



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ – ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

Θέμα διατριβής ειδίκευσης:

Αντιστροφή διαφορικών μαγνητικών δεδομένων στην εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων



Μεταπτυχιακός φοιτητής:

ΤΑΣΣΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: ΤΣΟΚΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ, Καθηγητής Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής
ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Γεωφυσικής
ΤΣΟΥΡΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ, Επίκουρος Καθηγητής Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2005

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ	
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη.....	9
1.3 Μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της Γης.....	11
1.3.1 Χαρακτηριστικά του γήινου μαγνητικού πεδίου.....	11
1.3.2 Παρατηρούμενες μεταβολές.....	12
1.4 Μαγνήτιση και μαγνητική επιδεκτικότητα των πετρωμάτων.....	14
1.4.1 Μαγνήτιση.....	14
1.4.2 Μαγνητική επιδεκτικότητα.....	14
1.4.3 Μαγνητικά υλικά.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΤΗΝ	
ΕΞΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ	
2.1 Εισαγωγή – Περίληψη της μεθόδου.....	17
2.2 Θεωρητική εξέταση των μαγνητικών μεθόδων στην αρχαιολογική έρευνα.....	18
2.2.1 Απαιτούμενα μεγέθη.....	19
2.2.2 Μαγνητικές ιδιότητες του εδάφους.....	19
2.3 Όργανα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου.....	20
2.3.1 Μαγνητόμετρο ελεύθερης μετάπτωσης πρωτονίου.....	20
2.3.2 Μαγνητόμετρο Καισίου-Ρουβιδίου.....	20
2.3.3 Μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής.....	20
2.4 Ανωμαλίες που οφείλονται σε τοπικές δομές.....	21
2.5 Εφαρμογή της μεθόδου και σχεδιασμός μιας διασκόπησης.....	23
2.5.1 Προκαταρκτικές ενέργειες.....	23
2.5.2 Σχεδιασμός και χάραξη καννάβου.....	24
2.5.3 Μέγεθος κελιού.....	25
2.5.4 Διάστημα όδευσης και δειγματοληψίας.....	26
2.5.5 Τρόπος όδευσης.....	26
2.5.6 Ύψος αισθητήρων.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ	
3.1 Εισαγωγή.....	28
3.2 Γραμμική αντιστροφή.....	30
3.2.1 Μαγνήτιση ενός στρώματος.....	30
3.3 Καθορισμός της διεύθυνσης μαγνήτισης.....	32
3.3.1 Ομοιόμορφη μαγνήτιση.....	32
3.3.2 Ανομοιόμορφη μαγνήτιση.....	33
3.4 Μη γραμμική αντιστροφή.....	33

3.5 Σχήμα της πηγής.....	33
3.5.1. Επαναληπτικές μέθοδοι.....	34
3.5.2 Μετατροπή του μη-γραμμικού σε γραμμικό.....	34
3.6 Δισδιάστατες μαγνητικές ανωμαλίες.....	34
3.6.1 Εξίσωση Euler.....	34
3.6.2 Αποσυνέλιξη Werner.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - ΑΝΟΡΘΩΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ	
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Αναγωγή στον πόλο (Reduction to the pole).....	39
4.3 Μέθοδος των αναβαθμίδων (Terracing).....	41
4.4 Φίλτρα αντιστροφής – Γενικά.....	41
4.5 Μονοδιάστατα (1D) φίλτρα αντιστροφής.....	42
4.5.1 Εκτίμηση του φίλτρου.....	42
4.5.2 Καταλληλότητα των φίλτρων στην Αρχαιομετρία.....	43
4.5.3 Ανταπόκριση των φίλτρων στην κατά βάθος μεταβολή.....	45
4.5.4 Πλευρική ανάλυση της διαδικασίας.....	47
4.5.5 Αποτέλεσμα αποκοπής του φίλτρου.....	48
4.6 Δισδιάστατα (2D) φίλτρα αντιστροφής.....	49
4.6.1 Το συνελκτικό μοντέλο.....	49
4.6.2 Βοηθητικές σημειώσεις στην εφαρμογή της μεθόδου.....	52
4.6.3 Εφαρμογή 2D φίλτρων σε συνθετικά δεδομένα.....	53
4.7 Σύγκριση φίλτρων αντιστροφής και αποσυνέλιξης Werner.....	56
4.7.1 Αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών.....	56
4.7.2 Εφαρμογή της αποσυνέλιξης Werner πολλαπλών πηγών και των φίλτρων αντιστροφής σε συνθετικά δεδομένα.....	57
4.7.3 Αποτελέσματα σύγκρισης των δυο μεθόδων.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ	
5.1 Λογισμικό κατασκευής φίλτρων αντιστροφής.....	62
5.2 Εφαρμογή σε συνθετικά δεδομένα.....	65
5.2.1 Κατά βάθος μεταβολή των στόχων.....	67
5.2.2 Διακριτική ικανότητα των στόχων.....	72
5.2.3 Προσανατολισμός των στόχων.....	77
5.2.4 Στόχοι πολύπλοκου σχήματος.....	78
5.2.5 Επίδραση θορύβου στην αναγνώριση στόχων.....	85
5.2.6 Σύνθετο μοντέλο προσομοίωσης ερειπίων.....	90
5.3 Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα.....	93
5.3.1 Εφαρμογή φίλτρων αντιστροφής σε δεδομένα ολικού πεδίου από την περιοχή του Μακρύγιαλου με τη χρήση του υπάρχοντος λογισμικού.....	93
5.3.2 Εφαρμογή φίλτρων αντιστροφής σε διαφορικά δεδομένα με τη χρήση του νέου λογισμικού.....	95

5.3.3 Εφαρμογή σε δεδομένα από τον αρχαιολογικό χώρο της Αυγής.....	96
5.3.4 Εφαρμογή σε δεδομένα από τον αρχαιολογικό χώρο της Μαρώνειας.....	99
5.3.5 Εφαρμογή σε δεδομένα από τον αρχαιολογικό χώρο της Νησίδας Μήτρου.....	101
5.3.6 Εφαρμογή σε δεδομένα από τον αρχαιολογικό χώρο της Σπάρτης.....	102
5.4 Συμπεράσματα.....	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	105
<i>I. Κώδικας FORTRAN εφαρμογής φίλτρων αντιστροφής.....</i>	<i>105</i>
<i>II. Κώδικας διάσπασης και συγκόλλησης καννάβου 40x40.....</i>	<i>112</i>
<i>III. Κώδικας αναδιάταξης γραμμών ενός αρχείου σε στήλες και τανάπαλιν.....</i>	<i>116</i>
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	118

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή με τίτλο «αντιστροφή διαφορικών μαγνητικών δεδομένων στην εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων» εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του τομέα Γεωφυσικής του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η ανάθεση του έγινε από τον καθηγητή Γεωφυσικής, κύριο Γ. Ν. Τσόκα τον Μάρτιο του 2004.

Κύριος στόχος της ήταν η ανόρθωση του διαφορικού μαγνητικού σήματος με τη χρήση φίλτρων αντιστροφής. Η συγκεκριμένη διαδικασία έλαβε χώρα μέσω προγράμματος FORTRAN το οποίο αναπτύχθηκε με βάση ήδη υπάρχον λογισμικό της περίπτωσης του ολικού πεδίου. Το παλαιότερο πρόγραμμα είχε κατασκευαστεί από τους Τσόκα και Παπαζάχο το 1992. Η αποτελεσματικότητα του προγράμματος αυτού δοκιμάστηκε τόσο σε συνθετικά όσο και σε πραγματικά δεδομένα και στην κατεύθυνση του αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής έγινε μια γενική αναφορά στις ποσότητες και τα χαρακτηριστικά εκείνα του μαγνητικού πεδίου της Γης τα οποία υπεισέρχονται στην συγκεκριμένη διαδικασία αντιστροφής και των οποίων γίνεται εκτενής αναφορά και χρήση στη συνέχεια. Σκοπός της παραγράφου αυτής είναι να αναφερθεί περιληπτικά στις βασικές αρχές της μεθόδου και να υπενθυμίσει τον τρόπο με τον οποίο ορίζεται το γήινο μαγνητικό πεδίο.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται σε πρακτικά ζητήματα της εφαρμογής των μαγνητικών μεθόδων κατά την εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων. Έτσι γίνεται μια πιο λεπτομερής αναφορά στην επίδραση την οποία έχει ένα μαγνητικό σώμα στο πεδίο της Γης με βάση τις ποσότητες που περιγράφηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Επίσης περιγράφονται διάφοροι τρόποι βελτιστοποίησης της λήψης μετρήσεων που ουσιαστικά αφορούν σε πιο πρακτικά ζητήματα σχεδιασμού μιας διασκόπησης στο ύπαιθρο. Επομένως γίνεται κατανοητό το πώς λαμβάνονται οι μετρήσεις τις οποίες επεξεργαζόμαστε στη συνέχεια και ποια είναι τα χαρακτηριστικά αυτών που παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην τελική ποιότητά τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται θεωρητική εξέταση της αντιστροφής. Γίνεται αναφορά σε διάφορες περιπτώσεις αντιστροφής με βάση τα χαρακτηριστικά του σώματος που διερευνάται καθώς και στις μαθηματικές ατέλειες της μεθόδου. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με ανάπτυξη της αποσυνέλιξης Werner ως μια από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους στην ερμηνεία δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό έχει τεθεί το γενικό θεωρητικό πλαίσιο της περαιτέρω διαδικασίας.

Με το τέταρτο κεφάλαιο ξεκινά η εμβάθυνση στο θέμα μας. Το κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στα φίλτρα αντιστροφής, μονοδιάστατα και δισδιάστατα. Αρχικά γίνεται μια μικρή αναφορά σε δυο επιμέρους μεθόδους ανόρθωσης μαγνητικού σήματος, την αναγωγή στον πόλο και την μέθοδο των αναβαθμίδων. Παρουσιάζονται επίσης πολλά παραδείγματα πρότερης επεξεργασίας με φίλτρα αντιστροφής καθώς και μια σύγκριση των μεθόδων των φίλτρων αντιστροφής και της αποσυνέλιξης Werner με βάση παλαιότερες δημοσιεύσεις πάνω στο θέμα.

Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει ουσιαστικά την εργασία που έλαβε χώρα για την παρούσα διατριβή. Αρχικά παραθέτει πληροφορίες σχετικά με το πρόγραμμα FORTRAN που αναπτύχθηκε και δίνεται μια περιγραφή της λειτουργίας του καθώς και των παραμέτρων τις οποίες χρησιμοποιεί. Στη συνέχεια παρατίθενται αρκετά παραδείγματα

δοκιμών σε συνθετικά δεδομένα για ποικιλία περιπτώσεων. Τα αποτελέσματα τους αξιολογούνται σε πρώτη φάση σε αυτό το σημείο. Αμέσως μετά ακολουθεί δοκιμή τόσο του παλιού όσο και του νέου λογισμικού σε κατάλληλα πραγματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα επίσης αξιολογούνται παράλληλα, ενώ στο τέλος γίνεται μια συνολική και συγκεντρωτική παρουσίαση όσων εξάχθηκαν από τη διαδικασία αυτή.

Στο παράρτημα που βρίσκεται μετά το τέλος του πέμπτου κεφαλαίου μπορούν να βρεθούν οι κώδικες όλων των προγραμμάτων που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη διατριβή – το κυρίως πρόγραμμα της αντιστροφής καθώς και το πρόγραμμα διάσπασης και συγκόλλησης δεδομένων ενός καννάβου 40x40 μαζί με ένα πρόγραμμα αναδιάταξης των δεδομένων ενός πίνακα. Η παρούσα διατριβή ειδίκευσης ολοκληρώνεται με την παράθεση της σχετικής βιβλιογραφίας.

Η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την συμβολή ορισμένων ανθρώπων. Αρχικά νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω πάνω από όλους τους την οικογένεια μου, τους γονείς μου Αθανάσιο και Παναγιώτα και την αδερφή μου Μιμικά. Τίποτα από όλα αυτά δεν θα μπορούσε να είχε γίνει χωρίς τις θυσίες τους, οικονομικές και ψυχικές. Ελπίζω όσα έχω κάνει στην μέχρι σήμερα ακαδημαϊκή μου πορεία να τους ικανοποιεί σαν ηθική τουλάχιστον επιβράβευση όλων όσων μου παρείχαν στα 7 χρόνια της παρουσίας μου στη Θεσσαλονίκη.

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή Γεωφυσικής κύριο Τσόκα Γρηγόρη για την ανάθεση αρχικά του θέματος και εν συνεχεία για την υπέροχη συνεργασία την οποία είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Είναι δύσκολο γενικά να κάνει κάποιος κάτι που είναι ενδιαφέρον για τον ίδιο αλλά μπορώ με σιγουριά να πω πως απόλυτα πραγματικά κάθε στιγμή ενασχόλησης μου με το θέμα. Επίσης τον ευχαριστώ για την γνώση την οποία μου παρείχε σε όλες τις εκφάνσεις της συνεργασίας μας. Στα δυο εναπομείναντα μέλη της τριμελούς μου επιτροπής οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ. Στον επίκουρο καθηγητή Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής Τσούρλο Παναγιώτη για τις χρήσιμες παρατηρήσεις του οι οποίες μεταφράστηκαν σε χρήσιμες προσθήκες κατά την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Στον αναπληρωτή καθηγητή Παπαζάχο Κωνσταντίνο για τις τεχνικές συμβουλές του κατά την ανάπτυξη του προγράμματος και για την βοήθεια στην κατανόηση του παλιού λογισμικού. Ευχαριστώ επίσης το μέλος του μονίμου προσωπικού του εργαστηρίου Γεωφυσικής Σταμπολίδη Αλέξανδρο για την βοήθεια που μου παρείχε σε διάφορα θέματα της διατριβής αυτής και για την γενικότερη επικοινωνία που είχαμε.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους με τους οποίους δουλέψαμε μαζί στο ύπαιθρο. Μαζί με τους προαναφερθέντες ευχαριστώ τους Βαργεμέζη Γιώργο (Λέκτορας), Διαμαντή Ρία, Καραούλη Μάριο, Κυριακίδου Αλεξάνδρα και Μπογιατζή Πέτρο για τις κουραστικές αλλά και όμορφες στιγμές που περάσαμε ως ομάδα στο Ελληνικό ύπαιθρο. Όλες οι εργασίες υπαίθρου στις οποίες συμμετείχα πέρα από τα οικονομικά τους οφέλη τις εκτιμώ ως τις πιο πλούσιες σε διδακτικό περιεχόμενο δραστηριότητές μου. Στη λίστα των παραπάνω συναδέλφων οφείλω να προσθέσω και τους συναδέλφους του υπογείου του Σεισμολογικού σταθμού Καραμάνο Χρήστο, Μεσσήνη Άννα και Τσαμπά Ανέστη για το υπέροχο κλίμα που δημιουργήσαμε και κάτω από το οποίο δουλέψαμε όλο αυτό τον καιρό. Ακόμη ένα ευχαριστώ αξίζει σε όλους τους υπόλοιπους συναδέλφους του σταθμού αλλά και του νέου κτιρίου οι οποίοι είναι πάρα πολλοί για να αναφερθούν αλλά γνωρίζουν ποιοι είναι

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σε όλους τους φίλους μου είτε μέσα είτε έξω από το Πανεπιστήμιο (Σπύρο, Αλέξανδρο, Δάκη, Δημήτρη, Στέφανο, Μαρία). Υπόχρεος είμαι στον φίλο μου Καράμπελα Στέφανο ο οποίος με φιλοξένησε στο μεσοδιάστημα μεταξύ προπτυχιακού και μεταπτυχιακού. Ζωή και Ελεάννα σας ευχαριστώ. Ευχαριστώ τέλος όλους όσους μου έβαλαν εμπόδια σε αυτή την πορεία μου.

*Γιώργος Τάσσης
Οκτώβριος 2005*



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Μαγνητικές Μέθοδοι

1.1 Εισαγωγή

Οι μαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης είναι οι παλιότερες μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης. Αρχικά οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό μεταλλευμάτων και κυρίως μεταλλευμάτων σιδήρου. Στη διασκόπηση πετρελαίου εφαρμόστηκαν μετά το 1920.

Η αρχή κάθε μεθόδου γεωμαγνητικής διασκόπησης βασίζεται στον εντοπισμό μεταβολών της **μαγνήτισης** των πετρωμάτων μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης με μετρήσεις στην επιφάνεια της Γης **μαγνητικών ανωμαλιών** μικρής κλίμακας, δηλαδή τοπικών μεταβολών της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου.

Οι μαγνητικές μέθοδοι είναι παρόμοιες με τις βαρυτομετρικές μεθόδους, αλλά η εφαρμογή τους είναι περισσότερο πολύπλοκη από την εφαρμογή των βαρυτομετρικών μεθόδων. Όμως, η γεωλογική ερμηνεία των μαγνητικών μετρήσεων είναι απλούστερη, γιατί είναι γνωστό ότι οι μαγνητικές ανωμαλίες που παρατηρούμε στην επιφάνεια της Γης οφείλονται σε μεταβολές της μαγνήτισης των πυριγενών ή κρυσταλλικών πετρωμάτων και όχι στα επιφανειακά ιζηματογενή πετρώματα τα οποία έχουν ασθενή μαγνήτιση.

Κατά την εφαρμογή των μαγνητικών μεθόδων για την ανίχνευση μεταλλευμάτων, επιδιώκεται ο εντοπισμός μεταλλευμάτων τα οποία έχουν μαγνητικές ιδιότητες ή ο εντοπισμός δομών οι οποίες έχουν μαγνητικές ιδιότητες και συνυπάρχουν με μη μαγνητικά υλικά οικονομικής σημασίας. Κατά τη γεωμαγνητική έρευνα για αναζήτηση πετρελαίου, καθορίζεται η δομή του θεμελιώδους μαγνητικού υποβάθρου το οποίο προδιαγράφει το πάχος και γενικά τις διαστάσεις των ιζημάτων.

1.2 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη

Μαγνητικές δυνάμεις δεν ασκούνται σε οποιοδήποτε σώμα που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, αλλά μόνο πάνω σε ορισμένα σώματα τα οποία λέγονται **μαγνητικά σώματα** (σίδηρος, νικέλιο, μαγνητίτης, κλπ.). Οι μαγνητικές δυνάμεις είναι ανάλογες ενός υποθετικού μεγέθους P , το οποίο λέγεται **ποσότητα μαγνητισμού** και μπορεί να είναι **βόρεια** (ή θετική) ποσότητα μαγνητισμού και **νότια** (ή αρνητική) ποσότητα μαγνητισμού.

Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb, το μέτρο F της δύναμης που ασκεί ορισμένη σημειακή ποσότητα μαγνητισμού P_1 , πάνω σε άλλη σημειακή μαγνητική ποσότητα P_2 , όταν η απόσταση των δύο αυτών ποσοτήτων είναι r δίνεται από τη σχέση

$$F = \frac{1}{\mu_0 \mu} \cdot \frac{P_1 P_2}{r^2}$$

όπου μ είναι σταθερά η οποία ονομάζεται **μαγνητική διαπερατότητα** και εξαρτάται από το υλικό που υπάρχει μεταξύ των δυο ποσοτήτων μαγνητισμού. Η ποσότητα μ_0 είναι σταθερά η οποία εξαρτάται από το σύστημα των μονάδων και έχει τιμή ίση με τη μονάδα στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων ($\mu_0 = 1$, στο emu) και τιμή ίση με $4\pi \cdot 10^{-7}$ (V sec/Am) στο SI. Η μαγνητική διαπερατότητα μ , είναι αδιάστατο μέγεθος και είναι ίση με τη μονάδα στο κενό και σχεδόν ίση με τη μονάδα στον αέρα.

