ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΠΡΟ-ΑΝΑΣΚΑΠΤΙΚΕΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΑΡΓΟΛΙΔΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Υпó

ΧΑΔΕΜΕΝΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ

A.M. 2709

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΛΑΓΙΟΣ

AOHNAI 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ-ABSTRACT				
ΚΕΦΑ/	ΛΑΙΟ 1: ΓΕΩΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ – ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΡΙΑ	4		
1.1 1.2	ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	4 6 7 11		
1.3	 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 1.3.1 Βασικές αρχές 1.3.2 Συστήματα Γεωραντάρ 1.3.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί	15 15 20 24		
1.4	ΠΑΡΑΔΕΙΙ ΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ (GPR, ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΗ ΕΛΛΑΔΑ 1.4.1 Εφαρμογές της μαγνητικής μεθόδου 1.4.2 Εφαρμογές της μεθόδου του Γεωραντάρ	IN 26 26 31		
		34		
2.1 2.2 2.3	ΤΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΓΟΥΣ	34 43		
2.0		17		
ΚΕΦΑ/	ΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	51		
3.1 3.2	 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. 3.1.1 Διάκριση τοπικού και περιφερειακού πεδίου 3.1.2 Αναγωγή στον βόρειο μαγνητικό πόλο 3.1.3 Υπολογισμός της κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΡΓΟΥΣ 	51 51 53 56 57		
ΚΕΦΑ/	ΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPR	. 60		
4.1	 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ GPR	60 63 68 68 71 77 79		
4.2	ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	80		
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ				
5.1 5.2 5.3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥΣ ΚΑΝΝΑΒΟΥΣ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	84 96 99		
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ				

ABSTRACT

In the present Master thesis, in order to supplement the results from an earlier work carried out by the Institute of Geology and Mineral Exploration (Zananiri & Zervakou 2008, Zananiri 2009), a non-invasive geophysical survey was performed at the city of Argos, which from the beginning of Archaic Times and through to Classical Times was one of the most prominent city-states. Based on historical and archaeological evidence, in collaboration with the archaeologists from the 4th Ephoria of Prehistoric and Classic Antiquities, two sites were chosen near the ancient Agora of Argos.

Total field magnetic measurements were collected over 5 grids, with 1 m spacing between measurement points. Mapping, filtering and inversion procedures of the magnetic data have been used in tandem. A GPR survey was also carried out in the same sites in order to utilize a method which was capable of producing high resolution results that would allow to pin-point the exact depth of burial and a more detailed outline of the linear and square structures indicated by the magnetic surveys. The GPR data where acquired using a GSSI SIR-2000 system equipped with a 400Hz antenna in a C-scan survey in order to receive 3D data which was then processed and plotted with the use of matGPR revision 2.2.4.3 software (Tzanis, 2010a).

The data management and cartographic representation was performed using Geographic Information Systems, where a geographic database was created, including all available information for the broader Argos area. The results of the geophysical survey were able to highlight the presence of linear and square structures possibly representing inhabitance ruins, namely small building remnants and road foundations according to observations from neighbouring excavations.

During the present work it was not possible to locate the ruins of the temple of Apollo Lyceus, however, the application of geophysical techniques succeeded to identify areas of increased interest and consequently suggest to the archaeologists excavation tests on the basis of the residual magnetic map and the 3D maps derived from the GPR survey.

Keywords: Argos, geoarchaeology, geophysics, magnetometry, georadar, inversion, GIS.

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>

Στην ανά χείρας Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης, πραγματοποιήθηκαν προανασκαφικές γεωφυσικές έρευνες στην πόλη του Άργους, η οποία από την Αρχαϊκή μέχρι την Κλασσική εποχή αποτέλεσε μια από τις σημαντικότερες πόλεις-κράτη. Σκοπός της μελέτης ήταν η συμπλήρωση των αποτελεσμάτων μιας προγενέστερης μελέτης που πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ζανανίρι & Ζερβάκου 2008, Ζανανίρι 2009). Με βάση τα διαθέσιμα ιστορικά και αρχαιολογικά στοιχεία, σε συνεργασία με τους αρχαιολόγους της Δ' Εφορίας Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων, επιλέχτηκαν δύο θέσεις στην περιοχή κοντά στην αρχαία Αγορά του Άργους.

Πραγματοποιήθηκε η λήψη μετρήσεων του ολικού μαγνητικού πεδίου σε σύνολο 5 καννάβων, κατά μήκος οδεύσεων που απείχαν 1m η μία από την άλλη, βήμα 1m. Ακολούθησαν διαδικασίες χαρτογραφικής απεικόνισης. зц φιλτραρίσματος και αντιστροφής των δεδομένων της μαγνητικής έρευνας. Στις ίδιες θέσεις εφαρμόστηκε η μέθοδος του γεωραντάρ, τα αποτελέσματα της οποίας είναι υψηλής ανάλυσης, με σκοπό να εντοπιστεί το ακριβές βάθος ταφής και να χαρτογραφηθούν ακριβέστερα οι γραμμικές δομές που εντοπίστηκαν μέσω των μαγνητικών διασκοπήσεων. Η συλλογή των δεδομένων του γεωραντάρ πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του συστήματος GSSI SIR-2000, που είναι εξοπλισμένο με κεραία 400Hz, ενώ εφαρμόστηκε ο τύπος C-scan κατά τις εργασίες υπαίθρου με σκοπό τη λήψη τρισδιάστατων δεδομένων. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, με τη χρήση του προγράμματος με τη χρήση του προγράμματος matGPR revision 2.2.4.3 (Tzanis, 2010a).

Η διαχείριση του συν δο των αποτελ σεμάτων κα των διαθέσιμων πληροφοριών για την ευρύτερη περιοχή του Άργους έγινε σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, όπου όλα τα στοιχεία εισήχθησαν σε ψηφιακή βάση δεδομένων. Έτσι, εντοπίστηκαν επιμήκεις δομές, παράλληλες προς τη διεύθυνση των κεντρικών οδών, καθώς και ίχνη που πιθανώς αποτελούν ερείπια κτισμάτων, όπως προκύπτει με βάση τα ευρήματα γειτονικές ανασκαφών.

Δεν κατέστη δυνατόν να εντοπιστεί η ακριβής θέση που βρίσκεται θαμμένος ο ναός του Λυκείου Απόλλωνος, συμφώνα όμως με την συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορέσαμε να προσδιορίσουμε την θέση διαφόρων θαμμένων ερείπιων πού αναμένουν την αρχαιολογική σκαπάνη να αποδείξει την θέση μορφή και χρήση που είχαν σε περασμένους αιώνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΓΕΩΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ – ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΡΙΑ

1.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Αναπόσπαστο κομμάτι κάθε λαού αποτελεί η ιστορία και ο πολιτισμός του. Παρά τη σημαντική δράση των αρχαιολόγων ένα μεγάλο μέρος της ιστορικής – πολιτιστικής μας κληρονομιάς βρίσκεται ακόμα θαμμένο στο υπέδαφος. Στις περισσότερες των περιπτώσεων αρχαιολογικά και ιστορικά στοιχεία υποδηλώνουν την παρουσία θαμμένων αρχαιοτήτων κάτω από μεγάλες εκτάσεις, οι οποίες είναι αδύνατο να ανασκαφούν στο σύνολό τους. Έτσι, η ανάγκη της μελέτης των περιοχών αυτών δημιούργησε το επιστημονικό πεδίο που σήμερα ονομάζεται «Αρχαιομετρία» και υπάγεται σε έναν ευρύτερο επιστημονικό κλάδο, την «Γεωαρχαιολογία».

Γεωαρχαιολογία είναι η εφαρμογή των αρχών και μεθόδων των γεωεπιστημών γ α την κ αταν άγση κ α καταγραφή του ιστορικ ώ κ α αρχαιολογ κ ώ αρχείου (Clark 1996, English heritage 2008).

Ο όρος «Γεωαρχαιολογία» περιγράφει την προσπάθεια της αρχαιολογικής επιστήμης, με τη βοήθεια των θετικών επιστημών, εξαγωγής συμπερασμάτων σε διάφορους τομείς της αρχαιολογικής έρευνας. Οι τομείς αυτοί είναι η χρονολόγηση και η προέλευση των αντικειμένων, η στατιστική επεξεργασία σε πληθυσμούς οργανικών και ανόργανων υπολειμμάτων της ανθρώπινης δραστηριότητας στο παρελθόν, καθώς επίσης και ο εντοπισμός αρχαιοτήτων χωρίς ανασκαφή και η λεπτομερής χαρτογράφηση για την διαχείριση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Έτσι, τα τελευταία χρόνια, η αρχαιολογική επιστήμη συστηματικά επιζητεί τη βοήθεια των θετικών επιστημών στην προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων σε διάφορους τομείς της αρχαιολογική επιστήμη συστηματικά επιζητεί τος διάφορους τομείς της αρχαιολογικής έρευνας (π.χ. Brothwell & Pollard 2001, Clark 1996, English Heritage 2004, Gaffney & Gater 2003, Monaghan & Lovis 2005).

Μεταξύ των τεχνικών που εφαρμόζονται κατά την εκπόνηση γεωαρχαιολογικών μελετών συγκαταλέγονται και οι γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης, που χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογική έρευνα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Η δυνατότητα χρήσης τους στηρίζεται στην ανίχνευση ανομοιογενειών που προκαλούν οι θαμμένες αρχαιότητες στις φυσικές

5

παραμέτρους του εδάφους. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι γεωφυσικές μέθοδοι δεν απαλλάσσουν τον αρχαιολόγο από την ανασκαφή αλλά τον βοηθούν να σχεδιάσει καλύτερα τις ανασκαφικές δραστηριότητες, να περιορίσει τις δαπάνες και να εξοικονομήσει ενέργεια και χρόνο.

Τελικός σκοπός, λοιπόν, των γεωφυσικών διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους είναι η παρουσίαση των δεδομένων σε μορφή τέτοια, ώστε να είναι εύκολα ερμηνεύσιμη από τους αρχαιολόγους. Η εικόνα που θα παραχθεί θα πρέπει να προσομοιάζει με την κάτοψη των ερειπίων, δηλαδή με αυτό που θα προέκυπτε αν είχε διεξαχθεί ανασκαφή. Τα σταδία που πρέπει να ακολουθηθούν στον σχεδιασμό και στην επιλογή της ενδεικνυόμενης μεθόδου περιγράφονται λεπτομερώς στο εγχειρίδιο που έχει εκδώσει η Υπηρεσία Βρετανική Κληρονομιάς (Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation by English Heritage, 2008).

Έτσι, λοιπόν αναπτύχθηκαν τεχνικές που μετασχηματίζουν τα γεωφυσικά αποτελέσματα σε μια εικόνα, η οποία να μοιάζει με την κάτοψη των θαμμένων ερειπίων (Scollar *et al.* 1986, Wynn 1986). Το λεπτό σημείο της ερμηνείας των γεωφυσικών χαρτών είναι οι επαρκείς αρχαιολογικές γνώσεις και πληροφορίες και για το λόγο αυτό καθίσταται αναγκαία η συμβολή των αρχαιολόγων στην ερμηνεία των μετρήσεων με την αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών για την περιοχή και τις ιδιότητες (π.χ. διαστάσεις, σύσταση) των αναμενόμενων θαμμένων δόμων. Για να συμβάλει ουσιαστικά, λοιπόν, στην αρχαιολογική έρευνα η γεωαρχαιολογία, είναι απαραίτητη η συνεργασία και των δύο κλάδων.

Όλες σχεδόν οι γεωφυσικές μέθοδοι διασκόπησης δοκιμάστηκαν στην έρευνα για τον εντοπισμό υπολειμμάτων της ανθρώπινης δραστηριότητας του παρελθόντος. Απ' αυτές, η μαγνητική, η ηλεκτρική και η ηλεκτρομαγνητική (GPR) μέθοδος, αφού διαμορφώθηκαν κατάλληλα, είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην αρχαιολογική εξερεύνηση. Η περιορισμένη χρήση των υπολοίπων μεθόδων οφείλεται στο μεγάλο χρόνο εκτέλεσης της διασκόπησης, στην οικονομική επιβάρυνση των έργων και στα δαπανηρά όργανα που απαιτούνται. Ειδικά για τη σεισμική μέθοδο, τα κύρια μειονεκτήματα είναι η πολυπλοκότητά της και το μεγάλο κόστος εφαρμογής, καθιστώντας σχεδόν απαγορευτική την εφαρμογή της σε συνηθισμένες αρχαιολογικές έρευνες (Louis *et al.* 2005, Goulty *et al.* 1990, Vafidis *et al.* 2003).

Ο Wynn (1986) εισήγαγε τον όρο «γεωφυσικές διασκοπήσεις μεγάλης διακριτικής ικανότητας» σαν γενικό χαρακτηριστικό όλων των γεωφυσικών τεχνικών που βρίσκουν εφαρμογή στην αρχαιολογική έρευνα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι μέθοδοι αυτοί να μπορούν να διακρίνουν θαμμένες δομές σε μικρές κλίμακες, μέτρου και μικρότερες.

Τα σήματα που λαμβάνονται στους φωρατές των οργάνων είναι μικρού μήκους κύματος και πλάτους. Δηλαδή, βρίσκονται λίγο ψηλότερα από τη στάθμη του θορύβου και για το λόγο αυτό απαιτούν πολύ μικρό βήμα δειγματοληψίας για να αποδοθούν χωρίς σφάλματα. Το βάθος ταφής σπάνια ενδιαφέρει εφ' όσον οι δομές που ανιχνεύονται στις συνηθισμένες περιπτώσεις βρίσκονται θαμμένες μεταξύ 0.5 και 1.5 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους τα παραπάνω ισχύουν για μαγνητικές η βαρυτικές μετρήσεις σε μέσα εδάφη. Για τις ενεργητικές γεωφυσικές μεθόδους, στις οποίες η ισχύς του πομπού καθορίζεται από τον χρηστή το βήμα δειγματοληψίας καθορίζεται από το μέγεθος και το βάθος ταφής της αναμενόμενης θαμμένης δομής. Δεν είναι όμως αυτή η μοναδική ιδιαιτερότητα των διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους. Η έκταση που συνήθως ερευνάται είναι πολύ μικρή, ενώ ταυτόχρονα απαιτείται μεγάλος αριθμός μετρήσεων. Με τον τρόπο αυτό, καταγράφονται ανωμαλίες που πολύ συχνά παρουσιάζουν μήκος κύματος της τάξης του 1m.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι με συνδυασμό των αποτελεσμάτων δύο ή περισσότερων γεωφυσικών μεθόδων είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα με μεγ αλ άτερη αξιοπιστία κα ακ ήβεια. Αυτό ακ ρβώς εφαρμόστηκ ε κα στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης, με τον συνδυασμό της μαγνητικής και γεωραντάρ.

1.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η μαγνητομετρία, η οποία είναι η πιο διαδεδομένη γεωφυσική μέθοδος στην αρχαιολογική έρευνα, χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά παγκοσμίως το 1958 στην Αγγλία από τους Black and Mr. Eli Lilly, οι οποίοι κατασκεύασαν – σε σχέδιο των Aitken και Hall – ένα πρωτονικό μαγνητόμετρο στο εργαστήριο αρχαιολογίας του πανεπιστημίου της Οξφόρδης. Οι πρώτοι στόχοι που εντοπιστήκαν με την χρήση του εν λόγω εξοπλισμού ήταν κλίβανοι κεραμοποιίας στην περιοχή Water Newton (Aitken *et al.* 1958) που απειλούνταν λόγω κατασκευαστικών έργων.

1.2.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Στη μαγνητική έρευνα μετράμε τις ανωμαλίες του τοπικού γεωμαγνητικού πεδίου που δημιουργούνται από πλευρικές μεταβολές στη μαγνήτιση των εδαφών, πετρωμάτων, θαμμένων ερειπίων, δρόμων, καθώς και άλλων υπολειμμάτων ανθρωπινής δραστηριότητας. Οι μαγνητικές ανωμαλίες οφείλονται στο (ανυσματικό) άθροισμα της επαγόμενης και παραμένουσας μαγνήτισης. Η επαγόμενη μαγνήτιση εξαρτάται από την ένταση του Γεωμαγνητικού Πεδίου καθώς και από τη μαγνητική επιδεκτικότητα Η παραμένουσα μαγνήτιση εξαρτάται από τη μαγνητική ιστορία του πετρώματος ή του αντικειμένου (για παράδειγμα θέρμανση και αναθέρμανση μέσα στο Γεωμαγνητικό Πεδίο, χημικές μετατροπές κ.ά.). Η μαγνητική ανωμαλία στόχων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος είναι μετρήσιμη εφόσον τα υλικά αυτά είναι θαμμένα σε μικρό βάθος και συνδέεται άμεσα με το γεωμετρικό σχήμα τους.



Σχήμα 1.1: Διάγραμμα μαγνητικής τομής Βορρά-Νότου που δημιουργείται από υπεδάφια μαγνητική δομή.

Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο είναι πεδίο μικρότερης κλίμακας και μπορεί να προσομοιαστεί με το πεδίο ενός μαγνητικού διπόλου. Αυτό το τοπικό πεδίο προστίθεται διανυσματικά στο μαγνητικό πεδίο της Γης και δημιουργεί τη μαγνητική ανωμαλία που παρουσιάζει την μέγιστη τιμή στην άμεση γειτονία της μαγνητικής δομής. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι η μεγίστη τιμή της ανωμαλίας μετατοπίζεται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της υπό μελέτη περιοχής. Έτσι, σε μεγάλα γεωγραφικά (μαγνητικά) πλάτη, όπου η μαγνητική κλίση (i) είναι σχεδόν κατακόρυφη, η θεωρητική ανωμαλία έχει ένα απλό μέγιστο με πολύ ασθενή και συμμετρικά ελάχιστα στις δύο πλευρές της ανωμαλίας. Αντίθετα, στον μαγνητικό ισημερινό (όπου i=0) η διεύθυνση της μαγνήτισης είναι οριζόντια και η ίδια ανωμαλία έχει μια ισχυρή αρνητική τιμή με συμμετρικές θετικές τιμές εκατέρωθεν αυτής. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις η μέγιστη τιμή καταγράφεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της δομής που την προκαλεί. Αντίθετα, σε ενδιάμεσα γεωγραφικά πλάτη η μαγνητική ανωμαλία εμφανίζεται με ασύμμετρη κατανομή ενώ η μέγιστη τιμή της (θετική σε μεγαλύτερα πλάτη και αρνητική σε μικρότερα) είναι μετατοπισμένη, δεξιά ή αριστερά της υπεδάφιας δομής που την προκαλεί. Τέλος, πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας ότι η μαγνητική ανωμαλία εξαρτάται επίσης από το σχήμα, τον προσανατολισμό και το μέγεθος της θαμμένης δομής, καθώς και από την διεύθυνση της μαγνήτισης του (Σχήμα 1.1).

Η μαγνητική επιδεκτικότητα ορίζεται ως ο λόγος της επαγόμενης μαγνήτισης *M* προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου *H*, δηλαδή καθορίζει τη συμπεριφορά του υλικού παρουσία σε εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και δίνεται από τη σχέση:

$$k = \frac{M}{H}$$

Η μαγνητική επιδεκτικότητα k, είν α αδιάστατη αλλάέχει διαφορετικ ή τιμή στα μετρικά συστήματα C.G.S. (emu-C.G.S.): ισχύει $k_{emu} = 4\pi k_{SI}$.

Αυτό που είναι σημαντικό στη δημιουργία μαγνητικών ανωμαλιών είναι η αντίθεση επιδεκτικότητας, δηλαδή η διαφορά επιδεκτικότητας μεταξύ του στόχου (αντικειμένου έρευνας) και του περιβάλλοντος που φιλοξενεί τον στόχο. Αυτή η ελάχιστη μεταβολή εντοπίζεται με τις μετρήσεις μαγνητικής επαγωγής. Παρατηρήθηκε ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα των εδαφών είναι συχνά μεγαλύτερη από αυτή των υποκείμενων στρωμάτων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μαγνητική επαύξηση. Το γεγονός της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος της Γης (~40cm) είχε παρατηρηθεί

9

πρώτα από τους Tucker (1952) και LeBorgne (1955, 1960) και η σημαντικότερη εφαρμογή του έγκειται στην αξιολόγηση μιας περιοχής όσον αφορά τη δυνατότητα εφαρμογής των μαγνητικών διασκοπήσεων, μέσω του υπολογισμού της επιδεκτικότητας του ανώτερου στρώματος του εδάφους και της αντίστοιχης αντίθεσης μεταξύ των αρχαιολογικών στόχων και του περιβάλλοντος εδάφους.

Η κρώτα πηγ ήτων μαγ ντικη νώ ιδιοτήτων του εδάφους είν α η περιεκτικότητα αυτού σε ορυκτά του σιδήρου. Τα κεραμικά περιέχουν ποσότητες μαγνητίτη (Fe₃O₄), αιματίτη (Fe₂O₃) και άλλων σιδηρομαγνητικών ορυκτών, σε ποσοστό γύρω στο 5% του πηλού από τον οποίο έχουν κατασκευαστεί. Μετά το ψήσιμο, οι μαγνητικοί κόκκοι προσανατολίζονται και λαμβάνουν τη διεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου (ΓΜΠ) που υπάρχει την στιγμή κατά την οποία το κεραμικό ψύχεται σε θερμοκρασία μικρότερη της θερμοκρασίας Curie. Έτσι, το κεραμικό αποκτά παραμένουσα μαγνήτιση (θερμοπαραμένουσα μαγνήτιση). Τα ορυκτά που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των εδαφών είναι τα οξείδια του σιδήρου βουρστίτης (FeO), μαγνητίτης (α Fe₃O₄), αιματίτης (γ Fe₂O₃), μαγκεμίτης (Fe₂O₃), καθώς και τα υδροξείδια του σιδήρου (Fe(OH)₂), (Fe(OH)₃) βερναλίτης, το οξείδιο του τιτανίου και σιδήρου ιλμενίτης (FeTiO₃) και το σουλφίδιο του σιδήρου μαγνητοπυρίτης (Fe₇S₈). Έχει αποδειχθεί, ότι η «ισχυρή συνιστώσα» της μαγνητικής επιδεκτικότητας οφείλεται στον μαγνητίτη και το μαγκεμίτη, ενώ η «ασθενής συνιστώσα» στον αιματίτη, τον γκαιτίτη Fe_3S_4 , τον λεπιδοκροκίτη (γ-FeO(OH)), κ.ά. (Maher, 1986).

Εδάφη τα οποία έχουν υποστεί καύση (π.χ. καύση καλλιεργήσιμων γαιών και αρχαία ανθρώπινη κατοίκηση) ή μηχανισμούς ζύμωσης (π.χ. όργωμα καλλιεργήσιμης γης, πλήρωση με φερτά υλικά αρχαιολογικών ερειπίων, χώροι απόθεσης σκουπιδιών) παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα (Clark 1996, Linford 2005, Cole *et al.* 1995). Η αιτία αυτού του φαινομένου είναι κυρίως ο σχηματισμός του μαγκεμίτη μέσω αναγωγικών αντιδράσεων. Έτσι, τα εδάφη αυτά παρουσιάζουν ενισχυμένη επαγόμενη και παραμένουσα μαγνήτιση και προκαλούν μεγάλες μαγνητικές ανωμαλίες.

10

Διορθώσεις λόγω ημερήσιας μεταβολής

Είναι γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης μεταβάλλεται με το χρόνο. Η πιο σημαντική μεταβολή του, στην περίπτωση των μαγνητικών διασκοπήσεων, είναι η κανονική ημερήσια μεταβολή της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου (Campbell 1997, σελ. 68-74). Καταγράφηκε για πρώτη φορά το 1722 στην Αγγλία και παρατηρήθηκε ότι γενικά έχει μεγαλύτερο εύρος το καλοκαίρι απ' ότι το χειμώνα, ενώ οφείλεται σε ηλεκτρικά ρεύματα που επάγονται στη Γη από μια εξωτερική πηγή.Η πηγή αυτή είναι τα ηλεκτρικά ρεύματα στην ανώτερη ατμόσφαιρα ή την ιονόσφαιρα, που με τη σειρά τους προκαλούνται από την ηλιακή ακτινοβολία. Αν παρατηρήσουμε το μαγνητόγραμμα μιας μαγνητικά ήσυχης ημέρας σε ένα σταθμό θα δούμε ότι έχει τη μορφή μιας ομαλής καμπύλης, η οποία αντιστοιχεί στην ημερήσια μεταβολή το πεδίου στη θέση αυτή. Η ημερήσια μεταβολή έχει εύρος της τάξης των 20-80nT και θεωρείται σημαντική συγκρινόμενη με την ευαισθησία του μαγνητομέτρου. Έτσι, πριν τη διεξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων, επιβάλλεται να γίνει η σχετική διόρθωση. Για το λόγο αυτό όταν μετράμε το συνολικό μαγνητικό πεδίο, χρησιμοποιούμε δύο μαγνητόμετρα, το ένα ως σταθμό βάσης και το άλλο για την λήψη των μετρήσεων (Telford et al. 1998).

Υψομετρικές και τοπογραφικές διορθώσεις

Η οριζόντια βαθμίδα του γεωμαγνητικού πεδίου είναι μόνο 0,03 nT/m στους πόλους και -0,015 nT/m στον ισημερινό. Έτσι, η διόρθωση υψόμετρου εφαρμόζεται σπάνια κατά την εκτέλεση μαγνητικών διασκοπήσεων για την αναζήτηση αρχαιολογικών στόχων, καθώς η περιοχή έρευνας είναι σχετικά περιορισμένη και κατά συνέπεια δεν εμφανίζει σημαντικές υψομετρικές και τοπογραφικές μεταβολές.

Χρήση του Διεθνούς Γεωμαγνητικού Πεδίου Αναφοράς

Το μαγνητικό πεδίο της Γης μεταβάλλεται φυσικά, καθώς μετακινείται από τους πόλους προς τον ισημερινό. Αυτή η αλλαγή είναι σε κάποιο βαθμό προβλέψιμη και γνωστή και ως εκ τούτου ονομάστηκε γήινο μαγνητικό πεδίο αναφοράς. Το Διεθνές γεωμαγνητικό πεδίο αναφοράς (I.G.R.F.) υιοθετήθηκε από τη Διεθνή Ένωση των γεωμαγνητισμού και Αερονομίας ορίζει το θεωρητικό αδιατάρακτο μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο στην επιφάνεια της Γης. Ο Carl Gauss το 1838 δημοσίευσε μια μαθηματική απόδειξη με την οποία αποδίδει τη δημιουργία του 95% του πεδίου σε εσωτερικές πηγές και μόλις 5% σε

εξωτερικές. Γενικά, στην πιο απλή του εκδοχή, το κύριο μαγνητικό πεδίο μπορεί να αποδοθεί ότι οφείλεται σε ένα δίπολο που βρίσκεται στο κέντρο της Γης και έχει απόκλιση 11.5° από τον άξονα περιστροφής της. Για τη λεπτομερέστερη μελέτη των χωρικών μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια της Γης χρησιμοποιείται μια σειρά σφαιρικών αρμονικών συναρτήσεων. Πρόκειται περί συναρτήσεων που ταλαντώνονται στην επιφάνεια μιας σφαίρας κ α εξαρτών αι τόσο από το γ ωγ ραφικ ό πλ άος όσο κ α το γεωγραφικό μήκος. Για την εφαρμογή της σφαιρικής αρμονικής ανάλυσης το μαγνητικό πεδίο της Γης, ένα διανυσματικό πεδίο, εκφράζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες Χ, Υ, Ζ και κάθε μία από τις συνιστώσες του είναι παράγωγος της ίδιας μονόμετρης συνάρτησης, του μαγνητικού δυναμικού W. Έτσι, το δυναμικό του γεωμαγνητικού πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$W = W(r, \theta, \lambda) = \frac{\alpha}{\mu_o} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^{n} P_n^m \cos\theta \left[g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda\right]$$

Το δυναμικό του μαγνητικού πεδίου αναφοράς που χρησιμοποιείται για τον ακριβή καθορισμό των μαγνητικών ανωμαλιών μικρής κλίμακας, δίνεται από τους πρώτους όρους της αρμονικής ανάλυσης. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του 11^{ου} Διεθνούς Γεωμαγνητικού Πεδίου Αναφοράς (IGRF11), για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δορυφόρους και ένα παγκόσμιο δίκτυο γεωμαγνητικών σταθμών, η σφαιρική αρμονική ανάλυση του μαγνητικού πεδίου περιλάμβανε όρους μέχρι και 13^{ου} βαθμού.

