλοντος (κέντρο) κατά την όδευση στη διεύθυνση x . Η μορφή της ανωμαλίας του δείκτη A.I.R. είναι πολύπλοκη (δεξιά) αλλά ορίζει με ακρίβεια τα όρια του σώματος (Ermokhin et al., 1992).

ιδιότητα μιας εκ των τριών αντιστάσεων να μηδενίζεται σε ομογενές και ισότροπο μέσο, μελέτησαν οι Grigoriou και Tsokas (1992). Οι ερευνητές αυτοί κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση του A.I.R. βοηθά στο να ξεπεραστούν αμφιβολίες που εγείρονται κατά την ερμηνεία. Επίσης, επειδή οι μορφές των ανωμαλιών A.I.R. δεν είναι απλές, είναι γι' αυτό ακριβώς το λόγο πολύ κατάλληλες για εφαρμογή διαδικασιών αναγνώρισης σήματος. Τα πλεονεκτήματα όμως αυτά θα πρέπει κανείς να τα σταθμίσει σε αντιπαράθεση με τις

πρακτικές δυσκολίες που εγείρονται από την χρησιμοποίηση της τετραγωνικής διάταξης. Στο παράδειγμα του σχήματος (3) φαίνεται η ανωμαλία που προκαλεί ένα πρίσμα πεπερασμένων διαστάσεων κατά την ηλεκτρική όδευση με την τετραγωνική διάταξη σε τύπο α (Ermokhin et al., 1992). Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η μορφή της ανωμαλίας A.I.R. και μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει ότι αυτή ορίζει με αναμφίβολο τρόπο τα όρια του υπεδάφειου σώματος.

Εκτός των ερευνητικών αναζητήσεων που εκτέθηκαν προηγουμένως, παρατηρείται και μια τάση για πραγματοποίηση γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων μεγάλων εκτάσεων (Leckebush, 1989; Nenon and Strange, 1992; Tsokas et al., 1992). Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στην εισαγωγή των αυτομάτων συστημάτων λήψης μετρήσεων όπως το R.A.T.E.A.U. που ήδη αναφέρθηκε.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Η μαγνητική μέθοδος είναι, όπως και η ηλεκτρική, από τις περισσότερο χρησιμοποιούμενες στην εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων. Αρχικά η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για ανίχνευση καμινών, φούρνων κεραμοποιίας και εστιών πυρός. Ο λόγος ήταν ότι οι δομές αυτές παρουσιάζουν ενισχυμένη επαγόμενη και παραμένουσα μαγνήτιση και έτσι προκαλούν θεαματικά μεγάλες μαγνητικές ανωμαλίες. Στη συνέχεια, όμως, και αφού προηγήθηκε η εισαγωγή του πυρηνικού μαγνητομέτρου, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε και για τον εντοπισμό δομών που προκαλούν ασθενέστερα σήματα. Η συνεχής βελτίωση του πυρηνικού μαγνητομέτρου και η εισαγωγή των μαγνητομέτρων "αλκαλικού αερίου" έκανε δυνατή την πραγματοποίηση μετρήσεων με ακρίβεια δεκάτου του nTesla. Η ίδια ακρίβεια έχει επιτευχθεί σήμερα και για τα μαγνητόμετρα ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής. Το γεγονός αυτό κατέστησε τη μέθοδο ικανή να μπορεί να ανιχνεύσει πολύ ασθενή σήματα. Συναικόλουθα, την έκανε κατάλληλη για παραγωγή αποτυπώσεων που μετά από κάποια επεξεργασία θα μπορούσαν να δώσουν μια εικόνα που να προσομοιάζει την κάτοψη των ερειπίων που υπάρχουν θαμμένα σε κάποιο αρχαιολογικό χώρο. Αυτή λοιπόν η ικανότητα της μεθόδου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η εφαρμογή της είναι πολύ πιο εύκολη κατά κανόνα από την ηλεκτρική μέθοδο, την έφερε σε πρώτη προτίμηση για τη διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων. Τα τελευταία μάλιστα χρόνια χρησιμοποιούνται περισσότερο τα διαφορικά μαγνητόμετρα, γιατί δεν απαιτείται διόρθωση των μετρήσεων για την ημερήσια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου. Επομένως, η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να γίνει πολύ γρήγορα από ένα μόνο χειριστή και εάν το όργανο διαθέτει μνήμη είναι δυνατόν να παραχθούν αποτελέσματα στο ύπαιθρο αυτοστιγμεί.

Ιδιαίτερα ταχεία τεχνική πραγματοποίησης των μετρήσεων είναι αυτή που προτάθηκε από τον Becker (1987) και χρησιμοποιεί ένα ρυμουλκούμενο διαφορικό μαγνητόμετρο "οπτικής αντλίας" κεσίου. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης μέχρι και 30.000 μετρήσεων σε 10 ώρες.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται με διαφορικό μαγνητόμετρο είναι απαλλαγμένες από το θόρυβο που εισάγεται λόγω των ατελειών της διαδικασίας διόρθωσης εξ αιτίας της ημερήσιας μεταβολής. Οι ατέλειες αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι γίνεται προέκταση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων του σταθμού βάσης θεωρώντας συνήθως ότι η μεταβολή στο διάστημα αυτό είναι γραμμική. Η

απόκλιση από την υπόθεση αυτή μπορεί να εισάγει σημαντικά σφάλματα πράγμα που συμβαίνει κατά τη διάρκεια ημερών με κάποια μαγνητική δραστηριότητα. Από την άλλη μεριά, οι διαφορικές μετρήσεις μπορούν να καταγράψουν ανωμαλίες που προκαλούνται από δομές που βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια της Γης από αυτές που μπορούν να καταγραφούν με μετρήσεις ολικού πεδίου. Δηλαδή, η εμβέλεια της διαφορικής μέτρησης είναι μικρότερη πράγμα που δίνει κάποια σημεία και στην μέτρηση ολικού πεδίου. Ένας τρόπος συγκερασμού των πλεονεκτημάτων των δύο τεχνικών προτάθηκε από τους Weymouth και Lessard (1986). Οι ερευνητές αυτοί προτείνουν την ταυτόχρονη πραγματοποίηση μετρήσεων από το κινητό μαγνητόμετρο και το σταθμό βάσης. Τα δεδομένα που παράγονται μ' αυτό τον τρόπο είναι απαλλαγμένα από το θόρυβο που εισάγεται λόγω ατελειών διόρθωσης και ταυτόχρονα διασκοπούν τη Γη σε μεγαλύτερο βάθος.