Ένταση του μαγνητικού πεδίου, σε ορισμένο σημείο του, λέγεται ένα διανυσματικό μέγεθος H , που έχει τη διεύθυνση και φορά της μαγνητικής δύναμης που ασκείται πάνω σε θετική μαγνητική ποσότητα P , η οποία βρίσκεται στο σημείο αυτό και μέτρο το οποίο δίνεται από τη σχέση

$$H = \frac{F}{P}$$

όπου F είναι το μέτρο της μαγνητικής δύναμης η οποία ασκείται στη μαγνητική ποσότητα όταν ο χώρος είναι κενός ($\mu = 1$). Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση r από ορισμένη μαγνητική ποσότητα P , στην οποία οφείλεται το μαγνητικό πεδίο, δίνεται από τη σχέση

$$H = \frac{1}{\mu_0 \mu} \cdot \frac{P}{r^2}$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων είναι το 1 oe (= 1 oersted) και στο SI το 1 A/m, είναι δε $1 \text{ A/m} = 4\pi/1000 \text{ oe}$.

Η **μαγνητική ροπή** ενός μαγνητικού δίπολου, του οποίου οι ποσότητες μαγνητισμού $+P$, $-P$ απέχουν απόσταση l , είναι ένα διανυσματικό μέγεθος, M^* , που έχει τη διεύθυνση του l , φορά από τον αρνητικό προς τον θετικό πόλο και μέτρο που δίνεται από τη σχέση

$$M^* = P \cdot l$$

Υποθέτουμε ότι ένα μαγνητισμένο σώμα αποτελείται από στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα τα οποία τείνουν να αποκτήσουν τη διεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου όταν το σώμα τεθεί μέσα σε πεδίο. Έστω ότι η συνολική ροπή ενός μαγνητισμένου σώματος είναι M^* . Ονομάζουμε **μαγνήτιση** του σώματος ένα διανυσματικό μέγεθος J που έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική ροπή και μέτρο το οποίο δίνεται από τη σχέση

$$J = \frac{M^*}{V},$$

όπου V είναι ο όγκος του σώματος. Η μαγνήτιση μετριέται με τις ίδιες μονάδες με την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Όταν το μαγνητικό πεδίο, μέσα στο οποίο τοποθετείται ένα μαγνητικό σώμα δεν είναι πολύ ισχυρό, η μαγνήτιση την οποία αποκτάει το σώμα αυτό συνδέεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου με τη σχέση

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{H},$$

όπου κ είναι η **μαγνητική επιδεκτικότητα**, η οποία εξαρτάται από το υλικό του μαγνητικού σώματος, είναι αδιάστατο μέγεθος και συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα με τη σχέση

$$\kappa = 1 + 4\pi\mu$$

Όταν ένα σώμα μαγνητικής επιδεκτικότητας κ τοποθετηθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο έντασης H , θα δημιουργήσει πρόσθετο μαγνητικό πεδίο έντασης H' . Το νέο πεδίο που αποτελεί σύνθεση των δυο πεδίων θα χαρακτηρίζεται από ολική ένταση B , η οποία ονομάζεται **μαγνητική επαγωγή** και είναι μ φορές μεγαλύτερη από την ένταση που θα είχε το πεδίο αν δεν υπήρχε το σώμα μαγνητικής επιδεκτικότητας κ . Η μαγνητική επαγωγή είναι η ποσότητα την οποία μετράμε και ερμηνεύουμε κατά τη μαγνητική διασκόπηση, ορίζεται δε από τη σχέση

$$B = \mu_0 \mu \cdot H$$

όπου H είναι η ένταση του αρχικού μαγνητικού πεδίου.

Η μονάδα μέτρησης της B στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων είναι το 1 Gauss. Επειδή οι τιμές της έντασης που μετριοούνται στη μαγνητική διασκόπηση είναι μικρές, ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται συνήθως το 1 γ (= 1 γάμμα) που ορίζεται από τις σχέσεις

$$1 \gamma = 10^{-5} \text{ Gauss} \ \& \ 1 \gamma = 10^{-5} \text{ Oersted}$$

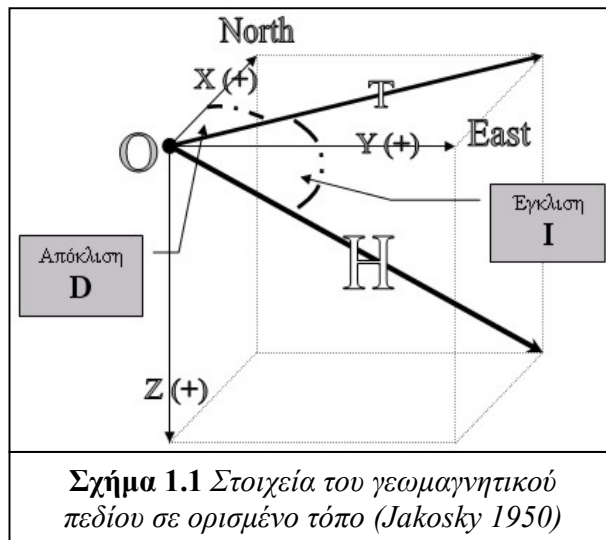
Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής στο SI είναι το 1 T (= 1 Tesla) = 10^4 Gauss. Επειδή 1 T = 10^9 nT (νανοτέσλα) θα είναι 1 γ = 1 nT.

1.3 Μεταβολές του μαγνητικού πεδίου της Γης

Το μαγνητικό πεδίο της Γης μεταβάλλεται από τόπο σε τόπο στην επιφάνεια της. Παρατηρείται επίσης και χρονική μεταβολή του πεδίου αυτού. Για το λόγο αυτό, το διάνυσμα της έντασης H του μαγνητικού πεδίου της Γης σε ορισμένο τόπο, πρέπει να προσδιορίζεται ως προς ορισμένο σύστημα αναφοράς για να είναι δυνατός ο καθορισμός των μεταβολών της έντασης.

1.3.1 Χαρακτηριστικά του γήινου μαγνητικού πεδίου

Ως σύστημα αναφοράς θεωρούμε ένα τρισσορθόγωνιο σύστημα αξόνων, που έχει αρχή το σημείο O , στο οποίο θέλουμε να προσδιορίσουμε το διάνυσμα της έντασης, ως άξονα x τη διεύθυνση $B-N$, ως άξονα y τη διεύθυνση $A-\Delta$ και ως άξονα z την κατακόρυφη διεύθυνση.



Αρχικά το διάνυσμα H αναλύεται στη κατακόρυφη συνιστώσα του Z , που θεωρείται θετική όταν έχει φορά προς τα κάτω και αρνητική προς τα πάνω, και στην οριζόντια συνιστώσα T . Η οριζόντια συνιστώσα αναλύεται στη μεσημβρινή συνιστώσα X , που θεωρείται θετική όταν έχει φορά προς B και αρνητική όταν έχει φορά προς N και στην συνιστώσα Y , που θεωρείται θετική όταν έχει φορά προς A και αρνητική όταν έχει φορά προς Δ . Το επίπεδο HOZ λέγεται **μαγνητικός μεσημβρινός** ενώ το επίπεδο XOZ είναι ο γεωγραφικός μεσημβρινός. Η γωνία D , που σχηματίζει η οριζόντια

συνιστώσα T , της έντασης του πεδίου με τη μεσημβρινή συνιστώσα X , δηλαδή, η γωνία μεταξύ του μαγνητικού και του γεωγραφικού μεσημβρινού, λέγεται **μαγνητική απόκλιση**. Αυτή λέγεται ανατολική αν η διεύθυνση της συνιστώσας T βρίσκεται μεταξύ B και A .

Η γωνία I , που σχηματίζει η ένταση H , του μαγνητικού πεδίου με την οριζόντια συνιστώσα T αυτής, λέγεται **μαγνητική έγκλιση**. Αυτή θεωρείται θετική ή αρνητική όταν η συνιστώσα Z είναι θετική ή αρνητική αντίστοιχα.

Αν θεωρήσουμε μαγνητική βελόνα στρεπτή γύρω από κατακόρυφο άξονα, αυτή θα στραφεί μέχρις ότου ο άξονας της έλθει στο επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινού, οπότε

ο άξονας αυτός θα σχηματίζει με τον άξονα X γωνία ίση με την απόκλιση D. Αν η μαγνητική απόκλιση είναι ανατολική, ο θετικός (βόρειος) πόλος της μαγνητικής βελόνας αποκλίνει προς τα ανατολικά του γεωγραφικού μεσημβρινού, ενώ, αν η μαγνητική απόκλιση είναι δυτική, ο πόλος αυτός της μαγνητικής βελόνας αποκλίνει προς τα δυτικά του γεωγραφικού μεσημβρινού.

1.3.2 Παρατηρούμενες μεταβολές

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια της Γης μεταβάλλεται τόσο κατά διεύθυνση όσο και κατά μέτρο από τόπο σε τόπο.

Υπάρχουν δυο σημεία κοντά στους γεωγραφικούς πόλους όπου η έγκλιση είναι ίση με 90^0 . Τα σημεία αυτά λέγονται **μαγνητικοί πόλοι** της Γης. Ο ένας από αυτούς λέγεται βόρειος μαγνητικός πόλος ($82.7B$, 114.4Δ) ενώ ο άλλος νότιος (65^0N , 139^0A). Όπως δείχνει η φορά των μαγνητικών γραμμών ο βόρειος μαγνητικός πόλος της Γης είναι αρνητικός και ο νότιος μαγνητικός πόλος αυτής είναι θετικός.

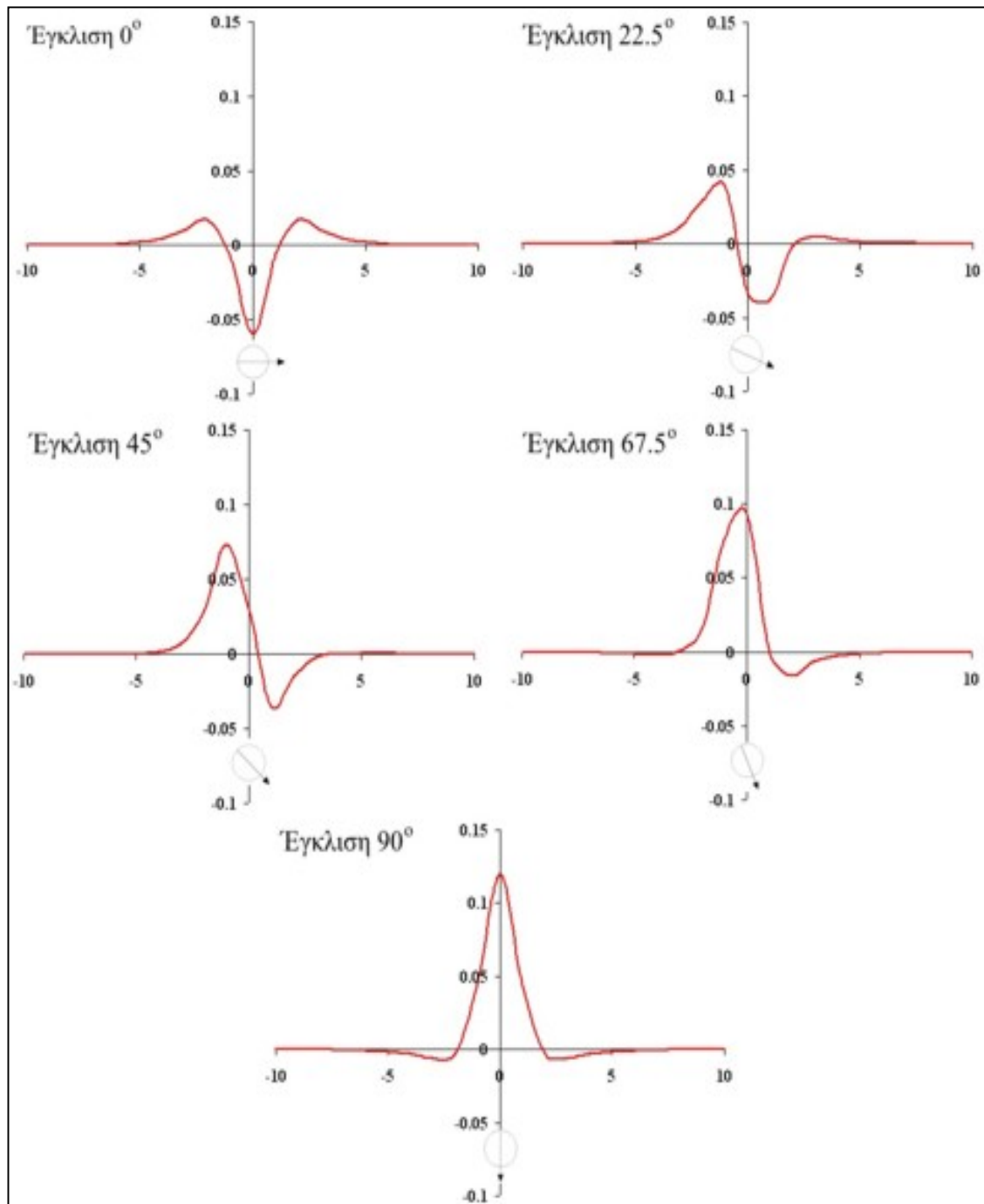
Σε ορισμένη κλειστή καμπύλη της επιφάνειας της Γης η έγκλιση έχει τιμή μηδέν, δηλαδή, η ένταση του πεδίου είναι οριζόντια. Η γραμμή αυτή περιβάλλει τη Γη κοντά στο γεωγραφικό ισημερινό και λέγεται **μαγνητικός ισημερινός**.

Το μαγνητικό πεδίο της Γης υφίσταται χρονικές μεταβολές που διακρίνονται σε **αιώνιες** και **παροδικές**. Οι αιώνιες μεταβολές δεν επηρεάζουν τις μαγνητικές διασκοπήσεις ενώ αντίθετα οι παροδικές τις επηρεάζουν. Αυτές διακρίνονται σε **κανονικές ή ημερήσιες** μεταβολές και σε **μη κανονικές**. Κατά την πραγματοποίηση των μαγνητικών παρατηρήσεων για τους σκοπούς της μαγνητικής διασκόπησης μπορούμε εύκολα να βρούμε την επίδραση της κανονικής μεταβολής πάνω στις μετρήσεις και να πραγματοποιήσουμε τις σχετικές διορθώσεις, γιατί αυτές παρουσιάζουν ομαλή ημερήσια πορεία. Όμως δεν μπορούμε εύκολα να λάβουμε υπόψη τις μη κανονικές μεταβολές κατά την πραγματοποίηση των μαγνητικών μετρήσεων για τους σκοπούς της μαγνητικής διασκόπησης γιατί αυτές παρουσιάζουν ανώμαλη εξέλιξη και πολλές φορές είναι εξαιρετικά έντονες (μαγνητικές καταιγίδες). Για το λόγο αυτό, πρέπει να αποφεύγεται η πραγματοποίηση μαγνητικών μετρήσεων για τους σκοπούς της μαγνητικής διασκόπησης κατά την εμφάνιση μη κανονικών μεταβολών του γεωμαγνητικού πεδίου.

Τη μαγνητική διασκόπηση ενδιαφέρουν οι **μαγνητικές ανωμαλίες**, δηλαδή οι διανυσματικές διαφορές μεταξύ της μαγνητικής επαγωγής που οφείλεται στη μαγνήτιση των πετρωμάτων μιας δομής και της μαγνητικής επαγωγής που οφείλεται στη μαγνήτιση των πετρωμάτων που περιβάλλουν τη δομή. Η μαγνητική ανωμαλία εξαρτάται από την αντίθεση μαγνήτισης και γι αυτό μεταβάλλεται από περιοχή σε περιοχή λόγω μεταβολής των στοιχείων του μαγνητικού πεδίου της Γης. Το σχήμα (1.2) παριστάνει τη μεταβολή της μαγνητικής ανωμαλίας κατά τη διεύθυνση B-N, που οφείλεται σε μαγνητισμένο πρίσμα, για πέντε διαφορετικές τιμές της μαγνητικής έγκλισης. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η μεταβολή της μαγνητικής ανωμαλίας με το γεωγραφικό πλάτος είναι σημαντική.

Στις μετρήσεις της βαθμίδας του μαγνητικού πεδίου δηλαδή στις διαφορικές μετρήσεις, οι ημερήσιες μεταβολές δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα και έτσι οι μετρήσεις αυτού του τύπου δεν είναι αναγκαίο να υποστούν οποιαδήποτε διόρθωση. Αυτό συμβαίνει γιατί αυτού του είδους οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με όργανα που φέρουν δυο αισθητήρες (φωρατές) σε κάποια απόσταση μεταξύ τους κατακόρυφα ή οριζόντια. Οι φωρατές καταγράφουν το σήμα ταυτόχρονα και αφαιρώντας τις δυο μετρήσεις μεταξύ

τους λαμβάνουμε τη διορθωμένη τιμή της έντασης του μαγνητικού πεδίου από την ημερήσια μεταβολή του.



Σχήμα 1.2 Μαγνητικές ανωμαλίες που οφείλονται σε μαγνητισμένο πρίσμα για πέντε τιμές της μαγνητικής έγκλισης (Nettleton 1971)

1.4 Μαγνήτιση και μαγνητική επιδεκτικότητα των πετρωμάτων

1.4.1 Μαγνήτιση

Η μαγνήτιση J που αποτελεί την ποσότητα εκείνη της οποίας η χωρική κατανομή άμεσα περιγράφει τη γεωμαγνητική δομή του υπεδάφους εξαρτάται όχι μόνο από μαγνητική επιδεκτικότητα k , αλλά και από την ένταση H του γεωμαγνητικού πεδίου. Όμως, ενώ η μαγνητική επιδεκτικότητα αποτελεί σταθερά των πετρωμάτων όπως η πυκνότητα, η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι διανυσματικό μέγεθος και, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μεταβάλλεται χρονικά αλλά και χωρικά πάνω στην επιφάνεια της Γης κατά μέτρο και διεύθυνση με συνέπεια την αντίστοιχη μεταβολή της μαγνήτισης.

Έτσι, η **αντίθεση μαγνήτισης** μιας δομής, δηλαδή η διανυσματική διαφορά μεταξύ της μαγνήτισης της δομής αυτής και της μαγνήτισης των πετρωμάτων που την περιβάλλουν εξαρτάται όχι μόνο από την διαφορά μεταξύ της μαγνητικής επιδεκτικότητας των πετρωμάτων της δομής και των πετρωμάτων που την περιβάλλουν αλλά και από τη γεωγραφική θέση (γεωγραφικό πλάτος κλπ.) του τόπου καθώς και από το χρόνο που γίνεται η παρατήρηση.

Ένα πρόσθετο πρόβλημα που υπάρχει σχετικά με τη μαγνήτιση των πετρωμάτων της Γης αποτελεί το γεγονός ότι αυτή δεν οφείλεται μόνο στην επίδραση του σημερινού μαγνητικού πεδίου αλλά και σε **παραμένουσα μαγνήτιση** που απέκτησαν αυτά σε παλαιότερες γεωλογικές εποχές. Η παραμένουσα μαγνήτιση έχει πολλές φορές σημαντικά διαφορετική διεύθυνση από τη μαγνήτιση που επάγεται στο υλικό από το γεωμαγνητικό πεδίο που υπάρχει σήμερα. Ευτυχώς όμως, η παραμένουσα μαγνήτιση δεν παρουσιάζει σημαντική κανονικότητα και γι' αυτό μπορεί να διακριθεί.