1.2.2 ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων emu (electromagnetic units), η μαγνητική επαγωγή B έχει ως μονάδα μέτρησης το Gauss (G), ενώ στο SI (Système International) η μαγνητική επαγωγή έχει μονάδα το Weber/meter, το οποίο ονομάζεται και Tesla. Συνήθως, στη μαγνητική διασκόπηση χρησιμοποιούμε το nanotesla=10⁻⁹ tesla. Ισχύουν οι ισοδυναμίες:

> 1 tesla = 10^4 gauss 1 nanotesla = 10^{-9} tesla = 1 gamma (γ) = 10^{-5} gauss

1.2.3 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Από όλους τους διαθέσιμους τύπους και τεχνολογίες μαγνητομέτρων, αυτό που συνηθέστερα χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των αρχαιομετρικών μαγνητικών μετρήσεων είναι το μαγνητόμετρο πρωτονικής μετάπτωσης (πρωτονικό μαγνητόμετρο) που μετράει την ένταση του ολικού μαγνητικού πεδίου (Parasnis 1997, Ralph 2007). Ένα από τα επιτυχέστερα υποδείγματα πρωτονικού μαγνητομέτρου είναι το G-856 Geometrics Inc. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται το σύνολο των υποσυστημάτων που το απαρτίζουν.

Η βασική αρχή λειτουργίας του πρωτονικού μαγνητομέτρου (Σχήμα 1.3α) βασίζεται στο φαινόμενο της «μαγνητικής μετάπτωσης». Οι πυρήνες των ατόμων πολλών στοιχείων, όπως π.χ. ο πυρήνας του υδρογόνου, έχουν μαγνητική ροπή. Όταν οι πυρήνες αυτοί βρεθούν μέσα σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο οι μαγνητικές ροπές τους προσανατολίζονται κατά τη διεύθυνση του πεδίου. Αν, στη συνέχεια, απομακρυνθεί το ισχυρό μαγνητικό πεδίο, οι άξονες των μαγνητικών ροπών των ατόμων μεταπίπτουν στη διεύθυνση της έντασης, Η, του μαγνητικού πεδίου της Γης με κυκλική συχνότητα που δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{M^*}{G}H$$

όπου *M*^{*} είναι η μαγνητική ροπή και G είναι η στροφορμή του πυρήνα. Ο λόγος $\lambda = \frac{M^*}{G}$ λέγεται γυρομαγνητικός λόγος και μετριέται εργαστηριακά με ακρίβεια έξι δεκαδικών ψηφίων.

Η μετάπτωση των πυρήνων μπορεί να δημιουργήσει τάση με επαγωγή στα άκρα του πηνίου που περιβάλλει το δείγμα. Η συχνότητα της τάσης αυτής, η οποία μπορεί να μετρηθεί, είναι ίση με τη συχνότητα μετάπτωσης των πυρήνων. Συνεπώς η προαναφερθείσα σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της έντασης του μαγνητικού πεδίου της Γης.Το δείγμα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το νερό γιατί αυτό αποτελείται από οξυγόνο, του οποίου οι πυρήνες δεν έχουν μαγνητική ροπή, και από υδρογόνο, του οποίου οι πυρήνες είναι πρωτόνια και έχουν μαγνητική ροπή. Στην περίπτωση αυτή η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης.Το διάγμα που χρησιμοποιείται συνήθως που μαγνητική της του του μαγνητική ροπή. Στην περίπτωση αυτή η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης, μετρημένη σε γ, δίνεται από τη σχέση H=23.4864f, όπου f είναι η συχνότητα που μετριέται σε Hz.

Το δοχείο με το νερό περιβάλλεται από ένα πηνίο που, όταν ο διακόπτης είνα κ λειστός διαρρέεται από συν εχές ρεύμα, γα την παραγωγή του ισχυρού μαγνητικού πεδίου έντασης 1000 oersted περίπου. Το ρεύμα διακόπτεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε κάθε διακοπή η μετάπτωση των πρωτονίων του υδρογόνου επάγει τάση στα άκρα του πηνίου, η οποία, αφού ενισχυθεί κατάλληλα, καταγράφεται.

Τα πρωτονικά μαγνητόμετρα εάν βαθμονομηθούν και ρυθμιστούν κατάλληλα μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια μέχρι και 0.3 nT. Η ίδια ακρίβεια έχει επιτευχθεί σήμερα και με τα μαγνητόμετρα Ρυθμιζόμενης Μαγνητικής Ροής (fluxgate magnetometers, Parasnis 1997, Ralph 2007). To yayovóc autó κατέστησε τη μαγνητομετρική μέθοδο ικανή να ανιχνεύει πολύ ασθενή πεδία. Επίσης, όπως και το μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής, το πρωτονικό μαγνητόμετρο είναι αρκετά εύκολο να κατασκευαστεί και επομένως είναι σχετικά οικονομικό. Ακόμη, και τα δύο δεν παρουσιάζουν αξιόλογη πορεία (drift) με το χρόνο. Τέλος, ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πρωτονικού μαγνητόμετρου είναι η ευκολία στη χρήση και η αξιοπιστία του. Ο προσανατολισμός του αισθητήρα χρειάζεται μόνο να τοποθετηθεί σε μεγάλη γωνία σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Ακριβής οριζοντίωση και προσανατολισμός δεν είναι απαραίτητοι. Αν, ωστόσο, το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται απότομα από σημείο σε σημείο (περισσότερο από 600 nT/m), θα επηρεαστούν διαφορετικά τμήματα του κυλινδρικού αισθητήρα από μαγνητικά πεδία διαφόρων μεγεθών, οπότε οι μετρήσεις θα υποβαθμιστούν σημαντικά. Τέλος, επειδή το σήμα που παράγεται από τη μετάπτωση είναι μικρό, το όργανο αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοντά σε πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος.



Σχήμα 1.2: Πρωτονικό μαγνητόμετρο της Geometrics (μοντέλο G-856). Στην εικόνα διακρίνονται: (α) το αισθητήριο στοιχείο (κεφαλή) που αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο γεμάτο με ένα υγρό από άτομα υδρογόνου (πρωτόνια) το οποίο περιβάλλεται από ένα πηνίο, (β) η μονάδα ελέγχου στην οποία υπάρχει η παροχή ρεύματος, ένας ηλεκτρονικός διακόπτης, ένας ενισχυτής και ένας μετρητής της συχνότητας, (γ) το καλώδιο σύνδεσης του αισθητήρα με τη μονάδα ελέγχου, (δ) πτυσσόμενη ράβδος πάνω στην οποία τοποθετείται ο αισθητήρας.

Τα τελευταία χρόνια στην αρχαιομετρία χρησιμοποιούνται συχνά τα διαφορικά μαγνητόμετρα (πρωτονικά ή fluxgate), τα οποία μετρούν την οριζόντια ή/και κατακόρυφη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου. Η ακρίβεια που παρουσιάζουν αυτά τα όργανα είναι της τάξης του 0.1 - 1 nT, εν ώ δεν απαιτούνται διορθώσεις για το κύριο (Γεωμαγνητικό) πεδίο και τις μεταβολές του. Τέλος, ιδιαίτερα ταχεία τεχνική πραγματοποίησης των μετρήσεων είναι αυτή που προτάθηκε από τον Becker (1987) και χρησιμοποιεί ένα ρυμουλκούμενο διαφορικό μαγνητόμετρο «οπτικής αντλίας» καισίου.



Σχήμα 1.3: Βασική αρχή λειτουργίας (α) πρωτονικού μαγνητομέτρου και (β) μαγνητομέτρου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής (Τροποποιημένα σχήματα από Λούης Ιωάννης σημειώσεις 2004).

Με τη χρήση των σύγχρονων μαγνητομέτρων, τα αποτελέσματα των μαγνητικών διασκοπήσεων επιτρέπουν την ταχεία παραγωγή μετρήσεων ακ ρβείας, που μετά από επεξεργ ασία, μπορούν ν α δώσουν μια εικ όν α που προσομοιάζει την κάτοψη των θαμμένων ερειπίων σε κάποιο χώρο αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Αυτή λοιπόν η δυνατότητα της μεθόδου, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η εφαρμογή της είναι πολύ πιο εύκολη και γρήγορη από άλλες γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης, την έφερε σε πρώτη προτίμηση για την διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων.

1.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η μέθοδος γεωραντάρ (Ground Penetrating Radar - G.P.R.) είναι μία ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική τεχνική που τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται συχνά στην αρχαιομετρία για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών λειψάνων. Η αρχαιολογική κοινότητα, εκμεταλλευόμενη την υψηλή διακριτική ικανότητα της μεθόδου, την χρησιμοποίησε για την ανίχνευση αρχαιολογικών στόχων, και ιδιαίτερα σε περιοχές όπου υπήρχαν τάφοι ή στοές όπου το ραντάρ μπορούσε να εντοπίσει με μεγάλη ακρίβεια τις έντονες αντιθέσεις διηλεκτρικής σταθεράς που σχηματίζον ταν από τις δομές αυτές. Η μέθοδος γεωραντάρ, που εφαρμόστηκε και στην παρούσα διατριβή αναλύεται παρακάτω.

1.3.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου γεωραντάρ, βραχείς παλμοί ραδιοφωνικών συχνοτήτων εκπέμπονται προς το υπέδαφος και το σήμα που ανακλάται προς την επιφάνεια καταγράφει την θέση υπεδαφικών σκεδαστών και τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που το βάθος ταφής του στόχου αναμένεται να είναι μικρό και το υπέδαφος δεν είναι πολύ αγώγιμο (δεν περιέχει μεγάλο ποσοστό υγρασίας ή αργίλου). Εάν ισχύουν τα παραπάνω, τότε η διείσδυση μπορεί να είναι της τάξης μερικών έως αρκετών μέτρων (ανάλογα με την κεντρική συχνότητα του παλμού).

<u>Διάδοση ραδιοφωνικών κυμάτων σε πεπερασμένα μέσα - Σύντομη Ανασκόπηση</u>

Έστω επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό (ΗΜ) κύμα που διαδίδεται σε ομογενή χώρο σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση ταλάντωσης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, δηλ, κατά την διεύθυνση του ανύσματος **E** × **H** :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \omega^2\mu\varepsilon\mathbf{E}$$

Η χωρική μεταβολή του πεδίου περιλαμβάνει διάχυση (πρώτος όρος δεξιού σκέλους) και διάδοση ή ακτινοβολία (δεύτερος όρος δεξιού σκέλους). Η ειδική αγωγιμότητα σ ελέγχει τις ωμικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης και η διηλεκτρική σταθερά ε τις διηλεκτρικές ιδιότητες. Η ταχύτητα και απόσβεση του κύματος σε συγκεκριμένο μέσο δίνεται από τον κυματαριθμό :

$$\mathbf{k} = \sqrt{i\omega\mu\sigma - \omega^{2}\mu\varepsilon} = \omega\sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2}\left(\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^{2}\right)} - 1\right) + i\omega\sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{2}\left(\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^{2}\right)} + 1\right)}$$

Σε χαμηλές συχνότητες ισχύει ότι $\varpi^2 \varepsilon \ll \varpi \sigma$ και ο όρος της ακτινοβολίας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέος. Για το λόγο αυτό τα χαμηλόσυχνα πεδία διαδίδονται διαχυτικά. Αντίθετα σε υψηλές συχνότητες ισχύει ότι $\varpi^2 \varepsilon \ll \varpi \sigma$ και ο όρος της διάχυσης μπορεί να αγνοηθεί. Έτσι, τα υψίσυχνα πεδία διαδίδονται δια ακτινοβολίας (οδεύοντα κύματα, π.χ. μετρήσεις γεωαρντάρ σε ξηρό πάγο). Σε περίπτωση που έχουμε μέσο με υψηλή αγωγιμότητα ο όρος της διάχυσης κυριαρχεί και το πεδίο αποσβένεται ταχύτατα.

Αφού διαδοθεί σε απόσταση x, το πλάτος της ηλεκτρικής συνιστώσας του ΗΜ κύματος είναι $E0 exp(-\alpha \cdot x)$, όπου $\alpha = Re[k]$ είναι ο συντελεστής απόσβεσης που δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon \mu}{2} \left(\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right)^2 \right)} - 1 \right)}$$

Το επιδερμικό βάθος είναι δ=1/α. Για την περίπτωση που ισχύει (σ/ ωε)<<1, δηλαδή όταν υπερισχύει το ρεύμα μετατόπισης, και έχουμε παραμαγνητικά υλικά, το επιδερμικό βάθος δίδεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$\delta = \frac{5,31\sqrt{K(\omega)}}{\sigma} \quad \mathrm{m}$$

όπου η παράμετρος σ εκφράζεται σε mS/m και K είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά: $\varepsilon(\omega) = K(\omega)\varepsilon 0$. Σε αγώγιμα μέσα το επιδερμικό βάθος είναι πολύ μικρό και το σήμα αποσβένεται ταχύτατα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το θαλασσινό νερό έχει μέσο επιδερμικό βάθος 0.01 m, ενώ οι υγρές άργιλοι 0.3 m. Αντίθετα, στην περίπτωση άνυδρων ή ξηρών υλικών χαμηλής αγωγιμότητας το βάθος διείσδυσης είναι πολύ μεγαλύτερο.

Η ταχύτητα διάδοσης των ραδιοκυμάτων δίνεται από τη σχέση:

$$V_{m} = \frac{\omega}{\text{Im}\{k\}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{0}\mu_{0}} \cdot \sqrt{\frac{K\mu_{r}}{2}\left(\sqrt{(1+P^{2})}+1\right)}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{K\mu_{r}}{2}\left(\sqrt{(1+P^{2})}+1\right)}}$$

όπου $c \approx 0.3$ m/ns, η ταχύτητα του φωτός στο κενό = $(\mu_o \varepsilon_0)^{-1/2}$, μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα ($\mu = \mu_r \cdot \mu_0$) και $P = \sigma/\omega\varepsilon$ ο παράγων απώλειας. Εάν θεωρήσουμε μέσο διάδοσης με παραμαγνητικές ιδιότητες (μ_r = 1) κ α μικ ρές απώλειες P (<<1) τότε η παραπάνω σχέση γίνεται :

$$V_m = \frac{c}{\sqrt{K}} = \frac{0.3}{\sqrt{K}} m / ns$$

Έτσι, οι ταχύτητες των ραδιοκυμάτων εξαρτώνται από την σύσταση των υπεδαφικών σχηματισμών και το περιεχόμενο υγρό κλάσμα. Η παράμετρος *Κ* μεταβάλλεται από 1 στον αέρα μέχρι 81 στο γλυκό νερό, οπότε η ταχύτητα διάδοσης κυμαίνεται από 0.300 m/ns στον αέρα μέχρι 0.033 m/ns στο νερό. Για τα περισσότερα γεωλογικά υλικά οι ταχύτητες κυμαίνονται μεταξύ 0.06 και 0.175 m/ns.

Τα γεωλογικά υλικά αποτελούνται συνήθως από μία σχετικά αντιστατική στερεά μήτρα και κορεσμένο ή ακόρεστο πορώδες. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες τέτοιων διφασικών μέσων είναι συνήθως ο μέσος όρος των ιδιοτήτων των δύο φάσεων:

$$K = (1 - \varphi) K_{\mu} + \varphi K_{\upsilon}$$

όπου φ το ολικό πορώδες του σχηματισμού και *K*_μ, *K*_υ οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές της στερεάς μήτρας και του πορικού ρευστού αντίστοιχα. Οι ανακλάσεις

παράγονται από μεταβολές στην ταχύτητα διάδοσης και αντικατοπτρίζουν αλλαγές στο περιεχόμενο υγρό κλάσμα.

Το ποσοστό του σήματος που ανακλάται από μία επαφή διαφορετικών σχηματισμών, εξαρτάται από την αντίθεση διηλεκτρικών ιδιοτήτων των σχηματισμών. Το πλάτος του ανακλώμενου κύματος δίδεται από τον συντελεστή ανάκλασης (-1< *R* < 1):

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}$$

όπου V_1 και V_2 είναι οι ταχύτητες στα στρώματα 1 και 2 αντίστοιχα και ε_1 και ε_2 είναι οι διηλεκτρικές σταθερές.

Με βάση τα ανωτέρω, ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης στα διάφορα υλικά είναι ιδιαίτερα σημαντικός κατά την έρευνα με γεωραντάρ, πρώτον γιατί χάρη στην αντίθεση ταχυτήτων των υλικών επιτυγχάνεται η απεικόνιση των στόχων, δεύτερον, γιατί μέσω αυτής μπορούμε να προσδιορίσουμε τη φύση τον θαμμένων υλικών. Τέλος, με βάση την ταχύτητα του ΗΜ παλμού μέσα στο μέσο διάδοσης, ο χρόνος διαδρομής μπορεί να αναχθεί σε απόσταση. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο προσδιορισμός του βάθους ταφής των αρχαιολογικών στόχων.

$$R = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}$$

<u>Διεισδυτική ικανότητα ραδιοκυμάτων γεωραντάρ</u>

Η ελάττωση του πλάτους των ραδιοκυμάτων συναρτήσει του βάθους διείσδυσης οφείλεται σε:

- Γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου του κύματος.
- Σκέδαση από μικρές ανομοιογένειες (ανακλαστήρες).
- Ανακλάσεις σε υπεδαφικούς στόχους.
- Απόσβεση (μετατροπή σε θερμική ενέργεια) λόγο των επαγωγικών και διηλεκτρικών ιδιοτήτων του κάθε υλικού. Σε μοριακό επίπεδο όταν ένα HM κ ψα διεγ έρει τα μόρια που το αποτελούν ένα σώμα τότε ένα μέρος της ενέργειας του κύματος μετατρέπεται σε θερμική. Η συχνότητα του κύματος είναι σημαντική γιατί το κάθε υλικό έχει και διαφορετική συμπεριφορά σε διαφορετικές συχνότητες. Συνήθως η μεγαλύτερη απορρόφηση συμβαίνει σε χαμηλές συχνότητες (μικροκύματα).

• Απώλειες κεραίας.

Η ανιχνευσιμότητα των υπεδαφικών στόχων εξαρτάται από:

- Την ισχύ και συχνότητα του πομπού.
- Την φύση του στόχου.
- Τις απώλειες ενέργειας.

Τα σύγχρονα συστήματα γεωραντάρ ανιχνεύουν σήματα τουλάχιστον 160db ασθενέστερα από τον εκπεμφθέντα παλμό ενώ η επίδοση αυτή βελτιώνεται συνεχώς (Daniels 2004). Έτσι, αν το άθροισμα σε db όλων των παραγόντων απώλειας ενέργειας είναι ίσο προς *F*, τότε η εξίσωση εμβέλειας του γεωραντάρ γράφεται:

 $F = -10\log 10[A\lambda 2e - 4\alpha r/16\pi 2r4]$

όπου λ το μήκος κύματος, Α παράγοντας με διαστάσεις έκτασης που χαρακτηρίζει το στόχο και *r* η εμβέλεια, δηλ. το θεωρητικά μέγιστο βάθος στο οποίο μπορεί να ανιχνευθεί ο στόχος.

Γενικά, στα συνήθη γεωλογικά περιβάλλοντα τα πεδία ραδιοφωνικών συχνοτήτων διαδίδονται στο όριο μεταξύ ακτινοβολίας και διάχυσης. Στην περίπτωση στεγνών πετρωμάτων τα σήματα γεωραντάρ διαδίδονται ως καθαρά κύματα, κυρίως δια ακτινοβολίας. Σε αργίλους και παρουσία ηλεκτρολυτών (υψηλή αγωγιμότητα) τα σήματα γεωραντάρ διαδίδονται ως διαχυτικά κύματα και αποσβένονται ταχύτατα. Στην περίπτωση μαγνητικών εδαφών, η γενική παραδοχή ότι μ=1 είναι δυνατόν να μην ισχύει, λόγω υψηλής περιεκτικότητας σε σιδηρομαγνητικά ορυκτά (μαγνητίτη, αιματίτη, ιλμενίτη κ.ά). Τότε, η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης και το συντελεστή ανάκλασης, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη λήψη των μετρήσεων. Τέλος, τα μεταλλικά σώματα που μπορεί να συναντώνται στην περιοχή μελέτης, λόγω της εξαιρετικά υψηλής αγωγιμότητάς τους, εμποδίζουν τη διάδοση των ραδιοκυμάτων που δεν διαδίδον ται στο εσωτερικ ό τους αλλά περιορίζονται στην επιφάνειά τους, όπου απορροφώνται εντόνως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία έντονων ανακλάσεων οι οποίες είναι εύκολα ανιχνεύσιμες με γεωραντάρ.

Γενικά, κατά την εφαρμογή της μεθόδου γεωραντάρ ισχύει ο εξής πρακτικός κανόνας: όταν η ειδική αγωγιμότητα ενός γεωλογικού μέσου είναι μεγαλύτερη των 10 mS/m (ειδική αντίσταση < 100 Ωm) η χρήση του γεωραντάρ δεν ενδείκνυται. Έτσι, είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τον προγραμματισμό και την

20

εκτέλεση των εργασιών υπαίθρου να γνωρίζουμε αν το έδαφος της υπό μελέτη περιοχής έχει μεγάλη αγωγιμότητα σε μικρό βάθος (νερό ή άργιλοι), καθώς τότε η διείσδυση του κύματος δεν θα είν α τέτοια ώστε ν α μας επιτρέψει την απεικόνιση του υπεδάφους, αφού απλά θα μετρήσουμε μια μεγάλη ανάκλαση από το αγώγιμο στρώμα που δεν θα επιτρέψει στο κύμα να διεισδύσει βαθύτερα. Για το λόγο αυτό η μέθοδος γεωραντάρ σε άνυδρες περιοχές έχει δώσει λεπτομερέστατα αποτελέσματα απεικόνισης των αρχαιολογικών στόχων (π.χ. Πέτρα Ιορδανίας, Conyers *et al.* 2002).

1.3.2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Τα συστήματα γεωραντάρ αποτελούνται από μία γεννήτρια σήματος, κεραίες εκπομπής και λήψης και ένα ψηφιακό καταγραφέα με δυνατότητες γραφικής απεικόνισης. Η κεραία εκπομπής (Tx) παράγει παλμικά ραδιοκύματα που διαδίδονται ως ευρεία δέσμη (Σχήμα 1.4) με ταχύτητα 0.3 m/ns στον αέρα και σαφώς μικρότερη στο έδαφος. Η διάρκεια και η κυματομορφή του πηγαίου παλμού εξαρτάται από τη συχνότητα λειτουργίας της κεραίας, αλλά τυπικά είναι μικρότερη των 20 ns. Κεραίες των 100 MHz έχουν φάσμα λειτουργίας ~50-200 MHz. Ο χρόνος διαδρομής από τον πομπό προς κάποιο υπεδαφικό στόχο και πίσω στον δέκτη συνήθως διαρκεί 10-1000 ns.



Σχήμα 1.4: Δέσμη διάδοσης παλμικών ραδιοκυμάτων από την κεραία του οργάνου (Πηγή: http://dissertationtools.com/index.php?main_page=product_info&products_id=20.)

Διακρίνουμε δύο κατηγορίες συστημάτων, ανάλογα με τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων κεραιών:

Α) Μονοστατικά συστήματα: η ίδια κεραία χρησιμεύει ως πομπός και δέκτης ταυτόχρονα (εκπέμπει – διακόπτει/αλλάζει λειτουργία – δέχεται /καταγράφει κ.ο.κ.). Τα συστήματα αυτά, παρόλο που είναι πιο εύχρηστα και παραγωγικά από τα διστατικά, είναι τεχνολογικώς πιο περίπλοκα και δεν επιτρέπουν άμεσα ανάλυση ταχύτητας των στρωματοειδών σχηματισμών όπως τα διστατικά. Παράδειγμα πλήρους μονοστατικού συστήματος δίδεται στο Σχήμα 1.5, όπου φαίνεται η μονάδα ελέγχου του συστήματος, αποτελούμενη από τον καταγραφέα και την οθόνη, και η κεραία που λειτουργεί ως πομπός και δέκτης. Όλα μαζί είναι τοποθετημένα σε σύστημα μεταφοράς με ρόδες, εφοδιασμένο με δρομόμετρο, που επιτρέπει την ταχεία λήψη μετρήσεων κατά μήκους τομών.



Εικόνα 1.5: Παράδειγμα του καταγραφικού συστήματος γεωραντάρ SIR-3000 της GSSI Inc.

B) Διστατικά συστήματα: Στην περίπτωση αυτή πομπός και δέκτης είναι ξεχωριστές κεραίες. Στο Σχήμα 1.6 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα διστατικού συστήματος, όπου φαίνεται ο πομπός, ο δέκτης, με τις αντίστοιχες κεραίες. Τα δεδομένα του πομπού και του δέκτη καταγράφονται και ταυτόχρονα προβάλλονται στην οθόνη της μονάδας ελέγχου, ενώ μεταξύ του καταγραφέα και των δύο κεραιών παρεμβάλλεται χρονόμετρο ακριβείας.



Σχήμα 1.6: Σκαρίφημα ενός διστατικού συστήματος γεωραντάρ (τροποποιημένο από τους Davies *et al.* 1989).

Έτσι, κατά τη λειτουργία ενός διστατικού συστήματος, η κεραία εκπομπής (Tx) παράγει παλμικά ραδιοκύματα Το σήμα οδεύει κατά μήκος της επιφάνειας και αφικνείται απ' ευθείας στον δέκτη, ενώ ταυτόχρονα διαδίδεται στο υπέδαφος και όταν συναντά επαφή μεταξύ στόχων με διαφορετικές ιδιότητες σκεδάζεται και μέρος της ενέργειάς του κατευθύνεται προς την επιφάνεια όπου καταγράφεται από το δέκτη. Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη διάταξη είναι η διάταξη ευρυγώνιας ανάκλασης, η οποία εφαρμόζεται μόνο σε οριζόντιους υπεδαφικούς σκεδαστές, αλ λ άεκ ελ ίσαι ταχέως κ α με ευκ αλία, εν ώ στην περίπτωση επίπεδων σκεδαστών χρησιμοποιείται η διάταξη κοινού μέσου σημείου.



(1): Stone fill with some soil ~50cm depth - (2): Stone wall without soil ~50 cm depth
(3): Bottom of the structure ~200 cm depth

DISTANCE METERI

Εικόνα 1.7: Παράδειγμα αρχαιολογικής εκσκαφής και θαμμένων υλικών που λειτουργούν ως ανακλαστήρες κατά την εφαρμογή της μεθόδου γεωραντάρ (Yalçiner *et al.* 2009).

Στην περίπτωση των αρχαιολογικών στόχων, οι ανακλάσεις προέρχονται κυρίως από κενά όπως τάφοι, στοές ή από οικοδομικά υλικά τα οποία αποτελούν, τοίχους, υδραυλικά έργα και θεμελιώσεις. Η φύση των υλικών αυτών εξαρτάται από την εποχή κατασκευής τους, ενώ οι αναμενόμενες ανακλάσεις έχουν διάφορες μορφές (Σχήμα 1.7). Για τα κενά και τις κοιλότητες η αντίθεση μεταξύ κενών γεμάτα αέρα και εδάφους που τα περικλείει παράγει μια πολύ δυνατή ανάκλαση. Αντιστροφές πολικότητας του προσπίπτοντος κύματος μπορεί επίσης να διακριθούν. Μερικώς πληρωμένα κενά που περιέχουν μπάζα ή νερό μπορεί επίσης να εντοπιστούν. Επίσης για τις ταφές ανάλογα με τη φύση τους και το βάθος τους δίνουν και διαφορετικές ανακλάσεις πέτρινα η πήλινα φέρετρα δημιουργούν ισχυρούς ανακλαστήρες. Η περίπτωση των τοίχων είναι και η πιο συχνή ανάλογα με το μέγεθος καθώς και με την γωνία της όδευσης σε σχέση με την δομή μπορεί να μας δώσει μια ευθύγραμμη ανάκλαση (κατά μήκος της δομής) έως και μια μικρή ανάκλαση της μορφής ανεστραμμένου U (κάθετα στην δομή). Γενικά όσο περισσότερα δεδομένα έχουμε για την αντίσταση των εδαφών της περιοχής τόσο πιο εύκολα θα μπορέσουμε να εντοπίσουμε επαρκείς αντιθέσεις αγωγιμότητας ειδικά σε περιπτώσεις πλευρικών ασυνεχειών.