Είναι γνωστό ότι οι μαγνητικές ιδιότητες των εδαφών οφείλονται κυρίως στην περιεκτικότητά τους σε οξειδία του σιδήρου. Όσον αφορά τις γεωφυσικές διασκοπήσεις για εντοπισμό αρχαιοτήτων, τα φερίμαγνητικά και αντιφερίμαγνητικά ορυκτά που παίζουν κάποιο ρόλο στην διαμόρφωση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των εδαφών είναι τα οξειδία και υδροοξειδία του σιδήρου, το οξειδίο του τιτανίου και σιδήρου (ιλμενίτης) και το σουλφίδιο του σιδήρου (μαγνητοπυρίτης). Έχει αποδειχθεί ότι η "ισχυρή συνιστώσα" της μαγνητικής επιδεκτικότητας οφείλεται στον μαγνητίτη και το μαγκαιμίτη, ενώ η ασθενής συνιστώσα στον αιματίτη, τον γκαιτίτη, τον λεπιδοκροκίτη κ.α. (Maher, 1986).

Η μαγνήτιση κόρου του μαγνητίτη και του μαγκαιμίτη είναι 200 φορές μεγαλύτερη αυτής του αιματίτη (Weymouth and Huggins, 1985).

Τα τελευταία χρόνια συνεχίστηκε η έρευνα για την κατανόηση των μηχανισμών ενίσχυσης της μαγνητικής επιδεκτικότητας των εδαφών σε αρχαιολογικούς χώρους. Το γεγονός της ενίσχυσης του επιφανειακού στρώματος της Γης (=40cm) είχε παρατηρηθεί πρώτα από τους Tucker (1952) και LeBorgne (1955, 1960) οι οποίοι και θεώρησαν την θέρμανση και την δράση βακτηριδίων ως την πιθανή εξήγηση. Ο Scollar (1965) και αργότερα άλλοι ερευνητές (Tite and Mullins, 1971; Aithen 1972) ασχολήθηκαν με το φαινόμενο αυτό σε συνδιασμό με την έρευνα σε αρχαιολογικούς χώρους. Οι Maher (1986) και Scollar et al. (1990) ασχολήθηκαν πρόσφατα με το ίδιο θέμα. Τα συμπεράσματα τους μπορούν αν συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα I (Sarris, 1992).

Τμήματα των διαδικασιών μεταοχηματισμού των οξειδίων που αναφέρονται στον πίνακα (I) έχουν αποδειχθεί πειραματικά. Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν ακόμα αρκετά ερωτηματικά και αβεβαιότητες. Για το λόγο αυτό, η έρευνα στο συγκεκριμένο θέμα συνεχίζεται εντατικά.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τελικός σκοπός των διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους είναι η παρουσίαση των δεδομένων σε μορφή τέτοια ώστε να είναι άμεσα ερμηνεύσιμα από οποιονδήποτε και όχι μόνον από ειδικούς. Η μορφή αυτή δε μπορεί να είναι άλλη από κάποια εικόνα που θα προσομοιάζει την κάτοψη των ερειπίων, δηλαδή το αποτέλεσμα που θα βλέπουμε αν είχε διεξαχθεί ανασκαφή. Μια τέτοια εικόνα είναι άμεσα αναγνώσιμη από τον αρχαιολόγο τον οποίο βοηθά να εντοπίσει τους στόχους του και να σχεδιάσει κατάλληλα την ανασκαφή. Από την άλλη μεριά, η εικόνα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δικονομική απόδειξη της ύπαρξης των ερειπίων σε περιπτώσεις απαλλοτριώσεων όπως συμβαίνει σε μερικές χώρες της

Ευρώπης. Συγκεκριμένα στην Γερμανία και την Αγγλία, τα γεωφυσικά αυτά σχέδια θεωρούνται με νόμο αποδεικτικά στοιχεία (Scollar et al., 1986).

Πίνακας I. Μηχανισμοί ενίσχυσης της μαγνητικής επιδεικτικότητας εδαφών (Sarris, 1992).

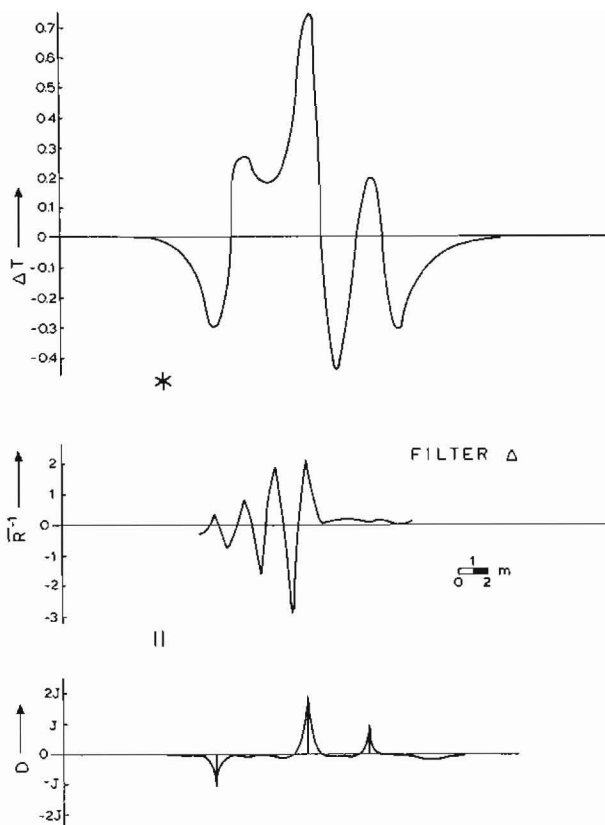
SUSCEPTIBILITY ENHANCEMENT MECHANISMS

1. Low temperature (150-250°) oxidation of magnetite
magnetite -----> (oxidation) -----> maghaemite (<600 nm)
hematite (>600 nm)
2. Heating Mechanism/Burning (up to 600° C)
haematite -- (heating/reduced atm) ---> magnetite -- (cooling) ---> maghaemite
3. Dahydration of Lepidocrocite (γFeOOH).
4. Fermentation Mechanism (Reduction - Oxidation Cycles)
Organic matter/ bacterial activity / anaerobic - aerobic cycles/wet-dry periods.