1.4.2 Μαγνητική επιδεκτικότητα

Η μαγνητική επιδεκτικότητα έχει για τη μαγνητομετρία ανάλογη σημασία που έχει η πυκνότητα στη βαρυτομετρία. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η γνώση της τιμής της μαγνητικής επιδεκτικότητας στα διάφορα πετρώματα της Γης.

Η **μαγνητική επιδεκτικότητα** είναι ένα μέτρο του βαθμού στον οποίο ένα σώμα μπορεί να μαγνητιστεί. Ορίζεται ως ο λόγος της επαγόμενης μαγνήτισης προς το επαγωγικό πεδίο, δηλαδή ποσοτικοποιεί την απόκριση ενός υλικού σε ένα εξωτερικό (ασθενές) μαγνητικό πεδίο. Μπορεί να εκφραστεί και ως **επιδεκτικότητα μάζας** ή ως **επιδεκτικότητα όγκου** (K). Εκτός από την μαγνητική επιδεκτικότητα, υπάρχει ένας αριθμός άλλων μαγνητικών παραμέτρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χαρακτηριστεί ένα υλικό.

Ένα μέρος των μαγνητικών αναλύσεων περιλαμβάνει μεταβολές, είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό, των εξής χαρακτηριστικών: μαγνητικό πεδίο, θερμοκρασία και χρόνος στον οποίο το δείγμα υπόκειται στα παραπάνω. Ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να εφαρμοστεί σε ποικίλες θετικές και αρνητικές εντάσεις και να μετρηθούν είτε η **επαγόμενη** (η μαγνήτιση ενός δείγματος με παρουσία μαγνητικού πεδίου) είτε η **παραμένουσα** (η μαγνήτιση ενός δείγματος με απουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου) μαγνήτισή του.

Πέρα από την μελέτη των μεταβολών του μαγνητικού πεδίου, κάποιες από τις μαγνητικές ιδιότητες μπορούν να μετρηθούν και σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, η **θερμοκρασία Curie** ενός δείγματος (T_c) είναι η θερμοκρασία στην οποία ο κορεσμός μαγνήτισης J_s γίνεται μηδέν. Στην πράξη, ορίζεται ως το σημείο στο οποίο η

μαγνήτιση ενός δείγματος παρουσιάζει την πιο γρήγορη μείωση (πλησιάζοντας το μηδέν). Η κλασματική μετατροπή των δειγμάτων ισούται με το λόγο της μαγνητικής επιδεκτικότητας όπως μετράται πριν προς την επιδεκτικότητα μετά την θέρμανση (500°C) σε μια αναγωγική ατμόσφαιρα, και παρέχει ένα μέτρο της συγκέντρωσης των λιγότερο μαγνητικών οξειδίων και υδροξειδίων του σιδήρου στο έδαφος που είναι διαθέσιμα για μετατροπή σε ισχυρές σιδηρομαγνητικές μορφές (με άλλα λόγια η ποσότητα αυτή εκφράζει το *δυναμικό* της μαγνητικής ενίσχυσης). Η μελέτη ορισμένων μαγνητικών ιδιοτήτων σε χαμηλές θερμοκρασίες ($25\text{ K} < T < 300\text{ K}$) όπως και η αναγνώριση μαγνητικών μετατροπών σε επίσης χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να αποδειχθούν εξαιρετικά χρήσιμες

1.4.3 Μαγνητικά υλικά

Τα υλικά διακρίνονται σε διαμαγνητικά, παραμαγνητικά και σιδηρομαγνητικά. Η μαγνητική επιδεκτικότητα των διαμαγνητικών υλικών έχει μικρή αρνητική τιμή, των παραμαγνητικών έχει μικρή θετική ενώ των σιδηρομαγνητικών έχει μεγάλη θετική.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε πραγματικά σιδηρομαγνητικά υλικά (σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο) τα οποία σπάνια εμφανίζονται μόνα τους στη φύση, σε αντισιδηρομαγνητικά υλικά (αιματίτης) και σε σιδηριμαγνητικά υλικά (μαγνητίτης) των οποίων η μαγνητική επιδεκτικότητα είναι μεγάλη.

Τα **σιδηριμαγνητικά** υλικά (μαγνητίτης) είναι σχεδόν αποκλειστικά υπεύθυνα για τη μαγνήτιση των πετρωμάτων που προκαλούν έντονες μαγνητικές ανωμαλίες στην επιφάνεια της Γης, και είναι αυτές που ενδιαφέρουν τη μαγνητομετρία. Έχει δειχθεί μάλιστα ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα ενός πετρώματος δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση

$$\kappa = 0.3p,$$

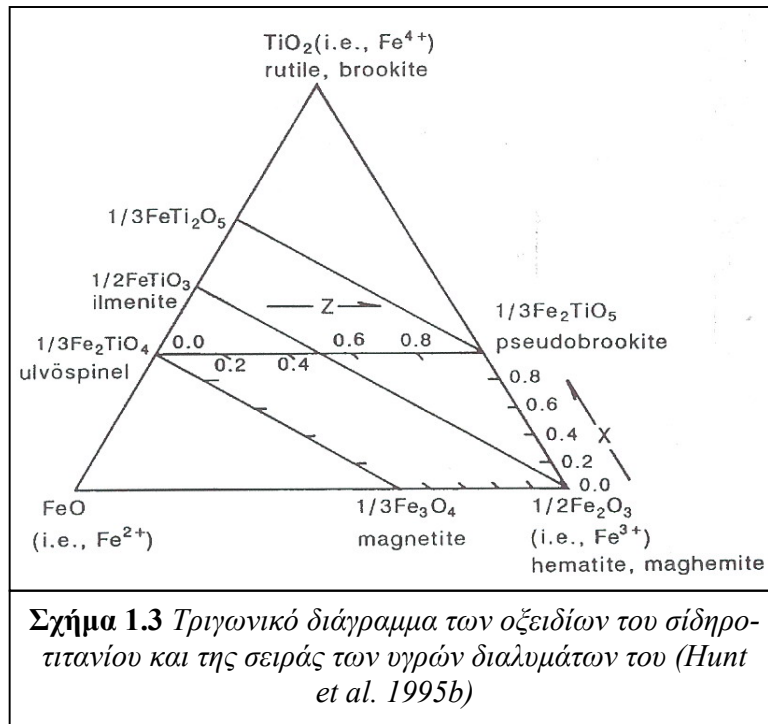
όπου p είναι ο λόγος του όγκου του μαγνητίτη προς το συνολικό όγκο του πετρώματος.

Τη μικρότερη μαγνητική επιδεκτικότητα έχουν τα ιζηματογενή πετρώματα ($75 \cdot 10^{-6}$), ακολουθούν τα μεταμορφωμένα ($350 \cdot 10^{-6}$), μετά είναι τα όξινα πυριγενή ($650 \cdot 10^{-6}$) και τη μεγαλύτερη τιμή έχουν τα βασικά πυριγενή ($2600 \cdot 10^{-6}$). Πολύ μεγάλες τιμές βρέθηκαν για ορισμένα πυριγενή πετρώματα. Έτσι για τους διορίτες και το διαβάση βρέθηκαν τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας της τάξης του 1500.

Παρατηρούμε δηλαδή ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα μεταβάλλεται σε μεγαλύτερο διάστημα τιμών, σε αντίθεση με την πυκνότητα των πετρωμάτων της οποίας το διάστημα μεταβολής είναι πολύ μικρό.

Επίσης με εφαρμογή διαφόρων μαγνητικών πεδίων που ποικίλουν σε συχνότητες και θερμοκρασίες, και συμπεριλαμβάνοντας πιθανώς και την επίδραση του χρόνου στη μαγνήτιση, μπορεί ένα δείγμα να χαρακτηριστεί σε σχέση με τη **σύνθεση του σε μαγνητικά ορυκτά**, την **πυκνότητά** του καθώς και το **μέγεθος των κόκκων** του.

Η σύνθεση αναφέρεται στη μαγνητική ορυκτολογία και στην κρυσταλλική δομή (δηλαδή μαγνητίτης [Fe_3O_4 , κυβικός σπινέλλιος], αιματίτης [Fe_2O_3 , ρομβοεδρικός], μαγγελίτης [$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, σπινέλλιος ανεπαρκής σε κατιόντα], και οι διάφορες ενώσεις των παραπάνω ορυκτών [τιτάνιο-μαγνητίτης, τιτάνιο-αιματίτης, τιτάνιο-μαγγελίτης]) (σχήμα 1.3).



Η πυκνότητα αναφέρεται γενικά στο κλάσμα της μάζας επί του ποσοστού του κυρίαρχου μαγνητικού φορέα, και το μαγνητικό μέγεθος κόκκων στην κατάσταση των μαγνητικών περιοχών που εξαρτάται από το μέγεθος του κυρίαρχου αυτού μαγνητικού φορέα.

Οι **μαγνητικές περιοχές** (magnetic domains) είναι μικρές περιοχές ομοιόμορφης μαγνήτισης μέσα σε ένα κόκκο. Διαδοχικά τεμάχια έχουν αντίθετες διευθύνσεις μαγνήτισης και χωρίζονται από στενά

(0.1 μm) τοιχία το ένα από το άλλο. Οι συνθήκες μαγνητικών περιοχών ποικίλουν από εξαιρετικά λεπτές μοναδιαίες περιοχές κόκκων οι οποίες είναι θερμικά ασταθείς, δηλαδή υπέρ-παραμαγνητικές (SP κόκκοι), σε σταθερές μοναδιαίες περιοχές (SD), ψευδο-μοναδιαίες περιοχές (PSD) και τέλος σε μεγάλους πολύ-περιοχικούς (MD) κόκκους. Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες έχουν δώσει τα παρακάτω μεγέθη κόκκων για ισοδιάστατο μαγνητίτη: SP = 0.03 μm ή και μικρότεροι, SD = 0.03-0.1 μm , PSD = 0.1-20 μm και MD = 20 μm και μεγαλύτεροι (Moskowitz and Banerjee 1979, Butler and Banerjee 1975, Day et al. 1977, Dunlop 1973, 1990).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

Εφαρμογή των μαγνητικών στην εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων

2.1 Εισαγωγή – Περίληψη της μεθόδου

Η μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των εδαφών ξεκίνησε στα 1950 με τις έρευνες του Le Borgne (1955, 1960), οι οποίες ακολουθήθηκαν και από άλλους (Cook & Carts 1962). Ο Le Borgne έδειξε ότι η παραγωγή μαγνητίτη και μαγγελίτη από την θέρμανση των εδαφών ή από διεργασίες ζύμωσης των εδαφών, είναι υπεύθυνη για τη γενική ενίσχυση της μαγνητικής επιδεκτικότητας των επιφανειακών στρωμάτων του εδάφους.

Με την ανάπτυξη των αρχαιολογικών διασκοπήσεων (Aitken et al. 1958) αυξήθηκε και το ενδιαφέρον σε αυτόν τον τομέα για δύο λόγους κυρίως:

1. έχει δείχθει ότι πολλές μαγνητικές ανωμαλίες οφείλονται σε επαγόμενη μαγνήτιση του υλικού που καλύπτει τις υπόγειες αρχαιολογικές δομές
2. παρατηρήθηκαν μαγνητικές αποκρίσεις σε ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις τόσο με όργανα της περιοχής της συχνότητας όσο και με όργανα της περιοχής του χρόνου (Colani and Aitken 1966, Howel 1968, Tite and Mullins 1970a)

Εργαστηριακές μετρήσεις επιβεβαίωσαν τις υποθέσεις του Le Borgne (Tite & Mullins 1970b, Mullins 1974, Tite & Linington 1975, Graham & Scollar 1976) με την διατύπωση της θεωρήσης ότι η θέρμανση οποιουδήποτε εδάφους σε αναγωγικές συνθήκες (παρουσία οργανικής ύλης) έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας με παραγωγή μαγνητίτη, ο οποίος μπορεί να οξειδωθεί σε μαγγελίτη.

Στα 1980, υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον σχετικά με τη χρήση μετρήσεων της μαγνητικής επιδεκτικότητας για την αναγνώριση παλαιοεδαφών σε μεγάλης κλίμακας αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Heller & Tunsheng 1984, Singer & Fine 1989). Αυτό οδήγησε σε ένα μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων με θέμα τις αυτογενείς και διαγετετικές διεργασίες οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αύξηση της επιδεκτικότητας. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου βρέθηκαν σε αρχαιολογικά ιζήματα βιογενής μαγνητίτης (Fassbinder 1990) και γκρανιτικής (Fassbinder & Stanjek 1994), υποδηλώνοντας πως μερικές διεργασίες βρίσκονται σε ανταγωνισμό στις μαγνητικές μεταβολές που συμβαίνουν στα εδάφη. Αρκετοί συγγραφείς μεταξύ των οποίων και οι Dalan & Banerjee (1996) προσπάθησαν να εξηγήσουν τη φύση του μαγνητικού σήματος από αρχαιολογικές διασκοπήσεις και να το διαχωρίσουν σε ανθρωπογενές και «φυσικό» σήμα.

Από αρχαιολογικής άποψης, αυτές οι νέες πληροφορίες οδήγησαν στην αναθεώρηση της γενικά αποδεκτής ερμηνείας για την μαγνητική ενίσχυση λόγω θέρμανσης, και την διερεύνηση της πιθανής ύπαρξης ενός ανθρωπογενούς σήματος, που ανταποκρίνεται σε μαγνητικά χαρακτηριστικά του εδάφους που συνδέονται με ανθρώπινες παρεμβάσεις.

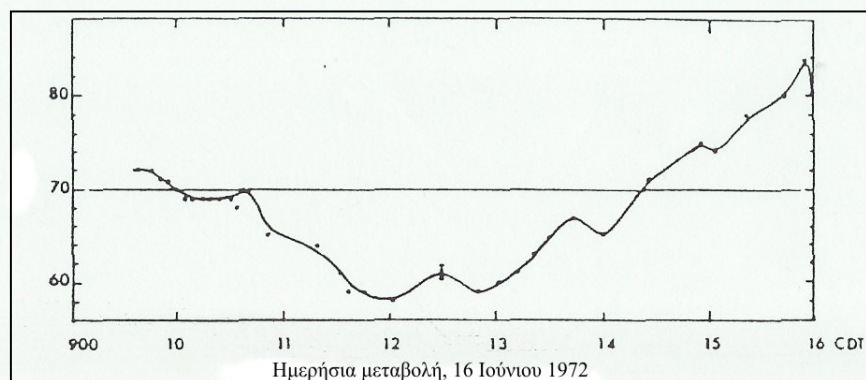
Επομένως λήφθηκε μια σειρά μετρήσεων (θερμοκρασία Curie, κύκλοι υστέρησης και μαγνητική επιδεκτικότητα) για τη μελέτη των μαγνητικών χαρακτηριστικών υλικών που έχουν διαφορετικές και εξεζητημένες ιδιότητες (φούρνοι κλπ) και του περιβάλλοντος εδάφους για αρχαιολογικές θέσεις.

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις στην εφαρμογή τους σε αρχαιολογικούς χώρους περιλαμβάνουν μετρήσεις της έντασης του γήινου μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο ενός πλέγματος (κάνναβος) που προσαρμόζεται πάνω από την υπό μελέτη περιοχή. Οι

μεταβολές στις μαγνητικές ιδιότητες του υπεδάφους (ιζήματα, πετρώματα, τεχνητά υλικά όπως τούβλα) μπορούν να προκαλέσουν μια εμφανή μεταβολή (ανωμαλία) στο μετρούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι ανωμαλίες αυτές μπορούν να προκληθούν από λείψανα τεχνητών κατασκευών όπως τείχη, τάφρους, θεμέλια, εστίες, λάγκους ή ακόμη και από μια περιοχή πιο έντονης κατοίκησης. Ο στόχος της ερμηνείας, δηλαδή ο διαχωρισμός του αποτελέσματος της ανθρώπινης δραστηριότητας από τις γεωλογικές μεταβολές στο υπέδαφος, καθορίζεται από την γνώση των φυσικών ιδιοτήτων της μαγνήτισης του εδάφους καθώς και από την επεξεργασία και την απεικόνιση των δεδομένων με διάφορους τρόπους έτσι ώστε να αναδειχθούν οι σημαντικότερες δομές. Η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου σε οποιοδήποτε χώρο εξαρτάται από τις μαγνητικές ιδιότητες του τοπικού υπεδάφους, το μέγεθος και τον χαρακτήρα της ανθρώπινης δραστηριότητας και τέλος, από την επιμέλεια που θα δειχθεί κατά τη διάρκεια της λήψης των μετρήσεων και στην ανάλυση αυτών.

2.2 Θεωρητική εξέταση των μαγνητικών μεθόδων στην αρχαιολογική έρευνα

Για τους σκοπούς μας, το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο της Γης μπορεί να οριστεί ως η διεύθυνση που λαμβάνεται από μια ελεύθερα περιστρεφόμενη βελόνα πυξίδας στο σημείο αυτό. Η διεύθυνση μπορεί να οριστεί με όρους όπως *απόκλιση* (η γωνία μεταξύ του πραγματικού βορρά και της οριζόντιας συνιστώσας του γήινου πεδίου) και *έγκλιση* (η γωνία μεταξύ του οριζόντιου επιπέδου και της διεύθυνσης του ολικού πεδίου). Η ένταση του πεδίου ή το μέγεθος βρίσκεται σε αντιστοιχία με την μέγιστη ροπή που ασκείται στην βελόνα της πυξίδας από το πεδίο. Σε αυτή την εργασία η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι το 1 γάμα (1 gamma ισούται με 1 nanotesla που είναι η μονάδα μέτρησης για το SI). Το μαγνητικό πεδίο στην Ελλάδα έχει ένταση κοντά στα 46000 gamma, η έγκλιση του είναι περίπου 54° ενώ η απόκλιση 1.5°.



Σχήμα 2.1 Τυπική ημερήσια μεταβολή μετρούμενη από ένα μαγνητόμετρο πρωτονίου σε σταθμό βάσης (Rapp & Gifford 1985)

Μια άλλη πλευρά του μαγνητικού πεδίου που θα πρέπει να μας απασχολήσει είναι η χρονική μεταβολή του. Σε μια τυπική ημερήσια μεταβολή το μέγεθος μειώνεται κατά τη διάρκεια του μεσημεριού κατά 20 με 30 γάμα περίπου από τις πρωινές και βραδινές τιμές του. Κατά τη διάρκεια μαγνητικών καταιγίδων λαμβάνουν χώρα μεγαλύτερες μεταβολές σε διάστημα λίγων ωρών.

2.2.1 Απαιτούμενα μεγέθη

Για τις αρχαιολογικές διασκοπήσεις η μονάδα μέτρησης της έντασης του μαγνητικού πεδίου είναι το 1 γάμμα (1 gamma ισούται με 1 nanotesla που είναι η μονάδα μέτρησης για το SI). Το μαγνητικό πεδίο στην Ελλάδα έχει ένταση κοντά στα 46000 gamma, η έγκλιση του είναι περίπου 54° ενώ η απόκλιση 1.5°.

2.2.2 Μαγνητικές ιδιότητες του εδάφους

Υλικά όπως εδάφη, πετρώματα και σιδηρούχα αντικείμενα μπορούν να αποκτήσουν μαγνήτιση από την παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου. Αυτού του είδους η μαγνήτιση λέγεται *επαγόμενη*. Πέρα από την επαγόμενη μαγνήτιση, η οποία εξαφανίζεται όταν το εφαρμοζόμενο πεδίο αφαιρεθεί, μερικά υλικά μπορούν να παρουσιάσουν *παραμένουσα* μαγνήτιση, η οποία είναι παρούσα και με την απουσία του εφαρμοζόμενου πεδίου. Οι ψημένες άργιλοι και μερικά πετρώματα αποκτούν μια θερμό-παραμένουσα μαγνήτιση αφού εκτεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες αρκετών εκατοντάδων βαθμών Κελσίου και ύστερα ψυχθούν με παρουσία μαγνητικού πεδίου. Η παραμένουσα μαγνήτιση μπορεί επίσης να οφείλεται σε χημική ανταλλαγή ή από την διευθέτηση μικρών σωματιδίων (μορίων) σε ένα μαγνητικό πεδίο.