1.3.3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αποτελεσματικά τη μέθοδο γεωραντάρ στην αρχαιολογική ερευνά για τους εξής λόγους: η συλλογή των δεδομένων είναι εύκολη και το κόστος της μεθόδου σχετικά χαμηλό. Το γεωραντάρ είναι μια μη παρεμβατική (καταστρεπτική) μέθοδος που αφήνει τους αρχαιολογικούς χώρους ανέπαφους. Δίνεται η δυνατότητα διασκόπησης με ευκρίνεια υψηλότερη από κάθε άλλη γεωφυσική μέθοδο και τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται από αυξημένη ακρίβεια και αξιοπιστία και κατά συνέπεια μπορούν να βαρύνουν σημαντικά στην λήψη της απόφασης για το αν θα πραγματοποιηθεί η όχι μια ανασκαφή.

Υπάρχουν όμως και κάποιοι περιορισμοί κατά την εφαρμογή της μεθόδου του γεωραντάρ. Όπως προαναφέρθηκε, ανακλάσεις δημιουργούνται στο έδαφος στις διεπαφές μεταξύ των υλικών. Τα περισσότερα αρχαιολογικά υλικά είναι χαμηλού έως μέτριας αντίθεσης, και υπάρχει σπάνια πρόβλημα μεγάλης αντίθεσης. Όμως τα προβλήματα προκύπτουν με την παρουσία μεγάλων κομματιών μετάλλου (το μέταλλο ανακλά 100% του σήματος) και με τον κορεσμό σε νερό ή εάν υδροφόρος ορίζοντας παρεμβάλλεται στα αρχαιολογικά στρώματα. Σε ιδανικά περιβάλλοντα η ερμηνεία του γεωραντάρ είναι σχετικά απλή διαδικασία, αλλά μπορεί να γίνει ιδιαίτερα περιπλοκή όταν ο στόχος είναι πολύ δυσδιάκριτος, π.χ. παρουσιάζει πολύ μικρή αντίθεση (Witten *et al.* 2000).

Οι ανακλάσεις είναι αρκετά απλό να απεικονιστούν όταν εξετάζονται ξεχωριστά, αλλά ο συνδυασμός ανάκλασης και διάθλασης των κυμάτων μέσω των πολλαπλών διεπαφών με ποικίλες μορφές και προσανατολισμού είναι δυσκολότερο να απεικονιστούν. Τα κύματα μπορούν να περάσουν μέσω μιας διεπαφής όπως η οροφή ενός στρώματος αργίλου, κατόπιν να απεικονίσουν το κατώτατο σημείο του στρώματος αργίλου, και έπειτα επανειλημμένα να απεικονίζουν πάνω και κάτω μεταξύ της οροφής και του κατώτατου σημείου του στρώματος. Εάν μερικά από αυτά τα σήματα φθάνουν τελικά στη λαμβάνουσα κεραία, κάθε ανάκλαση καταγράφεται, κάνοντας να φαίνονται ότι υπάρχουν πολλαπλές διεπαφές. Αυτές καλούνται «multiples» (Convers 2004). Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα είναι ότι πολλά ανακλώμενα κύματα κατευθύνονται μακριά από τη λαμβάνουσα κεραία. Μερικά ανακλώμενα κύματα δεν φθάνουν ποτέ στην κεραία, έτσι μόνο ένα μέρος των ανακλάσεων καταγράφεται πραγματικά. Ακόμα ένα ζήτημα είναι ότι η ενεργειακή μετάδοση του ραντάρ διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις (Convers 2004). Πολλές κεραίες έχουν είδος καλύμματος, έτσι ώστε η ενέργεια να μην ακτινοβολείται απλά επάνω από το έδαφος, αλλά η μετάδοση της ακτινοβολίας προς το έδαφος παίρνει μια κωνική μορφή (με την κεραία στην κορυφή) και όχι μια απλή ευθεία γραμμή. Καθώς η κεραία κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους ακτινοβολεί όχι μόνο προς τα κάτω, αλλάκαι μπροστά από το μέτωπο της κεραίας, πίσω του, και στις δύο πλευρές. Έτσι παράγονται οι υπερβολικές ανακλάσεις που προέρχονται από μια πηγή σημείου ή ένα μικρό σφαιρικό αντικείμενο (Convers 2004, Witten 2006). Οι ανακλάσεις εμφανίζονται συνεχώς καθώς η κεραία πλησιάζει το αντικείμενο, περνά άμεσα από αυτό, και έπειτα συνεχίζεται μακρύτερα κατά μήκος της γραμμής. Δεδομένου ότι το σύστημα GPR δεν εντοπίζει την κατεύθυνση από την οποία λαμβάνονται τα κύματα, υποθέτει ότι όλες οι αντανακλάσεις είναι κατ' ευθείαν κάτω από το ραντάρ. Έτσι οι υπερβολικές «ουρές» αντιπροσωπεύουν τις άκρες του αντικειμένου, όπως ανιχνεύθηκαν από την κεραία από κάθε πλευρά του, και η αιχμή αντιπροσωπεύει την πραγματική θέση και το βάθος που κατέγραψε η κεραία όταν ήταν από πάνω του.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί η σημαντικότερη, ίσως, δυσκολία στην εφαρμογή της μεθόδου, που έγκειται στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων από τον εκάστοτε μελετητή. Η ερμηνεία των δεδομένων γεωραντάρ μπορεί να καταλήξει υποκειμενική και για τον λόγο αυτό, οι γνώσεις και εμπειρία του ερμηνευτή

26

αποτελούν σημαντικότατο παράγοντα επιτυχίας. Σε γενικές γραμμές, τα ραδιογραφήματα διαφέρουν σημαντικά σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Για το λόγο αυτό, εκτός από τα τυπικά βήματα επεξεργασίας και αναγωγής δεδομένων που θα εφαρμοστούν, η περαιτέρω προσαρμοσμένη επεξεργασία πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες και απαιτήσεις της διασκόπησης. Έτσι, οι τεχνικές που θα επιλεχθούν, αλλάκαι η σειρά εφαρμογής τους σε κάποιες περιπτώσεις, εξαρτώνται από τα εκάστοτε δεδομένα και η ορθή επιλογή τους προϋποθέτει έναν ικανό και έμπειρο ερμηνευτή.

1.4 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ (GPR, ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η χρήση μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης για την ανίχνευση στόχων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος πρωτοεμφανίστηκε στην Ελλάδα στα τέλη της δεκαετίας του 1960 (π.χ. Ralph 1968, Foster & Hackens 1969). Όμως, παρά το γεγονός ότι έχουν περάσει αρκετές δεκαετίες, κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκε σειρά επιτυχημένων μελετών από διάφορες ερευνητικές ομάδες, η εφαρμογή της γεωφυσικής στην αρχαιολογία δεν συγκαταλέγεται ακόμη στις τυπικές τεχνικές αρχαιολ γοκι ζή διασκ τύησης κια δεν έχει κ θαερωθεί ως έν α από τα προκαταρκτικά στάδια των προανασκαφικών ερευνών.

1.4.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η γεωφυσική εξερεύνηση Ελληνικών αρχαιολογικών τοποθεσιών με τη μαγνητική μέθοδο διασκόπησης (Σχήμα 1.8 & Πίνακας 1.1) άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 στην περιοχή της αρχαίας Ήλιδας (Ralph 1968), στη Δήλο (Foster & Hackens 1969) και στα Μάλια της Κρήτης (Rudant & Thalmann 1976). Στη συνέχεια και κατά την δεκαετία του 1980 η μαγνητική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε σε πολλές περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος στην Ελλάδα. Οι Βλάχος και Λιβιεράτος (1981) αναφέρουν εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου σε τμήμα του χώρου της αρχαίας Πέλλας, ενώ ο Παπαμαρινόπουλος και οι συνεργάτες του δημοσίευσαν τα αποτελέσματα διασκοπήσεων που έγιναν στο διάστημα 1983-1985 στη Μυτιλήνη και тη αρχαία Στυμφαλία

(Papamarinopoulos *et al.* 1988). Την ίδια χρονική περίοδο έγιναν οι εξερευνήσεις του Μανδάλου και τμημάτων του Δίου, της Βεργίνας και της Πύδνας (Τσόκας *et al.* 1986, 1988, 1989).



Σχήμα 1.8: Χάρτης με τις θέσεις των σημαντικότερων εφαρμογών μαγνητικών διασκοπήσεων στον Ελληνικό χώρο.

Οι πρώτες αυτές μαγ ντικτές διασκ τυήσεις σε αρκετά γ νστωούς αρχαιολογικούς χώρους συνετέλεσαν στο να αποκτηθεί ένα επίπεδο εμπειρίας, το οποίο ήταν αναγκαίο για περαιτέρω έρευνες. Ακολούθησε η εκτεταμένη εφαρμογή σε τοποθεσίες στην Κω, τη Νάξο και τα Ίσθμια (Papamarinopoulos *et al.* 1988). Επίσης, το Λιβιεράτος *et al.* (1985) εξερεύνησαν μια εκτεταμένη περιοχή στην Ιαλυσό της Ρόδου.

Την ίδια χρονιά (1985) ο Μαρκογιαννάκης εξερεύνησε την τοποθεσία Φαλάσαρνα στην Κρήτη σαν υπεύθυνος συνεργείου του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Τσόκας 1988). Το καλοκαίρι του 1986 οι Παπαμαρινόπουλος και Τσόκας εξερεύνησαν τον Μινωικό οικισμό στην Ψείρα και τον Πρωτογεωμετρικό στο Καβούσι στην Κρήτη. Οι εργασίες αυτές έγιναν σε δύσκολες εδαφικές συνθήκες με συνέπεια την εισαγωγή ισχυρού θορύβου στις μετρήσεις. Έδωσαν όμως ποικιλία εντυπωσιακών ευρημάτων (Papamarinopoulos & Tsokas 1988).



Σχήμα 1.9: Παράδειγμα γεωφυσικής διασκόπησης με την εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου στην τοποθεσία της Ευρωπού (Tsokas *et al.* 1994).

Πίνακας 1.1: Αρχαιολογικές θέσεις στον Ελλαδικό χώρο, όπου εφαρμόστηκε η μαγνητική μέθοδος ως βασικ ή μέθοδος έρευνας, σε συνδυασμό πολ ές φορές κ α με άλ λα γεωφυσικές μεθόδους. Στη δεύτερη στήλη, μέσα σε παρένθεση, αναφέρονται οι κύριες δομές που εντοπίστηκαν. ΜΔ = Μαγνητική διασκόπηση, ΗΔ = Ηλεκτρική διασκόπηση, GPR = Γεωραντάρ, ΗΜΔ = Ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση, ΜΕ = Μαγνητική διασκόπηση, ΕΤΛ = Εναέρια τηλεπισκόπηση, GIS = Χρήση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, ESR = Electron Spin Resonance, MBS = Mossbauer Spectroscopy.

A/A	Περιοχή μελέτης	Μέθοδος	Αναφορά
1	Λουλούδια – Κίτρος, Πιερία	MΔ, ME, ESR,	Aidona <i>et al.</i> 1998
	(κλίβανοι)	MBS	
2	Πάνακτον, Βοιωτία	MΔ, HΔ, GPR	Papamarinopoulos et al. 1996
	(κλίβανος)		
3	Θάσος (κλίβανοι)	MΔ	Jones 1986
4	Δίμινιο	ΜΔ, ΗΔ, ΗΜΔ	Sarris 1998
			Johnson <i>et al.</i> 1999
5	Ηλις	MΔ	Ralph 1968
6	Ευρωπός	MΔ, HΔ, GPR	Tsokas et <i>al.</i> 1994
			Sarris1992
7	Κνωσός (Ρωμαικά ερείπια)	MΔ, HΔ, GPR	Shell 1997
8	Μαντίνεια	MΔ, $HΔ$, GPR ,	Papamarinopoulos et al.1993
		ΜΕ, ΗΜΔ	Sarris 1992, 1993
9	Παλαίκαστρο	MΔ	Lyness & Hobbs 1984
10	Κάστρο Πλαταμώνα, Πιερία	MΔ	Katsamhalos & Tsiounis1991
11	Νικόπολη, Ήπειρος (λιμάνι	ΜΔ, ΗΔ, ΗΜΔ,	Sarris et <i>al.</i> 1996
	και άλλες θέσεις)	ETΛ, GIS	
12	Ίσθμια, Κορινθία (οχυρό,	ΜΔ, ΗΔ, ΗΜΔ	Gregory & Kardulias 1990
	ιππόδρομος και άλλες		
	δομές)		
13	Λευκάδα (κάστρο)	ΜΔ, ΗΔ	Savvaidis et <i>al.</i> 1999
14	Μακρύγιαλος (Νεολιθικός	ΜΔ, ΗΔ, ΗΜΔ,	Tsokas <i>et al.</i> 1997
	οικισμός)	ME	
15	Θεολόγος, Ρόδος	ΜΔ, ΗΔ	Sarris <i>et al.</i> 1996
16	Μάλια, Κρήτη	MΔ	Rudant & Thalmann 1976
17	Πέλλα (αρχαία πόλη)	MΔ	Βλάχος & Λιβιεράτος 1981
18	Βρόντα, Καβούσι	MΔ	Papamarinopoulos & Tsokas 1988
19	Κεχριές, Κορινθία	MΔ, HΔ, GPR	Sarris <i>et al.</i> 2007

Οι Τσόκας και Λυριτζής (1987-1988) υλοποίησαν ένα εκτεταμένο πρόγραμμα διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους στο κέντρο της Αθήνας. Το ερευνητικό αυτό πρόγραμμα έγινε ταυτόχρονα για αρχαιολογικούς και πολεοδομικούς σκοπούς, στο πλαίσιο ενοποίησης των αρχαιολογικών χώρων του ιστορικού κέντρου της πόλης (Tsokas *et al.* 1988). Το 1987 στους Λούσσους Αχαΐας η μαγνητική έρευνα έδειξε την ύπαρξη κλιβάνου που χρησιμοποιούσαν για κεραμοποιία (Papamarinopoulos *et al.* 1988).

То 1988 άρχισε συστηματική γεωφυσική διασκόπηση των η αρχαιολογικών χώρων του Δίου και της Βεργίνας. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δίκτυα καννάβων με σκοπό να καλυφθούν ολοκληρωτικά οι εκτάσεις που κάποτε καταλάμβαναν οι δύο αρχαίες πόλεις (Τσόκας et al. 1988). Το 1989 οι ανασκαφές στην Τριταία (ΒΔ Πελοπόννησο) επιβεβαίωσαν τα γεωφυσικά δεδομένα που έδειχναν λείψανα θεμελίωσης Ρωμαϊκής κατοικίας (Papamarinopoulos et al. 1988).

Το 1988-1993 χρησιμοποιήθηκε η μαγνητική μέθοδος διασκόπησης στην Ευρωπού, επειδή οι στόχοι αναμένονταν να είναι κυρίως τοποθεσία της κλίβανοι. Οι κλίβανοι φτιάχνονται από ψημένη άργιλο και έτσι μπορούν να δώσουν αξιόπιστα μαγνητικά αποτελέσματα. Η ισχυρή μαγνητική ανωμαλία που είναι εμφανής στο νοτιοανατολικό τμήμα του μαγνητικού χάρτη (Σχήμα 1.9) αποδόθηκε σε κλίβανο (Tsokas et al. 1994). Η ανασκαφή επιβεβαίωσε τα γεωφυσικά αποτελέσματα εντοπίζοντας καλοδιατηρημένο κλίβανο της Ελληνιστικής εποχής που βρισκόταν θαμμένος 40 cm κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Περαιτέρω έρευνες στην περιοχή έφεραν στο φως έναν εκτεταμένο αρχαιολογικό χώρο (Diamanti et al. 2005).

Στα μέσα του καλοκαιριού του 1992, στο λόφο Πάνακτον στη Βοιωτία πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές έρευνες με διαφορικό μαγνητόμετρο, με σκοπό την εξερεύνηση ποικιλίας πολιτισμών που άφησαν τα χνάρια τους (Papamarinopoulos *et al.* 1992). Οι ανασκαφές έφεραν στο φως δομές που είχαν χαρακτηριστεί ως στόχοι από την γεωφυσική έρευνα, η οποία έδωσε σωστές εκτιμήσεις τόσο για το βάθος όσο και για το μέγεθος των μαγνητισμένων σωμάτων.

Το 1977 άρχισαν οι αν ασκ αφές στο χώρο της αρχαίας Ιωλ κώο που βρίσκεται στον μυχό του Παγασητικού κόλπου. Το 1997 με τη χρήση γεωφυσικών διασκοπήσεων εντοπίστηκαν δύο μεγάλα κτίσματα, που οι

31

αρχαιολόγοι πιστεύουν ότι ξεπερνούν τα 7000 m². Η προϊσταμένη της ΙΓ΄ Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, κ. Βασιλική Αδρύμη-Σισμάνη, στα πλαίσια συνεδρίου που έγινε τον Μάιο του 2001 δήλωσε πως είναι αναγκαία η βοήθεια και άλλων επιστημών για την καλύτερη διεξαγωγή της ανασκαφής, αλλά και για τη σωστότερη ανάγνωση των ευρημάτων (Έθνος, Τρίτη 15 Μαΐου 2001). Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων αναμένεται να αποτελέσουν έναυσμα για την συνέχιση των αρχαιολογικών ερευνών στην εν λόγω περιοχή, υποδεικνύοντας συγκεκριμένους στόχους που σχετίζονται με την παρουσία αρχαιολογικών λειψάνων. Τελικός στόχος των ερευνών είναι η συσχέτιση των γεωφυσικών ανωμαλιών με τα αρχαιολογικά δεδομένα της περιοχής, έτσι ώστε να ληφθούν όλα τα αναγκαία μέτρα προστασίας και αξιοποίησης του αρχαιολογικού χώρου.

Νεότερες μελέτες στην περιοχή των Κεχριών Κορίνθιας (Sarris *et al.* 2007) αποκάλυψαν τη διάταξη ρωμαϊκού νεκροταφείου. Η συγκεκριμένη μελέτη περιλάμβανε τρεις διαφορετικές γεωφυσικές μεθόδους για την καλύτερη και ακριβέστερη απεικόνιση των θαμμένων δόμων. Χρήση των ίδιων μεθόδων γίνεται και στον Ιθανό (Vafidis *et al.* 2005) με σκοπό τον εντοπισμό και την χαρτογράφηση των λείψανων της αρχαίας πόλης.

1.4.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΕΩΡΑΝΤΑΡ

Η πρώτη παγκόσμια απόπειρα χρήσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τη διασκόπηση του εδάφους έγινε to 1904 από τον Christian Hulsmeyer με στόχο τον εντοπισμό θαμμένων μέταλλων. Το πρώτο ψηφιακό ραντάρ για γεωλογικές εφαρμογές κατασκευάστηκε το 1976 από τη NASA (National Aeronautics and Space Administration) και χρησιμοποιήθηκε σε αποστολή στη Σελήνη για τον καθορισμό της καταλληλότητας του εδάφους για επανδρωμένη προσσελήνωση. Πολλές αποτυχημένες εφαρμογές έγιναν, όπως αυτή στην Γκίζα της Αίγυπτου το 1973 (Moyssa & Dolphin 1977), μέχρι την πρώτη εφαρμογή του γεωραντάρ στην αρχαιολογία στο Νέο Μεξικό (Vickers *et al.* 1976) για τον εντοπισμό θαμμένης τοιχοποιίας σε βάθος έως και 1m. Οι ανωμαλίες που εντοπίστηκαν από αυτές τις πρώτες δόκιμες ονομάστηκαν "radar echoes" και τα βάθη τους υπολογιστήκαν με προσεγγιστικές μετρήσεις ταχυτήτων που προσδιοριστήκαν με βάση τα εδαφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Πίνακας 1.2: Αρχαιολογικές θέσεις στον Ελλαδικό χώρο, όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος του γ εωραντάρ ως βασικ ή μέθοδος έρευνας, σε συνδυασμό πολ λ **ξ** φορές κ α με άλ λ **ξ** γεωφυσικές μεθόδους. Στην δεύτερη στήλη, μέσα σε παρένθεση, αναφέρονται οι κύριες δομές που εντοπίστηκαν. GPR = Γεωραντάρ, ΣΔ = Σεισμική διάθλαση, ΣΑ = Σεισμική Ανάκλαση, ΜΔ = Μαγνητική διασκόπηση, ΗΔ = Ηλεκτρική διασκόπηση. Στην τρίτη στήλη, μέσα σε παρένθεση δίνονται τα στοιχεία της κεραίας (σε MHz) του ραντάρ και το βάθος διασκόπησης (σε m).

A/A	Περιοχή μελέτης	Μέθοδος	Αναφορά
1	Ακρωτήρι Θήρα (διώροφη κατοικία)	GPR (300/500, 5m)	Papamarinopoulos et al. 1996
2	Αθήνα (κοίτη ποταμού)	GPR (80, 20m)	Papamarinopoulos &
			Papaioannou 1994
3	Χαλασμένος (Μινωικοί	GPR (225/450, 3-	Sarris 1998
	τάφοι)	4m)	
4	Ευρωπός (οικισμός)	GPR (250, 2m)	Tsokas et al. 1994
5	Ιτανός, Κρήτη (τρισδιάστατη	GPR (450/225, 2-	Sarris et al. 1998
	απεικόνιση του αρχαίου	3m), ΣΔ, ΣΑ	
	λιμανιού)		
6	Πέλλα (Μακεδονικός τάφος)	GPR, ΣΔ	Vafidis et al. 1995
7	Λευκάδα (δεξαμενές και	GPR, ΜΔ, ΗΔ	Savvaidis et al. 1999
	στοές κάστρου)		
8	Παλιόκαστρο, Κρήτη	GPR	McCoy 1997
	(ακτογραμμή)		
9	Περιστέρι (στοές ορυχείου)	GPR, ΗΔ, ΜΔ	Bartsiokas 1996
10	Θήρα (τέφρα από τη	GPR (50, 18-20m)	McCoy 1997
	Μινωική έκρηξη)		Russell & Stasiuk 2000
11	Κανάλι Ξέρξη (τμήμα του	GPR (80/120, 13-	Karastathis &
	καναλιού)	14m), ΣΔ, ΣΑ	Papamarinopoulos 1997
12	Κεχριές, Κορινθία	GPR (300/500, 5m)	Sarris <i>et al.</i> 2007
13	Κρήτη	GPR	Papadopoulos et al. 2009

Την δεκαετία του 1980 οι επιτυχίες στον εντοπισμό αρχαιοτήτων συνεχιστήκαν στην Κύπρο στο Hala Sultan Tekke (Fisher *et al.* 1980) και στο Ελ Σαλβαδόρ στην περιοχή Ceren (Sheets *et al.* 1985), όπου οι καταγραφές έδειξαν βαθύτερα θαμμένους τοίχους, θεμέλια σπιτιών και άλλες αρχαιολογικές δομές. Ο λόγος που οι δομές αυτές εντοπιστήκαν σε μεγαλύτερα βάθη είναι ότι τα υλικά πλήρωσης ήταν στεγνά και αντιστατικά, με αποτέλεσμα η αντίθεσή τους με τους αρχαιολογικούς στόχους να είναι τέτοια έτσι ώστε να μπορούν να εντοπιστούν ακόμα και στις χάρτινες καταγραφές εκείνης της περιόδου. Οι εφαρμογές

συν εχίστηκ αν με πολλ ξεπιτυχίες μια εκ των οποίων στην αρχαία πόλη της Πέτρας (Conyers *et al.* 2002), όπου απεικόνισαν θαμμένα θεμέλια κτισμάτων της αρχαίας αγοράς.

Στην Ελλάδα η μέθοδος χρησιμοποιείται την αναζήτηση θαμμένων αρχαιοτήτων από τη δεκαετία του 1990, όταν εφαρμόστηκε από τους Papamarinopoulos et al (1994) στο Σύνταγμα, με την ανακάλυψη της θαμμένης κοίτης του Ηριδανού. Ακολούθησαν πολλές επιτυχημένες εφαρμογές από διάφορες ερευνητικές ομάδες ελληνικών Πανεπιστημίων και Ερευνητικών Κέντρων, καθώς και από ξένους ερευνητές που εργάστηκαν σε χώρους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Οι σημαντικότερες από τις έρευνες αυτές παρατίθενται στον Πίνακα 1.2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΡΧΑΙΑ ΑΓΟΡΑ ΑΡΓΟΥΣ

2.1 ΤΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Το Άργος, ιστορική πόλη της Πελοποννήσου και σήμερα αγροτικό και βιοτεχνικό κέντρο της περιοχής, κατοικήθηκε από τα προϊστορικά χρόνια. Σύμφωνα μάλιστα με τους μύθους, το Άργος εμφανίζεται ως η αρχαιότερη πόλη της Αργολίδας, παρά το γεγονός ότι κατά τη μυκηναϊκή εποχή κατείχε δευτερεύουσα θέση, πίσω από τις Μυκήνες και την Τίρυνθα.



Σχήμα 2.1: Σχεδιάγραμμα του αρχαίου Άργους, όπου φαίνονται τα σπουδαιότερα από τα μνημεία που έχουν ανακαλυφθεί, ενώ με αστέρι σημειώνονται οι θέσεις των γεωφυσικών διασκοπήσεων. 1: Λόφος Ασπίδα, 2: Ιερά του Πύθιου Απόλλωνα και της Αθηνά Οξυδερκούς, 3: Μυκηναϊκοί τάφοι, 4: Θέατρο, 5: Κριτήριο, 6: Ρωμαϊκά Λουτρά, 7: Ωδείο, 8: Ιερό Αφροδίτης, 9: Αγορά, 10: Κάστρο Λάρισα, 12: Δεξαμενή, 13: Παναγία του Βράχου, 14: Οχυρό, 15: Αγ. Ιωάννης (Καρποδίνης και Δημητριάδης 1994).

Μετά την εξάπλωση των Δωριέων, το πολιτικό ενδιαφέρον μετατέθηκε στο Άργος, το οποίο αναδείχθηκε σ' ένα από τα σημαντικότερα δωρικά κέντρα, φτάνοντας στη μεγαλύτερη ακμή του στις αρχές του 7^{ου} αι. π.Χ. Κατά τη διάρκεια του Πελοποννησιακού πολέμου βρίσκεται στο πλευρό της Αθήνας, γι' αυτό και μετά το

τέλος του εμφανίζεται σε μειονεκτική θέση. Το 229 προσχώρησε στην Αχαϊκή Συμπολιτεία και το 146 υποτάσσεται στους Ρωμαίους. Κατά τη βυζαντινή περίοδο, το Άργος περιήλθε σε πολιτική αφάνεια, ενώ το 1212 καταλήφθηκε από τον Otto de la Roche (Φραγκοκρατία). Το 1463 κατακτήθηκε από τους Τούρκους για να περιέλθει το 1686 στους Ενετούς και στη συνέχεια ξανά στους Τούρκους, το 1715. Κατά τη διάρκεια της επανάστασης του 1821 η πόλη διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο.

Ανάλογη με την πολιτική ιστορία είναι και η πολιτιστική εξέλιξη στο Άργος. Από νωρίς η πόλη σημείωσε επίδοση στις τέχνες, ιδιαίτερα στην αγγειοπλαστική, που κατά την γεωμετρική περίοδο έφτασε σε υψηλό σημείο ακμής, καθώς και στη μεταλλουργία και τη χαλκοπλαστική.