"Maghaemite is always one of the dominant products of the enhancement mechanisms".

Το πρόβλημα όμως της μαγνητικής διασκόπησης είναι ότι το σήμα παρουσιάζει τόσο θετικό όσο και αρνητικό λοβό και μάλιστα η έντασή του εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος που διεξάγεται η διασκόπηση. Με άλλα λόγια, τα σήματα πρέπει να ανορθώνονται πριν από τον μετασχηματισμό των μαγνητικών δεδομένων σε εικόνα για να αποφευχθεί η παραγωγή συγκεχυμένου αποτελέσματος. Η διαδίαστατη διαδικασία που προτάθηκε από τους Karousova και Karous (1989) και τον Tsokas και τους συνεργάτες του (1991), για την λύση αυτού του προβλήματος, στηρίζεται στην παραγωγή των καταλλήλων φίλτρων Wiener. Η μαγνητική ανωμαλία θεωρείται προϊόν συνέλιξης μιας συνάρτησης διαμόρφωσης πλάτους και μιας άλλης που καθορίζει την μορφή της. Η αντιστροφή της συνάρτησης "μορφής" δίνει το φίλτρο Wiener το οποίο συνελισσόμενο με την μαγνητική ανωμαλία την ανορθώνει και τοποθετεί το μέγιστο της ανορθωμένης ανωμαλίας στο επίκεντρο του σώματος που την προκαλεί. Επίσης οι οριζόντιες διαστάσεις του σώματος αντιστοιχούν απ' ευθείας στην έκταση της ανορθωμένης ανωμαλίας. Ένα συνθετικό παράδειγμα της διαδικασίας αυτής φαίνεται στο σχήμα (4).

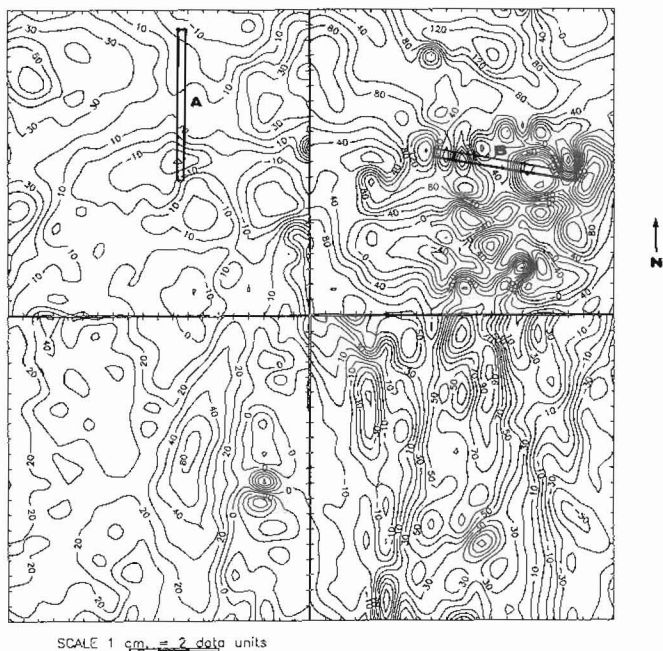
Οι Tsokas και Papazachos (1992) στηριζόμενοι στη θεώρηση που αναφέρθηκε παραπάνω, πρότειναν διαδίαστατα φίλτρα αντιστροφής χρησιμοποιώντας την ανωμαλία που παράγεται από τριδιάστατα σώματα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής των διδιάστατων αυτών φίλτρων αντιστροφής δίνεται στα σχήματα (5) και (6). Στο πρώτο από τα δύο αυτά σχήματα φαίνεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε τοποθεσία του χώρου των αρχαίων Αιγών (Βεργίνα) κοντά σε ορατά λείψανα του αμυντικού τείχους της πόλεως. Στο δεύτερο σχήμα δίνονται οι ανορθωμένες ανωμαλίες μετά την εφαρμογή φίλτρου αντιστροφής.



Σχ.4. Συνθετικό παράδειγμα εφαρμογής φίλτρου αντιστροφής στην ανωμαλία που προκαλείται από 3 κύβους πλευράς ίσης με το βήμα δειγματοληψίας αλλά διαφορετικής μαγνήτισης, των οποίων οι πάνω επιφάνειες είναι σε βάθος ενός βήματος δειγματοληψίας. Οι θέσεις των κύβων και το μέγεθος της μαγνήτισής τους αποδίδονται με τους παλμούς του κάτω διαγράμματος. Η ανωμαλία φαίνεται στο πάνω τμήμα του σχήματος, ενώ το φίλτρο έχει σχεδιαστεί στο κέντρο. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή νέων ανωμαλιών που φαίνονται στο κάτω τμήμα του σχήματος. Οι ανωμαλίες αυτές έχουν πλάτος ίσο με την μαγνήτιση των κύβων. Είναι ανορθωμένες με κέντρο στο επίκεντρο των σωμάτων που τις προκαλούν και το εύρος τους αποδίδει προσεγγιστικά το εύρος των σωμάτων αυτών (Tsokas et al., 1991).

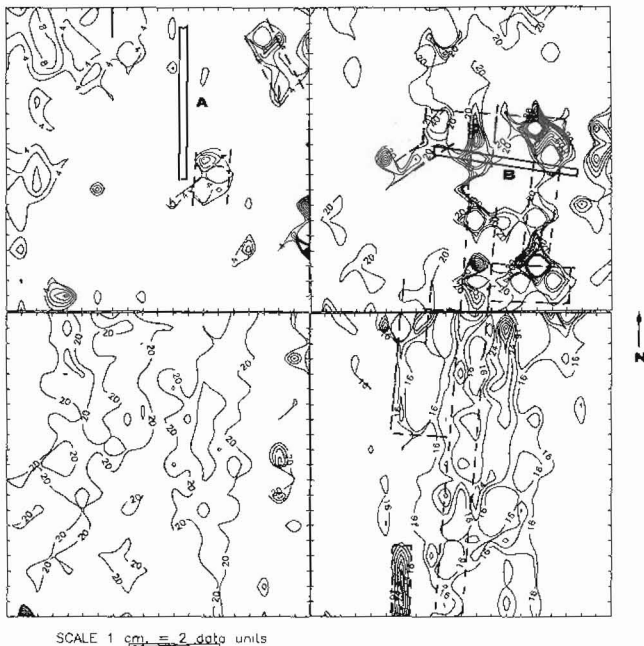
Η αντιστροφή των μαγνητικών ανωμαλιών έτσι ώστε να δώσουν την κατανομή της μαγνήτισης που τις προκάλεσε, αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της μαγνητικής διασκόπησης. Είναι γνωστό ότι το πρόβλημα αυτό τίθεται ασθενώς και δε μπορεί να βρεθεί