Ανάμεσα στις ακραίες περιπτώσεις της παραμένουσας μαγνήτισης και αυτές της επαγόμενης μαγνήτισης υπάρχει ένα μεγάλο εύρος χρονικών αποκρίσεων. Επειδή η χρονική απόκριση εξαρτάται από το μέγεθος των σωματιδίων που βρίσκονται στο έδαφος, τμήματα του εδάφους μπορεί να μαγνητιστούν πολύ γρήγορα ενώ άλλα να μεταβάλλουν τη μαγνήτιση τους πολύ αργά (*ιζώδης μαγνήτιση*).

Τα πιο σημαντικά συστατικά των εδαφών που προκαλούν τη μαγνήτιση τους είναι ο *αιματίτης* ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$), ο *μαγνητίτης* (Fe_3O_4) και ο *μαγγεμίτης* ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$). Τα δύο τελευταία ορυκτά είναι πολύ πιο έντονα μαγνητικά από το πρώτο, με την μαγνήτιση τους να είναι περίπου 200 φορές αυτή του αιματίτη. Επειδή επίσης τα εδάφη περιέχουν ποσοστό σε οξείδια του σιδήρου από ελάχιστο έως λίγο, τα προηγούμενα συστατικά και η μετατροπή τους από το ένα στο άλλο είναι οι σημαντικοί παράγοντες της μαγνήτισης του εδάφους. Δύο μέτρα της απόκρισης ενός υλικού στη μαγνήτιση είναι η *μαγνητική επιδεκτικότητα*, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της μαγνήτισης (διπολική ένταση ανά μονάδα όγκου) προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου, και η *ειδική επιδεκτικότητα* (διπολική ένταση ανά μονάδα μάζας ανά μονάδα πεδίου). Η τελευταία αυτή ποσότητα μετριέται σε emu ανά γραμμάριο (Aitken, 1974).

Τυπικές τιμές ειδικής επιδεκτικότητας είναι οι εξής (όλες οι μονάδες 10^{-6} emu/gr):

Ασβεστόλιθος, μερικές μη ψημένες άργιλοι	10
Υποκείμενα στρώματα εδάφους (Subsoils)	50-100
Υπερκείμενα στρώματα εδάφους (Topsoils)	100-1000
Καμένα εδάφη, ψημένες άργιλοι	1000-2500

Μετατροπή από αιματίτη σε μαγνητίτη ή μαγγεμίτη μπορούν να προκαλέσουν είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς δραστηριότητες που θα έχει σαν αποτέλεσμα μια μεγαλύτερη επιδεκτικότητα. Τέτοιου είδους διαδικασίες μετατροπής (Le Borgne 1955, 1960) λαμβάνουν χώρα όταν ο αιματίτης μεταπίπτει σε μαγνητίτη είτε κατά τη διάρκεια θέρμανσης όπως συμβαίνει σε μια εστία, είτε κατά τη διάρκεια αναερόβιας ζύμωσης σε μαυροχρωματικά εδάφη. Επομένως, τα υπερκείμενα στρώματα του εδάφους (topsoils)

έχουν συνήθως μια υψηλότερη μαγνήτιση από τα υποκείμενα (subsoils) και τις εστίες, ενώ καμένα σπίτια και αποθέτες μπορεί να είναι περισσότερο μαγνητικά από αυτά.

2.3 Όργανα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου

Τα τρία πιο συχνά χρησιμοποιούμενα όργανα που χρησιμοποιούνται σε διασκοπήσεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος είναι το μαγνητόμετρο ελεύθερης μετάπτωσης πρωτονίου (proton free-precession), το μαγνητόμετρο fluxgate και το μαγνητόμετρο καισίου-ρουβιδίου.

2.3.1 Μαγνητόμετρο ελεύθερης μετάπτωσης πρωτονίου

Το μαγνητόμετρο πρωτονίου είναι το πιο φτηνό και έτσι σχετικά το πιο διαδεδομένο από τα άλλα. Ο αισθητήρας του αποτελείται από ένα πηνίο που βρίσκεται μέσα σε ένα υγρό πλούσιο σε υδρογόνο (νερό ή κηροζίνη). Ένα ρεύμα πόλωσης κατά μήκος του πηνίου προκαλεί στο υγρό ένα μαγνητικό πεδίο αρκετά εντονότερο από το γήινο. Το πεδίο αυτό πολώνει μερικώς τα πυρηνικά πρωτόνια του υδρογόνου τα οποία είναι περιστρεφόμενα μαγνητικά δίπολα. Ύστερα το ρεύμα της πόλωσης σταματά απότομα και τα πρωτόνια μεταπίπτουν στο πεδίο της Γης. Για τα ελάχιστα δευτερόλεπτα που τα πρωτόνια μεταπίπτουν, στο πηνίο επάγεται μια τάση. Αυτή η τάση μεγεθύνεται, μετράται η συχνότητα της και η εκτίμηση του πεδίου δίνεται σε γάμα. Σε παλιότερα μοντέλα ένας πλήρης κύκλος ολοκληρωνόταν σε 7 sec, αλλά αυτό το διάστημα μπορεί να ελαττωθεί σε 3 ή 4 sec χωρίς απώλεια σε ευαισθησία. Η συνήθης ευαισθησία του οργάνου είναι 1 γ, που μπορεί όμως να αυξηθεί σε 0.25 γ στα συνηθισμένα φορητά μοντέλα. Σήμερα υπάρχουν μοντέλα με χρόνο 1.5 sec και ευαισθησία 0.1 γάμα.

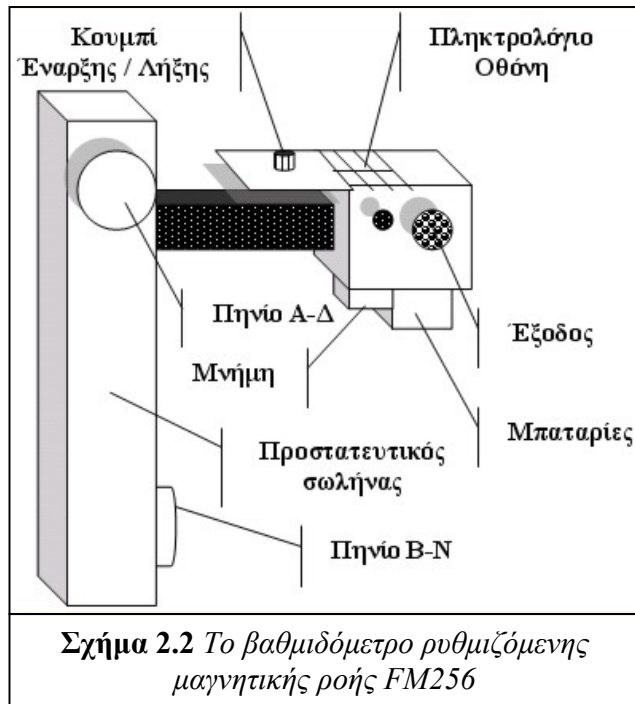
2.3.2 Μαγνητόμετρο Καισίου-Ρουβιδίου

Στα μαγνητόμετρα κεσίου-ρουβιδίου έχουμε αντικατάσταση των πυρηνικών πρωτονίων του μαγνητομέτρου πρωτονίου με ατομικά ηλεκτρόνια των δύο παραπάνω στοιχείων (σε κατάσταση εξάτιμησης) με τις λειτουργικές αρχές να είναι παρόμοιες και στα δυο όργανα. Τόσο το μαγνητόμετρο καισίου-ρουβιδίου όσο και το μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής έχουν υψηλή ευαισθησία και επίσης παρέχουν συνεχείς μετρήσεις του πεδίου, αλλά το κόστος τους είναι μεγαλύτερο από αυτό ενός μαγνητομέτρου πρωτονίου.

2.3.3 Μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής

Το μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής μετράει την συνιστώσα του διανύσματος του πεδίου κατά μήκος του άξονα ενός πηνίου και για αυτό το λόγο εξαρτάται πολύ από την διεύθυνση. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να απαλειφθεί με τον συνδυασμό δύο οργάνων σε ένα βαθμιδόμετρο (gradiometer), που δεν επηρεάζεται από τη διεύθυνση. Το βαθμιδόμετρο μετρά τη διαφορά του μαγνητικού πεδίου σε δυο αισθητήρες. Η απαίτηση για παράλληλη διάταξη των ανιχνευτικών μονάδων κάνει την εφαρμογή της μεθόδου αυτής αρχικά δύσκολη. Όμως το βαθμιδόμετρο έχει και κάποια πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων.

Το μαγνητικό βαθμιδόμετρο FM256 αναπτύχθηκε στην Αγγλία τη δεκαετία του '80 με σκοπό τη χρήση του για αρχαιολογικούς σκοπούς. Είναι εύκολο στη χρήση του, δεν επηρεάζεται από μαγνητικές διαταραχές στην ατμόσφαιρα εν αντιθέσει με τα άλλα μαγνητόμετρα και είναι αδιάβροχο. Σε περίπτωση που οι συνθήκες του εδάφους είναι



κανονικές το όργανο μπορεί να αναγνωρίσει μικρές μαγνητικές μεταβολές μέχρι και 1 μέτρο βάθος κάτω από την επιφάνεια και μεγαλύτερες μεταβολές σε βάθος ακόμα και 2 μέτρων.

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής της μεθόδου αυτής είναι:

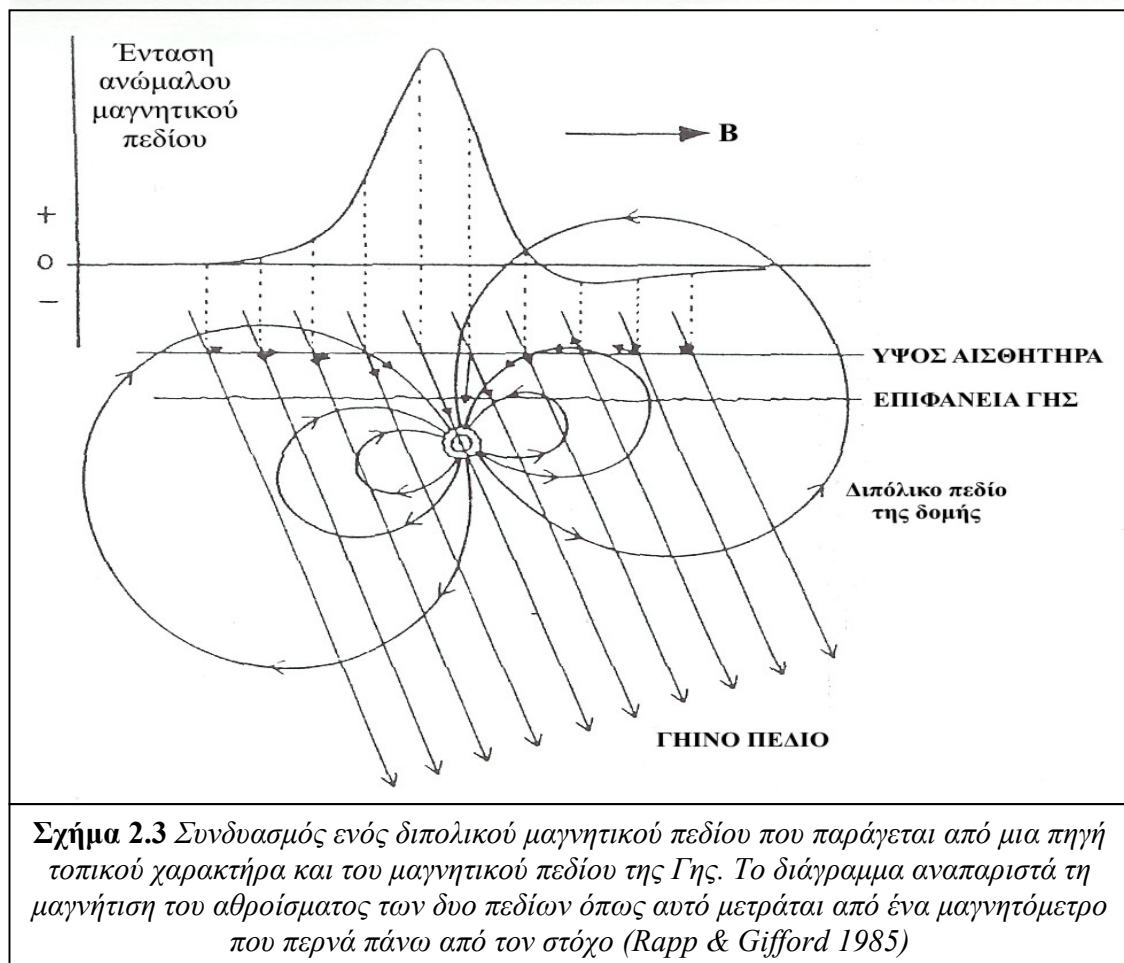
- γρήγορη έρευνα μεγάλων περιοχών
- καμία απαίτηση για επιπλέον εργατικό δυναμικό
- είναι μη καταστροφική – δεν καταστρέφονται ούτε οι αρχαιότητες ούτε η επιφάνεια του εδάφους
- τα δοκιμαστικά σκάμματα δεν ανοίγονται τυχαία
- κατασκευάζονται χάρτες σε

- ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι οποίοι δείχνουν πιθανές θέσεις ενδιαφέροντος καθώς και το σχήμα των οικοδομικών λειψάνων στο υπέδαφος
- οι αρχαιολόγοι λαμβάνουν πληροφορίες που τους βοηθούν να έχουν μια γενική εικόνα ενός ολόκληρου αρχαιολογικού χώρου έτσι ώστε να μπορούν να επικεντρωθούν σε επιλεγμένα σημεία που θα παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, με σκοπό την διενέργεια της εκσκαφής σε συγκεκριμένα σημεία

2.4 Ανωμαλίες που οφείλονται σε τοπικές δομές

Μια απομονωμένη μαγνητική δομή (πηγή) της οποίας οι διαστάσεις είναι μικρές σε σχέση με την απόσταση της από τους αισθητήρες, παράγει την πιο απλή ανωμαλία η οποία καλείται διπολική. Μια κανονική διπολική ανωμαλία προέρχεται από επαγόμενη μαγνήτιση (όπως για παράδειγμα σε ένα μικρό λάκκο), με την πόλωση να βρίσκεται στην ίδια διεύθυνση με το πεδίο της Γης. Ωστόσο, εάν η μαγνήτιση είναι παραμένουσα (όπως σε ένα κομμάτι σίδηρο, ένα καμένο πέτρωμα ή μια εστία), η πόλωση μπορεί να είναι σε διαφορετική διεύθυνση από αυτή του πεδίου της Γης με αποτέλεσμα η ανωμαλία που προκύπτει να ονομάζεται μη κανονική διπολική ανωμαλία.

Το ολικό μαγνητικό πεδίο στην γειτονία μιας κανονικής διπολικής ανωμαλίας είναι ο συνδυασμός (διανυσματικό άθροισμα) του ομοιόμορφου, και προς τα κάτω κατευθυνόμενου πεδίου της Γης και του ασθενούς, διπολικού πεδίου της πηγής. Η χαρτογράφηση των τιμών του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος μιας όδευσης B-N απεικονίζεται στο σχήμα (2.3).



Μπορούν να σημειωθούν τρία χαρακτηριστικά αυτού του τύπου ανωμαλίας:

1. Εάν η μαγνητική επιδεκτικότητα της ανομοιογένειας που προκαλεί την ανωμαλία είναι μεγαλύτερη αυτής του περιβάλλοντος η μέγιστη ένταση του μαγνητικού προφίλ βρίσκεται μετατοπισμένη νότια της πηγής. Η μετατόπιση αυτή είναι κατά μια απόσταση ίση με το ένα τρίτο περίπου της απόστασης αισθητήρα-πηγής
2. Η απόσταση αισθητήρα-πηγής είναι ίση περίπου με το μισό του μεγίστου της χαρτογράφησης
3. Η ένταση των αρνητικών τιμών, λόγω της αντίστασης του διπολικού πεδίου της πηγής στο πεδίο της Γης, είναι το 10% περίπου της μέγιστης έντασης. Όπως και στο πρώτο χαρακτηριστικό αυτό ισχύει κυρίως για μέσα γεωγραφικά πλάτη

Οι αποκλίσεις μιας μαγνητικής ανωμαλίας από τα παραπάνω χαρακτηριστικά υποδεικνύουν ένα μη κανονικό δίπολο, δηλαδή μια πηγή με παραμένονσα μαγνήτιση. Μακριά και λεπτά κομμάτια σιδήρου ή καμένα πετρώματα ειδικά προκαλούν ανωμαλίες με σημαντικές αποκλίσεις από αυτά των κανονικών διπολικών ανωμαλιών. Επομένως, εάν το ελάχιστο δεν βρίσκεται βόρεια του μεγίστου, ή αν το ελάχιστο αποκλίνει σημαντικά σε μέγεθος από το 10% του μεγίστου, μπορεί να θεωρηθεί ότι η πηγή δεν έχει μόνο επαγόμενη μαγνήτιση.

Το μέγεθος της ανωμαλίας εξαρτάται σημαντικά από την απόσταση αισθητήρα-πηγής, και μειώνεται ανάλογα με το πηλίκο του τετραγώνου αυτής της απόστασης. Το μέγεθος επίσης εξαρτάται από τον όγκο V της πηγής καθώς και από την αντίθεση μαγνητικής επιδεκτικότητας, k .

2.5 Εφαρμογή της μεθόδου και σχεδιασμός μιας διασκόπησης

Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην έρευνα ενός χώρου εξαρτάται από το είδος των πληροφοριών που είναι επιθυμητό να ληφθούν. Εάν αναζητούνται πιθανές γραμμικές δομές, όπως είναι τάφροι ή τείχη γνωστής διεύθυνσης, ή αν η θέση μικρών δομών (όπως εστίες) σε μεγαλύτερα κτίσματα είναι περίπου γνωστή τότε μια ή και μερικές οδεύσεις ίσως να είναι αρκετές. Η χαρτογράφηση των ανωμαλιών κατά μήκος ορισμένων οδεύσεων πιθανότατα επαρκεί για να αναδειχθούν οι επιθυμητές πληροφορίες. Συνήθως όμως πραγματοποιείται σειρά οδεύσεων οι οποίες συνιστούν κάνναβο υλοποιημένο επί του εδάφους.