Η στρατηγική θέση της πόλης στις δυτικές παρυφές της Αργολικής πεδιάδας διατήρησε το ενδιαφέρον των οικιστών της κατά την διάρκεια των αιώνων. Η οχυρή αυτή θέση ισχυροποιείται από τη παρουσία του χείμαρρου Χάραδρου (Ξεριάς) στα ΒΔ όπως επίσης και στα ΒΑ από τους λόφους της Λυκώνης με την ακρόπολη της Λάρισας (Σχήμα 2.1) στην κορυφή της και ο χαμηλότερος λόφος της Δειράδας (προφήτης Ηλίας ή Ασπίδα) (Παυσανίας ΙΙ 25, 4). Ο Χάραδρος με τις ξαφνικές του πλημμύρες αποτέλεσε καθοριστικό παράγοντα στην διαμόρφωση του ανάγλυφου της περιοχής. Οι πλημμυρικές αυτές παροχές από τις ισχυρές χειμερινές κατακρημνίσεις μεταφέρουν και μετέφεραν μεγάλο όγκο υλικών τα όποια και αποτέθηκαν στην περιοχή με αποτέλεσμα την καταστροφή των οχθών αλλά και την αναδιαμόρφωση της κοίτης του. Από τα αρχαιολογικά κατάλοιπα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι συνολικό ύψος των υδάτων μπορεί να φτάσει τα 4,5 μέτρα .Όλα

Σύμφωνα με τα παραπάνω το υπέδαφος της πόλης του Άργους αποτελείται από διαδοχικά προσχωσιγενή στρώματα διαφορετικών ιστορικών περιόδων, τα όποια αποτελούνται από κροκαλοπαγή που εναλλάσσονται με λεπτότερα στρώματα πηλού. Τα πρώτα μεγάλα κροκαλοπαγή αποτέθηκαν κατά την Πρωτοελλαδική περίοδο (Zagger 1993), όπως επαληθεύεται και από τις αρχαιολογικές ανασκαφές. Τα τελευταία βυζαντινά στρώματα τα οποία αποτελούνται από αργιλικά υλικά και βρίσκονται στο ανώτερο επίπεδο δείχνουν να έχουν σαφή διαφοροποίηση από τα κατώτερα κροκαλοπαγή, τα οποία καλύπτουν τα κλασικά και ρωμαϊκά ερείπια, τουλάχιστον στην περιοχή εντός των τειχών της πόλης

35
Η σύγχρονη πόλη κατέχει, στο μεγαλύτερο μέρος της, τη θέση της αρχαίας, κατάλοιπα από την οποία έφεραν στο φως οι ανασκαφές που έγιναν από τη Γαλλική Αρχαιολογική Σχολή, οι οποίες αποκάλυψαν τμήμα της αρχαίας αγοράς. Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 2.2, η αρχαιολογική σκαπάνη έχει φέρει στο φως ένα μεγάλο τμήμα της αρχαίας αγοράς στους νοτιοδυτικούς πρόποδες του λόφου Λυκώνη που είχε διαμορφωθεί τον 5° αι. π.Χ. και καταστράφηκε από τους Γότθους το 395 μ.Χ., καθώς και την οχύρωση και το αρχαίο θέατρο της πόλης στις νοτιοανατολικές πλαγιές της Λάρισας και δυτικά της αγοράς· το θέατρο πιστεύεται ότι χτίστηκε στο τέλος του 4^{ου} αι. π.Χ. ή στις αρχές του 3^{ου} αι. π.Χ., και όπως εκτιμάται ήταν ένα από τα μεγαλύτερα Ελληνικά θέατρα.

Τα όρια της αρχαίας αγοράς καθορίζονται από τους μεγάλους δρόμους που την περιέκλειαν και οδηγούσαν σε διαφορές γειτονικές πόλεις. Το δυτικό και νότιο άκρο της έχουν ανασκαφεί, στο μεν νότιο η στοά που δέσποζε στην αρχαία αγορά, στο δε δυτικό η υπόστυλη αίθουσα. Το βόρειο και ανατολικό τμήμα της αρχαία αγοράς καταλαμβανόταν από ένα σημαντικό ιερό του Άργους το ναό του Λυκείου Απόλλωνα ο όποιος δεν έχει μέχρι σήμερα ανακαλυφθεί (Piteros 1998). Η παρούσα διατριβή εστιάζει στον εν σπισμό των αρχαίων ερειπίων του ν αού του Λυκ έου Απόλλωνα.

Ο ναός του Λυκείου Απόλλωνα, που ήταν ο σημαντικότερος στο Αργός, αναζητήθηκε επίμονα από την αρχή των ανασκαφών, εδώ και 90 χρόνια περίπου. Γνωρίζουμε ότι βρισκόταν στην Αγορά, ότι το άγαλμα ήταν έργο του Αττάλου του Αθηναίου, γνωρίζουμε επίσης ποια άλλα αγάλματα βρίσκονταν στο εσωτερικό του, ποια μπροστά από αυτόν και ότι υπήρχαν πολλά άλλα αναθήματα. Ξέρουμε μάλιστα ότι κάποτε ο ναός, καθώς και ένα ξόανο του Απόλλωνα, είχαν αφιερωθεί από το Δαναό. Στο σχέδιο του ο W. Vollgraff είχε τοποθετήσει το ιερό στα ΒΔ της Αγοράς (J.P.Thalmann & M.Pierat). Στην πραγματικότητα, θα πρέπει να βρισκόταν μάλλον προς τη γωνία, εκεί ακριβώς όπου βρέθηκαν το 1952 τα λείψανα ενός βωμού με τρίγλυφα που προερχόταν από το ιερό. Οι περισσότερες επιγραφές που συνδέονται με το ιερό προέρχονται από αυτόν τον τομέα. Για το λόγο αυτό στο τοπογραφικό σχέδιο της Αγοράς του 1978 ο ναός μεταφέρθηκε υποθετικά στο κέντρο βόρειας της πλατείας. Το 1981, η τοποθέτηση αυτή επιβεβαιώθηκε από την αποκατάσταση, πάν ω στα μέλ η εν ός δωρικ ώ θριγ κ ώ (σε δεύτερη χρήση σ' αυτόν ακ ρβώς τον τομέα), ψηφισμάτων που έπρεπε να ήταν αναρτημένα μέσα στο ιερό του Απόλλωνα. Το 1985, ανατέθηκε στους ανασκαφείς της Γαλλικής Σχολής (Aupert 1987) να εντοπίσουν το ναό και συγκεκριμένα να ερευνήσουν συστηματικά τη βορειοδυτική γωνία της Αγοράς. Πράγματι, μια νέα ανάγνωση του κειμένου του Παυσανία θα μπορούσε να υποδείξει ότι ο περιηγητής δεν μιλάει ποτέ σαφώς για κάποιο άλλο ναό εκτός από αυτόν του Δαναού. Θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο ναός του Λυκείου Απόλλωνα δεν χρονολογείται υποχρεωτικά στην Κλασσική εποχή και συνεπώς δεν θα είχε τη δομή ενός κτιρίου αυτής της περιόδου. Για τη θέση του ναού δεν έχουμε πλέον πολλά περιθώρια επιλογής: μια πιθανή θέση θα ήταν το σταυροδρόμι των οδών Κορίν &υ, Θεάτρου και της νέας κρηπίδας.



Σχήμα 2.2: Σκαρίφημα της περιοχής της αρχαίας αγοράς και θεάτρου του αρχαίου Άργους κατασκευασμένο από τον W. Vollgraff.

Ο Cari Robert, στο βιβλίο του «*Pausanias als Schriftsteller*», Berlin (1909), παρατήρησε πως η περιγραφή του Άργους έγινε κατά το πρότυπο *Markttypus* (αγορας τύπος), δηλαδή πως ο Παυσανίας περιγράφει το Άργος ακτινωτά, αρχίζοντας σχεδόν πάντοτε από την Αγορά, πρότυπο που ακολουθεί και με την περιγραφή της, Σπαρτής, Τροιζήνας, Κορίνθου, Μεγαλόπολης και Μεσσήνης. Πρέπει όμως να ομολογήσουμε πως, λίγα μόνο λείψανα ταυτίζονται με βεβαιότητα με τα οικοδομήματα που αναφέρει ο Παυσανίας. Ευτυχώς, όμως, δεν υπάρχει αμφιβολία πως ο Παυσανίας ακολουθεί τους κυριότερους δρόμους της πόλης.

Αν γίνει δεκτός αυτός ο συλλογισμός, θα μπορούσαν να διευκρινισθούν οι κυριότεροι τουλάχιστον άξονες που ακολούθησε ο Παυσανίας στην περιγραφή του Άργους. Στις ανασκαφές των τελευταίων δεκαετιών, κυρίως στις σωστικές ανασκαφές που διενέργησε η Δ' Εφορεία Κλασσικών Αρχαιοτήτων, βρέθηκαν πολλά τμήματα δρόμων, καθώς και των τειχών της πόλης. Ο συνδυασμός όλων των ευρημάτων πρέπει να επιτρέψει την ανασύνθεση του οδικού δικτύου της πόλης και επομένως του οδοιπορικού του Παυσανία.

19, 3	Ιερό του Απόλλωνα	Ἀργείοις τῶν εν τῆ πόλει τό
		ἐπιφανέστατον ἐστίν Ἀπόλλωνος ἱερόν Λυκείου
	— λατρευτικό άγαλμα — θρόνος του Δαναού — αναπαράσταση του Βίτων	ένταύθα ἀνάκειται μέν
	— πΰρ Φορωνέως — ξόανα της Αφροδίτης και του Ερμή — άγαλμα του Λαδά — Ερμής και λύρα	έξης δέ τῆς εἰκόνος ταύτης [] τοῦ ναού δέ ἐστίν ἐντός. [] καί
19,7	Βαση μάχης ταύρου και λύκου — κολώνες και ξόανα Δια και Άρτεμης	ἐστί δέ ἕμπροσθεν τοῦ ναού καί πλησίον
19,8	Τάφος του Λίνου και της Ψαμαθείας Τάφος του ποιητή Λίνου Απόλλων Αργιεύς — Βωμός του Υέτιου Δία — Τάφος του Προμηθέα	τάφοι δέ εἰσίν, ὁ μεν […] [] τόν δέ ἐπί τούτοις [] [] καί [] δέ

Πινάκας 2.1: Στίχοι Παυσανία και μνημεία στα οποία αναφέρονται

Μπορούμε να περιγράψουμε 7 διαφορετικούς "περιπάτους" του Παυσανία :

- α. Γύρω από το ναό του Απόλλωνα και στην περιοχή της Αγοράς (ΙΙ19,3-20,6[?]),
- β. Από την Αγορά προς το Κριτήριο και το Θέατρο (ΙΙ20,6[?]-10),
- γ. Από το ναό της Αφροδίτης προς την Αγορά (II21,1-3),
- δ. Από την Αγορά και το μνημείο του Πύρρου προς την πύλη της Ειλειθυίας (ΙΙ 21,4-22,7),
- ε. Από την Αγορά προς το γυμνάσιο του Κυλάραβη (II22,8-9),
- ζ. Προς και από την Κοίλη (ΙΙ 23,1-3),
- η. Προς την ακρόπολη (II23,7[?]- 24,4).

Ο Piteros (1998) σημειώνει ότι για τον προσδιορισμό της θέσης του ιερού του Λυκείου Απόλλωνα αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση ο προσδιορισμός των ορίων της Αγοράς. Η δυτική πλευρά προφανώς ορίζεται από τον αρχαίο δρόμο, παράλληλο με την οδό Τριπόλεως, που οδηγεί προς τη Λέρνα (Σχήμα 2.3). Η βόρεια πλευρά ορίζεται από το δρόμο με κατεύθυνση Δ-Α που βρίσκεται λίγο βορειότερα από την οδό θεάτρου (Σχήμα 2.3, σημείο 28). Η ανατολική πλευρά της Αγοράς, η οποία δεν έχει συστηματικά ανασκαφεί, μπορεί να προσδιορισθεί κατά προσέγγιση από τους βασικούς δρόμους που οδηγούν προς τα ανατολικά και νοτιοανατολικά (Σχήμα 2.3, σημεία 9, 10, 11). Για τη νότια πλευρά θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

Τα σημαντικότερα μνημεία που έχουν αποκαλυφθεί μέχρι τώρα στην Αγορά είναι τα εξής: στη δυτική πλευρά η υπόστυλη Αίθουσα (Σχήμα 2.3, σημείο 17), στη νότια πλευρά η Νότια Στοά (Σχήμα 2.3, σημείο 18) και νοτιότερα από τη στοά, η παλαίστρα ενός από τα τρία γυμνάσια του Άργους (Σχήμα 2.3, σημείο 19) που κατασκευάστηκε πιθανότατα τον 1° π.Χ. αιώνα. Κατά μήκος της βόρειας πλευράς της στοάς αυτής έχει αποκαλυφθεί ο δρόμος ενός σταδίου της ίδιας εποχής με το γυμνάσιο (Σχήμα 2.3, σημείο 19), ο οποίος προφανώς χρησίμευε για την άσκηση των αθλητών. Νοτιότερα, στα ΝΔ της στοάς, έχουν αποκαλυφθεί τα θεμέλια σημαντικού ναϊκού (;) κτίσματος (Σχήμα 2.3, σημείο 20). Στα ΝΑ της στοάς και σε απόσταση 150m περίπου, έχει βρεθεί ο σημαντικότερος ναός μέχρι σήμερα στην περιοχή *της Αγοράς (Σχήμα 2.3, σημείο 21)*. Από τα παραπάνω είναι δυνατό να ποσδιορισθεί γενικά η νότια πλευρά της Αγοράς με έναν άξονα Α-Δ που διέρχεται από τη νότια πλευρά των δύο παραπάνω σημαντικών ναϊκών κτιρίων (Σχήμα 2.3, σημεία 20, *21)*. Η θεμελίωσή της, λόγω της φυσικής διαμόρφωσης του χώρου,

βρίσκεται ένα μέτρο περίπου ψηλότερα από τη θεμελίωση της νότιας στοάς. Από όλα τα παραπάνω διαπιστώνουμε τα εξής :



Σχήμα 2.3: Τοπογραφική απεικόνιση του αρχαίου Άργους από τον Piteros 1998.

- Η αρχαία Αγ φά του Αργ ώς δεν έχει τετράγ ων ο ή ορθογ ών ο σχήμα, αλ λ ά ακανόνιστο, προσαρμοσμένο προφανώς στους βασικούς δρόμους που καταλήγουν πέριξ της Αγοράς (Σχήμα 2.3).
- Το τμήμα της Αγοράς που έχει μέχρι τώρα συστηματικά ερευνηθεί δεν είναι το κεντρικό τμήμα, αλλά το βορειοδυτικό, η ανατολική πλευρά του οποίου προφανώς προσεγγίζει τον κεντρικό χώρο της Αγοράς.
- 3. Ο ναός του Λυκείου Απόλλωνα δεν βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα της Αγοράς, όπως έχει επανειλημμένα υποτεθεί. Άλλωστε, δεν έχει βρεθεί τίποτε in situ από το ν αό του Λυκ έου Απόλ λ ων α ούτε υπάρχει ικ αν άς χώρος για ν α υποστηριχθεί σοβαρά αυτή η υπόθεση. Ο ναός του Λυκείου Απόλλωνα δεν μπορεί να βρίσκεται ακόμα βορειότερα, δηλαδή εκτός Αγοράς.

Επιβάλλεται, λοιπόν, να επαναπροσδιορισθεί η θέση του σημαντικότερου ιερού της Αγοράς του Αργούς εντός της Αγοράς, με βασικό κριτήριο τις γραπτές πηγές και τα αρχαιολογικά δεδομένα. Ο σημαντικότερος ναός, που έχει μέχρι τώρα αποκαλυφθεί στην περιοχή της Αγοράς, βρίσκεται στα ΝΑ και σε απόσταση 140-150m NA του ανατολικού άκρου της νότιας στοάς (Σχήμα 2.3, σημείο 21). Είναι δωρικός ναός με εσωτερική κιονοστοιχία, διαστάσεις 32.65×18.45 m και είναι λίγο μικρότερος από τον κλασσικό ναό του Ηραίου του Άργους, με ΝΑ προσανατολισμό. Ο ναός, σύμφωνα με μαρτυρία του Παυσανία, ταυτίζεται με το ναό της Ήρας Ανθείας, ή της Δήμητρας (σύμφωνα με την Ευαγ. Πρωτονοταρίου-Δεϊλάκη), είτε με το ναό της Αθηνάς Σάλπιγγος (σύμφωνα με τον Pierart). Τέλος, κατά την άποψη του Α. Πιτερού, ο ναός αυτός ταυτίζεται με το ναό της Ήρας Ανθείας. Σε απόσταση 100m περίπου ΒΑ της νότιας στοάς έχει αποκαλυφθεί η μοναδική μέχρι τώρα γνωστή ημικυκλική εξέδρα στην αρχαία Αγορά, διαμέτρου 8m περίπου (Σχήμα 2.3, σημείο 23). Σε απόσταση 14.5m νοτιότερα της εξέδρας έχει αποκαλυφθεί τμήμα στυλοβάτη στοάς μήκους 15m περίπου με ΝΑ Διεύθυνση, παράλληλα προς την εξέδρα (Σχήμα 2.3, σημείο 24). Δέκα μέτρα περίπου αν ατολικάτερα της εξέδρας έχει βρεθεί το κατώτερο τμήμα ορθογωνίου βάθρου διαστάσεων 3.80×2.50 m που έχει τον ίδιο προσανατολισμό με την εξέδρα (Σχήμα 2.3, σημείο 25). Τα δύο αυτά μνημεία βρίσκονται τοποθετημένα κατά μήκος της βόρειας πλευράς της στοάς (Σχήμα 2.3, σημείο 24) και σε αρκετή απόσταση από αυτήν. Μεταξύ της στοάς και των βάθρων προφανώς διέρχεται η προέκταση του δρόμου (Σχήμα 2.3, σημείο 10) που οδηγεί από το Άργος προς Τίρυνθα-Ναυπλία.

Σε απόσταση 35m περίπου βόρεια από τον νοτιοανατολικό ναό της Αγοράς (Σχήμα 2.3, σημείο 21), και στη νότια πλευρά της στοάς που αναφέραμε (Σχήμα 2.3, σημείο 24), έχει βρεθεί το κατώτερο τμήμα ορθογωνίου βάθρου διαστάσεων 4.80×3.40 m (Σχήμα 2.3, σημείο 26). Από όλα τα παραπάνω διαπιστώνουμε τα εξής:

- Στα ΝΑ της Αγοράς υπάρχει μια συγκέντρωση πολύ σημαντικών μνημείων με τον ίδιο προσανατολισμό (ΝΑ), διαπίστωση που φανερώνει την ύπαρξη ενός αρχιτεκτονικά οργανωμένου συνόλου μνημείων.
- Στη βόρεια πλευρά υπάρχουν δύο βάθρα αγαλμάτων (Σχήμα 2.3, σημεία 23, 25), ενώ σε απόσταση 8-14m περίπου νότια υπάρχει προφανώς στοά (Σχήμα 2.3, σημείο 24), νοτιότερα άλλο βάθρο (Σχήμα 2.3, σημείο 26) και, τέλος, 35m

νοτιότερα ο ναός της Ήρας Αθεΐας(;) (Σχήμα 2.3, σημείο 21). Βλέπουμε λοιπόν ότι στο χώρο αυτό έχουν βρεθεί τα τρία σημαντικότερα βάθρα της Αγοράς και ο σημαντικότερος μέχρι τώρα ναός. Γίνεται φανερό ότι τα μνημεία αυτά αποτελούν τμήμα της αρχαίας Αγοράς (Σχήμα 2.3, σημεία 21, 23, 26).



Σχήμα 2.4: Υπέρθεση τοπογραφικών σκαριφημάτων της αγοράς του Άργους των Vollgraff (1958), Piteros (1998) και Thalmann (1978).

Έτσι, με την αντιπαραβολή των χαρτών από τις μέχρι στιγμής ερμηνείες για την θέση του ναού του Λυκείου Απόλλωνα βλέπουμε ότι η επικρατέστερη θέση είναι να βρίσκ εται στο χωράφι που εκ τείν εται στα δυτικ ά του αρχαιολογικού χώρου της αρχαίας Αγοράς. Με γνώμονα τα παραπάνω, αλλά και με την συμβολή των αρχαιολόγων της Δ' Ε.Π.Κ.Α., επιλέχθηκε η θέση 2 (ακριβής περιγραφή της θέσης αναφέρεται ακολούθως) για τη διεξαγωγή των μετρήσεων ως η πιο πιθανή για την ύπαρξη του ναού. Το οικόπεδο αμέσως δυτικότερα το ποιο φαίνεται από την ερμηνεία να είναι ακόμα πιο πιθανό να βρίσκεται ο ναός είναι ιδιωτική μάντρα απόθεσης παλαιών υλικών.



Σχήμα 2.5 Υπέρθεση τοπογραφικών σκαριφημάτων της αγοράς του Άργους των Vollgraff (1956) και Piteros (1998).

2.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΙΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΓΟΥΣ

Το Ι.Γ.Μ.Ε. στα πλαίσια του έργου του Γ' Κ.Π.Σ. «Συγκέντρωση, κωδικοποίηση και τεκμηρίωση θεματικών πληροφοριών αστικών και περαστικών περιοχών Ελλάδος - πιλοτικές εφαρμογές», (Υποέργο «Ολοκληρωμένη γεωλογική, τεχνικογεωλογική, υδρογεωλογική, γεωχημική και γεωφυσική έρευνα και μελέτη, αστικής και περαστικής πιλοτικής περιοχής Ναύπλιου, N. Αργολίδος»), πραγματοποίησε γεωφυσικές διασκοπήσεις μικρής κλίμακας στην περιοχή γύρω από την αρχαία αγορά του Άργους (Ζανανίρι & Ζερβάκου 2008, Ζανανίρι 2009). Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η μαγνητική και στόχος της μελέτης ήταν ο εντοπισμός αρχαιοτήτων στο υπέδαφος και η χαρτογράφηση τους. Στην εργασία υπαίθρου, καθώς και στην επεξεργασία των μετρήσεων συμμετείχε και ο γράφων.

Τα μαγνητικά δεδομένα των μελετών αυτών χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή, όπου και επανεπεξεργάστηκαν με τη χρήση διαφορετικού λογισμικού.



Σχήμα 2.6: Τοπογραφικό σκαρίφημα της πόλης του Άργους [τροποποιημένο από Piteros (1998b)]. 1– 3: Υποθετικές θέσεις δρόμων που οδηγούσαν ΑΝΑ, 4: Νότια στοά, 5: Θεμέλια κτίσματος πιθανώς μικρού ναού, 6: Ναός Ήρας Άνθειας, 7: Δυτικ ή πλ ευρά νότιας στοάς, 8–10: Ανεσκαμμένοι δρόμο, 11: Υποτιθέμενη θέση ναού λυκείου Απόλλωνα. Τα σημεία Α–C (θέση 1) και D–F (θέση 2) σηματοδοτούν την θέση των καννάβων των μαγνητικ ών μετρήσεων (μπλ ε τετράγ ωνα), ενώ με πράσινο σημειώνονται οι θέσεις των τομών G.P.R.

Οι θέσεις έρευνας, τόσο των μαγνητικών διασκοπήσεων που πραγματοποιήθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε:

- Σε οικόπεδο απαλλοτριωμένο από την Δ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, που βρίσκεται σε απόσταση 500m από την Αρχαία Αγορά (Σχήμα 2.6). Σε γειτονικό απαλλοτριωμένο οικόπεδο μετά από ανασκαφή βρέθηκαν οι δομές που φαίνονται στο Σχήμα 2.7, ενώ ανάλογες δομές αναμένεται να υπάρχουν θαμμένες σε βάθη 1-2m στην υπό μελέτη περιοχή.
- 2) Σε οικόπεδο απαλλοτριωμένο από την Δ' Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων, που βρίσκεται δίπλα στην Αρχαία Αγορά (Σχήμα 2.6). Η θέση αυτή μας υποδείχθηκε από τον Αναπληρωτή Προϊστάμενο της Δ' Ε.Π.Κ.Α. κ. Χρήστο

Πιτερό, σύμφωνα με τον οποίο αποτελεί πιθανή θέση Αρχαίου Ναού. Ο Ναός αναμένεται να είναι μεγάλων διαστάσεων και να έχει προσανατολισμό Α-Δ· αναμένεται επίσης ότι θα έχει διατηρηθεί κυρίως η βάση του, που πιστεύεται ότι είναι θαμμένη σε βάθος 2-3m.



Σχήμα 2.7: Αρχαιολογικές δομές που αποκαλύφθηκαν από τη Δ' Ε.Π.Κ.Α. σε απαλλοτριωμένο οικόπεδο κοντά στην Αρχαία Αγορά του Άργους.

Κατά την πραγματοποίηση της γεωμαγνητικής έρευνας από το Ι.Γ.Μ.Ε. χρησιμοποιήθηκαν δύο πρωτονικά μαγνητόμετρα τύπου SCINTREX και ένα πρωτονικό μαγνητόμετρο G-856 της GEOMETRICS που χρησίμευσε ως σταθμός βάσης για τη διόρθωση της ημερήσιας μεταβολής του γεωμαγνητικού πεδίου. Η περιοχή που επιλέχθηκε για την εκτέλεση των μαγνητικών μετρήσεων βρίσκεται μακριά από τα ηλεκτροφόρα σύρματα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη μετρούμενη μαγνητική επαγωγή.

Η θέση 1 διαιρέθηκε σε 3 υποκαννάβους, αναφερόμενοι στη συνέχεια ως κάνναβοι Α, Β και C, 20×20 m και 20×15 m αντίστοιχα. Στη θέση 2 πραγματοποιήθηκε λήψη μετρήσεων σε κάνναβο 30×30 m, διεύθυνσης B-N (D) και σε κάνναβο 30×10m, διεύθυνσης B-N (E). Οι θέσεις των κορυφών των καννάβων προσδιορίστηκαν με χωροστάθμηση από τοπογράφο, καθώς και με φορητή συσκευή GPS[.] οι συντεταγμένες τους στο σύστημα Ε.Γ.Σ.Α. 87 είναι:

ΘΕΣΗ	ΣΗΜΕΙΟ	ΚΑΝΝΑΒΟΣ	Χ (ΕΓΣΑ 87)	Υ (ΕΓΣΑ 87)	
1	1	А	387434.97	4165028.44	
	2	А	387454.30	4165033.80	
	3	A,B	387429.84	4165047.75	
	4	A,B	387449.42	4165053.19	
	5	В	387424.27	4165066.88	
	6	В	387443.35	4165072.08	
	1	С	387398.75	4165111.19	
	3	С	387385.48	4165118.46	
	4	С	387395.00	4165138.11	
	2	С	387408.05	4165131.13	
2	1	D	387175.24	4165246.23	
	3	D	387150.54	4165266.87	
	2	D	387190.25	4165266.33	
	4	D	387172.85	4165285.10	
	1	Е	385770.24	4161277.85	
	2	Е	385773.47	4161294.46	
	3	Е	385752.61	4161279.87	
	4 E		385752.89	4161300.29	

Με βάση το αναμενόμενο βάθος ταφής των αρχαιολογικών στόχων καθορίστηκε το βήμα δειγματοληψίας. Έτσι, η χωρική μεταβολή του συνολικού μαγνητικού πεδίου μετρήθηκε κατά μήκος οδεύσεων που απείχαν 1m η μία από την άλλη, με βήμα 1m. Εξαίρεση αποτελεί η θέση 2, όπου λόγω του γεγονότος ότι ο πιθανός στόχος αναμενόταν σε βάθος 2-3m οι μετρήσεις ελήφθησαν ανά 2m. Η έρευνα κάλυψε έκταση 2300m² και ελήφθησαν μετρήσεις σε συνολικά 1150 σημεία.

2.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ GPR ΣΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΑΓΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΓΟΥΣ

Όπως προαναφέρθηκε, με σκοπό να συμπληρωθεί η μελέτη που πραγματοποιήθηκε από το Ι.Γ.Μ.Ε. και να εξαχθούν ακόμη πιο αξιόπιστα συμπεράσματα για τις θαμμένες δομές, πραγματοποιήθηκαν στις ίδιες θέσεις έρευνας μετρήσεις γεωραντάρ (Ground Probing Radar - GPR). Οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις περιοχές (Σχήμα 2.6). Οι δυο από αυτές ήταν κοινές με τους μαγνητικούς καννάβους, ενώ στην τέταρτη περιοχή (κάνναβος Α-Β) δεν ήταν δυνατόν να διεξαχθούν μετρήσεις ραντάρ λόγω της απόθεσης υλικών κατεδαφίσεων από το δήμο Άργους στο διάστημα που μεσολάβησε από την διεξαγωγή των μαγνητικών μετρήσεων.



Σχήμα 2.8: Η συσκευή GSSI SIR-2000, που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη μετρήσεων GPR.