πραλιστική λύση αν δεν υπάρχουν ρεαλιστικές υποθέσεις και κάποια εκ των προτέρων γνώση. Σημαντικές προσπάθειες με σκοπό την αντιστροφή των μαγνητικών δεδομένων από αρχαιολογικούς χώρους έχουν γίνει πρόσφατα από τους Glasunov και Ermokhin (1992) και Szymanski και Dittmer (1992). Η πρώτη ομάδα ερευνητών στηρίχτηκε στην μέθοδο βελτιστοποίησης με τη χρήση παράγοντα κανονικοποίησης και η δεύτερη στην μέθοδο της μέγιστης εντροπίας (MEM).



Σχ.5. Χάρτης κατανομής του μαγνητικού πεδίου σε τμήμα του αρχαιολογικού χώρου των αρχαίων Αιγών (Βεργίνα) στην προέκταση ορατού λειψάνου του τείχους της πόλεως το οποίο σημειώνεται στο σχήμα (Tsokas and Parazachos, 1992).

Η υποθαλάσσια μαγνητομετρία έχει επίσης αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια (Petkov et al., 1990) παρά το γεγονός ότι απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, ακριβά μέσα και ειδικές γνώσεις Ναυσιπλοΐας και Γεωδαισίας. Συνήθως, οι υποβρύχιες μαγνητικές διασκοπήσεις συνδιάζονται με ηχοβολισμούς (sonar) ή ηχοβολισμούς πλευρικής σάρωσης (side scan sonar). Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως κατά τις χερσαίες αποτυπώσεις παρ' ότι ο στόχος είναι συνήθως η ανακάλυψη ναυαγίων, δηλαδή πολύ διαφορετικός από τον εντοπισμό ερειπίων.



Σχ.6. Χάρτης κατανομής των ανορθωμένων ανωμαλιών μετά από εφαρμογή φίλτρου αντιστροφής στα δεδομένα του σχήματος (5). Στο σχήμα σημειώνεται και η θέση εσκαφής αναγνωριστικών τομών (Tsokas and Papazachos, 1992).

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος συνεχούς κυματομορφής (CW) χρησιμοποιείται στην αρχαιολογική έρευνα από την δεκαετία του 1960. Όπως διαπιστώθηκε από την αρχή, η μέθοδος ελκύει την προσοχή των αρχαιοκαπήλων και των ερασιτεχνών, γιατί είναι κατάλληλη για ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων σε μικρό βάθος. Διάφοροι τύποι ηλεκτρομαγνητικών οργάνων απλού ή διπλού πηνίου έγιναν ευρέως γνωστοί με το εμπορικό όνομα "ανιχνευτές μετάλλου". Η διαφήμιση δε των ικανοτήτων τους έχει ξεφύγει κατά πολύ από τα όρια της επιστημονικής αλήθειας όπως και οι τιμές τους από τα λογικά πλαίσια.

Από τα πρώτα πειράματα που διεξήχθησαν έγινε φανερό ότι η μέθοδος υπόκειται σε σοβαρούς περιορισμούς (Tite and Mullins, 1969; 1970). Οι περιορισμοί ταξινομήθηκαν σε δύο κατηγορίες, σ' αυτούς που αφορούν τη φυσική αρχή της μεθόδου και σ' αυτούς που

έχουν να κάνουν με το επίπεδο εξέλιξης των οργάνων (Tabbagh, 1984). Στην πρώτη κατηγορία κατατάχθηκαν το πρόβλημα του μικρού βάθους διάτρησης, η σχετικά μικρή εγκάρσια διακριτική ικανότητα και οι αμφιβολίες που εγείρονται κατά την ερμηνεία.

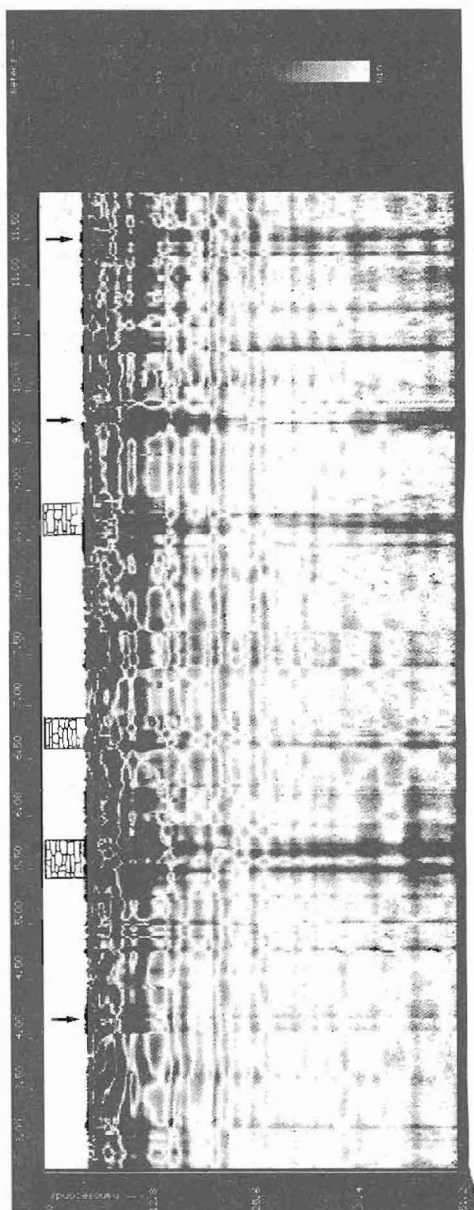
Τα σύγχρονα όργανα έχουν τη δυνατότητα μέτρησης τόσο της πραγματικής όσο και της φανταστικής συνιστώσας του δευτερογενούς πεδίου. Κατά συνέπεια, μπορεί κανείς να καταγράψει ταυτόχρονα διαφοροποιήσεις της μαγνητικής επιδεικτικότητας και της αγωγιμότητας του υπεδάφους. Επίσης η μέθοδος αντιδρά στην παρουσία μεταλλικών αντικειμένων είτε έχουν μαγνήτιση είτε όχι. Στα πλεονεκτήματα πρέπει να προστεθεί το γεγονός ότι δε χρειάζεται επαφή με το έδαφος για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις, πράγμα που δίνει ευελιξία και ταχύτητα στην εφαρμογή σε σχέση με την ηλεκτρική μέθοδο. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα συνεχούς καταγραφής κατά μήκος των οδεύσεων πράγμα που δεν είναι εφικτό με τα συνηθισμένα όργανα στις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