Για να μελετηθεί σωστά μια περιοχή, ειδικά αν είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος από λίγα μέτρα, θα πρέπει να γίνει χρήση δυο μαγνητομέτρων είτε διεξάγουμε περιορισμένο αριθμό οδεύσεων είτε έχουμε κανονικό κάνναβο. Εναλλακτικά, το κινητό μαγνητόμετρο μπορεί να καταγράφει το γήινο μαγνητικό πεδίο σε τακτά χρονικά διαστήματα (10 sec έως 2 min). Στη συνέχεια οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της καμπύλης της ημερήσιας μεταβολής του πεδίου της Γης και από αυτή υπολογίζονται οι διορθώσεις που πρέπει να γίνουν στις μετρήσεις του κινητού οργάνου για κάθε συγκεκριμένη στιγμή που αυτό λάμβανε μετρήσεις. Η όλη διαδικασία αυτή είναι σήμερα αυτοματοποιημένη. Τα όργανα λειτουργούν ταυτόχρονα οπότε οποιαδήποτε διαφορά μεταξύ των τιμών τους αναπαριστά το μέγεθος του ολικού πεδίου, που έχει προφανώς διορθωθεί για τις χρονικές του μεταβολές, λόγω της αφαίρεσης σε αυτό το σημείο. Στη μέθοδο του βαθμιδομέτρου, δυο αισθητήρες τοποθετούνται και διατηρούνται σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους (1 μέτρο για παράδειγμα) σε κατακόρυφη ευθεία. Οι δυο αισθητήρες λειτουργούν ταυτόχρονα, και καταγράφονται οι διαφορές στις μετρήσεις τους. Αυτές οι τιμές είναι *διαφορικά μεγέθη*, δηλαδή είναι οι κατακόρυφες χωρικές μεταβολές του πεδίου. Όπως και στην πρώτη μέθοδο οι ημερήσιες μεταβολές αναιρούνται αυτόματα από την αφαίρεση, ενώ οι τοπικές ανωμαλίες (οι οποίες θα επηρεάζουν περισσότερο τον αισθητήρα που βρίσκεται χαμηλότερα) καταγράφονται. Για την ακρίβεια οι μετρήσεις λαμβάνονται με τον τρόπο που περιγράφηκε είναι πρώτες κατακόρυφες διαφορές του πεδίου.

2.5.1 Προκαταρκτικές ενέργειες

Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε έρευνα κάποιου εκτενούς αρχαιολογικού χώρου, θα πρέπει να εξεταστούν όλες οι ορατές γεωλογικές και αρχαιολογικές δομές. Επιπλέον θα πρέπει να διαπιστωθούν η φύση, το μέγεθος και το βάθος ταφής των δομών πιθανού ενδιαφέροντος, καθώς και η παρουσία σιδερένιων αντικειμένων, αφού με τη γνώση των παραπάνω στοιχείων θα καθοριστεί η πορεία και ο τρόπος της έρευνας καθώς και η τελική ερμηνεία των δεδομένων που θα προκύψουν. Οι επιστήμονες που πραγματοποιούν την έρευνα θα πρέπει να βρίσκονται σε στενή συνεργασία με τους αρχαιολόγους, έτσι ώστε και οι δυο αυτές ομάδες να μοιραστούν τις γνώσεις τους πάνω στα αρχαιολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και στη γεωφυσική μέθοδο που θα εφαρμοστεί.

Μια κάποια εκτίμηση της επιτυχημένης εφαρμογής της μεθόδου μπορεί να ληφθεί από μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας τυπικών δειγμάτων από το έδαφος της περιοχής και τα αρχαία υλικά δόμησης. Όσον αφορά τα εδάφη, τα δείγματα θα πρέπει να ληφθούν σε αντιπροσωπευτικά στρωματογραφικά επίπεδα, καθώς και από θέσεις που βρίσκονται μέσα ή έξω από ορατές αρχαιολογικές δομές της περιοχής. Μετρώντας την επιδεκτικότητα των δειγμάτων πριν και μετά την θέρμανσή τους σε μια αραιή ατμόσφαιρα, είναι πιθανό να εκτιμηθούν τα μεγέθη των αναμενόμενων ανωμαλιών και να ληφθούν ορισμένες πληροφορίες για το μέγεθος της μετατροπής του αιματίτη σε μαγνητίτη που οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες.

2.5.2. Σχεδιασμός και χάραξη καννάβου

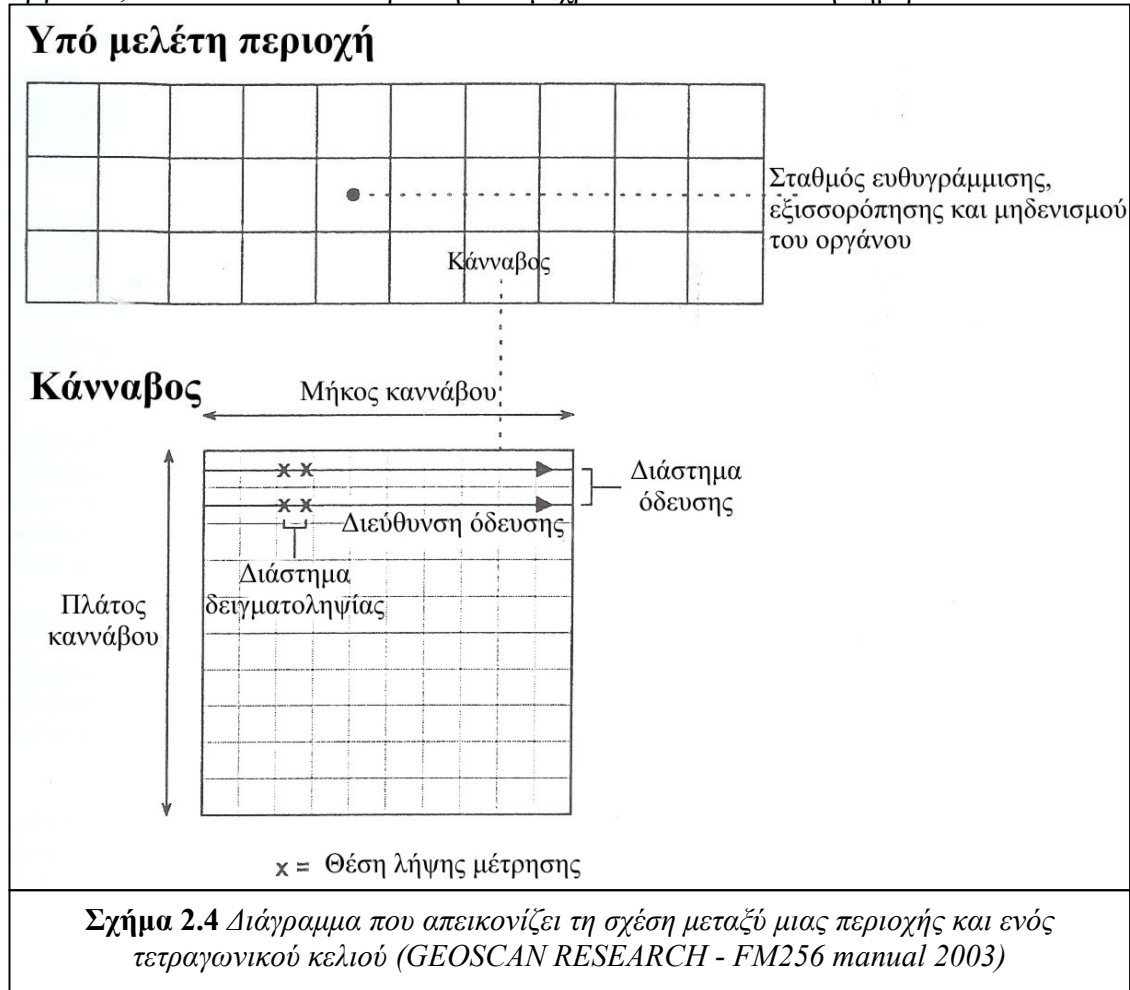
Η χαρτογράφηση μιας περιοχής επιτυγχάνεται με μέτρηση του πεδίου σε σημεία ενός πλέγματος (καννάβου) που τοποθετείται πάνω από την υπό μελέτη περιοχή. Όταν η διερεύνηση μιας περιοχής γίνεται με ένα απλό μαγνητόμετρο τότε θα πρέπει να εφαρμοσθεί κάποια μέθοδος για να διορθωθούν τα δεδομένα από την ημερήσια μεταβολή του γήινου μαγνητικού πεδίου. Χωρίς αυτές τις διορθώσεις, ο μαγνητικός χάρτης που θα προκύψει θα είναι παραμορφωμένος και θα εμφανιστούν ψευδείς ανωμαλίες, κυρίως κατά μήκος των γραμμών όδευσης. Η βασική ιδέα πίσω από αυτές τις διορθώσεις βρίσκεται στην υπόθεση ότι μαγνητικό πεδίο της Γης αλλάζει ταυτόχρονα, οπουδήποτε σε μια περιοχή αρκετά μεγαλύτερη από την υπό μελέτη περιοχή. Για την διόρθωση αυτή μπορούν να γίνουν διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες συνήθιστα περιλαμβάνουν τον ορισμό ενός σταθμού βάσης στον οποίο λαμβάνονται μετρήσεις του πεδίου ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Η θέση των σταθερών σημείων σε μια περιοχή είναι μια αναγκαιότητα για κάθε αρχαιολογική έρευνα. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση της γεωφυσικής. Κατά την διερεύνηση μιας περιοχής και ειδικά όταν αυτή είναι μεγάλη, θα πρέπει να γίνει διαίρεση της σε τετραγωνικά κελιά, κάθε ένα από τα οποία θα αντιμετωπίζεται ως μια ξεχωριστή μονάδα. Σε μια λεπτομερή έρευνα η υπό μελέτη περιοχή χωρίζεται σε ένα αριθμό τετραγωνικών κελιών, συνήθως πλευράς 20 ή 30 μέτρων, οι οποίοι στη συνέχεια υποδιαιρούνται σε ένα πλέγμα μικρότερων τετραγώνων, συνήθως πλευράς 1 μέτρου. Μέσα σε αυτές τις υποδιαιρέσεις λαμβάνονται μια ή και περισσότερες ενδείξεις του οργάνου, δίνοντας έτσι μια λεπτομερή και συστηματική κάλυψη μιας περιοχής.

Το σχήμα (2.4) δείχνει μια περιοχή η οποία έχει χωριστεί σε τετράγωνα πλευράς 10 μέτρων, και αναπαριστά διάφορες παραμέτρους που εισάγονται στην ρύθμιση του οργάνου πριν την έναρξη της διαδικασίας λήψης μετρήσεων. Οι μετρήσεις λαμβάνονται περπατώντας σε μια γραμμή όδευσης (traverse). Η απόσταση μεταξύ δυο μετρήσεων που λαμβάνονται κατά μήκος μιας γραμμής όδευσης ονομάζεται *διάστημα οδεύσεων* (sampling interval). Η απόσταση μεταξύ γραμμών όδευσης καλείται *διάστημα όδευσης* (traverse interval). Το μήκος της γραμμής όδευσης ορίζει το μήκος του καννάβου, ενώ ο αριθμός των οδεύσεων και η απόσταση μεταξύ των οδεύσεων ορίζουν το πλάτος του. Όλες αυτές οι διαστάσεις δίνονται σε μέτρα. Οι γωνίες των κελιών ορίζονται με πλαστικούς ή ξύλινους πασσάλους.

Έχει διαπιστωθεί πως ένα κελί μεγέθους 20 μοναδιαίων διαστημάτων ανά πλευρά παρέχει τη μεγαλύτερη ευελιξία. Αυτός ο χώρος θα περιέχει 21x21, δηλαδή 441 σημεία και θα μπορεί να διερευνηθεί σε χρόνο από 25 μέχρι 50 λεπτών, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Προσθέτοντας το χρόνο που απαιτείται για την

τοποθέτηση και ανάπτυξη των καννάβων αυτών καθώς και για την ετοιμασία των οργάνων, είναι δυνατόν να διερευνηθούν μέχρι και 10-14 κελιά την ημέρα.



Συνήθως, τα κελιά υλοποιούνται πάνω στον κάνναβο της ανασκαφής. Εάν δεν υπάρχει τότε τα κελιά τοποθετούνται με προσανατολισμό Β-Ν ή Α-Δ. Ωστόσο αυτά τα κελιά μπορούν να προσανατολιστούν σε οποιαδήποτε διεύθυνση και μερικές φορές υλοποιούνται στο έδαφος έτσι ώστε τα όρια τους να συμπίπτουν με τοπογραφικά όρια ή φυσικούς περιορισμούς. Όπου κρίνεται απαραίτητο, πλήρη κελιά θα ορίζονται ως ψευδή (dummy) ή μέρη αυτών που δεν είναι δυνατό να ερευνηθούν θα συμπληρώνονται με ψευδείς μετρήσεις (dummy logs).

2.5.3 Μέγεθος κελιού

Τα κελιά μπορεί να είναι τετραγωνικά ή ορθογώνια με διαστάσεις 10, 20, 30, 40, 50 ή 100 μέτρων αν και η συνηθέστερη διάσταση που χρησιμοποιείται είναι είτε 20 είτε 30 μέτρα. Η μεγάλη ποικιλία στις διαστάσεις αυτές επιτρέπει προσαρμογές στη λήψη μετρήσεων ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε περιοχής και βοηθά στην ελαχιστοποίηση ή και πλήρη απαλοιφή δυσκολιών που έχουν να κάνουν με την επεξεργασία των δεδομένων.

Η επιλογή του μεγέθους των καννάβων εξαρτάται επίσης και από το αν θα γίνει χρήση βοηθητικών γραμμών ή καθοδηγητικών πασσάλων αφού μεγέθη μεγαλύτερα από 20-30 μέτρα πιθανόν να καταστήσουν τις μεθόδους αυτές πιο δύσκολες στη χρήση.

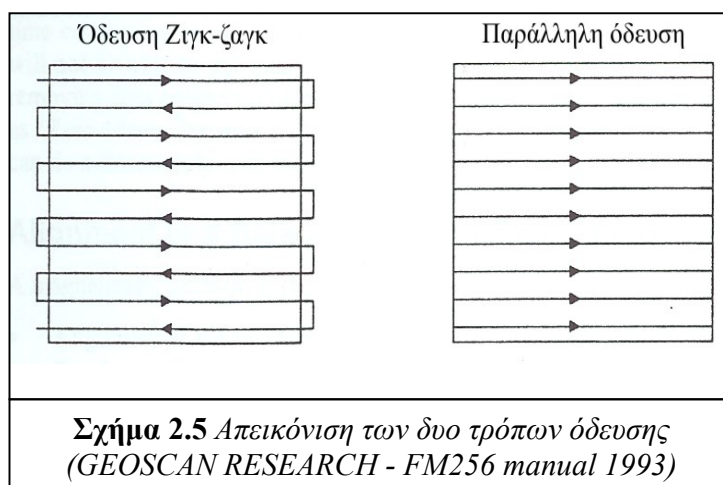
2.5.4 Διάστημα όδευσης και δειγματοληψίας

Το μέγεθος του μοναδιαίου καννάβου (grid unit) καθορίζεται από το μέγεθος των αναμενόμενων δομών. Ακριβολογώντας, το βήμα δειγματοληψίας εξαρτάται από το μήκος κύματος των ανωμαλιών που θα προηγηθούν από τις αναμενόμενες δομές στο χώρο έρευνας. Υπό αυστηρά μαθηματική θεώρηση, το βήμα δειγματοληψίας καθορίζεται από την αρχή του Nyquist. Επειδή ο αριθμός των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου που θα ληφθούν είναι ανάλογος του τετραγώνου του μοναδιαίου καννάβου, αυτή η επιλογή περιορίζεται τόσο από την επιθυμητή λεπτομέρεια των αποτελεσμάτων όσο και από τον διαθέσιμο χρόνο. Γενικά, το μοναδιαίο αυτό διάστημα θα πρέπει να είναι μικρότερο από τις γραμμικές διαστάσεις των αναμενόμενων ανωμαλιών. Με βάση τα προηγούμενα δομές μεγέθους ενός ή δυο μέτρων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια μπορούν να ανιχνευθούν με διάστημα δειγματοληψίας ενός μέτρου. Εάν οι δομές βρίσκονται βαθύτερα, τότε τα χωρικά μεγέθη των ανωμαλιών θα είναι μεγαλύτερα (όπως και ασθενέστερα) και έτσι θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μεγαλύτερο διάστημα δειγματοληψίας. Σε ιστορικούς χώρους, γραμμικές δομές όπως τείχη ή ερείπια μεγάλων οικοδομημάτων μπορούν να ανιχνευθούν με ακόμα μεγαλύτερο διάστημα δειγματοληψίας. Μια προσέγγιση για μεγάλες περιοχές είναι να γίνει χρήση ενός αδρού διαστήματος (όπως 2 μέτρα) και στη συνέχεια η έρευνα να επικεντρωθεί στις περιοχές με μεγαλύτερη μαγνητική δραστηριότητα με διάστημα του ενός ή ενάμισι μέτρου.

Η επιλογή του διαστήματος όδευσης και δειγματοληψίας προκύπτει συνήθως από συμβιβασμό μεταξύ των παρακάτω παραγόντων:

1. εκτίμηση της τοπογραφίας και της περιοχής των στόχων της έρευνας
2. επιθυμητή πυκνότητα δειγματοληψίας
3. ταχύτητα της εργασίας
4. αναμενόμενος λόγος σήματος προς θόρυβο
5. διαθέσιμο σύστημα – μονό ή διπλό

2.5.5 Τρόπος όδευσης



Σε μια λεπτομερή διασκόπηση, το έδαφος καλύπτεται από μια σειρά συνεχόμενων οδεύσεων. Οι οδεύσεις αυτές μπορεί να είναι είτε της ίδιας διεύθυνσης (παράλληλη όδευση) ή να αλλάζουν διεύθυνση μετά την ολοκλήρωση της κάθε οδεύσης (βουστροφηδόν όδευση – ζιγκ ζαγκ) σχήμα (2.5)

Οποιοσδήποτε τρόπος κι αν επιλεγεί, το όργανο θα πρέπει να διατηρείται συνεχώς στην ίδια διεύθυνση έτσι ώστε να μην υπάρξουν μεταβολές στα επίπεδα του θορύβου. Για παράλληλη όδευση με ένα διαφορικό μαγνητόμετρο (ή αλλιώς βαθμιδόμετρο) ο χρήστης κρατάει το όργανο στο πλάι του. Για όδευση ζιγκ-ζαγκ το όργανο κρατιέται συνήθως μπροστά από τον χρήστη ο οποίος αλλάζει την πλευρά πιασίματος του από αριστερά σε δεξιά κάθε φορά που ο ίδιος αλλάζει διεύθυνση με το όργανο να παραμένει σε σταθερό προσανατολισμό.

Η επιλογή του τρόπου όδευσης είναι ένας συμβιβασμός που γίνεται μεταξύ της μεγαλύτερης ταχύτητας στην πραγματοποίηση της έρευνας που προσφέρει η όδευση ζιγκ-ζαγκ και της ελαφρώς υψηλότερης ποιότητας δεδομένων που δίνει η παράλληλη. Πραγματοποιώντας ζιγκ-ζαγκ όδευση δεν γίνεται επιστροφή στην αρχή της επόμενης γραμμής με αποτέλεσμα να κερδίζεται αρκετός χρόνος. Γενικά όπως είναι κατανοητό οι περισσότερες διασκοπήσεις γίνονται με αυτό τον τρόπο αφού η ταχύτητα είναι μεγάλης σημασίας και τα οποιαδήποτε σφάλματα μπορούν να διορθωθούν μερικώς στη συνέχεια από το κατάλληλο λογισμικό. Για έρευνες στις οποίες ο χρόνος δεν είναι τόσο σημαντικός, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε από τους δυο τρόπους, με την παράλληλη όδευση να παρέχει δεδομένα ελαφρώς καλύτερης ποιότητας.

2.5.6 Ύψος αισθητήρων

Για την επιλογή του ύψους στο οποίο θα βρίσκεται ο αισθητήρας από το έδαφος θα πρέπει να ληφθούν υπόψη δυο παράγοντες. Πρώτα, αφού το πλάτος μιας ανωμαλίας αυξάνεται σε σχέση με την απόσταση πηγής-αισθητήρα, ένα μεγαλύτερο ύψος αισθητήρα θα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη ανάλυση μεταξύ ανωμαλιών που οφείλονται σε γειτονικές δομές. Ένας προσεγγιστικός κανόνας ορίζει ότι η απόσταση μεταξύ αισθητήρα-πηγής δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τις εσωτερικές αποστάσεις της πηγής η οποία επιθυμείται να εντοπιστεί. Αυτό υπονοεί πως η απόσταση μεταξύ αισθητήρα-πηγής θα πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη του διαστήματος δειγματοληψίας.