Κατά την πραγματοποίηση της έρευνας γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκε το μονοστατικό σύστημα GSSI SIR-2000¹ του Τομέα Γεωφυσικής – Γεωθερμίας του ΕΚΠΑ, εξοπλισμένο με κεραία 400 MHz (Εικόνα 2.8). Η κεραία αυτή επιλέχθηκε για την δυνατότητας της, ανάλογα πάντα και με τις συνθήκες, να καταγράφει σε βάθος 3

¹ Για λεπτομέρειες βλ. http://www.geophysical.com/Documentation/Manuals/SIR2000%20Manual_RevB.PDF

 - 5 μέτρων που την κάνει κατάλληλη για χρήση σε αρχαιολογικές έρευνες όπου οι στόχοι αναμένονται σε βάθη από 0,5 ως και 3.5 μέτρα.



Σχήμα 2.9: Οι μαγνητικοί κάνναβοι D και E και οι θέσεις των μετρήσεων GPR, στη θέση 2.



Σχήμα 2.10: Οι μαγνητικοί κάνναβοι Α, Β και C και οι θέσεις των μετρήσεων GPR, στη θέση 1.

Οι εργασίες υπαίθρου σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να ληφθούν τριδιάστατα δεδομένα, έγινε δηλ. κατά τον τύπο C-s ca. Η θέση 2 διαιρέθηκε σε 2 εκτάσεις διαστάσεων 50×21 m και 43×27m, οι οποίες αναπτύσσονται δεξιά και αριστερά της εισόδου του οικοπέδου, αντίστοιχα. Σε αυτές πραγματοποιηθήκαν διαμήκεις και εγκάρσιες σαρώσεις (B-scans) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, οι οποίες στο εξής θα αναφέρονται ως κάνναβος Εκαικάνναβος D, αντίστοιχα, και όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9 επικαλύπτουν τους μαγνητικούς κάνναβους D και E. Στη θέση 1 πραγματοποιήθηκε λήψη μετρήσεων σε 3 κάναβους (Σχήμα 2.10) με διαστάσεις 50×34 m (κάνναβος α), 50×18 m (κάνναβος c, που επικαλύπτει τον μαγνητικό κάνναβο c) και 50×4 m (κάνναβος b), αλλά εδώ πραγματοποιήθηκαν μόνο διαμήκεις ή εγκάρσιες σαρώσεις (B-scans). Μετρήθηκε επίσης μικρός αριθμός μεμονωμένων τομών σε χώρους όπου δεν ήταν δυνατόν να δημιουργηθεί κάνναβος (Σχήμα 2.10). Με βάση το αναμενόμενο βάθος ταφής και έκταση των αρχαιολογικών στόχων, καθορίστηκε ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών σαρώσεων (τομών) θα είναι 1m σε όλες τις περιπτώσεις. Συνολικά, η έρευνα κάλυψε έκταση 5000m² και έγιναν 225 σαρώσεις (τομές), με την μακρύτερη να έχει μήκος 90 m.

Σε όλες τις περιπτώσεις οι τομές σημάνθηκαν με κλασικά μέσα (πασσάλους στην αρχή και τέλος εκάστης) και η σάρωση έγινε βουστροφηδόν, προκειμένου να εξοικονομηθεί χρόνος. Τα δεδομένα ελήφθησαν με ανάλυση 16-bit (την μέγιστη επιτρεπτή για το SIR-2000). Το σύστημα SIR-2000 έχει δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης της ενίσχυσης του σήματος, ανάλογα με τις συνθήκες μέτρησης, πλεονέκτημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Αντιθέτως, το όργανο που διαθέτει ο Τομέας Γεωφυσικής – Γεωθερμίας δεν είναι εφοδιασμένο με οδόμετρο αυτόματης μέτρησης αποστάσεων (survey wheel), οπότε η σάρωση έγινε αναγκαστικά με το σύστημα ρυθμισμένο να μετρά με σταθερό ρυθμό μετρήσεων ανά μονάδα χρόνου, ο οποίος ήταν 32 ίχνη (traces) 16-bit δεδομένων το δευτερόλεπτο σε όλες τις περιπτώσεις. Η διαδικασία μετατροπής (μετασχηματισμού) της δειγματοληψίας από ίσα χρονικά διαστήματα σε ίσες αποστάσεις κατά μήκος της γραμμής σάρωσης περιγράφεται στο Κεφ. 4.1 και χρησιμοποιεί την δυνατότητα που προσφέρει το SIR-2000, να σημειώνει (mark) συγκεκριμένα ίχνη σε αναφορά με χαρακτηριστικά σημεία κατά μήκος της σάρωσης (marker traces). Έτσι, εκάστη γραμμή σάρωσης σημάνθηκε με μετροταινία απλωμένη μεταξύ των δύο άκρων της

και κατά την διάρκεια της σάρωσης, τα ίχνη που αντιστοιχούσαν σε ίσες αποστάσεις του ενός μέτρου σημειώνονταν κατάλληλα (βλ. Κεφ. 4.1).

Οι θέσεις των κορυφών των καννάβων προσδιορίστηκαν με φορητή συσκευή GPS· οι συντεταγμένες τους στο σύστημα Ε.Γ.Σ.Α. 87 είναι:

ΘΕΣΗ	ΣΗΜΕΙΟ	ΚΑΝΝΑΒΟΣ	Χ (ΕΓΣΑ 87)	Υ (ΕΓΣΑ 87)	
1	1	А	387345.85	4165087.79	
	2	А	387316.06	4165102.93	
	3	А,	387340.03	4165147.26	
	4	А	387369.59	4165132.52	
	1	В	387404,98	4165106,27	
	2	В	387407.26	4165104.39	
	3	В	387474.95	4165066.71	
	4	В	387477.53	4165064.46	
	1	С	387366.00	4165131.88	
	3	С	387376.57	4165146.27	
	4	С	387419.31	4165120.33	
	2	С	387408.66	4165106.10	
2	1	D	387147.37	4165315.86	
	3	D	387129.16	4165290.49	
	2	D	387175.54	4165295.26	
	4	D	387156.00	4165270.76	
	1	E	387156.00	4165270.76	
	2	Е	387199.51	4165238.79	
	3	Е	387214.269	4165260.07	
	4	Е	387176.086	4165294.96	

Οι εργασίες υπαίθρου έλαβαν χώρα μεταξύ 4/9/2009 και 5/10/2009 με συμμετοχή του γράφοντα, των γεωλόγων κ.κ. Ελευθερίας Δροσόπουλου, Ειρήνης Κωστάκη και Αγγελικής Ευσταθίου, της Δρ. Ειρήνης Ζανανίρι (Διεύθυνση Γενικής Γεωλογίας και Γεωλογικών Χαρτογραφήσεων, στο Ι.Γ.Μ.Ε.) και του Δρ. Ανδρέα Τζάνη (Επίκουρου Καθηγητή του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, στο Ε.Κ.Π.Α.).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1.1 Διάκριση τοπικού και περιφερειακού πεδίου

Πρώτος στόχος κάθε μαγνητικής διασκόπησης είναι η κατασκευή του χάρτη της μαγνητικής ανωμαλίας για την περιοχή που ερευνάται. Ο χάρτης αυτός, εκτός από τις ανωμαλίες που δημιουργούνται από τις δομές που μας ενδιαφέρουν, περιέχει και άλλες που οφείλονται σε πηγές που βρίσκονται βαθύτερα ή ρηχότερα. Οι ανωμαλίες αυτές επικάθονται σε εκείνες που μας ενδιαφέρουν και κατά συνέπεια, ο μαγνητικός χάρτης δείχνει το συνολικό αποτέλεσμα. Για να μπορέσουμε, όμως να βγάλουμε ασφαλή ποσοτικά συμπεράσματα για τις δομές-στόχους της έρευνας μας πρέπει να έχουμε την ανωμαλία που αυτές προκαλούν σε καθαρή μορφή, δηλαδή όχι σαν συνιστώσα κάποιας άλλης ανωμαλίας.

Ορίζουμε, λοιπόν την ανωμαλία που προκαλούν οι συγκεκριμένες δομέςστόχοι ως *τοπικό πεδίο* και οποιοδήποτε άλλο πεδίο, το οποίο οφείλεται σε δομές που βρίσκονται βαθύτερα ή είναι μεγαλύτερες ως *περιφερειακό πεδίο*. Τα πεδία αυτά συνυπάρχουν και αντιπροσωπεύονται από κάποια ποσοστά στις τιμές της μαγνητικής ανωμαλίας που έχουμε μετρήσει σε κάθε σταθμό μέτρησης. Εμφανίζονται όμως με διαφορετικό τρόπο και έτσι μπορούμε να τα διακρίνουμε και να τα απομονώσουμε.

Είναι φανερό, ότι οι ένναες του τοπικού και του περιφερειακού πεδίου είναι σχετικές και εξαρτών ται από τον στόχο της συγ κκεριμέν ης έρευνας. Αυτό που θεωρείται περιφερειακό πεδίο σε κάποια έρευνα μπορεί να αποτελεί το τοπικό, δηλαδή το στόχο μιας άλλης έρευνας. Ο διαχωρισμός αυτών των πεδίων γίνεται τόσο με γραφικές όσο και με αναλυτικές μεθόδους. Οι περισσότερο εύχρηστες αναλυτικές μέθοδοι είναι:

 Ο υπολογισμός των παραγώγων και συγκεκριμένα της πρώτης οριζόντιας παράγωγου του πεδίου. Η πρώτη οριζόντια παράγωγος μπορεί εύκολα να υπολογιστεί στο πεδίο χώρου, είναι προσανατολισμένη καθώς εξαρτάται από την φορά υπολογισμού της και η κλίση του μαγνητικού σώματος που παράγει την

51

ανωμαλία έχει μεγάλη επίδραση πάνω της (Louis 2004). Ο υπολογισμός της πρώτης και δεύτερης παραγωγού μπορεί να ορίσει τα όρια μιας θαμμένης δομής.

- Η πολυωνυμική προσαρμογή. Οι πολυωνυμικές επιφάνειες είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο, προκειμένου να προσομοιωθεί το περιφερειακό γήινο μαγνητικό πεδίο πάνω από μικρή περιοχή της επιφάνεια της Γης. Χρησιμοποιείται, επίσης, και για την εξομάλυνση των μαγνητικών δεδομένων (Haines, G. V 1990).
- Το φιλτράρισμα συχνότητας (Frequency filtering). Τα φίλτρα κυματαριθμού (ανωπερατά και κατωπερατά) εφαρμόζονται στα μαγνητικά δεδομένα για να περιορίσουν επιρροές από εξωτερικές κ φίως πήγ ς που διαταράσσουν το φασματικό περιεχόμενο των δεδομένων. Ένα ανωπερατό φίλτρο αφήνει να περάσουν μικροί κυματαριθμοί και απορρίπτει σήματα με κυματαριθμούς μεγαλύτερους από τον κυματαριθμό αποκοπής. Το πραγματικό ποσό της απόσβεσης για κάθε κυματάριθμο ποικίλλει από το φίλτρο σε φίλτρο. Ένα κατωπερατό φίλτρο λειτουργεί αντιστρόφως, ενώ υπάρχουν και ζωνοπερατά φίλτρα που αποτελούν συνδυασμό ενός ανωπερατού και ενός κατωπερατού φίλτρων.
- Η άν ωσε ή κάτωσε συνέχιση του μαγνητικού πεδίου (Upward/ Downward Continuation) χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τις τιμές του μαγνητικού πεδίου σε χαμηλότερο η υψηλότερο υψόμετρο με προβολή προς τα πάνω ή κάτω, υποθέτοντας συνεχεία του πεδίου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για τη συγ χών ευση μετρήσεων που έχουν γ ίνει σε διαφορετικ ά υψόμετρα σε έν α κοινό επίπεδο αναφοράς, ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση. Η διαδικασία αυτή συνήθως βασίζεται στον δισδιάστατο μετασχηματισμό Fourier (Boschetti et al. 2001).

Όλες σχεδόν οι μέθοδοι διαχωρισμού τοπικού-περιφερειακού πεδίου που προαναφέρθησαν αφορούν την επεξεργασία των μαγνητικών παρατηρήσεων στο πεδίο χώρου (Mesko 1965,1966, Fuller 1967, Zurflueh 1967, Darby and Davies 1967 Gupta and Ramani, 1980; Pawlowski and Hansen, 1990; Pawlowski, 1994). Μετά την αφαίρεση του περιφερειακού πεδίου από τα δεδομένα εφαρμόζονται κατάλληλοι μετασχηματισμοί μέσω των οποίων διευκολύνεται η ερμηνεία. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι η διόρθωση για την ημερήσια μεταβολή του μαγνητικού πεδίου και οι υψομετρικές και τοπογραφικές διορθώσεις όπως περιγράφηκαν και στο Κεφάλαιο 1.2.1. Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιηθήκαν η αναγωγή στον βόρειο μαγνητικό πόλο και ο υπολογισμός της κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου όπως αναφέρονται ακόλουθα.

3.1.2 Αναγωγή στον βόρειο μαγνητικό πόλο

Στη μαθηματική ορολογία, φιλτράρισμα ονομάζεται η συνέλιξη των δεδομένων με μια σειρά συντελεστών (Peter 1949, Elkins 1951, Oldham 1967). Μετά την εισαγωγή του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform⁻ Cooley and Tukey, 1965), τα φίλτρα εφαρμόζονται ευκολότερα στο χώρο των κυματαρίθμων. Ο μετασχηματισμός Fourier των δεδομένων g(x, y) δίνεται από τη σχέση:

$$G(k_x,k_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x,y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy$$

όπου k_x,k_y είναι οι κυματάριθμοι στις διευθύνσεις x, y.

Το φιλτράρισμα σε δύο διαστάσεις μπορεί να περιγραφεί ως η συν έλιξη δύο συναρτήσεων, της συνάρτησης των δεδομένων g(x, y) και του φίλτρου h(x, y).

$$f(x, y) = h(x, y) * g(x, y)$$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα της συνέλιξης (Bracewell 1965, Hsu 1970) έχουμε:

$$F(k_x,k_y) = H(k_x,k_y) \cdot G(k_x,k_y)$$

όπου η συνάρτηση $H(k_x,k_y)$ είναι η μετασχηματισμένη Fourier του φίλτρου στο πεδίο κυματαριθμών, $G(k_x,k_y)$ είναι η μετασχηματισμένη Fourier των δεδομένων g(x,y)και $F(k_x,k_y)$ είναι η MF των φιλτραρισμένων τιμών. Στην συνέχεια, εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier στην $F(k_x,k_y)$ παίρνουμε την έκφραση των φιλτραρισμένων δεδομένων στο πεδίο χώρου σύμφωνα με την σχέση:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$$

Οι ανωμαλίες του ολικού μαγνητικού πεδίου εμφανίζονται πολύπλοκες και εκτός από την κατανομή της μαγνήτισης *m* (*x*,*y*,*z*) εξαρτώνται από τη διεύθυνση της

μαγνήτισης, καθώς και από τη διεύθυνση του κανονικού μαγνητικού πεδίου της Γης στο συγκεκριμένο τόπο μέτρησης. Σε μέσα γεωγραφικά πλάτη (βόρεια και νότια) οι ανωμαλίες εμφανίζουν τόσο θετικό όσο και αρνητικό λοβό. Αν η δομή βρίσκεται στον μαγνητικό πόλο, προκαλεί ανωμαλία απλούστερη από αυτή που θα προκαλούσε σε άλλο γεωγραφικό πλάτος. Στην περίπτωση του βόρειου πόλου η ανωμαλία είναι θετική και παρουσιάζει μέγιστο ακριβώς επάνω από το κεντροειδές του σώματος που την προκαλεί (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Πριν την αναγωγή στον πόλο η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου έχει κάποια έγκλιση (α), ενώ στον πόλο η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι κατακόρυφη (β) (Blakely 1995).

Η αναγωγή, λοιπόν στο μαγνητικό πόλο των μαγνητικών ανωμαλιών που παρατηρούμε σε διάφορα πλάτη διευκολύνει φανερά την προσπάθεια ερμηνείας. Ο Blakeley (1995) έδειξε ότι ο μετασχηματισμός Fourier της ανωμαλίας που προκαλεί μία οριζόντια ζώνη του θαμμένου σώματος είναι:

$$F[\Delta T] = 2\pi C_m \Theta_m \Theta_f |k| e^{|k|z_0} \int_{z_0}^{\infty} e^{-|k|z'} F[M(z')] dz'$$

$$\Theta_m = \hat{m}_z + i \frac{\hat{m}_x k_x + \hat{m}_y}{|k|}$$

$$\Theta_f = \hat{f}_z + i \frac{\hat{f}_x k_x + \hat{f}_y k_y}{|k|}$$
(3.1.1)

όπου z' το βάθος στο οποίο βρίσκεται η ζώνη αυτή, C_m είναι σταθερά που εξαρτάται από το σύστημα μονάδων, \hat{m} και \hat{f} είναι τα μοναδιαία διανύσματα στη διεύθυνση της

μαγνήτισης του Γήινου πεδίου αντίστοιχα $(\hat{m} = (\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z), \hat{f}(\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{f}_z))$ και το σύμβολο *F* δηλώνει την μετασχηματισμένη Fourier.

Η παραπάνω σχέση, για διαφορετικές διευθύνσεις μαγνήτισης και εξωτερικού πεδίου έστω *m̂*' και *f̂*' αντίστοιχα, θα γίνει:

$$F[\Delta T_{t}] = 2\pi C_{m} \Theta_{m}' \Theta_{f}' |k| e^{|k|z_{0}} \int_{z_{0}}^{\infty} e^{-|k|z'} F[M(z')] dz', \qquad (3.1.2)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (3.1.1) και (3.1.2) παίρνουμε

$$F\left[\Delta \mathbf{T}_{t}\right] = \frac{\Theta_{m}^{\prime} \Theta_{f}^{\prime}}{\Theta_{m} \Theta_{f}} \cdot F\left[\Delta \mathbf{T}\right]$$

Από την τελευταία σχέση παίρνουμε το πεδίο έτσι όπως θα το μετρούσαμε στο βόρειο μαγνητικό πόλο, αν απαιτούσαμε τα \hat{m}' και \hat{f}' να έχουν διεύθυνση κατακόρυφη και φορά προς το εσωτερικό της Γης. Το ανηγμένο στον πόλο πεδίο θα είναι:

$$F[\Delta T_r] = \frac{1}{\Theta_m \Theta_f} F[\Delta T] = \frac{|k|}{\alpha_1 k_x^2 + \alpha_2 k_y^2 + \alpha_3 k_x k_y + i|k| (b_1 k_x + b_2 k_y)}, \quad |k| \neq 0$$
(3.1.3)

όπου

$$\alpha_{1} = \hat{m}_{z}\hat{f}_{z} - \hat{m}_{x}\hat{f}_{x}, \qquad \alpha_{2} = \hat{m}_{z}\hat{f}_{z} - \hat{m}_{y}\hat{f}_{y} \qquad \alpha_{3} = -\hat{m}_{y}\hat{f}_{x} - \hat{m}_{x}\hat{f}_{y}$$
$$b_{1} = \hat{m}_{x}\hat{f}_{z} - \hat{m}_{x}\hat{f}_{x} \qquad b_{2} = -\hat{m}_{y}\hat{f}_{z} - \hat{m}_{x}\hat{f}_{y}$$

Η σχέση (3.1.3) είναι στην πραγματικότητα μία πράξη φιλτραρίσματος των δεδομένων. Η παλμική απόκριση (impulse response) του φίλτρου αυτού δίνεται από το κλάσμα στο δεξιό μέρος της σχέσης (3.1.3). Αποδεικνύεται όμως (Silva 1986) ότι η πράξη που περιγράφει η εξίσωση αυτή καθίστανται ασταθής κοντά στον μαγνητικό ισημερινό και δημιουργεί «μαθηματικές παρενέργειες», ιδίως στα μικρά μήκη κύματος. Οι Hansen και Pawlowiski (1989) πρότειναν μία μέθοδο για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, το οποίο όμως δεν συναντάται στον Ελλαδικό χώρο.

3.1.3 Υπολογισμός της κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανίχνευσης της κατακόρυφης βαθμίδας, με ιδιαίτερη εφαρμογή στα μαγνητικά και αερομαγνητικά δεδομένα. Αυτές περιλαμβάνουν τη μέθοδο της οριζόντιας βαθμίδας, την εφαρμογή φιλτραρίσματος βαθμίδας, προσανατολισμένης οριζόντιας βαθμίδας TOU μετασχηματισμού ψευδοβαρύτητας (Blakely και Simpson, 1986), συνολικής βαθμίδας (π.χ. Phillips, 1998) και τέλος φιλτράρισμα τοπικού κυματαριθμού (π.χ. Thurston και Smith, 1997). Αυτές οι μέθοδοι έχουν δημιουργηθεί και εφαρμοστεί στον εντοπισμό ασυνεχειών και των ορίων μεταξύ μαγνητικών - μη μαγνητικών σχηματισμών με το να καθορίζουν τις κατευθύνσεις της μέγιστης κλίσης των παραγώγων πρώτων τάξης, ή τον γραμμικό συνδυασμό παραγώγων πρώτης και δεύτερης τάξης (τοπικός κυματάριθμος).

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούμε το τριδιάστατο αναλυτικό σήμα. Ο Nabighian (1984), μέσω του γενικευμένου μετασχηματισμού Hilbert, έδειξε ότι οι κατακόρυφες και οριζόντιες παράγωγοι του δυναμικού πεδίου συνδέονται ως εξής:

$$F\left\{\frac{\partial M}{\partial z}\right\} = -\frac{ik_x}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \cdot F\left\{\frac{\partial M}{\partial x}\right\} - \frac{ik_y}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}} \cdot F\left\{\frac{\partial M}{\partial y}\right\}$$

όπου *F* υποδηλώνει τη μετασχηματισμένη Fourier και *M* αντιπροσωπεύει το μετρούμενο μαγνητικό πεδίο έτσι η συνολική βαθμίδας είναι:

$$G = \frac{\partial M}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial M}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial M}{\partial z} \mathbf{k} \; .$$

Οπού το πλάτος της ολικής βαθμίδας είναι:

$$A = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2}$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η εφαρμογή ανάλυσης της κατακόρυφης βαθμίδας δεν επηρεάζεται από μεμονωμένες μαγνητικές επαφές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης τοπικών αλλαγών στο μαγνητικό πεδίο (π.χ. Roest et al, 1992). Επειδή αυτή *0M*

η μέθοδος απαιτεί τον υπολογισμό της κατακόρυφης συνιστώσας ∂z με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Fourier, μπορεί να είναι κάπως πιο ευαίσθητη στο θόρυβο από την μέθοδο Blakely και Simpson (1986). Ωστόσο, δεν υπόκειται στις ίδιες υποθέσεις και δεν οδηγεί σε μετατοπισμένες επαφές. Για τους λογούς λοιπόν που προαναφερθήκαν χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ολικής βαθμίδας. Οι υπολογισμοί

έγιναν με ειδικό αδημοσίευτο λογισμικό που έχει γράψει ο Δρ. Ανδρέας Τζάνης και παρεχώρησε προς χρήση για τους σκοπούς της παρούσας.

3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΡΓΟΥΣ

Οι λήψη των μαγνητικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε με το μαγνητόμετρο Geometrics G-856, με την διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.1. Σε κάθε σημείο ελήφθησαν τρεις μετρήσεις, προκειμένου να διασφαλισθεί η ακρίβεια των δεδομένων, με την κεφαλή του μαγνητομέτρου τοποθετημένη σε ύψος 1,5 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και ένα μαγνητόμετρο Geometrics G-856 ως σταθμός βάσης για τον καθορισμό της ημερησίας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, ρυθμισμένο να μετρά αυτόματα ανά 2 λεπτά.





Σχήμα 3.2: Γράφημα της τοπικής μεταβολής του μαγνητικού πεδίου μετρούμενη από τον σταθμό βάσης την 15/03/2007. Η μαύρη ομαλή γραμμή προέκυψε από πολυωνυμική προσαρμογή (5^{ου} βαθμού) στις τιμές του ολικού μαγνητικού πεδίου, ενώ στο πάνω μέρος του γραφήματος δίνεται και η σχετική εξίσωση.

Οι τοπικές μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που μετρηθήκαν στον σταθμό βάσης έχουν μορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Οι χαμηλόσυχνες μεταβολές του μαγνητικού πεδίου προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές

πολυωνυμικής παρεμβολής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, και το προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκε για την αφαίρεσή τους από τα δεδομένα.

Κατόπιν αφαιρέθηκαν οι σημειακές ακραίες τιμές (spikes) που παρατηρήθηκαν, και οφείλονται στην ύπαρξη μεταλλικών αντικειμένων καθώς και σε άλλες πήγες μαγνητικού θορύβου, και στη θέση τους τοποθετήθηκε ο μέσος όρος των γειτονικών τιμών.

Η ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Απεικόνιση με τη χρήση ισομεγέθων καμπύλων των αρχικών δεδομένων (Raw magnetic data contouring), όπου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Kriging.
- Αφαίρεση της ημερήσιας μεταβολής και των σημειακών ακραίων τιμών.
- Αναγωγή στον βόρειο μαγνητικό πόλο με χρήση του προγράμματος Magpick.
- Υπολογισμός της κατακόρυφης βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου.

Οι ανηγμένες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου χαρτογραφήθηκαν στις θέσεις των καννάβων και έτσι κατασκευάστηκαν χάρτες ισομαγνητικών καμπύλων που αποτελούν και τα βασικά δεδομένα για την ποιοτική ερμηνεία που επιχειρήθηκε κατωτέρω. Στο Σχήμα 3.3, όπου χρησιμοποιούμε τον κάνναβο B ως παράδειγμα για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι οι ανωμαλίες παρουσιάζουν μια γεωμετρική διάταξη στο χώρο. Συγκεκριμένα παρατηρούμε επιμήκεις και εγκάρσιες μεταξύ τους δομές (μαύρες γραμμές σχήμα Γ). Η ορθογώνια μορφή διαστάσεων 3x5 m και ο προσανατολισμός της, ομοιάζει με αυτή των οικιών που ανακαλύφθηκαν σε διπλανό οικόπεδο, όπως φαίν **α** αι στην Εικόνα 2.7. Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι δομές που παρατηρούμε αντιστοιχούν σε θαμμένα θεμέλια και τοιχοποιίες κτηρίων.



Σχήμα 3.3: Δεδομένα μαγνητικών μετρήσεων του καννάβου Β: (Α) μαγνητική ανωμαλία, αφού αφαιρέθηκε η ημερήσια μεταβολή, (Β) μετά από αναγωγή στον Βόρειο Πόλο, (Γ) η κατακόρυφη βαθμίδα των μαγνητικών ανωμαλιών, (Δ) τρισδιάστατη απεικόνιση του χάρτη Γ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ GPR

Η μέθοδος επεξεργασίας των δεδομένων GPR είν α έν α ευρύ θέμα κ α η πλήρης ανάπτυξη του θα εξαιρετικά δύσκολη, καθώς οι ακολουθητέες μέθοδοι και διαδικασίες διαφέρουν ανάλογα με τα δεδομένα προς επεξεργασία, το καθεστώς θορύβου και τους στόχους. Συνεπώς, θα εστιάσουμε στο να παρουσιαστούν τα βήματα που να ακολουθήσαμε, ούτως ώστε η όλη διαδικασία να είναι αποδοτική σε ορθά αποτελέσματα.

4.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης, έγινε με τη χρήση του προγράμματος matGPR revision 2.2.4.3 (Tzanis, 2010a). Το εν λόγω λογισμικό διατίθεται δωρεάν από την ηλεκτρονική διεύθυνση http://users.uoa.gr/~atzanis/matgpr/ και βασίζεται στην υπολογιστική μηχανή και γλώσσα προγραμματισμού MATLAB™. Πρόκειται για ένα λογισμικό που αποτελείται από δύο επίπεδα: Το ανώτερο επίπεδο είναι ένα σπονδυλωτό πρόγραμμα που οργανώνει το κατώτερο επίπεδο λειτουργιών και αυτοματοποιεί τη διαχείριση των δεδομένων και τη ροή της εργασίας μέσω γραφικών διεπαφών (Graphical User Interfaces – GUI). Το κατώτερο επίπεδο αποτελείται από μια σειρά από αυτόνομες και αυτο-τεκμηριωμένες λειτουργίες για το χειρισμό, την απεικόνιση και την επεξεργασία των δεδομένων.