Ο Tabbagh (1984) μελέτησε τα πλεονεκτήματα της μεθόδου σε σύγκριση με την μαγνητική. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος Slingram είναι πιο ενδιαφέρουσα εκτός των περιπτώσεων που οι στόχοι είναι μεγάλες και βαθιές δομές (η πάνω επιφάνεια να είναι τουλάχιστον 1m βάθος). Επίσης, επεσήμανε το γεγονός ότι για να βελτιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου είναι αναγκαίο να σχεδιαστούν όργανα αποκλειστικά για την αρχαιολογική εξερεύνηση. Τα συμπεράσματα αυτά στηρίχτηκαν κυρίως σε μαθηματικές προσομοιώσεις. Σύγκριση με πραγματικά δεδομένα πραγματοποίησαν ο Tabbagh και οι συνεργάτες του (1988), στην προσπάθεια τους να αποδώσουν την εικόνα μιας θαμμένης Νεολιθικής κυκλικής τάφρου στη Βαυαρία. Γενικά, τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών δεν ήταν τέτοια ώστε να δίνουν σοβαρό προβάδισμα σε κάποια από τις δύο μεθόδους.

Οι βέλτιστοι τρόποι διάταξης των πηνίων στην επιφάνεια του εδάφους μελετήθηκαν από τον Tabbagh (1986). Το συμπέρασμα ήταν ότι η τοποθέτηση των πηνίων έτσι ώστε να είναι κάθετα μεταξύ τους αποτελεί τον καλύτερο τρόπο για τις "αρχαιολογικές" διασκοπήσεις.

Υπάρχουν πολλές αναφορές εφαρμογών των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων CW στη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Beran, 1983; Csatho and Pattantyus, 1988). Σχεδόν παντού, όμως, επιβεβαιώνονται τα αρχικά συμπεράσματα, ότι δηλαδή οποιοδήποτε όργανο κι αν χρησιμοποιείται είναι απαραίτητο να προσαρμόζεται η τεχνική στο συγκεκριμένο πρόβλημα κατά περίπτωση.

Τα πλεονεκτήματα της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου παροδικής κυματομορφής (T.E.M.) προσέλκυσαν το ενδιαφέρον κατά την δεκαετία του 1980 όταν ουσιαστικά αναπτύχθηκε η μέθοδος. Το ελκυστικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μέτρηση του δευτερογενούς πεδίου χωρίς την παρουσία του πρωτογενούς. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην μεταλλευτική έρευνα. Ως προς την αρχαιολογική έρευνα, οι Lee και Buselli (1988) αναφέρουν μια πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή της στην Κορέα με σκοπό την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων. Οι ίδιοι ερευνητές πραγματοποίησαν πειράματα αναλογικής κλίμακας σε δεξαμενή. Το συμπέρασμα τους ήταν ότι η μέθοδος T.E.M. είναι ικανή να ανιχνεύσει μεταλλικά αντικείμενα σε βάθος μέχρι και 12 φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος τους. Φαίνεται ότι η μέθοδος έχει σημαντικές προοπτικές, αν και δεν υπάρχουν αναφορές σε πραγματικές συνθήκες που να επιβεβαιώνουν ένα τόσο εντυπωσιακό βάθος διεύθυνσης.



Σχ.7. Χρονική τομή καταγραφών ραντάρ που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου κατά την εξερεύνηση του νεκροταφείου της Ρωμαϊκής εποχής της αρχαίας Ευρωπού. Οι καταγραφές έγιναν για διάστημα 51.2ns με αντένα εύρους συχνοτήτων [200MHz-2GHz]. Εντοπίζονται πολλά οικοδομικά λείψανα στις θέσεις που υποδεικνύονται με βέλη. Οι αναπαραστάσεις των τοίχων αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των τοίχων μεγάλου ταφικού μνημείου το οποίο έχει εντοπιστεί προηγουμένα με ηλεκτρική διασκόπηση.

Οι Karmis και Tsokas (1992) αναφέρουν μια εφαρμογή της μεθόδου στην ανίχνευση ταφικών μνημείων στην περιοχή της αρχαίας Ευρωπού. Οι παραπάνω ερευνητές συνέκριναν επίσης τα αποτελέσματα της μεθόδου με αυτά της γεωηλεκτρικής μεθόδου συνεχούς ρεύματος. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη τεχνική μετρήσεων η οποία θεωρήθηκε βέλτιστη για τις συγκεκριμένες συνθήκες. Το κύριο συμπέρασμα των παραπάνω ερευνητών ήταν ότι η προοπτική της μεθόδου T.E.M. έγκειται στη δυνατότητα καταγραφής πολλών καναλιών σε κάθε θέση μέτρησης τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορα βάθη διείδυσης. Ελάσσονα σχετικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ευκρινέστερη αποτύπωση της κατανομής των ειδικών αντιστάσεων και η μεγάλη ικανότητα ανίχνευσης μεταλλικών αντικειμένων. Το γεγονός, όμως, ότι είναι χρονοβόρα και ότι απαιτεί ακριβή μηχανήματα και σχετικά ειδικευμένο προσωπικό περιορίζει τη μέθοδο σε ειδικές εφαρμογές προς το παρόν.