Επιπλέον, το ύψος του αισθητήρα θα πρέπει να επιλεγεί με τρόπο τέτοιο που θα ελαττώνει τις σχετικές επιδράσεις του επιφανειακού θορύβου, που οφείλεται στις μεταβολές στη μαγνήτιση της επιφάνειας και εδάφους. Με την αύξηση του ύψους του αισθητήρα η επίδραση του θορύβου σε σχέση με το σήμα θα ελαττωθεί. Πιθανότατα η καλύτερη λύση σε αυτό το θέμα είναι ένα ύψος αισθητήρα μεταξύ 40 και 60 εκατοστών για διάστημα δειγματοληψίας 1 μέτρο.

Η παραπάνω εξίσωση είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στην διάκριση του ευθέως προβλήματος και της αντιστροφής. Ο *ευθύς υπολογισμός* είναι ο υπολογισμός του $f(P)$ από γνωστές ή υποθετικές τιμές των $s(Q)$ και $\psi(P, Q)$ και του όγκου R . Για κάθε αποτέλεσμα ενός τέτοιου υπολογισμού, το $f(P)$ είναι καθορισμένο απόλυτα εφόσον είναι γνωστά τα $s(Q)$, $\psi(P, Q)$ και R . Επομένως ο ευθύς υπολογισμός έχει μια μοναδική λύση. Στο ευθύ πρόβλημα λαμβάνει χώρα επαναλαμβανόμενη διόρθωση των $s(Q)$ και R , ακολουθεί υπολογισμός του $f(P)$ και σύγκριση με μετρούμενες τιμές του πεδίου έως ότου το υπολογιζόμενο πεδίο να συμπίσει με το μετρούμενο. Αν και ο ευθύς υπολογισμός είναι μαθηματικά μοναδικός, ένα μοντέλο που έχει αναπτυχθεί με βάση το ευθύ πρόβλημα για μαγνητικές ή βαρυτικές πηγές δεν είναι μοναδικό. Η αντιστροφή από την άλλη πλευρά, εισάγει μετρήσεις του $f(P)$ απευθείας στο αριστερό μέλος της εξίσωσης και λύνει για διάφορες τιμές του $s(Q)$ και R . Η διαδικασία υπολογισμού του $s(Q)$ είναι γνωστή ως *γραμμική αντιστροφή* ενώ αυτή του υπολογισμού του R ως *μη γραμμική αντιστροφή*.

Αρχικά ας εξεταστεί το γραμμικό πρόβλημα. Η παραπάνω εξίσωση θα μπορούσε να μετατραπεί σε μια εξίσωση πινάκων της μορφής

$$f_i = \sum_{j=1}^N s_j \psi_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, L$$

και αν ισχύει $L > N$ να γίνει χρήση ελαχίστων τετραγώνων για τον υπολογισμό των N τιμών του s_j . Αυτό όμως δεν είναι όσο απλό φαίνεται. Το πρώτο θεμελιώδες πρόβλημα είναι η **μη μοναδικότητα της λύσης**. Ακόμα και αν είναι γνωστή η ακριβής τιμή του $f(P)$, η εύρεση μιας μοναδικής λύσης για το $s(Q)$ πιθανόν να μην είναι δυνατή. Η μοναδικότητα μπορεί να καθοριστεί με απάντηση στο ερώτημα αν υπάρχουν μη μηδενικές λύσεις για το $a(Q)$ στην εξίσωση

$$\int_R a(Q) \psi(P, Q) dV = 0$$

Αν η απάντηση είναι ναι τότε το $s(Q)$ είναι μη μοναδικό.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της μη μοναδικότητας υπάρχουν δυο προσεγγίσεις. Θα μπορούσαν να γίνουν απλουστευτικές υποθέσεις για την πηγή. Για παράδειγμα θα μπορούσε να υποτεθεί ότι η μαγνήτιση είναι ομοιόμορφη στο σώμα που προκαλεί την ανωμαλία ή ότι η μια διεύθυνση του εκτείνεται σε άπειρο μήκος. Τέτοιου είδους υποθέσεις μειώνουν τις πιθανές λύσεις, αλλά η μη μοναδικότητα της λύσης παραμένει ως πρόβλημα. Ωστόσο αυτή είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται σε μελέτες αντιστροφής. Μια δεύτερη προσέγγιση θα ήταν να γίνει προσπάθεια εύρεσης κάποιου κοινού χαρακτηριστικού όλων των πιθανών λύσεων όπως είναι για παράδειγμα το μέγιστο βάθος ταφής οποιασδήποτε ρεαλιστικής πηγής. Μια τέτοιου είδους θεώρηση οδηγεί στην ανάπτυξη θεωριών για ιδεατά σώματα των οποίων γίνεται χρήση στη συνέχεια. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο η οποία θα επιλεγεί, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και επιμέρους γεωλογικά και γεωφυσικά στοιχεία όπου είναι διαθέσιμα για την ελάττωση του εύρους των ρεαλιστικών λύσεων.

Το δεύτερο πρόβλημα είναι η **αστάθεια της λύσης**. Σύμφωνα με την εξίσωση Fredholm το πεδίο δυναμικού σε ένα σημείο εξαρτάται από το σύνολο των τμημάτων που αποτελούν την πηγή. Για την ακρίβεια, το πεδίο δυναμικού σε ένα σημείο είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος όλων των τμημάτων της πηγής, όπου η συνάρτηση στάθμισης είναι η $\psi(P, Q)$. Σε όρους ανάλυσης γραμμικών συστημάτων, το $f(P)$ είναι ένα γραμμικό συναρτησιοειδές του $s(Q)$. Για κάθε $P \neq Q$, το $\psi(P, Q)$ είναι μια ομαλά μεταβαλλόμενη

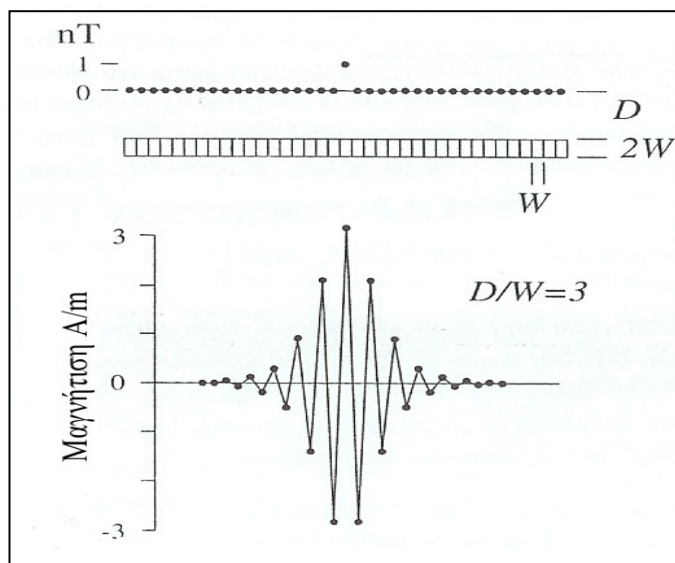
συνάρτηση. Επομένως η συνάρτηση του $f(P)$ είναι πάντα ομαλότερη του $s(Q)$ όσο το P βρίσκεται έξω από το σώμα. Άρα η αντιστροφή με υπολογισμό του $s(Q)$ από την εξίσωση Fredholm αντιστοιχεί σε μια απομαλοποίηση της συνάρτησης του $f(P)$. Μικρές αλλαγές στην $f(P)$ προκαλούν μεγάλες και μη ρεαλιστικές μεταβολές στην $s(Q)$ και έτσι η λύση είναι ασταθής. Η εφαρμογή της αντιστροφής σε πεδία δυναμικού είναι γνωστό πως είναι ασταθής. Υπάρχουν τρόποι για την μείωση αυτής της αστάθειας αλλά αυτοί έχουν σαν κόστος την απώλεια πληροφοριών που αφορούν στην πηγή.

Το τρίτο πρόβλημα είναι αυτό της **δομής**. Οι μέθοδοι αντιστροφής γίνονται ευκολότεροι στη χρήση με μοντελοποίηση της κατανομής της πηγής με απλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα μια μέθοδος θα μπορούσε να υποθέσει ότι η πηγή αποτελείται από απλά σώματα όπως δίπολα, γραμμικές πηγές ή λεπτές στρώσεις. Όπως είναι φυσικό η γεωλογία δεν είναι ποτέ τόσο απλή και έτσι τα αποτελέσματα που θα ληφθούν δεν θα είναι ακριβή.

3.2 Γραμμική αντιστροφή

Η εξίσωση Fredholm μας δείχνει ότι τα μαγνητικά και βαρυτικά πεδία είναι γραμμικώς ανάλογα της μαγνήτισης και της πυκνότητας αντίστοιχα, και ότι ο υπολογισμός της μαγνήτισης ή της πυκνότητας από μαγνητικά ή βαρυτικά πεδία είναι ένα γραμμικό πρόβλημα αντιστροφής.

3.2.1 Μαγνήτιση ενός στρώματος



Σχήμα 3.1 Παράδειγμα αστάθειας της λύσης κατά την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος. Θεωρούμε δομή που συνίσταται σε ένα οριζόντιο στρώμα όπως αυτή του επάνω τμήματος. Το στρώμα αποτελείται από κελιά πλάτους W και σε βάθος D . Το πάχος του στρώματος είναι $2W$. Η προκύπτουσα μαγνήτιση για $D/W=3$ είναι στο κάτω τμήμα (Bott & Hutton 1970)

Ένα σώμα το οποίο μπορεί να είναι ένα στρώμα μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα τεμάχια (κελιά) και έτσι με χρήση τεχνικών ελαχίστων τετραγώνων να βρεθεί η μαγνήτιση κάθε κελιού. Γενικά υπάρχει η τάση για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση του πλάτους των κελιών με σκοπό την άντληση περισσότερων πληροφοριών. Η επιλογή του πλάτους του κάθε κελιού αυτού εξαρτάται από την επιθυμητή ανάλυση. Το ερώτημα είναι: για ένα δοθέν βάθος ενός μαγνητικού στρώματος ποια είναι η ποσότητα των πληροφοριών που μπορεί να ληφθεί από τη μαγνήτιση που θα υπολογιστεί; Οι Bott και Hutton (1970) έδειξαν ότι η αναλυτική ισχύς αυτής της μεθόδου αντιστροφής έχει σαφείς

περιορισμούς. Όπως φαίνεται στο σχήμα (3.1) θεωρήθηκε ότι $\Delta T_i = 0$ για όλα τα σημεία εκτός από ένα στο οποίο $\Delta T_i = 1$ nT. Επίσης έγινε χρήση της σχέσης

$$\Delta T_i = \sum_{j=1}^N M_j \psi_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, L$$

για τον υπολογισμό της μαγνήτισης. Μια ρεαλιστική εικόνα για μια τέτοια δομή θα έπρεπε να είναι αυτή με την μαγνήτιση M_j που προκαλεί την ανωμαλία να έχει τιμή σχεδόν μηδέν για κάθε j . Αντί αυτού όμως βρέθηκαν λύσεις για τη μαγνήτιση οι οποίες ποίκιλαν μη ρεαλιστικά, με το ποσοστό αυτής της διακύμανσης να εξαρτάται από το βάθος του στρώματος και το πλάτος των κελιών. Οι Bott και Hutton (1970) συμπέραναν εμπειρικά πως αν το πλάτος των κελιών είναι μια ή δύο φορές μικρότερο από το βάθος τότε η λύση της αντιστροφής είναι ασταθής.

Η αιτία αυτής της αστάθειας μπορεί να φανεί από τις παρακάτω απλές αλγεβρικές παρατηρήσεις. Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί σε μορφή πινάκων ως εξής

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \Delta T_3 \\ \dots \\ \Delta T_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} & \dots & \psi_{1N} \\ \psi_{21} & \psi_{22} & \dots & \psi_{2N} \\ \psi_{31} & \psi_{32} & \dots & \psi_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \psi_{L1} & \psi_{L2} & \dots & \psi_{LN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \dots \\ M_N \end{bmatrix}$$

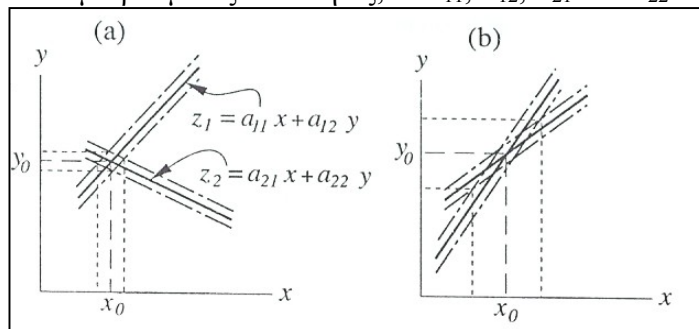
Κάθε στήλη του πίνακα ψ_{ij} αναπαριστά την ανωμαλία ολικού πεδίου κατά μήκος μίας οδεύσης πάνω από ένα κελί έστω j . Αν τα πλάτη των κελιών είναι μικρά σε σύγκριση με το βάθος τότε η τομή πάνω από το κελί j θα είναι πανομοιότυπη με άλλες οδεύσεις πάνω από τα κελιά $j+1$ και $j-1$. Με άλλα λόγια, μικρό πλάτος κελιών έχει σαν συνέπεια γειτονικές στήλες του πίνακα ψ_{ij} να είναι παρόμοιες. Αυτό σημαίνει στην άλγεβρα των πινάκων ότι ο ψ_{ij} θα είναι αόριστος.

Για να φανεί καλύτερα ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται οι λύσεις των M_j θεωρούμε δυο εξισώσεις

$$z_1 = a_{11}x + a_{12}y$$

$$z_2 = a_{21}x + a_{22}y$$

οι οποίες αποτελούν μέρος ενός πειράματος παρόμοιου της περίπτωσης μας. Οι z_1 και z_2 είναι μετρούμενες ποσότητες, οι a_{11} , a_{12} , a_{21} και a_{22} είναι υπολογισμένες ποσότητες ενώ x και y είναι οι λύσεις που αναζητούνται. Όπως φαίνεται στο σχήμα (3.2) οι δυο αυτές εξισώσεις ορίζουν ευθείες σε ένα σύστημα x, y με τη λύση (x_0, y_0) των εξισώσεων αυτών να ορίζεται από το σημείο τομής των δυο ευθειών.



Σχήμα 3.2 Λύση συστήματος δυο εξισώσεων. Οι δυο εξισώσεις παριστούν δυο ευθείες (συνεχείς γραμμές). Η αναζητούμενη λύση εφόσον οι εξισώσεις πρέπει εξ υποθέσεως να έχουν κοινή λύση, ορίζεται από την τομή των ευθειών (Blakely 1994)

Σφάλματα τα οποία πιθανόν να έγιναν κατά την μέτρηση των z_1 και z_2 προκαλούν παράλληλη μετατόπιση των ευθειών αυτών. Εάν οι δύο ευθείες σχηματίζουν μεγάλη

γωνία στην τομή τους (σχήμα 3.2 a) τότε μικρές μετατοπίσεις της θέσης τους δεν επηρεάζουν τον καθορισμό της λύσης (x_0, y_0). Ωστόσο αν οι δυο ευθείες είναι σχεδόν παράλληλες (σχήμα 3.2 b), μικρά σφάλματα στα z_1 και z_2 θα προκαλέσουν σημαντικά σφάλματα στον καθορισμό της λύσης, και έτσι αυτή θα είναι ασταθής.

Οι δυο ευθείες θα είναι σχεδόν παράλληλες αν ισχύει $a_{11}/a_{12} \approx a_{21}/a_{22}$. Για το μαγνητισμένο στρώμα αυτό θα ισχύει σε περιπτώσεις που το πεδίο σε σημείο i που οφείλεται στο κελί j είναι παρόμοιο με το πεδίο στο σημείο i που οφείλεται στο κελί $j+1$ και με το πεδίο στο σημείο $i+1$ που οφείλεται στο κελί j .

Η πιο πάνω εξισώσεις με τη μορφή πινάκων δεν είναι τίποτε άλλο από την επέκταση των δυο παραπάνω εξισώσεων. Οι γραμμές και οι στήλες του ψ_{ij} είναι ομαλώς μεταβαλλόμενες συναρτήσεις. Επομένως ο απευθείας υπολογισμός του ΔT_i από την M_j είναι μια διαδικασία εξομάλυνσης ενώ η αντιστροφή μια διαδικασία απομάλυνσης. Επιπλέον, όσο πιο βαθιά βρίσκεται το στρώμα σε σχέση με το κελί τόσο πιο ομαλός είναι ο πίνακας ψ_{ij} . Αν το πλάτος του κελιού είναι πολύ μικρό σε σχέση με το βάθος του στρώματος, ο πίνακας ψ_{ij} γίνεται αόριστος και μικρές αλλαγές στο ΔT_i θα προκαλούν μη ρεαλιστικές τιμές στην υπολογιζόμενη M_j .

3.3 Καθορισμός της διεύθυνσης μαγνήτισης

3.3.1 Ομοιόμορφη μαγνήτιση

Σε ορισμένες γεωλογικές περιπτώσεις υποθέτεται ότι ένα σώμα είναι ομοιόμορφα μαγνητισμένο και το σύστημα λύνεται ως προς το απλό διάνυσμα στο οποίο περιγράφει καλύτερα τη μαγνήτιση. Μια γνωστή εφαρμογή της μεθόδου αυτής γίνεται για τον καθορισμό της μαγνήτισης των υποθαλάσσιων οροσειρών στις οποίες γίνονται μετρήσεις βαθυμετρίας και της ανωμαλίας ολικού πεδίου αυτών με τρεις υποθέσεις: α) ομοιόμορφη μαγνήτιση της οροσειράς β) το πάνω όριο τους να είναι ίδιο με τη βαθυμετρική επιφάνεια και γ) ύπαρξη γνωστής κάτω επιφάνειας (επίπεδη). Η μαγνήτιση τελικά υπολογίζεται κατ' αντιστοιχία με ένα παλαιομαγνητικό δείγμα, και υποθέτοντας πως αυτή είναι πρωτίστως παραμένουσα και καταγράφηκε στο χρόνο που δημιουργήθηκε η οροσειρά.

Υποθέτοντας ότι η ανωμαλία ολικού πεδίου μετράται σε N διαφορετικές θέσεις το σύστημα προς λύση γίνεται

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \dots \\ \Delta T_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_{1x} & \xi_{1y} & \xi_{1z} \\ \xi_{2x} & \xi_{2y} & \xi_{2z} \\ \dots & \dots & \dots \\ \xi_{Nx} & \xi_{Ny} & \xi_{Nz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

Οι τρεις στήλες του πίνακα ξ_{ij} αναπαριστούν την ανωμαλία ολικού πεδίου στις διάφορες θέσεις, υποθέτοντας μοναδιαίες μαγνητίσεις του στοιχειώδους υποθέματος στις διευθύνσεις x , y και z αντίστοιχα. Κάθε στοιχείο αυτού μπορεί να υπολογιστεί με τεχνικές του ευθέως προβλήματος αλλά για να γίνει αυτό θα πρέπει το σχήμα του σώματος να προσομοιωθεί με ένα απλό μοντέλο όπως είναι ένα σύνολο από λεπτά ελάσματα (Talwani 1965). Έτσι τελικά βρίσκονται οι τρεις τιμές των M_x , M_y και M_z που ελαχιστοποιούν την ποσότητα

$$E^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta T_i - \Delta T'_i)^2$$

όπου $\Delta T'_i$ είναι οι μετρούμενες τιμές της ανωμαλίας.