Η σχεδιαστική φιλοσοφία είναι απλή: οι ροές εργασίας κινούνται σε ένα συνεχή κύκλο μεταξύ των «δεδομένων εισόδου», δηλαδή των δεδομένων πριν από κάποια επεξεργασία (βήμα) και των «δεδομένων εξόδου» που αποτελούν τα στοιχεία που προκύπτουν από αυτή τη λειτουργία. Ο/Η χρήστης εισάγει τα δεδομένα εισόδου. Στη συνέχεια αποφασίζει και εφαρμόζει ένα στάδιο της επεξεργασίας και αξιολογεί το αποτέλεσμα. Αν ικανοποιηθεί, θα «κρατήσει» το αποτέλεσμα που αντικαθιστά τα δεδομένα εισόδου με τα δεδομένα της παραγωγής και θα ξεκινήσει νέο κύκλο μέσα από την ίδια διαδικασία με ένα νέο στάδιο επεξεργασίας. Αν όχι, θα

βήμα επεξεργασίας. Τόσο το ανώτερο κατώτερο επίπεδο μπορεί να επεκταθεί από το χρήστη.

Η εισαγωγή των δεδομένων μπορεί να γίνει σε δεδομένα διαφορετικών μορφότυπων, DZT (GSSI), RD3 (Mala Geophysics) και SU, SEG-Y αναθεωρήσεων 0.0 και 1.0 και ZOND. Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται στη δυαδική μορφή (αρχεία MAT) για την ταχύτερη και ευκολότερη μετέπειτα πρόσβαση σε αυτά. τα δεδομένα μπορούν επίσης να εξαχθούν σε DZT, SU και SEG-Y αρχεία. Είναι επίσης δυνατό να σχεδιαστούν και να εξεταστούν λεπτομερώς μεμονωμένα ίχνη και φάσματα ιχνών σε επιμέρους παράθυρα

Βασικά στοιχεία για την επεξεργασία των δεδομένων περιλαμβάνουν: γραφικό προσδιορισμό και ρύθμιση του χρόνου-μηδέν, δυνατότητες επεξεργασίας μεμονωμένων ιχνών, την απομάκρυνση του συνολικού μέσου όρου (background trace), dewowing, Automatic Gain Control (AGC). Πρόσθετες λειτουργιές περιλαμβάνουν την αλλαγή ρυθμού δειγματοληψίας (αύξηση ή μείωση) στον χρόνο και στο χώρο. Για τα όργανα που δεν είναι εξοπλισμένα με οδόμετρα εφαρμόζεται μετασχηματισμός δεδομένων που συλλέγονται σε ίσους χρόνους σε δεδομένα ίσων αποστάσεων.. Αυτή η ομάδα προγραμμάτων διευκολύνει επίσης το τριδιάστατο προσδιορισμό των θέσεων των ιχνών, σε σχέση με κάποιο τοπικό σύστημα αναφοράς.

Βοηθητικά προγράμματα φιλτραρίσματος και εξομάλυνσης περιλαμβάνουν χωρικό μέσο και διάμεσο φιλτράρισμα σε μία και δύο διαστάσεις, την αφαίρεση ενός κινούμενου παράθυρου μέσων όρων ιχνών για την ενίσχυση των μη οριζόντιων ανακλάσεων ή την απομάκρυνση των ιχνών του κινούμενου-παράθυρου για την ενίσχυση υπο-οριζόντιων ανακλάσεων. Είναι διαθέσιμη χωρική καταστολή του θορύβου χρησιμοποιώντας μια μορφή αποσύνθεσης Karhunen-Loeve. Το λογισμικό παρέχει, επίσης, φιλτράρισμα συχνότητας με φίλτρα FIR μηδενικής φάσης. Όλοι οι τύποι φίλτρων είναι διαθέσιμοι (ανωπερατά, κατωπερατά και ζωνοπερατά). Αυτή η ομάδα λειτουργιών συμπληρώνεται με ένα διαδραστικό FK φίλτρο, που διευκολύνει την εφαρμογής φίλτρων συχνότητας - κυματαριθμού). Ένα πρόγραμμα για να εκτελέστει προγνωστική αντισυνέλιξη είναι επίσης διαθέσιμο.

Το matGPR προσφέρει επίσης μια σειρά εργαλείων απεικόνισης και προσομοίωσης για να βοηθήσει την ερμηνεία. Αυτά περιλαμβάνουν ανάλυση ταχύτητας με την διαδραστική σχεδίαση υπερβολών περίθλασης. Προηγμένα εργαλεία μονοδιάστατης ερμηνείας περιλαμβάνουν στατικές διορθώσεις, χωροθέτηση συχνότητας - κυματαριθμού για πολυεπίπεδες δομές ταχυτήτων, χωροθέτηση phase-shifting για πολυεπίπεδες δομές ταχύτητας και χωροθέτηση βάθους (απεικόνιση του χρόνου σε βάθος). Τα διδιάστατα εργαλεία προσομοίωσης περιλαμβάνουν έναν σχεδιαστή και κατασκευαστή μοντέλων ταχυτήτων, ο οποίος είναι γραφικός και διευκολύνει την εύκολη και γρήγορη δημιουργία και επεξεργασία των μοντέλων και των ιδιοτήτων του (εισαγωγή, μετακίνηση ή κατάργηση κορυφών καθώς και την αλλαγή ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων) που αποτελούνται από πολλά αντικείμενα πολυγωνικής ή κυκλικής διατομής. Τέλος, προσφέρει μιας σειρά από λειτουργίες για τη δημιουργία, το χειρισμό και την απεικόνιση τριδιάστατων όγκων δεδομένων GPR. Κάποια τμήματα του προγράμματος ανασχεδιάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας από τον Δρ. Ανδρέα Τζάνη και τα αποτελέσματα των νέων 3d μεθόδων απεικόνισης παρουσιάζονται στο Κεφαλαίο 4.3

Εκτελώντας το πρόγραμμα matGPR, αναδύεται ένα παράθυρο (Σχήμα 4.1) που προσφέρει το φάσμα λειτουργιών και μεθόδων ανάλυσης/επεξεργασίας, μέσω των επτά λιστών επιλογής που εμφανίζονται στη γραμμή εργαλείων.

🚺 ma	tGPR F	Revision 2.2.4									
Data	View	Basic Handling	Filtering	Imaging	Modelling	3-D View	Windows	About			Ľ
	Welcome to MATGPR R2										
						Data	Info				
Copyright (C) 2005, 2008, 2010 Andreas Tzanis											
	This program is free software; you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or any later version.										
	This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License for more details.										
			You sho al Four	ould have ong with t idation, In	received a his progra c., 675 M:	copyoft m;ifnot, ass Ave, (he GNU G write to th Cambridge	General F le Free S e, MA 02	Public License Software 2139, USA.		

Σχήμα 4.1: Αρχική οθόνη του προγράμματος matGPR.

4.1.1 Ανασύνταξη ραδιογραφημάτων

Η διαδικασία επεξεργασίας που υιοθετήθηκε στην παρούσα διατριβή ειδίκευσης θα επιδειχθεί με εφαρμογές σε ένα παραδειγματικό αρχείο δεδομένων το οποίο συγκεντρώνει σχεδόν όλα τα παρατηρούμενα στην περιοχή χαρακτηριστικά υπεδαφικής δομής (συμπεριλαμβανομένων των αρχαιολογικών στόχων) και θορύβου. Το αρχείο που επιλέχθηκε για την επίδειξη, αντιστοιχεί στην μηκοτομή που σημειώνεται με γαλάζιο χρώμα στην Εικόνα 4.2 (Τομή 108). Τα πρωτογενή δεδομένα (Σχήμα 4.3) παρατηρούμε ότι απεικονίζονται σε δυο άξονες: τον άξονα του *χρόνου* σε ναν αδευτερόλ επτα (ns) που είναι ο διπλ άς (μετ' επιστροφής) χρόν ος διάδοσης του κύματος, και τον άξονα των *ιχνών* (traces), δηλαδή των διαδοχικών κυματομορφών που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια της όδευσης.



Σχήμα 4.2: Οδεύσεις GPR στη θέση 2. Με γαλάζιο χρώμα σημειώνεται η θέση της τομής 108 που θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα.



Σχήμα 4.3: Πρωτογενή δεδομένα της τομής 108.

Η ανασύνταξη (editing) του ραδιογραφήματος γίνεται σε τέσσερα βήματα. Το πρώτο βήμα συνίσταται σε μετασχηματισμό του ραδιογραφήματος, ώστε τα ίχνη (traces) να επανατοποθετηθούν από δειγματοληψία κατά ίσα χρονικά διαστήματα (equal time intervals sampling mode) σε δειγματοληψία κατά ίσες αποστάσεις (equal spacing) κατά μήκος της γραμμής σάρωσης (scan line). Το διαθέσιμο στον Τομέα Γεωφυσικής – Γεωθερμίας γεωραντάρ τύπου SIR-2000 δεν διαθέτει τροχίσκο αυτόματης μέτρησης αποστάσεων (survey wheel) και είναι ρυθμισμένο να μετρά 32 ίχνη το δευτερόλεπτο κατά την διάρκεια της σάρωσης.

Το σύστημα SIR-2000 και, γενικά, όλα τα συστήματα γεωραντάρ, επιτρέπουν την σημείωση (marking) συγκεκριμένων ιχνών σε αναφορά με χαρακτηριστικά σημεία κατά μήκος της γραμμής σάρωσης, προκειμένου να χρησιμεύσουν ως δείκτες της θέσης του ίχνους κατά μήκος της γραμμής σάρωσης. Στο SIR-2000 η σημείωση γίνεται με ένα πλήκτρο (marker button) τοποθετημένο στην λαβή της κ εραίας ή της μον άδας ελ έγ χου και καταγ ράφεται με απόδοση μίας εκ των τιμών 0×E8, 0×E1, 0×E100, 0×EC ή 0×EC00 στο δεύτερο δείγμα του σημειωμένου ίχνους, ανάλογα με το επιλεγμένο δυναμικό εύρος (8 ή 16 bits) και την έκδοση του λογισμικού συλλογής δεδομένων.

Στην παρούσα μελέτη, τα ίχνη σημειώνονταν σε ίσες αποστάσεις του ενός μέτρου, όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 2, με την βοήθεια μετροταινιών απλωμένων κατά μήκος της γραμμής σάρωσης. Τα σημειωμένα ίχνη αντιστοιχούν σε θέσεις με γνωστές συντεταγμένες (σε τοπικό καρτεσιανό σύστημα) οι οποίες εισάγονται στο πρόγραμμα διαδραστικά, ή μέσω ειδικών αρχείων (βλ. Tzanis 2010,

Εγχειρίδιο Χρήσης matGPR, σελ. 57). Ο χρήσης καθορίζει το βήμα (απόσταση) μεταξύ των ιχνών του μετασχηματισμένου ραδιογραφήματος οι θέσεις των επανατοποθετημένων ιχνών υπολογίζονται με βάση την θέση των σημειωμένων ιχνών. Στη συνέχεια, τα επανατοποθετημένα ίχνη υπολογίζονται με βάση τα μετρηθέντα ίχνη με τη χρήση της τμηματικής προσαρμογής κυβικών Ερμιτιανών πολυωνύμων (π.χ. Kahaner et al, 1989). Στην περίπτωση της Τομής 108 επιλέχθηκε διάστημα (βήμα) δειγματοληψίας ίσο προς 0.01 m, το οποίο είναι ικανοποιητικό για την πιστή αναπαραγωγή των δεδομένων χωρίς απώλεια πληροφορίας και το μετασχηματισμένο ραδιογραφηματισμένο ραδιογραφημα που προκύπτει αποτελείται από 2902 ίχνη.



Σχήμα 4.4: Δεδομένα τομής 108 όπου έχει εφαρμοστεί παρεμβολή σε ίσες αποστάσεις και αναδειγματισμός στον άξονα των ιχνών.

Τα ως άνω μετασχηματισθέντα (επανατοποθετημένα) ραδιογραφήματα έχουν μεγάλο μέγεθος και καταλαμβάνουν πολύ χώρο στην προσωρινή και μόνιμη μνήμη, πράγμα που μπορεί να δυσκολέψει τα μελλοντικά στάδια ανάλυσης. Κατά συνέπεια, το δεύτερο βήμα επεξεργασίας συνίσταται σε αναδειγματισμό (resampling) των ραδιογραφημάτων, ώστε να εκκαθαρισθεί η πλεονάζουσα πληροφορία. Η σχετική λειτουργία εφαρμόζει ένα ευέλικτο αλγόριθμο, (παρεμβολή sin-c), ο οποίος μπορεί να υπολογίσει το πλάτος ενός σήματος σε οιονδήποτε επιθυμητό χρόνο ή θέση στον χώρο, αρκεί αυτός/αυτή να καθορίζεται με μία σταθερή αριθμητική τιμή (Smith και Gosset, 1984). Επιπλέον, χρησιμοποιείται ένα κατωπερατό φίλτρο ανεξάρτητα από το συντελεστή μετατροπής του ρυθμού δειγματοληψίας: ο αλγόριθμος εφαρμόζει την (analogue interpretation) της «αναλογική ερμηνεία» μετατροπής ρυθμού δειγματοληψίας, όπως αναφέρεται από τους Crochiere και Rabiner (1983), κατά την οποία μία συγκεκριμένη παλμική απόκριση κατωπερατού φίλτρου οφείλει να εφαρμόζεται ως συνεχής συνάρτηση. Η συνέχεια της παλμικής απόκρισης προσομοιώνεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δειγμάτων των παλμικών αποκρίσεων που είναι αποθηκευμένες σε έναν κατάλογο. Περισσότερες λεπτομέρειες για την εφαρμογή της μεθόδου αναδειγματοληψίας στο matGPR, μπορεί να βρει ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης στο εγχειρίδιο χρήσης (Tzanis, 2010b). Στην παρούσα μελέτη, σχετική διερεύνηση έδειξε ότι τυχόν αναδειγματισμός των ραδιογραφημάτων, ούτως ώστε να περιλαμβάνουν 500 περίπου ίχνη (1 ανά 10cm), δίδει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μετά τον αναδειγματισμό, το παραδειγματικό ραδιογράφημα έχει την μορφή της Εικόνας 4.4.

Το τρίτο βήμα συνίσταται στην διόρθωση μεμονωμένων ιχνών, ή μικρών ομάδων ιχνών που κυριαρχούνται από θόρυβο μεγάλου πλάτους (κυρίως λόγω δόνησης της κεραίας λόγω ανωμαλιών του εδάφους ή ανακλάσεων από παραεπιφανειακά μεταλλικά αντικείμενα. Αυτό γίνεται με διαδραστική επιλογή των προβληματικών ιχνών (με τον δρομέα επί της οθόνης) και αντικατάστασή τους με παρεμβολές που υπολογίζονται από τα γειτονικά και κοντινά τους ίχνη. Το αποτέλεσμα της ανωτέρω διαδικασίας αυτής εμφανίζεται στην Εικόνα 4.5.





Τελικό στάδιο της ανασύνταξης του ραδιογραφήματος είναι η αφαίρεση πληροφορίας μεγάλης κλίμακας, η οποία είναι κοινή σε όλα τα ίχνη και δεν οφείλεται στην δομή του υπεδάφους. Τα φαινόμενα αυτά μπορεί να οφείλονται στην πηγή (παλμό ραντάρ), την πρώτη ανάκλαση του παλμού στην επιφάνεια, στην αλληλεπίδραση (ζεύξη) της κεραίας με το υπέδαφος και σε στατικό (αμετάβλητο με τον χρόνο) θόρυβο διαφόρων τύπων σε γενικές γραμμές προκαλούν την εμφάνιση *ζώνωσης* (banding) στα ραδιογραφήματα, δηλ. οριζόντιων λωρίδων διαφορετικής διάρκειας, όπως στα Σχήματα 4.4 και 4.5. Ως «global background» ορίζεται ο μέσος όρος όλων των ιχνών (μέσο ίχνος) και υπολογίζεται προσθέτοντας όλα τα ίχνη μαζί και διαιρώντας με τον αριθμό τους. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σώρευση (stacking) και ενισχύει το σύμφωνο (coherent) περιεχόμενο του σήματος, απαλείφοντας τις στατιστικά τυχαίες (random) μεταβολές (ή θόρυβο). Στην προκειμένη περίπτωση, το σύμφωνο μέρος του σήματος αποτελείται από όλα τα φαινόμενα που προκαλούν ζώνωση, δηλ. αυτό που συνήθως ονομάζουμε συστημικό θόρυβο. Το αποτέλεσμα της αφαίρεσης του μέσου ίχνους από τα δεδομένα του Σχήματος 4.5 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Τα δεδομένα του Σχ. 4.5 αφού εφαρμόστηκε αφαίρεση του μέσου ίχνους (global background removal).

4.1.2 Περαιτέρω επεξεργασία

Όπως είναι σαφές και από τα ανωτέρω παραδείγματα, τα συλλεχθέντα δεδομένα πάσχουν από θόρυβο διαφόρων τύπων. Το θετικό είναι ότι, όπως διαπιστώθηκε μετά από σχετική διερεύνηση, ο θόρυβος αυτός μπορεί γενικά να κατασταλεί σε ικανοποιητικό βαθμό με την εφαρμογή απλών φίλτρων κυματιδιακού (wavelet) τύπου.

4.1.2.1 B-spline wavelet

Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός μπορεί να αποσυνθέσει μια χρονοσειρά δεδομένων σε ένα φάσμα επιπέδων ενέργειας κατανεμημένων σε στενές φασματικές ζώνες και μήκη κύματος. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων σε υποσύνολα συγκεκριμένων χρονικών-συχνοτικών κλιμάκων που προσφέρουν υψηλή διακριτική ικανότητα στα βραχέα μήκη κύματος και εντοπισμό συχνοτικού (πληροφοριακού) περιεχομένου στα μακρά μήκη κύματος. Η μέθοδος αυτή είναι πιο ευέλικτη και κατατοπιστική από το μετασχηματισμό Fourier, ο οποίος παρέχει το φάσμα ισχύος σε δεδομένες ζώνες μήκους κύματος, αλλά για ολόκληρη τη σειρά δεδομένων, εξομαλύνοντας τα τοπικά χαρακτηριστικά κάθε μήκους κύματος. Στο επίπεδο της μίας χρονο-συχνοτικής κλίμακας, ο κυματιδιακός μετασχηματισμός βασίζεται σε ένα γραμμικό, στενοζωνικό φίλτρο. Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός μπορεί να εφαρμοσθεί σε διαφορετικές χρονο-συχνοτικές κλίμακες με αλλαγή της κλίμακας (μεγέθους) του κυματιδίου, (φίλτρου), εξάγοντας χρονο-συχνοτική πληροφορία σε μήκη κύματος που ταιριάζουν με το εύρος ζώνης των κυματιδίων: μικρής κλίμακας δεδομένα θα ταιριάξουν με μικρά κυματίδια, αλλά όχι με μεγάλα κυματίδια και αντίστροφα. Με την εφαρμογή αυτών των πακέτων φίλτρων σε δεδομένα GPR είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τοπικά χρονο-συχνοτικά χαρακτηριστικά, καθώς και να καταστεί δυνατή η διάκριση χαρακτηριστικών σε διαφορετικές κλίμακες (ή ακόμα και ο εντοπισμός περιοχών όπου δεδομένα συγκεκριμένων κλιμάκων λείπουν). Οι μετασχηματισμοί που εφαρμόζονται στην παρούσα διατριβή βασίζονται σε κυματίδια B-Spline, που έχουν κατασκευαστεί από μετάθεση, στάθμιση και άθροιση των B-spline συναρτήσεων $N_m(x)$, όπου x είναι μια χρονική μεταβλητή και *m* είνα η τάξη των spline. Λεπτομέρειες σχετικά με τις Bσυναρτήσεις spline και την κατασκευή των κυματιδίων B-spline μπορούν να

αναζητηθούν στους Chui (1992), Daubechies (1992), Ueda και Lodha (1995). Για το λόγο αυτό στο παρόν θα δοθούν μόνο βασικές πληροφορίες.

Τυπικά, η B-spline *m* -οστής τάξης ορίζεται επαναληπτικά από την συνέλιξη:

$$N_{1}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0\\ 1 & 0 \le x < 1\\ 0 & x \ge 1 \end{cases}$$
$$N_{m}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} N_{m-1} N_{1}(t) dt = \int_{0}^{1} N_{m-1}(x-t) dt$$

Είναι φανερό ότι $\mathcal{N}_m(x) > 0$ για 0 < x < m και ότι η 1^{ης} τάξης B-spline $\mathcal{N}_1(x)$ είναι η συνάρτηση βάθμωσης Haar. Η δίβαθμη έκφραση των γενικής τάξης *m* συναρτήσεων βάθμωσης B-spline γράφεται ως εξής:

$$N_m(x) = \sum_{k=0}^m p_k N_m(2x-1) = \sum_{k=0}^m 2^{-m+1} \binom{m}{k} N_m(2x-1), \qquad 0 \le k < m.$$

όπου *P*_k είναι η ακολουθία δυο-κλιμάκων. Οι ιδιότητες των B-splines συνοπτικά είναι:

1. Συμπαγές πεδίο τιμών (compact support):supp $N_m = [0, m]$ 2. Κατανομή ομοιογένειας: $\sum_{k=-\infty}^{\infty} N_m(x-k) = 1$ 3. Συμμετρία: $N_m(\frac{m}{2}+x) = N_m(\frac{m}{2}-x), \quad x \in \Re$ 4. Αναδρομική ιδιότητα: $N_m(x) = \frac{x}{m-1}N_{m-1}(x) + \frac{m-x}{m-1}N_{m-1}(x-1)$

Δεδομένου ότι οι B-splines \mathcal{N}_m είναι συναρτήσεις βάθμωσης, μπορούν να σχετιστούν με κυματίδια ψ_m που δημιουργούνται από την γραμμική άθροιση των συναρτήσεων \mathcal{N}_m . Η δίβαθμη συνάρτηση των κυματιδίων B-spline γενικής τάξης m δίνεται από:

$$\psi_m(x) = \sum_{k=0}^{3m-2} q_k N_m(2x-k),$$

$$q_k = (-1)^k 2^{1-m} \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} N_{2m}(k+1-l)$$
(1)

Τα κυματίδια B-spline έχουν πολλές επιθυμητές ιδιότητες, μερικές από τις οποίες είναι:

- Συμπαγές πεδίο τιμών: Το πεδίο τιμών της ψ_m = [0, 2m-1] για m = 1, 2,..., όπως προκύπτει από τον ανωτέρω ορισμό τους.
- Είναι συμμετρικά για άρτια τάξη *m* και αντί συμμετρικά για περιττή τάξη *m*, δηλαδή:

 $\begin{cases} \psi_m(x) = \psi \dot{q}_n(2m-1-x), & m \quad \pi \varepsilon \rho \imath \tau \tau \\ \psi_m(x) = - \dot{\psi}_m(2m-1-x), & m \quad \rho \tau \imath \alpha \end{cases}$

- Η *q_k* αποτελεί πεπερασμένη σειρά; μόνο οι πρώτοι 3^m -1 όπου είναι μημηδενικοί.
- 4. Παρουσιάζουν πλήρη ιδιότητα ταλάντωσης.
- 5. Έχουν ροπή που τείνει στο 0 $\int_{-\infty}^{\infty} \psi_m(x) x^i dx = 0, \quad i = 0, 1, ..., m 1$
- 6. Е́іvai орθоγώνια σε διαφορετικές κλίμακες, όπως $\left[\psi_m(2^{j_1}x-k_1),\psi_m(2^{j_2}x-k_2)\right]=0$ εάν $j_1 \neq j_2$, αν και διαφορετικές μετατοπίσεις των ίδιων κυματιδίων δεν είναι ορθογώνιες στην ίδια κλίμακα, όπως $\left[\psi_m(2^jx-k_1),\psi_m(2^jx-k_2)\right]\neq 0$ εάν $m \neq 1$. Αυτή η ιδιότητα αναφέρεται ως ημι-ορθογωνιότητα .

Τα Κυματίδια B-spline μπορεί να κατασκευαστούν άμεσα από την (1), αλλά το αποτέλεσμα δεν έχει πάντα τις επιθυμητές φασματικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, το κυβικό B-spline κυματίδιο που υπολογίστηκε από τους Ueda και Lodha (1995) φαίνεται να έχει ασήμαντη dc συνιστώσα και παρουσιάζει μια σημαντική ολίσθηση φάσης στις χαμηλότερες συσχνότητες και αστάθεια φάσης σε υψηλότερες συχνότητες και μεγαλύτερες κλίμακες. Μετά την αξιολόγηση των φασματικών χαρακτηριστικών, οι βέλτιστες αριθμητικές υλοποιήσεις των κυματιδίων B-spline επελέγησαν ως εξής:

 Για το γραμμικό και το τετραγωνικό κυματίδιο, η απευθείας κατασκευή με βάση την δίβαθμη συνάρτηση B-spline και την εξίσωση (1) αποδείχτηκε η βέλτιστη λύση. Έτσι, το γραμμικό κυματίδιο B-spline είναι:

$$\psi_2(x) = \frac{1}{12} \Big[N_2(2x) - 6N_2(2x-1) + 10N_2(2x-2) - 6N_2(2x-3) + N_2(2x-4) \Big]$$

• Το τετραγωνικό κυματίδίο είναι:

$$\psi_3(x) = \frac{1}{480} \Big[N_3(2x) - 29N_3(2x-1) + 147N_3(2x-2) - 303N_3(2x-3) \\ + 303N_3(2x-4) - 147N_3(2x-5) + 29N_3(2x-6) - N_3(2x-7) \Big]$$

Αυτές είναι, επίσης, οι προτεινόμενες λύσεις από τον Ueda και Lodha (1995).

- Για το κυβικό κυματίδιο B-spline υιοθετούνται οι λύσεις των Katunin και Korczak (2009). Η μέθοδός τους περιλαμβάνει μια περίπλοκη τμηματική προσέγγιση των κυματιδίων με κυβικά πολυώνυμα επί βραχέων χρονικώνδιαστημάτων του πεδίου τιμών τους. Η αναλυτική μορφή της προσέγγισης είναι μακροσκελής και δεν παρουσιάζεται για λόγους συντομίας, εντούτοις αποδεικνύεται ότι συνιστά ευσταθή συνάρτηση με ομαλά φασματικά χαρακτηριστικά.
- Τέλος και η παράγωγος της κυβικής B-spline M₄ (x), συνιστά κυματίδιο (Canny, 1986) και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά από M₄ (x),.

4.1.2.2 Φιλτράρισμα με B-spline wavelet

Εκτός από τις πλεονεκτικές τους μαθηματικές ιδιότητες (π.χ. συμπαγές πεδίο τιμών, ορθογωνιότητα κλπ), τα κυματιδιακά φίλτρα B-spline συνιστούν μια οικογένεια με ευρύ φάσμα δυνατοτήτων χρονο-συχνοτικού εντοπισμού. Το άνω διάγραμμα του Σχήματος 4.7 δείχνει τις συχνοτικές αποκρίσεις της οικογένειας των κυματιδίων B-spline για την ονομαστική συχνότητα των 400MHz και δεδομένα που καταγραφήκαν με συχνότητα δειγματοληψίας 0.1957ns. Το κάτω διάγραμμα είναι το ίδιο, αλλά για συχνότητα 100MHz και συχνότητα δειγματοληψίας 0.7828ns. Ο συντονισμός των διαφόρων φίλτρων στην ίδια συχνότητα επιτυγχάνεται με την προσαρμογή του μήκους τους



Σχήμα 4.7: Κανονικοποιημένες συχνοτικές αποκρίσεις των κυματιδιακών φίλτρων B-spline για διαφορετικές κεντρικές συχνότητες και ρυθμούς δειγματοληψίας. Το σχήμα παραχωρήθηκε από τον Δρ. Α. Τζάνη (2011).
Η μορφή των διαφορετικών συχνοτικών αποκρίσεων αποσαφηνίζει ότι τα διαφορετικά φίλτρα αποσπούν και διαφορετική πληροφορία. Η παράγωγος του κυβικού B-spline επιτρέπει την διέλευση μίας αρκετά ευρείας φασματικής ζώνης γύρω από τη κεντρική συχνότητα, ενώ το γραμμικό και το τετραγωνικό κυματίδια Bspline επιτρέπουν διέλευση σταδιακά στενότερων ζωνών, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα τον οξύτερο συχνοτικό εντοπισμό και ως εκ τούτου, λεπτομερέστερη εξαγωγή χρονικής κλίμακας. Επί πλέον, η απόκριση συχνότητας των κυματιδίων Bspline έχει μορφή προσομοιάζουσα αυτής του πηγαίου παλμού. Αυτό καθιστά την τεχνική καταλληλότερη (προσαρμοστικότερη) σε δεδομένα GPR, από τα κοινά φίλτρα πεδίου συχνότητας (π.χ. Butterworth, Chebyshev κ.λπ.). Για παράδειγμα το κυματίδιο Ricker (ή κυματίδιο Σομπρέρο), μία από τις κοινότερες μορφές πηγαίου παλμού, μπορεί να προσεγγισθεί με παραγώγους των συναρτήσεων B-spline.