ΥΠΕΔΑΦΕΙΟ ΡΑΝΤΑΡ

Η μέθοδος του υπεδάφειου ραντάρ είναι η πλέον πρόσφατη μέθοδος εντοπισμού γεωφυσικών δομών. Στηρίζεται στην εκπομπή ενός παλμού μικρής διάρκειας και στη λήψη της ηχούς του που επιστρέφει μετά από κάποιες ανακλάσεις σε υπεδάφειες επιφάνειες που χωρίζουν μέσα με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά. Κατ' αυτή την έννοια, η μέθοδος παρ' ότι είναι ηλεκτρομαγνητική στην αρχή της, παρουσιάζει στενή συγγένεια με τη σεισμολογία ανάκλασης. Οι χρόνοι διαδρομής που καταγράφονται στους δέκτες μετατρέπονται σε βάθη και έτσι το αποτέλεσμα είναι μια γεωηλεκτρική τομή του εδάφους η οποία έχει σημαντική ομοιότητα με τις σεισμικές τομές.

Το σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι έχει τη δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης των δομών εφ' όσον παίρνουμε ανακλάσεις τόσο από την κορυφή όσο και από το κάτω τμήμα τους. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται όλο και περισσότερο στην αρχαιολογική εξερεύνηση χωρίς όμως να είναι ξεκαθαρισμένη ούτε η ακριβής χρησιμότητά της ούτε οι πραγματικές της δυνατότητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχει ποικιλία οργάνων στο εμπόριο τα οποία πολλές φορές στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές λειτουργίας (Gaffney et al., 1991). Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι τα pulse και impulse όργανα.

Η μέθοδος μελετάται συνεχώς και έχουν ήδη εντοπιστεί αρκετές ατέλειές της (Tealby and Gampbell, 1992), ενώ γίνεται ταυτόχρονα προσπάθεια βελτίωσής της.

Στο σχήμα (7) δίνεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου στην αρχαία Ευρωπό (Tsokas et al., 1993). Στο σχήμα αυτό μπορεί κανείς να παρατηρήσει εμφανείς ανακλάσεις που οφείλονται σε θαμμένα οικοδομικά λείψανα αλλά και τη συνιστώσα θορύβου εξ' αιτίας της ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης των κεραιών.

Οι Stove και Addyman (1989) υποστήριξαν ότι η τεχνική πρέπει να χρησιμοποιείται σε διασκοπήσεις μικρής κλίμακας σε περιοχές με σαφή στρωματογραφία και εκεί όπου οι άλλες γεωφυσικές μέθοδοι δεν αποδίδουν, όπως π.χ. μέσα σε πόλεις. Την άποψη αυτή συμμερίζεται εν μέρει και ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον πιστεύουμε ότι η μέθοδος βρίσκει ακόμη σε αρχικό στάδιο και ότι δεν υπάρχει προς το παρόν όργανο κατάλληλο για όλες τις περιπτώσεις. Προβλήματα όπως η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη

και η πόλωση της δέσμης (Tealby et al., 1992) πρέπει να μελετηθούν σε βάθος για να ξεπεραστούν. Επίσης πρέπει να δημοσιευτούν αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών έτσι ώστε να διαμορφωθεί ένα κάποιο επίπεδο κοινής εμπειρίας.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΒΑΡΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η βαρυτική μέθοδος είναι προφανώς ασύμφορη, χρονοβόρα και με επισφαλή επιτυχία ως προς τις δομές - στόχους της αρχαιολογικής εξερεύνησης. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε σπανιότατα και για εντοπισμό συγκεκριμένων στόχων. Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται λεπτομερής τοπογραφική διόρθωση σε χάρτες με κλίμακα ασυνήθιστα μικρή σε σύγκριση με τις κλίμακες που συνήθως χρησιμοποιούνται στην μεταλλευτική έρευνα. Έχουν αναφερθεί εφαρμογές με σκοπό την ανίχνευση ανθρωπογενών υπόγειων κοιλοτήτων (Fajlkewicz, 1976; Blizkonosky, 1979) καθώς επίσης και μια πολύ ενδιαφέρουσα διερεύνηση του εσωτερικού της πυραμίδας του Χέοπος με σκοπό την ανίχνευση αγνώστων αιθουσών (Vogel et al., 1992).

Η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης καθώς και η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης υψηλής διακριτικής ικανότητας έχουν χρησιμοποιηθεί με κάποια επιτυχία για την ανίχνευση υπεδάφειων φυσικών ή ανθρωπογενών κοιλοτήτων (McCann et al., 1987). Μια ενδιαφέρουσα εφαρμογή αναφέρθηκε από τον Utecht (1990) στην προσπάθεια του να ανιχνεύσει μνημεία στον τύμβο του Αντίοχου στη Νότιο Ανατολική Μ.Ασία.

Μια ερευνητική προσπάθεια με σκοπό την ανίχνευση ταφικών μνημείων σε τύμβους βρίσκεται προς το παρόν σε εξέλιξη στη Β.Ελλάδα με κύριο ερευνητή τον συγγραφέα της παρούσας εργασίας. Η προσπάθεια αυτή που γίνεται κάτω από την αιγίδα της Γ.Γ.Ε.Τ. έχει δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα μέχρι στιγμής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ.Β.Παπαζάχο για την προσεκτική ανάγνωση και τις διορθώσεις του κειμένου καθώς και για τις εποικοδομητικές υποδείξεις του για την βελτίωση της εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aitken, M.J., (1974). *Physics and Archaeology*. Clarendon Press, Oxford.
- Aspinall, A. and Lynam, J.T., (1968). An induced polarization instrument for archaeological surveying. *Prospezioni Archaeologiche*, 3, 91-93.
- Becker, H., (1987). Zusammenwirken von Luftbild und Bodennagnetik zur Prospektion des hallstattzeitlichen Grabenwerkes bei Holzen. *Das Archaeologische Jahr in Bayern 1986*, 77-80.
- Beran, B.W., (1983). Electromagnetics for mapping buried earth features. *Journal of Field Archaeology*, 10, 47-54.
- Blizkonosky, M., (1979). Processing and applications in microgravity surveys. *Geophysical Prospecting* 27, 848-861.
- Carpenter, E.W. and Habberjam, J.M., (1956). A tripotential method of resistivity prospecting. *Geophysics*, 21, 455-469.