3.3.2 Ανομοιόμορφη μαγνήτιση

Η ανάλυση με ελάχιστα τετράγωνα απαιτεί την τυχαία κατανομή των υπολοίπων (σφαλμάτων) $e_i = \Delta T_i - \Delta T'_i$. Με την υπόθεση της ομοιόμορφης μαγνήτισης όμως τα σφάλματα εμφανίζουν αναντιστοιχία σε μεγάλες θετικές και αρνητικές τιμές γεγονός που εν μέρει δείχνει κυμαινόμενη μαγνήτιση. Στην περίπτωση αυτή γίνεται τοπογραφικός διαχωρισμός σε συγκεκριμένα τεμάχια με συγκεκριμένες ιδιότητες και η μαγνήτιση υπολογίζεται ξεχωριστά. Οι Parker et al. (1974) αντί για προσπάθεια εύρεσης μιας διεύθυνσης μαγνήτισης αναζήτησαν μαγνήτιση με την παρουσία τόσο ομοιόμορφων όσο και ανομοιόμορφων συνιστωσών με την προϋπόθεση η ανομοιόμορφη συνιστώσα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Σε αυτή την εργασία η μαγνήτιση $M(Q)$ αναπαρίσταται τόσο από τις ομοιόμορφες όσο και από τις ανομοιόμορφες συνιστώσες

$$M(Q) = M_0 + M_N(Q)$$

όπου M_0 είναι διανυσματική σταθερά. Το στοιχείο $M(Q)$ με ελαχιστοποίηση της $M_N(Q)$ είναι η μαγνήτιση η οποία είναι σχεδόν ομοιόμορφη για κάθε δοθέν M_0 .

3.4 Μη γραμμική αντιστροφή

Το πεδίο δυναμικού στο αριστερό μέλος της εξίσωσης Fredholm είναι ένα γραμμικό συναρτησιοειδές της κατανομής της μάζας ή του μαγνητικού υλικού. Διπλασιάζοντας την ένταση της μαγνήτισης για παράδειγμα, διπλασιάζεται και το πλάτος της ανωμαλίας ολικού πεδίου, ενώ τριπλασιάζοντας την μαγνήτιση θα τριπλασιαστεί το πλάτος της ανωμαλίας. Γενικά, ένα σύστημα λέγεται γραμμικό αν ικανοποιεί τα παρακάτω σημεία: αν $f_1(P)$ είναι το πεδίο που προκαλείται από μια κατανομή πηγής $s_1(Q)$ και $f_2(P)$ το πεδίο από μια άλλη κατανομή $s_2(Q)$ τότε το πεδίο που προκαλείται από το $a s_1(Q) + b s_2(Q)$ είναι απλά το $a f_1(P) + b f_2(P)$ όπου a και b σταθερές.

Δεν μπορεί όμως να ληφθεί το ίδιο και για άλλες παραμέτρους που ορίζουν την πηγή. Το πεδίο δυναμικού δεν είναι γραμμικό συναρτησιοειδές του βάθους, του πάχους ή του σχήματος της πηγής για παράδειγμα. Όλες αυτές οι παράμετροι εμπεριέχονται στην ποσότητα $\psi(P, Q)$ και στα όρια της ολοκλήρωσης που υπαγορεύονται από τον όγκο R . Οι μέθοδοι αντιστροφής που προσπάθησαν να υπολογίσουν αυτές τις μη γραμμικές παραμέτρους ονομάζονται μέθοδοι μη γραμμικής αντιστροφής, που όμως ενέχουν πολλές απλουστεύσεις και εν δυνάμει γραμμικοποιούν το πρόβλημα.

3.5 Σχήμα της πηγής

Το σχήμα της πηγής είναι ένα θεμελιώδες πρόβλημα της αντιστροφής. Για την λύση του γίνονται απλουστευτικές υποθέσεις για την κατανομή της πηγής ενώ τα υπολογιζόμενα σχήματα δεν είναι γνωστό αν συμφωνούν με τις πραγματικές πηγές. Στην πράξη υπάρχουν πηγές των οποίων το υποθετικό σχήμα δεν συμπίπτει με το πραγματικό γεωλογικό.

3.5.1. Επαναληπτικές μέθοδοι

Η ανάπτυξη μοντέλων για την επίλυση του ευθέως προβλήματος στα πεδία δυναμικού είναι μια διαδικασία τριών βημάτων:

1. Υπολογίζεται η ανωμαλία από ένα μοντέλο
2. Η μετρούμενη ανωμαλία συγκρίνεται με την υπολογιζόμενη ανωμαλία
3. Το μοντέλο τροποποιείται έτσι ώστε να βελτιωθεί η ομοιότητα στη σύγκριση

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου υπάρξει συμφωνία με τα αποτελέσματα.

3.5.2 Μετατροπή του μη-γραμμικού σε γραμμικό

Αν και τα πεδία δυναμικού εξαρτώνται μη γραμμικά από ορισμένες παραμέτρους της πηγής, αυτή η εξάρτηση είναι σχεδόν γραμμική σε σχέση με αρκετά μικρές αλλαγές αυτών των παραμέτρων. Για παράδειγμα το πεδίο δυναμικού ενός πολυγωνικού πρίσματος συσχετίζεται με τις συντεταγμένες των γωνιών του πολυγώνου με χρήση συναρτήσεων τόξου εφαπτομένης και λογαρίθμων, δηλαδή το πεδίο είναι μια μη γραμμική συνάρτηση των συντεταγμένων του πολυγώνου. Τέτοιου είδους μη γραμμικές σχέσεις μπορούν να γραμμικοποιηθούν θεωρώντας πολύ μικρές αλλαγές των παραμέτρων τους. Για παράδειγμα τα βαρυτικά και μαγνητικά πεδία που οφείλονται σε μια ομάδα πολυγωνικών πρισμάτων μπορούν να αναλυθούν σε μια σειρά Taylor που θα βασίζεται στην αλλαγή της θέσης των συντεταγμένων των πολυγώνων. Αν οι αλλαγές στις συντεταγμένες είναι μικρές η σειρά Taylor μπορεί να περικοπεί και να γίνει γραμμική. Κατασκευάζεται στη συνέχεια αλγόριθμος ο οποίος καθορίζει την καλύτερη διάταξη των πρισμάτων για μια δοθείσα ανωμαλία.

3.6 Δισδιάστατες μαγνητικές ανωμαλίες**3.6.1 Εξίσωση Euler**

Κάποιες μέθοδοι εκτίμησης βάθους βρίσκουν καλύτερη εφαρμογή σε ανωμαλίες που προκαλούνται από απομονωμένες πηγές. Μια άλλη ομάδα τεχνικών χρησιμοποιεί μια ελαφρώς τροποποιημένη στρατηγική, η οποία αντιμετωπίζει τις μαγνητικές και βαρυτικές ανωμαλίες ως αποτέλεσμα πολλών σχετικά απλών πηγών. Αυτή η στρατηγική ενδείκνυται για τομές μεγάλου μήκους ή μεγάλης κλίμακας διασκοπήσεις με πολλές ανωμαλίες. Για παράδειγμα, μια τεχνική που μπορεί να εκτιμήσει τη θέση ενός απλού σώματος (μονόπολο, δίπολο, λεπτό φύλλο κλπ.) με χρήση λίγων μόνο μετρήσεων του μαγνητικού ή βαρυτικού πεδίου μπορεί να εφαρμοστεί και σε μια τομή μεγάλου μήκους, με διαχωρισμό αυτού σε πολλά παράθυρα διαδοχικών μετρήσεων, και να υπολογιστεί στη συνέχεια η θέση της μεμονωμένης πηγής που αντιστοιχεί σε κάθε παράθυρο. Με χαρτογράφηση των αποτελεσμάτων θα προκύψουν μαγνητικές ή βαρυτικές συγκεντρώσεις γεωλογικού ενδιαφέροντος.

Η εξίσωση Euler έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μιας τέτοιας τεχνικής. Η γενική μορφή της εξίσωσης αυτής δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{r} \cdot \nabla f = -nf$$

Οι εξισώσεις f που ικανοποιούν την εξίσωση Euler θεωρούνται ομογενείς και αν επίσης ικανοποιούν την εξίσωση Laplace μπορούν να παρασταθούν με σφαιρικές συντεταγμένες ως ένα σύνολο σφαιρικών επιφανειακών αρμονικών. Κάθε χωρική παράγωγος μιας ομογενούς συνάρτησης είναι επίσης ομογενής.

Για παράδειγμα η ανωμαλία ολικού πεδίου ενός μαγνητικού δίπολου (ή ομοιόμορφα μαγνητισμένης σφαίρας) δίνεται από τη σχέση

$$\Delta T = C_m \hat{b} \cdot \nabla \left(m \cdot \frac{1}{r} \right),$$

όπου $\hat{b}$ είναι μοναδιαίο διάνυσμα παράλληλο στο περιβάλλον πεδίο, και m η ροπή του δίπολου. Αποδεικνύεται εύκολα ότι η ΔT όπως ορίζεται ικανοποιεί την εξίσωση Euler για $n = 3$. Η παράμετρος n στην εξίσωση Euler αναφέρεται ως **δομικός δείκτης** ή **ρυθμός ελάττωσης**.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα την ανωμαλία ολικού πεδίου πάνω από ένα απλό σώμα όπως είναι μια σφαίρα ή ένας κύλινδρος. Επίσης ΔT_i είναι το σημείο i μιας μαγνητικής διασκόπησης πάνω από σφαίρα ή κύλινδρο, με το σημείο μέτρησης στη θέση (x, y, z) και το κέντρο του σώματος στη θέση (x_0, y_0, z_0) . Έχουμε λοιπόν

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \Delta T_i & \frac{\partial}{\partial y} \Delta T_i & \frac{\partial}{\partial z} \Delta T_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} = n \Delta T_i$$

Θεωρώντας ότι υπάρχει τρόπος υπολογισμού της οριζόντιας και κατακόρυφης βαθμίδας της ανωμαλίας ολικού πεδίου τότε η παραπάνω εξίσωση έχει μόνο τέσσερις άγνωστους, τους x_0, y_0, z_0 και n , με τους τρεις πρώτους να δίνουν τη θέση του σώματος. Είναι δυνατόν να αυξηθεί ο αριθμός των εξισώσεων με χρήση μετρήσεων και από άλλες θέσεις (i)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \Delta T_1 & \frac{\partial}{\partial y} \Delta T_1 & \frac{\partial}{\partial z} \Delta T_1 \\ \frac{\partial}{\partial x} \Delta T_2 & \frac{\partial}{\partial y} \Delta T_2 & \frac{\partial}{\partial z} \Delta T_2 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \dots \end{bmatrix}$$

και λύνοντας το σύστημα με ελάχιστα τετράγωνα να βρεθούν οι άγνωστοι. Εάν είναι γνωστή η θέση του σώματος, το σύστημα μπορεί απλά να λυθεί ως προς n και έτσι να ληφθούν πληροφορίες για τη φύση του σώματος. Μπορεί επίσης να υπάρχει κάποια ένδειξη για τη φύση του σώματος οπότε να γίνει μια υπόθεση για την τιμή του n και το σύστημα να λυθεί απλά για τη θέση του σώματος.

Αν και η εξίσωση Euler αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για τον εντοπισμό σωμάτων ιδεατού σχήματος, όπως είναι οι σφαίρες ή οι κύλινδροι, η μέθοδος έχει σαφείς περιορισμούς όταν εφαρμόζεται σε πιο τυπικές δομές από άποψη κατανομής. Σε αυτές τις πιο ρεαλιστικές περιπτώσεις το n μπορεί να μην είναι σταθερό σε σχέση με το βάθος και τη θέση της πηγής (Steenland 1968, Steenland 1968, Ravat 1994) γιατί η f δεν είναι πλέον μια παράγωγος του $1/r$ αλλά περισσότερο ένα ολοκλήρωμα της πλήρους κατανομής της πηγής. Οι Reid et al. (1990) έδειξαν ότι οι ανωμαλίες πάνω από ορισμένες επιμήκεις δομές όπως είναι λεπτά ελάσματα υπό κλίση, ικανοποιούν την εξίσωση Euler, αλλά το πρόβλημα δεν εντοπίζεται εκεί. Ο Ravat (1994) έδειξε ότι η μέθοδος είναι αυστηρά εφαρμόσιμη μόνο όταν η ανωμαλία έχει σταθερό ρυθμό ελάττωσης σε σχέση με την απόσταση από την πηγή.

Παρά τους όποιους θεωρητικούς περιορισμούς της, η μέθοδος Euler φαίνεται να παρέχει χρήσιμα αποτελέσματα στην πράξη. Μια άλλη προσέγγιση που χρησιμοποιείται

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Αντιστροφή

3.1 Εισαγωγή

Μεταξύ των πεδίων δυναμικού και των πηγών που τα προκαλούν υπάρχει μια ολοκληρωτική σχέση. Στα παραδείγματα που παρατίθενται, το σύμβολο R αναφέρεται στον όγκο που καταλαμβάνει η πηγή, P είναι το σημείο από το οποίο γίνεται η παρατήρηση και βρίσκεται στη θέση (x, y, z) που δεν είναι μέσα στην πηγή, Q είναι το σημείο που γίνεται η ολοκλήρωση μέσα στην πηγή με συντεταγμένες (x', y', z') και $\mathbf{r}$ είναι ένα διάνυσμα το οποίο κατευθύνεται από το σημείο Q στο P . Οι σχέσεις αυτές για το βαρυτικό και μαγνητικό πεδίο είναι:

Κατακόρυφη έλξη βαρύτητας

$$g(P) = -\gamma \int_R \rho(Q) \frac{z - z'}{r^3} dV$$

Κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο

$$B_z(P) = -C_m \frac{\partial}{\partial z} \int_R \mathbf{M}(Q) \cdot \nabla_Q \frac{1}{r} dV = C_m \int_R \frac{\mathbf{M}(Q)}{r^4} \cdot [3\hat{r}(z - z') - r\hat{\mathbf{k}}] dV$$

Ανωμαλία ολικού πεδίου (κατά προσέγγιση)

$$\Delta T(P) = -C_m \hat{\mathbf{F}} \cdot \nabla_P \int_R \mathbf{M}(Q) \cdot \nabla_Q \frac{1}{r} dV = C_m \int_R \frac{\mathbf{M}(Q)}{r^3} \cdot [3(\hat{\mathbf{F}} \cdot \hat{\mathbf{r}})\hat{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{F}}] dV$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, οι ποσότητες $\rho(Q)$ και $M(Q)$ έχουν τη συνήθη έννοια της πυκνότητας και μαγνήτισης αντίστοιχα. Το μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{\mathbf{F}}$ έχει τη διεύθυνση του αδιατάρακτου μαγνητικού πεδίου, ενώ το μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{\mathbf{k}}$ διευθύνεται κατακόρυφα προς τα κάτω. Οι παράγοντες γ και C_m είναι σταθερές.

Οι παραπάνω σχέσεις ακολουθούν μια γενική μορφή

$$f(P) = \int_R s(Q) \cdot G(P, Q) dV$$

Σε μερικές περιπτώσεις είναι θεμιτό να καθοριστεί η κατευθυντική συμπεριφορά της μαγνήτισης. Κάποιες φορές για παράδειγμα υποτίθεται ότι η μαγνήτιση επάγεται πλήρως από το περιβάλλον πεδίο. Έτσι η μαγνήτιση θα είναι σχεδόν μονοκατευθυντική εάν η επιδεκτικότητα είναι ισότροπη και η μαγνητική διασκόπηση δεν είναι πολύ μεγάλης έντασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορούμε να θέσουμε $M(Q) = M(Q)\hat{\mathbf{M}}$ στις δυο τελευταίες εξισώσεις και να μεταφέρουμε το μοναδιαίο διάνυσμα μέσα στις αγκύλες. Τότε όλες οι εξισώσεις έχουν την ίδια γενική μορφή

$$f(P) = \int_R s(Q) \cdot \psi(P, Q) dV$$

όπου $f(P)$ είναι το πεδίο δυναμικού στο P , το $s(Q)$ περιγράφει την φυσική ποσότητα (πυκνότητα ή μαγνήτιση) στο Q και $\psi(P, Q)$ είναι μια συνάρτηση που εξαρτάται από τη γεωμετρική τοποθέτηση του σημείου παρατήρησης P και του σημείου Q . Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως **εξίσωση Fredholm** της πρώτης ομάδας (Morse και Feshbach 1953). Οι εξισώσεις $\psi(P, Q)$ και $G(P, Q)$ ονομάζονται συναρτήσεις Green.

επίσης είναι η διασκόπηση να χωριστεί σε τετράγωνα, πιθανόν αλληλοκαλυπτόμενα παράθυρα και για κάποια ειδική τιμή του n να αναλυθεί κάθε παράθυρο για την εύρεση της θέσης της πηγής.

Τέλος είναι φανερό πως η μέθοδος Euler απαιτεί τη γνώση όχι μόνο της ανωμαλίας αλλά και της βαθμίδας της και στις τρεις διευθύνσεις. Αυτές πιθανόν να είναι διαθέσιμες από πραγματικές μετρήσεις της βαθμίδας αλλά πιθανότερο είναι αυτές να πρέπει να εξαχθούν από τις μετρήσεις των ανωμαλιών.

3.6.2 Αποσυνέλιξη Werner

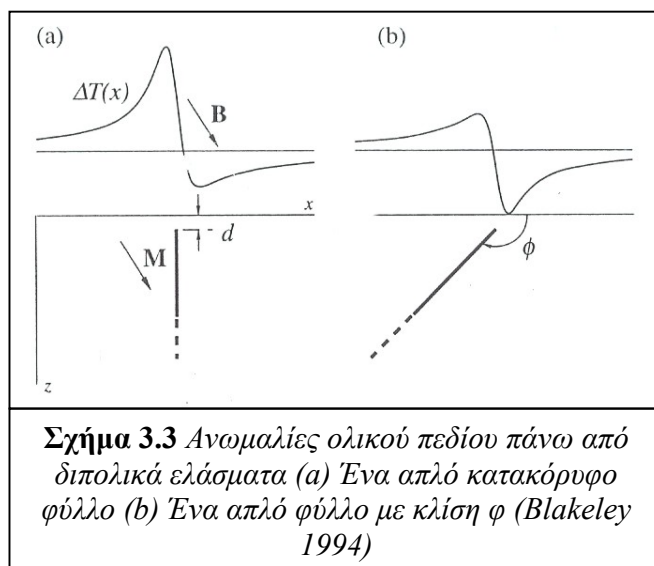
Το μαγνητικό πεδίο ενός λεπτού φυλλόμορφου σώματος (έλασμα) έχει πολύ απλή μορφή η οποία εν μέρει εξαρτάται άμεσα από τη θέση και το βάθος στο οποίο βρίσκεται. Αυτό σε πρώτη φάση παρέχει την δυνατότητα υπολογισμού του πάνω ορίου του σώματος αυτού με τέσσερις μόνο μετρήσεις της ανωμαλίας ολικού πεδίου. Χωρίζουμε δηλαδή μια ανωμαλία ολικού πεδίου πάνω από μια πηγή σε τμήματα, στο καθένα από τα οποία θα υπολογίζεται με βάση τέσσερις μετρήσεις η θέση του σώματος. Με συνεχόμενες μετρήσεις γίνεται όλο και πιο ρεαλιστική η συγκέντρωση των εξαγχθέντων σημείων γύρω από το πραγματικό σώμα. Αν μοντελοποιηθεί σωστά η πραγματική γεωλογική τομή με μια διάταξη τέτοιων σωμάτων, τότε από την ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού ομάδων από σημεία κατά μήκος της τομής μπορούν να αντληθούν στοιχεία για την θέση των σωμάτων.