Σχήμα 4.8: Το ίχνος υπ' αριθμό 157 της τομής 227. 4.8α που αναλύεται με κυματίδιο παραγώγου κυβικής B-spline με διαφορετικό αριθμό σημείων (χρονικές κλίμακες) κάθε φορά 4.8β,γ,δ,ε Το σχήμα παραχωρήθηκε από τον Δρ. Α. Τζάνη (2011).

Για να παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτά τα κυματίδια επιδρούν σε δεδομένα GPR και παρέχουν την πληροφορία που πρέπει να εξαχθεί, παραθέτουμε ένα παράδειγμα. Το ίχνος που φαίνεται στο Σχήμα 4.8α περιέχει ισχυρές ανακλάσεις από θαμμένους στόχους (ανθρωπογενείς κατασκευές) στο διάστημα 18-30 ns και ασθενείς ανακλάσεις κρυμμένες σε έντονο θόρυβο στο διάστημα 60-80 ns. Τα δεδομένα περιέχουν υψίσυχνο θόρυβο που παρουσιάζεται μετά τα 30 ns και χαμηλόσυχο θόρυβο που εντοπίζεται μεταξύ 40–50 ns (χαμηλής έντασης) και 60–80 ns (υψηλής έντασης). Ωστόσο, το πιο ανησυχητικό και ενδεχομένως παραπλανητικό χαρακτηριστικό του θορύβου είναι μια σειρά από αντηχήσεις μεταξύ των 100-200 MHz και παρουσιάζουν τρεις φασματικές κορυφές στα 110 MHz, 140 MHz και 170MHz, Πρόκειται, σαφώς, για μια δομημένη διεργασία αβέβαιης προέλευσης, πιθανόν λόγω αυτό-σύζευξης της κεραίας, με ισχύ ανάλογη με το περιεχόμενο ισχύος των δεδομένων (υποθέτουμε ότι εξαπλώνεται κυρίως στο διάστημα 200-600 MHz). Μια έκφραση αυτού του θορύβου μπορεί να φανεί ξεκάθαρα μεταξύ 30–50 ns, αλλά αργότερα συνδυάζεται με τα δεδομένα και τον θόρυβο. Κατ' αυτόν τον τρόπο δεν είναι εφικτό να γνωρίζουμε το πλάτος και την χρονική του έκταση.

Τα δεδομένα του Σχ. 4.8α αναλύονται με κυματίδιο παραγώγου κυβικής Βspline. Το Σχήμα 4.8β απεικονίζει τα αποτελέσματα εφαρμογής κυματιδίου 5σημείων· η απόκριση συχνότητας του φίλτρου έχει μέγιστο στα ~1.28GHz και είναι συντονισμένη με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων που έχουν χρονικές κλίμακες της τάξης των 0.6 – 1.6 ns. Ως εκ τούτου, η έξοδος του φίλτρου είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο του θορύβου βραχέων περιόδων, αν και μέρος της υψίσυχνης συνιστώσας των δεδομένων φαίνεται επίσης να έχει διέλθει στο διάστημα 18–30 ns. Το Σχήμα 4.8γ απεικονίζει τα αποτελέσματα ενός κυματιδίου 110-σημείων η απόκριση συχνότητας του φίλτρου έχει μέγιστο στα ~0.06MHz όπου και οι μακρότερες περίοδοι των δεδομένων εισόδου και αντιστοιχούν στις χρονικές κλίμακες του χαμηλόσυχνου υψίσυχνου θορύβου: η έξοδος του φίλτρου είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο του χαμηλόσυχνου θορύβου. Το Σχήμα 4.8δ απεικονίζει τα αποτελέσματα από ένα κυματίδιο 42 σημείων, η απόκριση συχνότητας του οποίου έχει μέγιστο στα 140 MHz και είναι συντονισμένο με διαδικασίες που έχουν χρονικές κλίμακες της τάξης 4–16ns. Ως αποτέλεσμα, συνιστά ένα μοντέλο των διεργασιών αντήχησης που περιγράφονται παραπάνω. Είν α πλ όν προφαν ές ότι αυτή η διαδικ ασία έχει μεταβλητή ένταση η οποία είναι σημαντική και συγκρίσιμή με την ένταση των

ανακλάσεων των θαμμένων στόχων και ιδιαίτερα στο πρώτο μέρος του ίχνους τους. Επιπλέον, μεγιστοποιείται στα 30–40 ns και στα 60–75 ns και εξαφανίζεται μετά το 80° ns. Τέλος, στο Σχήμα 4.8ε φαίνονται τα αποτελέσματα ενός κυματιδίου 15 σημείων, η απόκριση συχνότητας του οποίου έχει μέγιστο στα 399 MHz⁻ αυτή ταυτίζεται περίπου με την ονομαστική κεντρική συχνότητα της κεραίας και επιλέγει τα χαρακτηριστικά στοιχεία με χρονικές κλίμακες της τάξης των 2 – 5 ns. Τα εν λόγω αποτελέσματα είναι συγκρίσιμα με τη διάρκεια των κύριων ανακλάσεων και πολύ διαφορετικά από τη χρονική κλίμακα του θορύβου: τα αποτελέσματα του Σχ. 4.8ε ουσιαστικά αποτελούνται από δεδομένα χωρίς θόρυβο!

Στο ανωτέρω παράδειγμα το κυματίδιο παραγώγου κυβικής B-spline ήταν σχεδόν επαρκές για την ανάλυση. Όμως στο ακριβώς επόμενο ίχνος, μόνο 1 μέτρο αριστερά και 5 λεπτά αργότερα, οι κατανεμημένες στην ζώνη 100 – 200 MHz διεργασίες θορύβου συγχωνεύτηκαν σε μια ενιαία, ισχυρή και κυρίαρχη φασματική έξαρση με κεντρική συχνότητα περίπου 200 MHz (Σχήμα 4.9α). Το κυματίδιο παραγώγου κυβικής B-spline κυματιδίου με κεντρική συχνότητα 400 MHz δεν μπορεί να καταστείλει το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό λόγω της διεσταλμένης συχνοτικής του απόκρισης (Σχήμα 4.9β). Σε αυτή την περίπτωση είναι το γραμμικό κυματίδιο B-spline, συντονισμένο στα 400MHz, αυτό που δίνει την επιθυμητή καταστολή θορύβου (Σχήμα 4.9γ), εν ώ το αντίστοιχο τετραγωνικό και κυβικό κυματίδια προσφέρουν αυξημένη δυνατότητα συχνοτικού εντοπισμού και εξαγωγής λεπτομερέστερης χρονο-συχνοτικής κλίμακας (Σχήμα 4.9δ-ε).



Σχήμα 4.9: Το ίχνος υπ' αριθμό 231 της τομής 228.4.9α που αναλύεται με διαφορετικό τύπο κυματίδιου B-spline κάθε φορά 4.9β,γ,δ,ε Το σχήμα παραχωρήθηκε από τον Δρ. Α. Τζάνη (2011).



Σχήμα 4.10: Η τομή 228 πριν και μετά την εφαρμογή γραμμικού κυματιδίου B-spline 27 σημείων, συντονισμένου στα 400MHz, Το σχήμα παραχωρήθηκε από τον Δρ. Α. Τζάνη (2011).

Η παρουσίαση των κυματιδιακών φίλτρων B-spline θα ολοκληρωθεί με επίδειξη της εφαρμογής τους σε ένα πλήρες ραδιογράφημα. Στο Σχήμα 4.10α παρουσιάζεται το πρωτογενές ραδιογράφημα, από το οποίο εξήχθη το ίχνος που αναλύθηκε στο Σχήμα 4.9. Η εικόνα του σχήματος 4.10β παρουσιάζει τα ίδια δεδομένα μετά από εφαρμογή γραμμικού κυματιδίου B-spline 27 σημείων, συντονισμένου στα 400MHz. Το ραδιογράφημα υποφέρει από ισχυρό χαμηλόσυχνο θόρυβο, κυρίως στα πρώτα 20 μέτρα της σάρωσης, ο οποίος φαίνεται να οφείλεται σε στάσιμο κύμα αέρος (κύμα που διαδίδεται στην επαφή εδάφους – αέρα και επιστρέφει από παρακείμενο σκεδαστή, πιθανόν τοιχοποιία). Παρατηρούνται, επίσης, ριπές υψίσυχνου ισχυρού θορύβου, ιδίως στους ύστερους χρόνους, μετά τα 80ns, ο οποίες, πιθανόν, να οφείλονται στην ενίσχυση (από το σύστημα) εκπομπών κινητής τηλεφωνίας, σε μία χρονική ζώνη όπου το πλάτος του σήματος γεωραντάρ έχει πέσει κάτω από το κατώφλι ανίχνευσης. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό παρατηρείται σε αποστάσεις 8 – 12 m και χρόνους 30 – 60ns: φαίνεται ότι πρόκειται για συμβολή πλευρικών σκεδάσεων τύπου «παπιγιόν» (bowtie) σε συνδυασμό με ισχυρή ριπή υψίσυχνου θορύβου. Τέλος, υπάρχει και συστημικός θόρυβος, που στην προκειμένη περίπτωση δεν έχει αφαιρεθεί.

Η εφαρμογή του κυματιδιακού φίλτρου εξαλείφει ολοσχερώς τον χαμηλόσυχνο, τον υψίσυχνο και μεγάλο μέρος του συστημικού θορύβου, του οποίου η παραμένουσα συνιστώσα μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί με αφαίρεση του μέσου ίχνους. Επιπλέον, αποκαλύπτει ένα θαμμένο και κατά πάσα πιθανότητα ανθρωπογενή μικρό σκεδαστή, ο οποίος υποδεικνύεται με το βέλος στο Σχήμα 4.10β, καθώς και την πιθανή πηγή του «παπιγιόν», δηλ. μία εντόνως κεκλιμένη επιφάνεια ακριβώς αριστερά του προαναφερθέντος μικρού σκεδαστή.

4.1.2.3 Ανάλυση Ταχύτητας

Η ανάλυση ταχύτητας αποτελεί σημαντικότατο στάδιο της επεξεργασίας δεδομένων γεωραντάρ, διότι από αυτή καθορίζεται η τελική τοποθέτηση των υπεδαφικών σκεδαστών στον χρόνο (χωροθέτηση ή migration) και κατά βάθος (χωροθέτηση βάθους/ depth migration). Στην περίπτωση του μονοστατικού γεωραντάρ, τυπικά, η ανάλυση ταχύτητας μπορεί να γίνει μόνο στη βάση ύπαρξης υπερβολών περίθλασης από θαμμένους σημειακούς ή μικρούς σκεδαστές.

Μια απλή προσέγγιση στο πρόβλημα της ταύτισης των υπερβολών περίθλασης βασίζεται στην υπόθεση της διάδοσης χωρίς διασπορά σε ομογενή ημιχώρο και ασχολείται μόνο με σημειακούς σκεδαστές η πεπερασμένου μεγέθους στόχους κυκλικής διατομής. Το matGPR προσφέρει δυνατότητα διαδραστικής ανάλυσης ταχύτητας με προσαρμογή υπερβολών περίθλασης με βάση την γραφική διεπαφή (graphical User Interface - GUI) που παρουσιάζεται στη Εικόνα 4.11. Η διαδικασία ταύτισης περιλαμβάνει τη γραφική λύση της εξίσωσης

$$t = \frac{\delta_T + \delta_R}{v} = \frac{\left(\sqrt{(x - x_T)^2 + d^2} - r\right) + \left(\sqrt{(x - x_R)^2 + d^2} - r\right)}{v}$$

όπου *t* είναι ο χρόνος διπλής διαδρομής, ^δτ και ^δε αντίστοιχα οι αποστάσεις από τον πομπό προς το στόχο και από το στόχο στο δέκτη, ^xτ και ^xε αντίστοιχα, οι θέσεις του πομπού και του δέκτη κατά μήκος του άξονα σάρωσης.



Σχήμα 4.11: Το διαδραστικό περιβάλλον (GUI) ανάλυσης ταχύτητας με προσομοίωση υπερβολών περίθλασης. Αναλύονται τα δεδομένα του ραδιογραφήματος 108 μετά και από την εφαρμογή κυματιδιακού φίλτρου.

Η υπερβολή υπολογίζεται τροποποιώντας διαδραστικά τις παραμέτρους v (ταχύτητα ημιχώρου/ velocity στην Εικόνα 4.11), r (ακτίνα στόχου/ Radius στην Εικόνα 4.1), d

(βάθος/ Depth) και $\frac{[(x]]_T - x_R)}{2}$, δηλ. την θέση του μέσου της απόστασης πομπούδέκτη κατά μήκος του άξονα σάρωσης (Location), έως ότου η υπολογιζόμενη υπερβολή περίθλασης ταιριάζει με την παρατηρούμενη. Οι παράμετροι μπορούν να μεταβληθούν με τους τρόπους που περιγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης του matGPR (Tzanis, 2010). Η θεωρητική υπερβολή υπερτίθεται στα δεδομένα και η ποιότητα της προσαρμογής τοποθέτησης καθορίζεται εμπειρικά. Στην περίπτωση της Εικόνας 4.11, αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα μεταβάλλεται με το βάθος. Έτσι, τελικά κατασκευάζεται μονοδιάστατο μοντέλο ταχύτητας – βάθους, το οποίο αποτελείται από δυο στρώματα:

Ταχύτητα	Πάχος
0.105 m/ns	0.95 m
0.085 m/n	m

Σε γενικές γραμμές παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχαν μεγάλες αποκλίσεις στη δομή ταχύτητας μεταξύ καννάβων (π.χ. πλευρικές μεταβολές, αλλαγή στο πάχος κ.λπ.) συνακολούθως, χρησιμοποιήθηκε ως μέσο μοντέλο το μοντέλο δυο στρωμάτων που κατασκευάσθηκε για την Θέση 2. Όπως θα συζητηθεί στο Κεφ. 5, τα δυο στρώματα αντιπροσωπεύουν διαφορετικές χρονολογικές περιόδους (νεώτερη - βυζαντινή και ρωμαϊκή - παλαιότερη). Το βαθύτερο και παλαιότερο στρώμα έχει μικρότερη ταχύτητα από το υψηλότερο και νεώτερο στρώμα. Η δημιουργία του ίσως μπορεί να αποδοθεί στην δράση του ποταμού Χάραδρου, ο οποίος πλημυρίζοντας έθαβε την περιοχή με αποτέλ σμα τα ν **έ**α κ ήρια ν α κ ίζον αι πάν ω στα επιχώματα που έθαψαν τα παλαιοτέρα κτίσματα.

4.1.2.4 Χωροθέτηση βάθους

Τελικό βήμα της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός του βάθους ταφής των αρχαιολογικών σχηματισμών. Η χωροθέτηση βάθους γίνεται με βάση τα μοντέλα ταχύτητας που κατασκευάστηκαν για κάθε κάνναβο (βλ. Κεφ. 4.1.2.3). Ο μετασχηματισμός από συντεταγμένες χρόνου – απόστασης σε συντεταγμένες βάθους – απόστασης είναι αρκετά περίπλοκη διαδικασία η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

- Υπολογισμό της συνάρτησης βάθους χρόνου t(z) από την συνάρτηση ταχύτητας
 βάθους ν(t).
- 2. Αντιστροφή της *t*(z) σε *z*(*t*) με αντίστροφη γραμμική παρεμβολή.
- 3. Μετατροπή της *z*(*t*) σε βάθος *z* με βάση την αντίστροφη απεικόνιση (2).
- Μετατροπή της A(t) σε A(z), όπου το σύμβολο A αντιπροσωπεύει το πλάτος ενός ίχνους του ραδιογραφήματος.

Με τον τρόπο αυτό λαμβάνουμε αποτελέσματα όπως αυτό του Σχήματος 4.12 για το παραδειγματικό ραδιογράφημα 108, τα οποία καταδεικνύουν τα βάθη ταφής των θαμμένων δομών κάτω από τη περιοχή έρευνας.



Σχήμα 4.12: Το ραδιογράφημα 108 μετά από επεξεργασία και χωροθέτηση βάθους.

4.2 ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε το αδημοσίευτο πρόγραμμα GPRslice, που βασίζεται στις λειτουργίες του matGPR, και γράφτηκε από τον Δρ. Ανδρέα Τζάνη ο οποίος το παραχώρησε προς χρήση.

Ο σκοπός της δημιουργίας τριδιάστατων δεδομένων GPR είναι να εξαχθεί χωρική πληροφορία, η οποία πιθανόν να μην είναι εύκολα ανιχνεύσιμη στις μηκοτομές. Ένα τρόπος για να γίνει αυτό είναι να ενισχυθούν χαρακτηριστικά τα οποία είναι άμεσα συσχετισμένα μεταξύ τους. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως σώρευση (stacking). Η δημιουργία ενός 3-Δ όγκου επεξεργασμένων δεδομένων πραγματοποιείται ως εξής: Αρχικά ορίζεται ένας νέος κάνναβος επάνω από την περιοχή που πρέπει να απεικονισθεί. Τα ίχνη GPR που εμπίπτουν στην ίδια κυψελίδα αυτού του καννάβου αθροίζονται (σωρεύονται) και συνιστούν το νέο μέσο ίχνος που αντιστοιχεί σ' αυτήν την κυψελίδα. Εν συνεχεία, τα πλάτη των σωρευμένων ιχνών μετασχηματίζονται (π.χ. μετατρέπονται σε απόλυτες τιμές, στιγμιαία πλάτη κ.λπ.). Όλες οι τιμές των σωρευμένων ιχνών που βρίσκονται μεταξύ δοθέντων από τον χρήστη ορίων βάθους ή χρόνου (ζώνης), αθροίζονται και υπολογίζεται ο μέσος όρος τους που αποτελεί την τελική τιμή που απεικονίζεται. Για την δοθείσα ζώνη. Οι τιμές αυτές αποδίδονται στο οριζόντιο επίπεδο και σε βάθος που αντιστοιχεί την οροφή της απεικονιζόμενης ζώνης.

Το διαδραστικό περιβάλλον (GUI) ανάλυσης του GPRslice, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 4.13, αποτελείται από το αριστερό τμήμα, που χρησιμεύει στην επιλογή των τομών του κάθε καννάβου και από το δεξί τμήμα όπου βρίσκονται τα πεδία που ορίζουν το μέγεθος των κελίων, που θα γίνει η σώρευση, το βάθος η το χρόνο για τον οποίο θα υπολογιστεί ο μέσος όρος των τιμών, η μέθοδος σώρευσης, η εξομάλυνση και οι τιμές που θα την ορίσουν και τέλος ο τρόπος προβολής των δεδομένων σε δυο η τρεις διαστάσεις.



Σχήμα 4.13: Το διαδραστικό περιβάλλον (GUI) ανάλυσης του GPRslice3.

Η απεικ άνιση γίνεται σε 2 ή 3 διαστάσεις, αν άλ αγ α με την επιλ αγ ή του χρήστη, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.14 και 4.15). Συγκεκριμένα στην εικόνα 4.14 βλέπουμε μια διδιάστατη απεικόνιση του Καννάβου Α στην Θέση 1 και βάθος 0,7 m οι περιοχές με κίτρινα και κόκκινα χρώματα αντιπροσωπεύουν ανακλάσεις (μέγιστα πλάτη ιχνών) που προέρχονται από θαμμένες δομές. Η γεωμετρική τους διάταξη στο χώρο μας επιτρέπει να υποθέσουμε ότι πρόκειται ανθρωπογενείς θαμμένες δομές. Η εικόνα 4.15 δείχνει τις τριδιάστατες απεικονίσεις του Καννάβου Α σε διαφορετικά βάθη προβεβλημένες σε 3 διαστάσεις. Παρατηρούμε ότι οι ανακλάσεις διατάσσονται σε βάθη από 0,6m έως κα 1.8m που συμπίπτουν με τα βάθη που έχουν ανακαλυφθεί αρχαία σε ήδη ανεσκαμμένα τμήματα του χώρου.



Σχήμα 4.14: Διδιάστατη απεικόνιση του καννάβου Α στην Θέση 1 και βάθος 0,7 m (ζώνη βαθών από 0.4m έως 1.2 m).



Σχήμα 4.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση του Καννάβου Α στην Θέση 1 και διαφορετικά επίπεδα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥΣ ΚΑΝΝΑΒΟΥΣ

Ο σκοπός της αν ά χείρας διατριβής ήταν η όσο το δυν ατόν πιστότερη κα αναλυτικότερη απεικόνιση των θαμμένων αρχαιολογικών στόχων της αρχαίας αγοράς του Άργους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιηθήκαν, αρχικά, οι πληροφορίες που συλλέξαμε από βιβλιογραφικές πηγές (βλ. Κεφ. 2.1), ώστε να προσδιοριστούν οι ζώνες με το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Αυτές ήταν το ανατολικό άκρο της αρχαίας Αγοράς, οπού και πιθανολογείται η ύπαρξη των ερείπιων του ν αού του Λυκείου Απόλλωνα και νότια, έκτος της περιοχής της Αγοράς, οπού το αντικείμενο της έρευνας ήταν ο καθορισμός της θέσης των μεγάλων οδικών αξόνων που οδηγούσαν προς αυτήν (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Τοπογραφικό σκαρίφημα των υπό μελέτη περιοχών στην πόλη του Άργους [τροποποίηση από Piteros (1998β)].

Με την βοήθεια και των αρχαιολόγων της Δ' Ε.Π.Κ.Α. (κ. Α. Μπανάκα, κ. Χ. Πιτερός) εντοπίστηκαν, επιλέχθηκαν και προσδιοριστήκαν τα όρια των περιοχών μελέτης και έγινε η αυτοψία του χώρου με σκοπό τον προσδιορισμό των καταλλήλων μεθόδων γεωφυσικών διασκοπήσεων. Επιλέχθηκαν, λοιπόν, οι μέθοδοι μαγνητική και γεωραντάρ, η πρώτη για την δυνατότητα της γρήγορης και αξιόπιστης αποτύπωσης, έτσι ώστε να μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μορφή των στόχων, και η δεύτερη για τη δυνατότητα λεπτομερέστερης καταγραφής των θαμμένων στόχων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκριμένες γεωφυσικές μέθοδοι έχουν

χρησιμοποιηθεί διεθνώς (βλ. Κεφ. 1.4) με πολύ καλά αποτέλεσμα σε αρχαιολογικούς στόχους.

Το επόμενο βήμα ήταν η εφαρμογή τους στην ύπαιθρο. Για το σκοπό αυτό καθορίστηκαν οι κάνναβοι στους οποίους εφαρμόστηκε η μαγνητική μέθοδος Οι θέσεις των καννάβων σημειώνονται στον χάρτη του Σχήματος 5.2. Τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων (βλ. Κεφ. 3) παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.3 – 5.7.



Σχήμα 5.2: Τοπογραφικό σκαρίφημα των υπό μελέτη περιοχών, όπου σημειώνονται οι θέσεις των μαγνητικών καννάβων [τροποποίηση από Piteros(1998b)].



Σχήμα 5.3: Κατακόρυφη βαθμίδα μαγνητικών μετρήσεων του καννάβου. Α



Σχήμα 5.4: Κατακόρυφη βαθμίδα μαγνητικών μετρήσεων του καννάβου Β.



Σχήμα 5.5: Κατακόρυφη βαθμίδα μαγνητικών μετρήσεων του καννάβου C.



Σχήμα 5.6: Κατακόρυφη βαθμίδα μαγνητικών μετρήσεων του καννάβου D.



Σχήμα 5.7: Κατακόρυφη βαθμίδα μαγνητικών μετρήσεων του καννάβου Ε.

Η διάταξη των καννάβων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου γεωραντάρ επικαλύπτει ή βρίσκεται παραπλεύρως των καννάβων των μαγνητικών μετρήσεων (Σχήμα 5.7). Με βάση την ανάλ ιση του Κεφ. 4 κ α την μέθοδο απεικόνισης που λεπτομερώς περιγράφτηκε στο Κεφάλαιο 4.3, τα αποτελέσματα που θα χρησιμοποιηθούν στην ερμηνεία παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.8-5.10.



Σχήμα 5.7: Τοπογραφικό σκαρίφημα των υπό μελέτη περιοχών, όπου σημειώνονται οι θέσεις των οδεύσεων γεωραντάρ [τροποποίηση από Piteros(1998b)].



Σχήμα 5.8: Διδιάστατη απεικόνιση ανακλάσεων (μέγιστα πλάτη ιχνών) στη θέση 2, κάνναβος E-D, ζώνη βαθών από 0.4m έως 1,5 m.



Σχήμα 5.9: Διδιάστατη απεικόνιση ανακλάσεων (μέγιστα πλάτη ιχνών) στη θέση 1, κάνναβος C, ζώνη βαθών από 0.4m έως 1,5 m.



Σχήμα 5.10: Διδιάστατη απεικόνιση ανακλάσεων (μέγιστα πλάτη ιχνών) στη θέση 1, κάνναβος Α, ζώνη βαθών από 0.4m έως 1,5 m.

Στην περιοχή όπως έχει αναφερθεί και στο κεφ. 4.1.2.3 υπάρχει μια διαφοροποίησης της ταχύτητας σε σχέση με το βάθος. Στην εικόνα 5.11 παρατηρούμε ότι το βάθος στο οποίο γίνεται αυτή η αλλαγή είναι περίπου 1,2 - 1,3m. Τα δυο στρώματα με διαφορετικές ταχύτητες: αντιπροσωπεύουν στρώματα διαφορετικής ηλικίας με πιθανότερη, αυτή του ανώτερου, την βυζαντινή. Στις εικόνες 5.8 - 5.9 - 5.10 απεικονίζονται ίχνη που προέρχονται και από τα δυο στρώματα



Σχήμα 5.11: Το ραδιογράφημα 108 μετά από επεξεργασία και χωροθέτηση βάθους. Η κόκκινη γραμμή δείχνει την επαφή των δυο στρωμάτων διαφορετικής ταχύτητας

Αν θέλουμε να παρατηρήσουμε ίχνη που προέρχονται ξεχωριστά από το κάθε στρώμα γ α την θέση 2, κ άν ν βόος Ε-D περνούμε τις εικόνες 5.12 - 5.13 - 5.14. Βλεπουμε ότι η διάταξη των θαμμένων δομών μεταβάλλεται με το βάθος η κύρια συσσώρευση τους είναι στο κέντρο της περιοχής που βλέπουμε την συνεχεία τους από τα 70 cm εως και τα 2 m βάθος]



Σχήμα 5.12: Ανακλάσεις (μέγιστα πλάτη ιχνών) στη θέση 2, κάνναβος E-D. ζώνη βαθών από 0.9 m έως 1,1 m)



Σχήμα 5.13: Ανακλάσεις (μέγιστα πλάτη ιχνών) στη θέση 2, κάνναβος Ε-D. ζώνη βαθών από 1,1 m έως 1,3 m



Σχήμα 5.14: Ανακλάσεις (μέγιστα πλάτη ιχνών) στη θέση 2, κάνναβος Ε-D. ζώνη βαθών από 1,5 m έως 1,7 m

Τα αποτελέσματα από τις δυο γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε, απεικονίζονται συνολικά στο χάρτη του Σχήματος 5.11. Η κατασκευή του καθώς και όλων των χαρτών που θα χρησιμοποιηθούν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων έγινε σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) με τη χρήση του λογισμικού ArcGIS. Οι εικόνες γεωαναφέρθηκαν με σφάλμα μικρότερο του 0.01 και χρησιμοποιώντας περισσότερα των 6 σημείων έλεγχου για την πιστότερη και ακριβέστερη γεωαναφορά τους. Στη συνέχεια, τα δεδομένα εισήχθησαν σε ψηφιακή βάση δεδομένων (γεωβάση) έτσι ώστε να είναι ευκολότερη η εποπτική απεικόνιση της υπό μελέτη περιοχής, των διαθέσιμων αρχαιολογικών και ιστορικών πληροφοριών, των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών διακοπήσεων και η συνδυαστική ερμηνεία τους, καθώς και η διάθεση όλων των παραπάνω στους αρχαιολόγους. Στην παρούσα μελέτη χρήσιμες πληροφορίες από την γεωβάση που δημιουργήθηκε εισήχθησαν στο Google Earth και αποθηκεύτηκαν ως συμπιεσμένο αρχείο Keywhole Markup Language (.KMZ). Έτσι, διευκολύνεται η διάχυση της πληροφορίας στην αρχαιολογική κοινότητα, αφού υπάρχει άμεσα διαθέσιμη με τη χρήση ενός ελεύθερου λογισμικού και σε μορφή εύκολα κατανοητή και από τον μη εξειδικευμένο χρήστη.