- Csatho, B. and Pattantyus, M., (1988). Prospecting with the EM-31 on Archaeological sites. Proc. of the 26th International Symposium on Archaeometry, May 16-20, Toronto, 139-144.
- Dittmer, J.K. and Szymanski, J.E., (1992). A forward modeling of resistive two dimensional features using the finite element method. Vieweg Verlag, (in press).
- Ermokhin, K., Tsokas, G.N. and Glasunov, V.V., (1992). A discussion on the utility of A.I.R. (Azimuthal Inhomogeneity Ratio) anomalies based on the computed effect of 3-D structures. Archaeological Sciences 1991. University of York and York Authorities (in press).
- Fajkiewicz, J.Z., (1976). Gravity vertical gradient measurements for the detection of small geologic and anthropogenic forms. Geophysics, 41, 1016-1030.
- Grigoriou, J., (1979). An archaeological resistivity survey on the south margin of Dalton Parlours, Yorkshire M.Sc. thesis, Leeds University.
- Habberjam, G.M., (1979). Apparent resistivity observations and the use of the square array techniques. Geoprospection Monographs, Gebruder-Bortraeger, Berlin.
- Habberjam, G.M. and Watkins, G.E., (1967). The reduction of lateral effects in resistivity probing. Geophysical Prospecting, 15, 221-236.
- Hesse, A., Jolivet, A. and Tabbagh, A., (1986). New prospects in shallow depth electrical surveying for archaeological and pedological applications. Geophysics, 51, 584-594.
- Gaffney, C., Gater, J. and Ovenden, S., (1991). The use of geophysical technique in archaeological evaluations. Institute of Field Archaeology, Birmingham, technical paper No 9.
- Glasunov, V.V. and Ermokhin, K., (1992). Mathematical modelling of geophysical fields of archaeological objects. P.A.C.T., (in press).
- Grigoriou, J. and Tsokas, G.N., (1992). The use of A.I.R. (Azimuthal Inhomogeneity ratio in prospecting at archaeological sites). Prospezioni Archaeologiche, (in press).
- Katsambalos, K.E. and Tsioumis, A., (1988). Two case studies of two-level magnetic surveys in archaeological prospection. "Eratosthenes", 23, 309-327.
- Katsambalos, K.E., (1991). Loverdu-Tsigarida, K. and Tsioumis, A. Magnetic prospection at sites of archaeological interest: The castle of Platamon. Paper read in the "2nd Southern European Conference on Archaeometry", Delphi, April 19-21.
- Karousova, O. and Karous, M., (1989). Deconvolution of ΔT profile curves. Paper read at the Intern. Symp. on computer applications and quantitative methods in Archaeology; Univ. of York and York Archaeological Authorities, U.K.
- Karmis, P. and Tsokas, G.N., (1992). Time domain T.E.M. in the search for buried antiquities: A field Experiment, Theory and Practice of Applied Geophysics, Vieweg-Verlag, (in press).
- Le Borgne, E., (1955). Susceptibilite magnetique anormale du sol superficiel. Annales Geophysique", 399-419.
- Le Borgne, E., (1960). Influence du feu sur les proprietes magnetique de sol et sur celles de Schist et du Granite.

- Annales de Geophysique, 16, 159-196.
- Leckebush, J., (1989). Geoelectric methods and image processing in Archaeological sites. A report for "Kantonsarchaologie, Zurich".
- Lee, S.K. and Busseli, G., (1988). Transient E.M. Analogue modelling for the Korean treasure hunting with the SIROTEM system. Geophysical Prospecting 36, 976-994.
- McCann, D.M., Jackson, P.D. and Fenning, P.J., (1988). Comparison of the seismic and ground probing radar methods in geological surveys. I.E.E. Proc., 135, 4, 380-390.
- Maher, B.A., (1986). Characterization of soils by mineral magnetic measurements. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 42, 76-92.
- Nenov, N. and Strange, P., (1992). A large scale geophysical Survey at Nicopolis ad Istrum. P.A.C.T. (in press).
- Noel, M. and Walker, R., (1989). Imaging Archaeology by electrical resistivity tomography: a preliminary study. Conference on archaeological sciences, Bradford, Sep. 1989, Oxbow Monograph 9, 295-304.
- Noel, M. and Xu, B., (1991). Archaeological investigation by electrical resistivity tomography: A preliminary study. Geophys.J.Int., 107, 95-102.
- Papakyriakou, J.G., (1980). A resistivity survey of the archaeological site: Dalton Parlours, West Yorkshire. M.Sc. thesis, Leeds University.
- Papamarinopoulos, St. P., Tsokas, G.N. and Williams, H., (1985). Magnetic and electric measurements on the island of Lesbos and the detection of buried relics. Geoexploration, 23, 169-187.
- Papamarinopoulos, St.P. and Tsokas, G.N., (1988). Geophysical studies in Eastern Crete for the detection of ancient relics at Kavoussi. "Proceedings of the international symposium on Engineering Geology", Marinos and Koukis eds., Balkema, 1137-1142.
- Papamarinopoulos, St.P., Jones, R. and Williams, H., (1988). Electric resistance survey of the southern part of the buried ancient town of Stymphalos. Geoexploration, 25, 255-261.
- Petkov, A., Georgiev, M. and Nenov, N., (1990). Underwater magnetic Archaeological Prospecting in Bulgaria. Institute of Thracologie, Sofia, Technical papers.
- Sarris, A., (1992). Shallow depth geophysical investigation through the magnetic and resistance techniques. Ph.D. thesis, University of Nebraska.
- Sarris, S. et Vassiliadis, C., (1978). Etude stratigraphique de l'Acropole D' Amathonte (Chypre) par sondage electriques. These du D.E.A. Universite Pierre et Marie Curie (Paris VI).
- Scollar, I., (1965). A contribution to magnetic prospecting in Archaeology. Archaeo-Physika, 1, 21-92.
- Scollar, I., Weidner, B. and Segeth, K., (1986). Display of archaeological magnetic data. Geophysics, 51, 623-633.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A. and Herzog, I., (1990). Archaeological prospecting and remote sensing. Cambridge University Press, Cambridge.
- Spahos, J., (1979). Calculs sur model, role du quadripole en