Σχήμα 5.15: Συγκριτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δεδομένων στις Θέσεις 1 και 2.



Σχήμα 5.16: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων γεωραντάρ στη Θέση 2, κάνναβος E-D.



Σχήμα 5.17: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων γεωραντάρ στη Θέση 2, κάνναβος E-D.

Στις περιπτώσεις που υπάρχουν επικαλυπτόμενοι κάνναβοι (E-D) και C παρατηρούμε ότι οι μαγνητικές μετρήσεις ακολουθούν την ίδια διάταξη με αυτές των ραντάρ και εν μέρει συμπίπτουν, όπως διακρίνεται στο κεντρικό τμήμα του καννάβου E-D (Σχ. 5.15, 5.16 και 5.17). Το γεγονός αυτό επαληθεύει τα αποτελέσματα και των δυο μεθόδων. Οι δομές που απεικονίζονται πιθανώς προέρχονται από πραγματικές θαμμένες δομές και όχι από θόρυβο η επιφανειακές πηγές.



Σχήμα 5.18: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων κα με τις δύο μεθόδους στη θέση 2, κάνναβος E-D.

5.2 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΝΘΩΠΟΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ

Στην Θέση 1 παρατηρούμε ότι ο δρόμος (κάνναβος Α) δεν διέρχεται ακριβώς από το σημείο που είχε αρχικά υποτεθεί [σημειώνεται με μαύρη διάστικτη γραμμή στο Σχήμα 5.19 η εκτιμώμενη, σύμφωνα με τον Πιτερό (1998), θέση], αλλά βρίσκεται περίπου 30m BA και έχει την ιδία διεύθυνση που οδηγεί προς την αρχαία Αγορά. Μια δεύτερη υπόθεση είναι να πρόκειται για κάποιο δρόμο παράλληλο σε αυτόν. Οι δομές που εντόπισαν οι μαγνητικές μετρήσεις μαγνητικοί κάνναβοι (B-A) ακολουθούν την διεύθυνση των οδών και πιθανώς πρόκειται για οικίες, όπως φαίνεται και από τις ανασκαφές που έγιναν νοτιότερα στην Θέση 1 και σε γειτονικό απαλλοτριωμένο οικόπεδο (Σχήμα 5.20 και Εικόνα 5.1).



387400

Σχήμα 5.19: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων κα με τις δύο μεθόδους στη θέση 1, κάνναβος Α-Β-C.



Σχήμα 5.20: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων στη θέση 2, κάνναβος E-D, και νέα θέση (άσπρη γραμμή) δρόμου.



Εικόνα 5.1: Ανασκαμμένη περιοχή με ρωμαϊκές κατοικίες νότια της Θέσης 1.

97



Σχήμα 5.21: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μαγνητικών μετρήσεων στη Θέση 1, κάνναβος Α-Β- C, ενώ οι μαύρες γραμμές απεικονίζουν τις διευθύνσεις των κτισμάτων.

Στη Θέση 2, όπου ερευνούμε για τα ερείπια του Ναού του Λυκείου Απόλλωνα, παρατηρούμε ότι στο κέντρο της περιοχής υπάρχει συγκέντρωση δομών που αποτελούν τμήματα ενός ή περισσότερων κτισμάτων. Σαφή συμπεράσματα για τη θέση του Ναού δε μπορούμε να έχουμε, κ αθώς δεν υπάρχει μια διακριτή κ α ομογενής δομή που να έχει τις διαστάσεις και τον προσανατολισμό του Ναού. Οι δομές που αναδείχτηκαν στο χώρο και πιθανώς να ταιριάζουν με τον αναμενόμενο προσανατολισμό κ α τις διαστάσεις του Ναού φαίνονται στην εικόνα 5.22. Οι δυο επικρατέστερες εντοπίζονται στο κέντρο της περιοχής και στο ΝΑ άκρο της. Οι υποθέσεις αυτές μένει να επαληθευτούν από την αρχαιολογική σκαπάνη.



Σχήμα 5.22: Τοπογραφικό διάγραμμα της πόλης του Άργους [τροποποίηση από Piteros(1998b)], όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων γεωραντάρ στη θέση 2, κάνναβος Ε-D, ενώ το λευκό διακεκομμένο τετράγωνο υποδεικνύει τη νέα θέση που πιθανών να υπάρχει ο Ναός του Λυκείου Απόλλωνα.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης πραγματοποιήθηκαν προανασκαφικές γεωφυσικές έρευνες σε δύο θέσεις στην περιοχή κοντά στην αρχαία Αγορά του Άργους. Εφαρμόστηκαν επιτυχώς η μαγνητική μέθοδος και η μέθοδος γεωραντάρ σε σύνολο 5 (επικαλυπτόμενων σε κάποιες θέσεις) καννάβων. Η περιοχές έρευν ας επιλέχθηκ αν σε συν εργασία με τους αρχαιολ άγ ως της Δ' Ε.Π.Κ.Α., με βάση τα διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία, καθώς και τα ευρήματα ανασκαφών στην περιοχή του Άργους.

Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων, ήταν αρκετά καθαρά και οι ενδείξεις συμπίπτουν. Το σύνολο των αποτελεσμάτων καθώς και οι διαθέσιμες για την περιοχή πληροφορίες εισήχθησαν σε ψηφιακή βάση δεδομένων για τη διευκόλυνση της πιστότερης απεικόνισής τους και της συνδυαστικής ερμηνείας του.

Έτσι, εντοπίστηκαν επιμήκεις δομές, παράλληλες προς τη διεύθυνση των κεντρικών οδών, καθώς και ίχνη που πιθανώς αποτελούν ερείπια κτισμάτων. Με βάση τα στοιχεία αυτά προτείνεται η πιθανή αναθεώρηση της θέσης των δυο οδών στην Θέση 1, που σύμφωνα με τα γεωφυσικά αποτελέσματα εντοπίζονται ΒΑ ή ΝΑ της υποτιθεμένης από τους αρχαιολόγους (Πιτερός 1998).

Η θέση του Ναού του Λυκ ίου Απόλ λνωα δεν κατέστη δυνατό να ταυτοποιηθεί με σαφήνεια, αν κ α η έρευνα προτείν ε θέσεις συμβατές με τον αναμενόμενο προσανατολισμό και τις διαστάσεις του. Περαιτέρω γεωφυσικές διακοπήσεις σε γειτονικές θέσεις ίσως να μπορέσουν να τον εντοπίσουν. Παρόλα ταύτα η γεωφυσική έρευνα που εφαρμόσαμε στην περιοχή γύρω από την Αρχαία Αγορά του Άργους με σκοπό την αναζήτηση της πιθανής θέσης του Ναού του Λυκείου Απόλλωνα έδωσε αποτελέσματα τα οποία θεωρούμε ότι θα οδηγήσουν τους αρχαιολόγους σε μια πιο στοχευμένη έρευνα και πιθανόν την ανακάλυψη ευρημάτων που θα οδηγήσουν στον εντοπισμό του.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι παρά τις εκτεταμένες χρονικά αρχαιολογικές έρευνες και ανασκαφές, η ευρύτερη περιοχή του Άργους είναι ακόμα ανεξερεύνητη λόγω της πληθώρας των ευρημάτων και των θαμμένων ερειπίων. Έτσι, με τη συμβολή των γεωφυσικών διασκοπήσεων είναι δυνατόν να οργανωθούν στοχευμένες ανασκαφές και απαλλοτριώσεις, περιορίζοντας το κόστος και τον απαιτούμενο χρόνο, καθώς και να αποκλειστούν θέσεις αν δεν παρουσιάσουν ενδείξεις θαμμένων ερειπίων. Με αρχή αυτή την μελέτη ελπίζουμε ότι η καλή συνεργασία μεταξύ των δυο επιστημονικών κλάδων – γεωφυσικής και αρχαιολογίας – θα επιτύχει να δώσει μια πληρέστερη εικόνα της ευρύτερης περιοχής του Άργους στις διάφορες χρονικές περιόδους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aitken M.J., Webster, G., Rees, G. 1958. Magnetic prospecting, Antiquity 32, pp 270-271,.
- Argote, D. L., Tejero, A., Chávez, R. E., López. P. A., and Bravo R., 2009. 3D modelling of magnetic data from an archaeological site in north-western Tlaxcala state, Journal of Archaeological Science, Mexico, 36 1661–1671.
- Bannert, D., Kalkreuth, W. and Wallner, 1984. Geological map scale 1:50.000. Sheet of Nafplion. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, Greece.
- Bevan, B. W., and Roosevelt, A. C., 2003, Geophysical exploration of Guajarà a prehistoric earth mound in Brazil, Geoarchaeology, 18 (3) 287-331.
- Blakely, R. J. and R. W. Simpson, 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies, Geophysics, 51(7), 1494-1498.
- Blakely, R. J., 1995, Potential theory in gravity and magnetic applications:Cambridge University Press, New York.
- Boschetti, F., Hornby, P., and Horowitz, F., 2001, Wavelet based inversion of gravity data: Exploration Geophysics, 32, 48–55.
- Bracewell, R 1965 The Fourier Transform and Its Applications. New York: McGraw-Hill,
- Brothwell, D.R and Pollard, A.M. (eds) 2001. Handbook of archaeological sciences Chichester: John Wiley and Sons.
- Campbell, K. W. (1997), Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra, *Seismological Research Letters*, 68(1), 154 -179.
- Chui, C.K., 1992. An Introduction to Wavelets. Academic Press, New York.
- Clark, A J, 1996, Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology Revised Edition, BT Batsford Ltd. London.
- Cole, M A, Linford, N T, Payne, A P and Linford, P K 1995. Soil magnetic susceptibility measurements and their application to archaeological site investigation, in J Beavis and K Barker (eds), Science and Site: Evaluation and Conservation, Bournemouth University Occas Pap 1, 114–62.

- Conyers, L. B., 2004, Ground penetrating radar for archaeology. Altamira press, Walnut Creek, California.
- Conyers, L. B., E. G. Ernenwein and L. Bedal 2002 Ground-Penetrating Radar Discovery at Petra, Jordan. Antiquity 76:339-340.
- James W. Cooley & John W. Tukey 1965: "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series", Math. Comput. 19, 297–301
- Courbin, P., 1963, Strartigraphie et Stratigraphie: methods et perspectives In: Etudes archéologiques Paris pp. 59-102.
- Crochiere, R. E. and Rabiner, L. R. 1983. Multirate Digital Signal Processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Daniels, D.J., 2004. Ground Penetrating Radar. 2nd Edn., The Institution of Electrical Engineers, London,
- Darby, E. K., and E. B. Davies, 1967 The analysis and design of two-dimensional filters for two-dimensional data: Geophysical Prospecting, v. 15, p. 383-406.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical prospecting, Vol. 37, p. 531-551
- Daubechies, I., 1992. Ten lectures on wavelets 10 lectures on wavelets CBMS-NSF regional conference series in applied Society for industrial and applied mathematics.,.
- Diamanti N G, Tsokas G N, Tsourlos P I and Vafidis A 2005 Integrated interpretation of geophysical data in the archaeological site of Europos (Northern Greece) Archaeological Prospection 12 79-91.
- Donoghue D N M Powlesland D J and Pryor C 1992 Integration of remotely sensed and ground based geophysical data for archaeological prospecting using a geographic information system In: Proc. of the 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society Cracknell A P and Vaughan R A (Eds.) University of Dundee 197-207.
- Drahor M G 2006 Integrated geophysical studies in the upper part of Sardis archaeological site, Turkey Journal of Applied Geophysics 59 205-223.
- Elkins, Thomas A., 1951 The second derivative method of gravity interpretation: Geophysics, v. 16, p. 29-50.
- English Heritage 2008 Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation English Heritage: Swindon pp. 60.

- Eppelbaum L V Khesin B E and Itkis S E 2009 Archaeological geophysics in arid environments: Examples from Israel Journal of Arid Environments doi:10.1016/j.jaridenv.2009.04.018.
- Fischer, P.M., Follin, Sven G.W., and Ulriksen, P. (1980). Subsurface interface radar survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus. In Peter M. Fischer, Ed., Applications of Technical Devices in Archaeology, pp. 48-51. Studies in Mediterranean Archaeology 63. P. Astrom: Goteborg, Sweden.
- Foster E Hackens T 1969 Decco metal detector survey on Delos Archaeometry 11 165-172.
- Fuller, B. D., 1967 Two-dimensioal frequency analysis and design of grid operators:Mining Geophysics, v. 2, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa,Oklahoma.
- Gaffney C and Gater J 2003 Revealing the buried past: geophysics for archaeologists Stroud: Tempus.
- Gaffney C F Gater J A Linford P Gaffney V L and White R 2000 Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the Roman City of Wroxeter Archaeological Prospection 7 81–99.
- Geoarchaeology (n.d.), 2010. The Concise Oxford Dictionary of Archaeology. Retrieved January 21, 2010, from Answers.com Web site: <u>http://www.answers.com/topic/geoarchaeology-1</u>
- Goulty, N.R., Thatcher, J.S., Findlay, M.J., Kragh, J.E. and Jackson, P.D. 1990. Experimental investigation of cross-hole seismic techniques for shallow coal exploration. Quarterly Journal of Engineering Geology 23, 217-228.
- Grauch, V. J. S. and L. Cordell, 1987, Limitations on determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data, Geophysics, 52(1), 118-121.
- Gupta, V. K. and N. Ramani, 1980. Some aspects of regional–residual separation of gravity anomalies in a Precambrian terrain. Geophysics, 45, 1412–1426
- Hsu, H. P., 1970, Fourier analysis: New York, Simon and Schuster.
- Ioannis, L., F., Prospecting for voids with vertical radar profiling. Proceedings of the 9th international congress of the geological society of Greece. Athens, September, 2010, XXXIV, No 4, pp 1363-1370.
- Kahaner, D., Moler, C., and Nash, S., Numerical Methods and Software, Prentice Hall, Englewood Clis, 1989

Karpodinis-Dimitriadis E 1994 Peloponnese: A travel guide of museums, monuments and archaeological sites Athens Publishing S.A. pp. 62-71 Athens.

- Katsonopoyloy, D., 2010. Earth science applications the field of archaeology: the Helike example. Proceedings of the 12th international congress of the geological society of Greece. Patras, May, 2010, XLIII, No 2, pp 812-820.
- Kvamme K L 1989 Geographic Information Systems in regional archaeological research and data management In: Archaeological Method and Theory Schiffer M B (Ed.) 1 139-203.
- Kvamme K L 2001 Current practices in archaeogeophysics In: Earth Sciences and Archaeology (Eds. P Goldberg, V T Holliday and C R Ferring) pp. 353-384 Kluwer Academic/Plenum New York.
- Le Borgne, E. (1955), Susceptibilite magnetique anormale du sol superficiel, Ann. Geophys., 11, 399–419.
- Le Borgne, E. (1960), Influence du feu sur les proprietes magnetiques du sol et sur celles du schiste et du granite, Ann. Geophys., 16, 159–195.
- LinfordN2005 Archaeological applications of naturally occurring nanomagnets Int. Conf. on Fine Particle Magnetism (London, 20–22 September 2004) J. Phys. Conf. Ser. 17 127–44
- Lopez-Loera H Urrutia-Fucugauchi J Comparan-Elizondo J L Castillo-Torres R Ponce-Juarez R Jarquin-Pacheco A M and Martinez-Vargas E 2000 Magnetic study of archaeological structures in La Campana, Colima, western Mesoamerica Journal of Applied Geophysics 43 101-116.
- Louis et al. 2005 Filippos I. Louisa, b, Roger A. Clarka, Ioannis F. Louis, Costas C. Makropoulos Nondestructive imaging of small size voids at Akrotiri archaeological site, Thera Island, Greece, by seismic inversion techniques Journal of Applied Geophysics 57 (2005) 306–326
- Maher, B. A. 1986, Characterization of soils by mineral magnetic measurements, Phys. Earth Planet. Inter, 42, 76–92.
- Maschner H D G 1996 Geographic Information Systems in Archaeology In New Methods, Old Problems: GIS in Modern Archaeological Research Maschner H D G (ed) 1-23 Center for Archaeological Investigation Southern Illinois University at Carbondale.
- Mesko, C. A., 1966 Two-dimensional filtering and the second derivative method: Geophysics, v. 31, p. 606-617.

- Monaghan G W and Lovis W A 2005 Modelling Archaeological Site Burial in Southern Michigan: A Geoarchaeological Synthesis Michigan State University Press East Lansing MI.
- Nabighian, M. N., 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundametal relations, Geophysics, 40(6), 780-786.
- Negri S and Leucci G 2006 Geophysical investigation of the Temple of Apollo (Hierapolis, Turkey) Journal of Archaeological Science 33 1505-1513.
- Oldham, C. H. G., 1967 The (sin x)/ x (sin y) / y method for continuation of potential fields: Mining Geophysics, v. 2, p. 591-605.
- Papadopoulos N Sarris A Yi M-J and Kim J-H 2009 Urban archaeological investigations using surface 3D Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography methods Exploration Geophysics 40 (1) 56-68.
- Papamarinopoulos S.P. Geophysical surveys at sites of archaeological importance and the solution of their problems raised by agricultural and urban development. Laboratory of geophysics, pp 48, University of Patras 1988.
- Papamarinopoulos S.P Sarris A. 1992 Geophysical studies in ancient Mantinea comparative results. Poster (Archaeometry 92 ') Los Angeles
- Papamarinopoulos S.P. 1994 Geophysical investigations with the georadar in the middle of Athens Syntagma square and the discovery of the subterranean river Eridanos. GPR94. Proceedings of 5th international conference in gpr Kitchener Ontario:Waterloo
- Papastamatiou I Vetoulis D Tataris A Christodoulou G Bornovas I Lalechos N and Kounis G 1970 Geological map scale 1:50.000. Sheet of Argos I.G.M.E. Athens Greece.
- Parasnis, D. S., 1997. Principles of Applied Geophysics: 5th edition, Chapman and Hall, London, England, 400 p
- Patella D and Hesse D A 1999 Electric, Magnetic and Electromagnetic methods applied to cultural heritage Journal of Applied Geophysics Special Issue 41 135-311.
- Pattantyùs À 1986 Geophysical results in archaeology in Hungary Geophysics 51(3) 561-567.
- Pawlowski, and R. O. Hansen, 1990, Gravity anomaly separation by Wiener filtering: Geophysics, 55, 539

- Pawlowski R. S.,1994. Green's equivalent-layer concept in gravity band pass filters design Geophysics 59 (1):96-67
- Phillips, J. D., 1998. Processing and Interpretation of Aeromagnetic Data for the Santa Cruz Basin—Patagonia Mountains Area, South-Central Arizona, U.S. Geological Survey, Open-File Report 02-98.
- Pitéros Ch 1998 Contribution a la topographie Argienne. Le site, les remparts et quelques problèmes topographiques Recherches Franco-Helléniques III 179-210.
- Ralph, E. K. 1968. Cesium magnetometer survey, Elis, Greece. MASCA. Newsletter 4 1-2.
- Ralph E K, Morrison F and O'Brien D 1968 Archaeological surveying utilizing a highsensitivity difference magnetometer Geoexploration 6 109–22
- Ralph 2007 comparison of a proton and a rubidium magnetometer for archaeological prospecting Archaeometry Volume 7, Issue 1, pages 20–27, June 1964
- Roest, W. R., J. Verhoef, and M. Pilkington, 1992, Magnetic interpretationusing the 3-D analytic signal: Geophysics, 57, 116–125.
- Renfrew, C., 1976. Archaeology and the earth sciences. In: Geoarchaeology: Earth Science and the Past (Eds D.A. Davidson & M.L. Shackley), Duckworth, London, pp. 1-5.
- Roest,W.R., Verhoef, Jacob, and Pilkington, Mark, 1992, Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: Geophysics, v.57, no.1, p.116-125.
- Rudant J P Thalmann J P 1976 Mallia, prospection géophysique Bulletin de Correspondance Hellénique 100 833-837.
- Sambuelli L Socco L V and Brecciaroli L 1999 Acquisition and processing of electric, magnetic and GPR data on a Roman site (Victimulae, Salussola, Biella) Journal of Applied Geophysics 41 189-204.
- Sarris A and Jones R 2000 Geophysical and related techniques applied to archaeological survey in the Mediterranean: A Review Journal of Mediterranean Archaeology 13 (1) 3-75.
- Sarris A Dunn R K Rife J L Papadopoulos N Kokkinou E and Mundigler C 2007 Geological and geophysical investigations in the Roman Cemetery at Kenchreai (Korinthia), Greece Archaeological Prospection 14 1-23.
- Sarris A Peraki E Chatzoyiannaki N Elvanidou M Kappa E Kakoulaki G Karimali E Katifori M Kouriati K Papadakis G Papadopoulos N Papazoglou M Trigkas V

and Athanasaki K 2006 Digital Archaeological Atlas of Crete http://digitalcrete.ims.forth.gr/ index.php?I=2.

- Sarris A Psichogiou O Papadopoulos N Dogan M Stamos A Karagiannis Y and Koustas G 2008 Archaeological prospection research project: Portitses, Argos Archaeo-Telepiskopika Nea Newsletter Sarris A (ed) 4 Rethymno Crete.
- Savvaidis, A., Tsokas G. N., Tsoyrlos, P., Vargemezis, G., A Geophysical Survey in the archaeological site of Archontiko, Yanitsa. Proceedings of the 9th international congress of the geological society of Greece. Athens, September, 2010, XXXIV, No 4, pp 1379-1383.
- Schmidt A 2007 Archaeology, magnetic methods In D Gubbins and E Herrero-Bervera (eds) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism 23-31 Encyclopedia of Earth Sciences Series Heidelberg New York Springer.
- Scollar, I., Weidner, B., and Segeth, K. (1986). Display of archaeological magnetic data. Geophysics 51, 623 633.
- Sheets, P.D., Loker, W.M., Spetzler, H.A.W., and Ware, R.W. (1985). Geophysical Exploration for Ancient Maya Housing at Ceren, El Salvador. National Geographic Research Reports 20, 645-656 Stove, G.C., and A Campbell, W.H., Introduction to Geomagnetic Fields (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- Smekalova T N Voss O Smekalov S L 2005 Magnetic survey in archaeology. 10 years of using of Overhauser GSM-19 gradiomenter Saint Petersburg Publishing house of Polytechnic University 68 p.
- Smith, J. O., and P. Gossett. 1984. A Flexible Sampling-Rate Conversion Method.' Pages 19.4.1-19.4.2 of: Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, San Diego, vol. 2.New York: IEEE Press
- Stern,W., 1929, versucht einer electrodynamiscen Dickenmessung von Gletschereis. Beitrage zun geophysik32:p292-333
- Stine R S Lanter D P 1990 Considerations for archaeology database design In: Interpreting Space: GIS and Archaeology Allen K M S Green S W and Zubrow E B W (Eds.) Taylor and Francis London 80-89.
- Tataris, A., Kallergis, G. and Kounis, G., 1970. Geological map scale 1:50.000. Sheet of Ligourion. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens, Greece.
- Telford W M, Geldart L R and Sheriff R E 1998 Applied Geophysics 5th ed Cambridge University Press Cambridge.
- Thurston, J. B. and R. S. Smith, 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPItm method, Geophysics, 62(3), 807-813.
- Tsokas G N, Giannopoulos A, Tsourlos P, Vargemezis G, Tealby J M, Sarris A, Papazachos C B and Savopoulou T 1994 A large scale geophysical survey in the archaeological site of Europos (northern Greece) Journal of Applied Geophysics 32 85-98.
- Tsokas G N, Rocca A Ch and Papazachos B C 1986 Magnetic prospecting at the Prehistoric site of the village Mandalo in Northern Greece P.A.C.T. 15 143-152.
- Tsokas G N, Sarris A, Pappa M, Bessios M, Papazachos C B, Tsourlos P and Giannopoulos A 1997 A large-scale magnetic survey in Makrygialos (Pieria), Greece Archaeological Prospection 4 123-137.
- Tucker P.H. High magnetic effect of Lateritic soils in Cuba Geophysics 17, pp 753-757, 1952.
- Tzanis, A., 2010. matGPR Release 2: A freeware MATLAB® package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data, FastTimes, 15 (1), 17 – 43.
- Tzanis, A., 2010b.matGPR Release 2: Manual and Technical Reference, http://users.uoa.gr/~atzanis/matgpr.matgpr.html
- Ueda M., Lodha S. 1995, Wavelets: an elementary introduction and examples, University of California, Santa Cruz.
- Vafidis A, Manakou M, Kritikakis G, Voganatsis D, Sarris A and Kalpaxis T 2003 Mapping the ancient port at the archaeological site of Itanos (Greece) using shallow seismic methods Archaeol. Prospect. 10 163–73
- Vafidis A Economou N Ganiatsos Y Manakou M Poulioudis G Sourlas G Vrontaki E Sarris A Guy M and Kalpaxis Th 2005 Integrated geophysical studies at ancient Itanos (Greece) Journal of Archaeological Science 32 1023-1036.
- Vargemezis, G., Fikos, H., Mertzanidis I., Zananiri, I., 2010. Γεωφυσική έρευνα εντοπισμού θαμμένων απολιθωμένων κορμών στο απολιθωμένο δασός Συγρίου της νήσου Λέσβου. Proceedings of the 9th international congress of the geological society of Greece. Athens, XXXIV, No 4, pp 1285-1291.

- Vickers, R., L. Dolphin, and D. Johnson. 1976. Archaeological investigations at Chaco Canyon using subsurface radar. 81-101 pp. IN: Remote Sensing Experiments in Cultural Resource Studies, assembled by Thomas R. Lyons, Chaco Center, USDI-NPS and University of New Mexico
- Weymouth J W and Lessard Y A 1986 Simulation studies of diurnal corrections for magnetic prospection Prospezioni Archaeologiche 10 37-47.
- Wynn, J. C., 1986, Archaeological prospection-- an introduction to the special issue: Geophysics 51, 533-537.
- Yalçiner. C.H., M. Bano a, M. Kadioglu, V. Karabacak, M. Meghraoui, E. Altunel 2009 New temple discovery at the archaeological site of Nysa (western Turkey)using GPR method Journal of Archaeological Science 36 (2009) 1680– 1689
- Zananiri, I. and Zervakou, A., 2008. Geoarchaeological survey at the broader Argos area, Argolis Prefecture. Institute of Geology & Mineral Exploration, Athens, pp. 32.
- Zananiri, I., 2009. Geomagnetic survey at the city of Argos, Argolis Prefecture. Institute of Geology & Mineral Exploration, Athens, pp. 26.
- Zananiri, I., Chiotis, E., Tsombos, P., Hademenos, V., and Zervakou, A., 2010. Geoarchaeological studies in urban and suburban areas of the Argolis prefecture, Greece. Proceedings of the 12th international congress of the geological society of Greece, Patras, May, 2010, XLIII, No 3, pp 1539-1548
- Zananiri, I., Hademenos, V. and Piteros, Ch., 2010. Geophysical investigations near the ancient Agora at the city of Argos, Greece. Journal of Geophysics and Engineering, Vol. 7.
- Zurflueh, E.G. 1967. "Applications of Two-Dimensional Linear Wavelength Filtering. Geophysics. 32(6):1015-1035.
- Λούης. Ι. Εισαγωγικά Μαθήματα Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής
- Παυσανίου 1903 Ελλάδος Περιήγησις, Βιβλίο ΙΙ: Κορινθιακά ed F Spiro Leipzig Teubner (M l'abbé Gedoyn 1731 Pausanias: Voyage historique de la Grèce / traduit en François. Tome douzième chez Didot Paris).
- Τζάνης 2009 Στοιχεία από τον Ηλεκτρομαγνητισμό 4^η αναθεώρηση Αθηνά
- Τσόκας Γ.Ν. Ανάπτυξη των γεωφυσικών εφαρμογών σε αρχαιολογικούς χώρους στην Ελλάδα. Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, pp 491-500, Θεσσαλονίκη 1988.