- prospection électrique de subsurface- Application a le detection Archaeologique. These de Doctorat troisieme cycle. Universite Pierre et Marie Curie (Paris VI).
- Stove,G.C. and Addyman,P.V., (1989). Ground probing impulse radar: an experiment in archaeological remote sensing at York. *Antiquity* 63, 337-342.
- Szymanski,J. and Dittmer,J., (1992). Inversion of Archaeological Magnetic survey data using the maximum entropy method: Preliminary results. Vieweg Verlag, (in press).
- Tabbagh,A., (1984). On the comparison between magnetic and electromagnentic prospecting methods for magnetic features detection. *Archaeometry*, 26(2), 171-182.
- Tabbagh,A., (1986). What is the best coil orientation in the Slingram electromagnetic prospecting methods? *Archaeometry*, 28(2), 185-196.
- Tabbagh,A., Bossuet,G. and Becker,H., (1988). A comparison between magnetic and electromagnentic prospection of a Neolithic ring ditch in Bavaria. *Archaeometry*, 30(1), 132-144.
- Tealby,J.M. and Campbell,T., (1992). A report on the evaluation of ground penetrating radar in Archaeology (1990/1991). Vieweg Verlag (in press).
- Tealby,J.M., Oxley,J., Campbell,T., Giannopoulos,A. and Dittmer,J., (1992). Analysis of ground probing radar, including polarization effects, when used in condition assessment of ancient mounments. Vieweg Verlag, (in press).
- Tite,M.S. and Mullins,C.E., (1969). Electromagnetic prospecting: a preliminary investigation. *Prospezioni Archaeologiche*, 4, 95-102.
- Tite,M.S. and Mullins,C.E., (1970). Electromagnentic prospecting on archaeological sites using a soil conductivity meter. *Archaeometry*, 12, 97-104.
- Tite,M.S. and Mullins,C.E., (1971). Enhancement of the magnetic susceptibilities of soils on archaeological sites. *Archaeometry*, 14, 2, 229-236.
- Τσόκας,Γ.Ν., (1988). Ανάπτυξη των γεωφυσικών εφαρμογών σε αρχαιολογικούς χώρους στην Ελλάδα. Πρακτικά Πρώτου Συμποσίου για τις νέες Εξελίξεις στη Σεισμολογία και Γεωφυσική του Ελληνικού Χώρου. Θεσσαλονίκη, 91-100.
- Tsokas,G.N., (1988). Recent prospecting results from ancient Aegae (Verghina, N.Greece). Proceeding of the international symposium on Engineering Geology, Balkema, Rotterdam,Marinos and Koukis eds, 1131-1134.
- Tsokas,G.N. and Rocca,A.Ch., (1986). Geophysical prospecting at archaeological sites with some examples from Northern Greece. *First Break*, 4, 8, 31-39.
- Tsokas,G.N., Rocca,A.C. and Papazachos,B.C., (1986b). Magnetic prospecting at the prehistoric site of the village of Mandalo in Northern Greece. *P.A.C.T.* 15, 143-152.
- Tsokas,G.N., Rocca,A.C. and Papazachos,B.C., (1986c). Some aspects concerning the application of Geophysical prospecting methods at the archaeological site of Dion. *P.A.C.T.*, 15, 153-162.
- Tsokas,G.N. and Saatsoglou-Paliadeli,C., (1988). The discovery of the relics of a complex of walls in ancient Aegean (Verghina, N.Greece) by geophysical investigations.

- Archaeophysika, 25, 435-437.
- Tsokas, G.N., Rocca, A.C. and Bessios, M., (1989). Geophysical investigations in the area of the tumulus of "Aliki" near Kitros, ancient Pydna. Sci. Ann. Fac. Phys. Mathem., 1, 25-34.
- Tsokas, G.N., Liritzis, J., (1990). Resistivity prospecting in the centre of Athens for the detection of buried Antiquities. Prospezioni Archaeologishe, 1, 133-143.
- Tsokas, G.N., Papazachos, C.B., Loucoyiannakis, M.Z. and Karousova, O., (1991). Inversion filters for the transformation of geophysical data from archaeological sites based on the vertical sided finite prism model. Archaeometry, 33, 215-230.
- Tsokas, G.N. and Papazachos, C.B., (1992). Two-dimensional inversion filters in magnetic prospecting: Application to the exploration for buried antiquities. Geophysics, 57, 8, 1004-1013.
- Tsokas, G.N., Giannopoulos, A., Tsourlos, P., Vargemezis, G., Sarris, A., Papazachos, C.B. and Savopoulos, Th., (1993). A large scale multipurpose survey in Europos (N.Greece). Paper read at the second conference of the Hellenic Archaeometrical Union, Thessaloniki, March 26-28.
- Tsourlos, P., (1992). A report on resistivity tomography. Archaeological remote sensing Lab. Dept. of Electronics, University of York.
- Tucker, P.H. (1952). High magnetic effect of Lateritic soil in Cuba Geophysics, 17, 753-757.
- Βλάχος, Δ. και Λιβιεράτος, Ε., (1981). Μαγνητομετρικές αποτυπώσεις αρχαιολογικών χώρων. Προκαταρκτική έκθεση μιας εφαρμογής. Ημερίδα "Συμβολή της Τοπογραφίας και Φωτογραμμετρίας στην Καταγραφή και Αποτύπωση Μνημείων και Ιστορικών Συνόλων", Αθήνα, 6 Αυγούστου.
- Vogel, A., Hosney, H. and Wetzig, E., (1992). Gravity survey and inverse modelling of the Cheops pyramid. Vieweg Verlag, (in press).
- Weymouth, J.W. and Huggins, R., (1985). Geophysical surveys of Archaeological sites. Archaeological Geology, Rapp and Gilford eds, Yale University Press, New Haven, 191-235.
- Weymouth, J.W. and Lessard, Y.A., (1986). Simulation studies of diurnal corrections for magnetic prospecting. Prospezioni Archeologiche, 10, 37-47.
- Wynn, J.C., (1986). Archaeological prospecting: An introduction to the special issue. Geophysics, 51, 3, 533-537.
- Utecht, T., (1990). Geophysical investigations at the tumulus of Nemrud Dag, Turkey. Proc. of an International symposium on Engineering Geology Marinos-Koukis eds, Balkema, Rotterdam, 2131-2132.