Η τεχνική αυτή αναπτύχθηκε θεωρητικά από τον Werner (1953) ενώ αργότερα τέθηκε σε εφαρμογή από τους Hartman, Teskey και Friedberg (1971). Οι ομάδες των συνεχόμενων σημείων λειτουργούν σαν παράθυρο που «γλιστράει» κατά μήκος της όδευσης. Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια κατά μια έννοια με αυτή της αποσυνέλιξης στη σεισμική διασκόπηση κι έτσι η μέθοδος καλείται **αποσυνέλιξη Werner**.

Οι κάθετες φλέβες φαίνεται να αποτελούν μια πολύ εξειδικευμένη εφαρμογή. Ωστόσο όπως δείχθηκε από τους Hartman et al. (1971) και Hansen & Simmonds (1993) η γενίκευση της μεθόδου για άλλα υποθετικά σώματα είναι βατό πρόβλημα. Για παράδειγμα, η ανωμαλία πάνω από μια πολύ λεπτή φλέβα είναι ισοδύναμη με την οριζόντια βαθμίδα ενός ημιάπειρου ημιχώρου (μοντέλο υπεδάφιας γωνίας ή άλλης προσομοίωσης ρήγματος). Έτσι η οριζόντια βαθμίδα μπορεί να αναλυθεί με τον ίδιο

τρόπο για εντοπισμό των απότομων ορίων στα μαγνητικά στρώματα.

Οι Ku & Sharp (1983) ανέπτυξαν μια συζήτηση σε σχέση με την αποσυνέλιξη Werner η οποία ακολουθεί περιληπτικά. Ένα μαγνητικό έλασμα αμελητέου πάχους είναι ισοδύναμο με ένα φύλλο δίπολων (σχήμα 3.3) Για να βρεθεί η ανωμαλία ενός ημιάπειρου φύλλου παίρνουμε ως αφετηρία τις εξισώσεις για μια απλή γραμμή δίπολων και ολοκληρώνουμε από το βάθος d



ως το άπειρο. Διπολική ροπή ανά μονάδα μήκους m είναι ίση με το γινόμενο της μαγνήτισης M επί το εμβαδόν της τομής. Αν το πλάτος των φύλλων είναι Δx τότε $m = M \Delta x dz$. Οι συνιστώσες x και z του μαγνητικού πεδίου εξαιτίας μιας σειράς δίπολων δίνονται από τις σχέσεις

$$B_x = \frac{2C_m M \Delta x}{(x'^2 + z'^2)^2} [\hat{M}_x (x'^2 - z'^2) + 2\hat{M}_z x' z'] dz'$$

$$B_z = \frac{2C_m M \Delta x}{(x'^2 + z'^2)^2} [\hat{M}_z (z'^2 - x'^2) + 2\hat{M}_x x' z'] dz'$$

και η ανωμαλία ολικού πεδίου μιας γραμμικής πηγής δίνεται από τον τύπο

$$\Delta T_1 = \hat{F} \cdot B = \frac{2C_m M \Delta x}{(x'^2 + z'^2)^2} [a(z'^2 - x'^2) + 2\beta x' z'] dz'$$

όπου $\hat{F}$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα που είναι παράλληλο στο περιβάλλον πεδίο και

$$a = \hat{F}_x \hat{M}_x - \hat{F}_z \hat{M}_z$$

$$\beta = \hat{F}_x \hat{M}_z - \hat{F}_z \hat{M}_x$$

Για να βρεθεί η ανωμαλία του κάθετου φύλλου ολοκληρώνουμε την πιο πάνω σχέση από το βάθος d ως το άπειρο για να έχουμε:

$$\Delta T_s = 2C_m M \Delta x \int_d^\infty \frac{ax'^2 - az'^2 + 2\beta x' z'}{(x'^2 + z'^2)^2} dz' = -2C_m M \Delta x \frac{ad - \beta x'}{x'^2 + d^2}$$

Περιστρέφοντας το σύστημα αναφοράς x, y κατά μια γωνία θ παράγεται ένα νέο σύστημα συντεταγμένων u, w

$$x = u \cos \theta + w \sin \theta$$

$$z = -u \sin \theta + w \cos \theta$$

Περιστρέφοντας όμως το σύστημα συντεταγμένων κατά γωνία θ ισοδυναμεί με μια περιστροφή στο λεπτό φύλλο κατά ένα ποσοστό $-\theta$. Με εφαρμογή της μετατροπής των συντεταγμένων και θέτοντας το σημείο παρατήρησης στο σημείο $(x, 0)$ αντί για το $(0, 0)$ έχουμε σαν αποτέλεσμα την γενική εξίσωση για την ανωμαλία ολικού πεδίου πάνω από ένα ημιάπειρο έλασμα δίπολων:

$$\Delta T_s(x) = \frac{A(x - x') + Bd}{(x - x')^2 + d^2}$$

όπου

$$A = -2C_m M \Delta x (\alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi)$$

$$B = 2C_m M \Delta x (-\alpha \sin \varphi + \beta \cos \varphi)$$

Όπου φ είναι η γωνία κλίσης του φύλλου κάτω από το οριζόντιο επίπεδο όπως φαίνεται στο σχήμα (3.3).

Για κάθε δοθείσα κλίση φ η παραπάνω εξίσωση έχει τέσσερις αγνώστους A, B, x' και d που απαιτούν για τη λύση τους τέσσερις ή περισσότερες μετρήσεις της ανωμαλίας ολικού πεδίου. Επίσης αυτή μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$x^2 \Delta T_1 = a_0 + a_1 x + b_0 \Delta T_1 + b_1 x \Delta T_1$$

ή αλλιώς σε μορφή πινάκων ως εξής

$$x^2 \Delta T_i = \begin{bmatrix} 1 & x & \Delta T_i & x \Delta T_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

όπου ΔT_i είναι το σημείο i της τομής και

$$a_0 = -Ax' + Bd$$

$$a_1 = A$$

$$b_0 = -x'^2 - d^2$$

$$b_1 = 2x'$$

Οι τέσσερις άγνωστοι περιορίζονται στους a_0 , a_1 , b_0 και b_1 δηλαδή

$$x' = b_1/2$$

$$d = \sqrt{-b_0 - \frac{b_1^2}{4}}$$

$$A = a_1$$

$$B = \frac{2a_0 + a_1 b_1}{2d}$$

έτσι λύνοντας ως προς a_0 , a_1 , b_0 και b_1 υπολογίζονται οι τιμές των x' , d , A και B .

Τέσσερις συνεχόμενες μετρήσεις της ανωμαλίας ολικού πεδίου παρέχουν τέσσερις εξισώσεις με τέσσερις αγνώστους ή αλλιώς σε μορφή πινάκων

$$\begin{bmatrix} x_i^2 \Delta T_i \\ x_{i+1}^2 \Delta T_{i+1} \\ x_{i+2}^2 \Delta T_{i+2} \\ x_{i+3}^2 \Delta T_{i+3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & \Delta T_i & x_i \Delta T_i \\ 1 & x_{i+1} & \Delta T_{i+1} & x_{i+1} \Delta T_{i+1} \\ 1 & x_{i+2} & \Delta T_{i+2} & x_{i+2} \Delta T_{i+2} \\ 1 & x_{i+3} & \Delta T_{i+3} & x_{i+3} \Delta T_{i+3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ b_0 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

Με εφαρμογή της παραπάνω φόρμουλας σε τέσσερις συνεχόμενες μετρήσεις της ανωμαλίας ολικού πεδίου πάνω από ένα έλασμα δίπολων θα έπρεπε να εξαχθούν οι τέσσερις άγνωστοι που αφορούν στο έλασμα, δηλαδή οι x' , d , A και B . Αν η μοντελοποίηση της γεωλογικής τομής είναι δυνατόν να γίνει σωστά με χρήση πολλών τέτοιων φύλλων τότε πάνω σε αυτή μπορεί να μετακινηθεί η ομάδα αυτή των τεσσάρων σημείων και με ερμηνεία των αποτελεσμάτων να προκύψουν οι διάφορες γεωλογικές και μη δομές.

Η μέθοδος που περιγράφηκε πιο πάνω είναι εφαρμόσιμη τόσο για την ανωμαλία ολικού πεδίου όσο και για την οριζόντια βαθμίδα της (Ku & Sharp 1983). Οι Hansen και Simmonds επέκτειναν την μέθοδο της αποσυνέλιξης Werner και σε πολυγωνικές πηγές. Στη μέθοδο τους, η αποσυνέλιξη εφαρμόζεται στο αναλυτικό σήμα της ανωμαλίας και όχι στην ίδια την ανωμαλία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

Ανόρθωση μαγνητικού σήματος

4.1 Εισαγωγή

Γενικά είναι δεδομένο πως στην επεξεργασία των πεδίων δυναμικού, ο διανυσματικός χαρακτήρας των μαγνητικών ποσοτήτων τις καθιστά πιο δύσκολες και πολύπλοκες ως προς τους χειρισμούς από αυτές των βαρυτικών. Απαιτείται επομένως μια προκαταρκτική διεργασία απλοποίησης του μαγνητικού σήματος έτσι ώστε αυτό να λάβει μια μορφή τέτοια που να μας επιτρέπει να έχουμε την ίδια αφετηρία στην παρουσίαση του ή και στην περαιτέρω επεξεργασία του, όπως με άλλες γεωφυσικές τεχνικές. Δηλαδή θέλουμε το μαγνητικό σήμα να μοιάζει με αυτό της βαρυτικής διασκόπησης ή αυτά που καταγράφονται από την εφαρμογή της ηλεκτρικής χαρτογράφησης κατά τις εξερευνήσεις αρχαιολογικών χώρων. Σε μέσα γεωγραφικά πλάτη, η μορφή της ανωμαλίας που προκαλείται από μια θαμμένη μαγνητική δομή. Σε μια όδευση που περνά ακριβώς πάνω από την πηγή αυτή, θα έχει την τυπική διλοβική μορφή εξαιτίας του διπολικού χαρακτήρα της επίδρασης του θαμμένου σώματος στο Γήινο μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, βαρυτικές ή ηλεκτρικές ανωμαλίες που προκαλούνται από το ίδιο σώμα θα έχουν μια πολύ πιο απλή μορφή με ένα μόνο λοβό ο οποίος θα βρίσκεται σε θέση κεντρική πάνω από το σώμα που προκαλεί την ανωμαλία και μέγεθος ανάλογο της έντασης της ανωμαλίας αυτής. Επομένως είναι λογικό να αναζητηθούν μαθηματικοί τρόποι για την μετατροπή του μαγνητικού σήματος σε μια μορφή ανάλογη των ηλεκτρικών στην περίπτωση διασκοπήσεων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Έτσι ο σκοπός της μετατροπής αυτής είναι η διλοβική μορφή του μαγνητικού σήματος, η οποία δεν είναι αντιπροσωπευτική ούτε για τη θέση ούτε για την ένταση της μαγνήτισης, να μετατραπεί σε απλό μονολοβικό (ανορθωμένο) σήμα, παρόμοιο με το αποτέλεσμα μιας ηλεκτρικής διασκόπησης. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η διάκριση ενός στόχου θα είναι αρκετά πιο εύκολη και έτσι η επεξεργασία της κατανομής μιας μαγνητικής ποσότητας, στην οποία θα καταλήξουμε να προσομοιάζει την κάτοψη των αρχαιοτήτων που θα σχεδιάζαμε αν είχε γίνει ανασκαφή. Αν και γενικά σε πολύπλοκες εικόνες με πολλά πιθανά σώματα με μαγνητικές ιδιότητες η σαφήνεια της μορφής τους έγκειται σε υποκειμενικά κριτήρια, όπως θα φανεί και πιο κάτω, η εφαρμογή μεθόδων ανόρθωσης του μαγνητικού σήματος είναι ευεργετική. Οι τρεις πιο σημαντικές μέθοδοι στην ανόρθωση αυτή περιγράφονται πιο κάτω.

4.2 Αναγωγή στον πόλο (*Reduction to the pole*)

Οι θετικές βαρυτικές ανωμαλίες τείνουν να βρίσκονται τοποθετημένες πάνω από συγκεντρώσεις μάζας, αλλά δεν ισχύει απαραίτητα το ίδιο και για μαγνητικές ανωμαλίες εκτός αν η μαγνήτιση και το περιβάλλον πεδίο έχουν κατακόρυφη διεύθυνση.

Ο μετασχηματισμός Fourier της ανωμαλίας ολικού πεδίου που προκαλείται από μια τρισδιάστατη κατανομή μαγνήτισης $M(x, y, z)$ δίνεται από τη σχέση

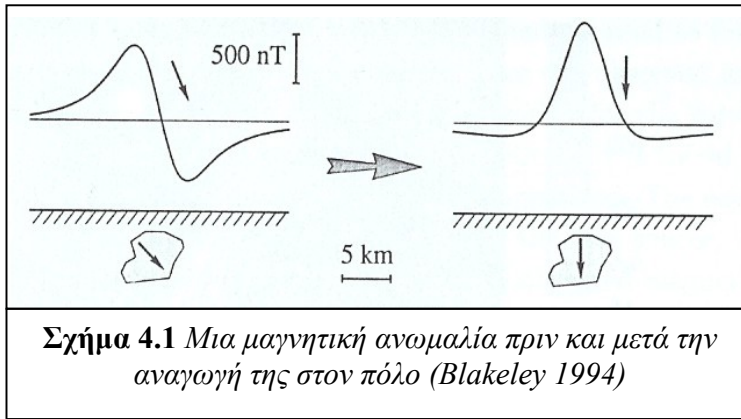
$$\mathfrak{Z}[\Delta T] = 2\pi C_m \Theta_m \Theta_f |k| e^{|k|z_0} \int_{z_0}^{\infty} e^{-|k|z'} \mathfrak{Z}[M(z')] dz'$$

όπου με $\Im[M(z')]$ δηλώνεται ο μετασχηματισμός Fourier της μαγνήτισης σε μια οριζόντια πλάκα μέσα από το σώμα σε βάθος z' . Οι παράμετροι Θ_m και Θ_f δίνονται από τις σχέσεις

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

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

όπου $\hat{\mathbf{m}} = (\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z)$ και $\hat{\mathbf{f}} = (\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{f}_z)$ είναι μοναδιαία διανύσματα στην διεύθυνση της μαγνήτισης και στην διεύθυνση του περιβάλλοντος πεδίου αντίστοιχα.



Εφόσον τα $\hat{m}$ και $\hat{f}$ είναι κατακόρυφα, οι Θ_m και Θ_f θα συνεισφέρουν μια φάση στη μαγνητική ανωμαλία, η οποία έχει τη δυνατότητα να μετατοπίσει την ανωμαλία πλευρικά, να της παραμορφώσει το σχήμα, ακόμη και να της αλλάξει το πρόσημο (σχήμα 4.1). Γενικά, αν η μαγνήτιση και το περιβάλλον πεδίο δεν

είναι κατακόρυφα σε διεύθυνση, μια συμμετρική κατανομή μαγνήτισης (όπως είναι μια ομοιόμορφα μαγνητισμένη σφαίρα) θα δώσει μια λοξή μαγνητική ανωμαλία αντί για συμμετρική.

Αυτή η επιπρόσθετη πολυπλοκότητα μπορεί να εξαλειφθεί από μια μαγνητική διασκόπηση με χρήση των εξής σχέσεων

$$\Im[\Delta T_r] = \Im[\Delta T] \Im[\psi_r] \quad \text{όπου} \quad \Im[\psi_r] = \Theta'_m \Theta'_f / \Theta_m \Theta_f$$

Αν απαιτηθεί να ισχύει η συνθήκη $\hat{\mathbf{m}}' = \hat{\mathbf{f}}' = (0,0,1)$ για την τελευταία σχέση, τότε η ακριβώς προηγούμενη της θα μετατρέψει μια μετρούμενη ανωμαλία ολικού πεδίου στην κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου που προκαλείται από την ίδια κατανομή πηγής μαγνητισμένη κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η μετατρεμμένη ανωμαλία στην περιοχή Fourier δίνεται από τη σχέση

$$\Im[\Delta T_r] = \Im[\psi_r] \Im[\Delta T]$$

$$\text{όπου} \quad \Im[\psi_r] = 1/\Theta_m \Theta_f = |k|^2 / (a_1 k_x^2 + a_2 k_y^2 + a_3 k_x k_y + i|k|(b_1 k_x + b_2 k_y)), |k| \neq 0$$

$$\begin{cases} a_1 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_x \hat{f}_x, & a_2 = \hat{m}_z \hat{f}_z - \hat{m}_y \hat{f}_y \\ a_3 = -\hat{m}_y \hat{f}_x - \hat{m}_x \hat{f}_y, & b_1 = \hat{m}_y \hat{f}_z + \hat{m}_z \hat{f}_y \\ b_2 = \hat{m}_y \hat{f}_z + \hat{m}_z \hat{f}_y \end{cases}$$

Η εφαρμογή της $\Im[\psi_r]$ καλείται *αναγωγή στον πόλο* (Baranov & Naudy 1964) γιατί η ΔT_x είναι η ανωμαλία που θα μετρούνταν στο βόρειο μαγνητικό πόλο, όπου τόσο η επαγόμενη μαγνήτιση όσο και το περιβάλλον πεδίο θα είχαν κατεύθυνση κατακόρυφη

προς τα κάτω. Η αναγωγή στον πόλο αφαιρεί ένα μέρος της πολυπλοκότητας από την τελική διαδικασία ερμηνείας. Μετακινεί τις ανωμαλίες πλευρικά έτσι ώστε αυτές να τοποθετηθούν πάνω από τις πηγές που τις προκαλούν και αλλάζει το σχήμα τους έτσι ώστε συμμετρικές πηγές να προκαλούν συμμετρικές ανωμαλίες. Η διεύθυνση τόσο της μαγνήτισης όσο και του περιβάλλοντος πεδίου είναι αναγκαίες στην τελευταία εξίσωση, αλλά δεν απαιτείται καμία άλλη υπόθεση σε ότι αφορά την κατανομή της μαγνήτισης, εκτός αυτής που αναφέρεται στις πλευρικές διαστάσεις των πηγών.

4.3 Μέθοδος των αναβαθμίδων (*Terracing*)

Οι Cordell και McCafferty (1989) περιέγραψαν μια τεχνική για την παραγωγή ενός είδους μιας ισοδύναμης πηγής από τις μετρούμενες βαρυτικές ή μαγνητικές ανωμαλίες. Η οδηγούσα αρχή πίσω από την τεχνική τους είναι ότι η πυκνότητα ή η μαγνήτιση μέσα σε ένα ισοδύναμο στρώμα θα πρέπει να παραμένει σταθερή εκτός από σημεία απότομων ορίων. Η τελική μορφή των τιμών της πυκνότητας ή της μαγνήτισης θυμίζει μια εικόνα ενός τοπίου με αναβαθμίδες, όπου οι «λόφοι και κοιλάδες» του πεδίου δυναμικού έχουν μετατραπεί σε οριζόντιες επιφάνειες με απότομες άκρες. Συνεπαγόμενα, η τεχνική αυτή ονομάστηκε *μέθοδος των αναβαθμίδων*. Χάρτες αναβαθμισμένων φυσικών ιδιοτήτων έχουν την γενική όψη ενός γεωλογικού χάρτη, όπου η λιθολογία απεικονίζεται σαν ομοιόμορφα σώματα εκτός κι αν αναφερόμαστε σε θέσεις κατά μήκος επαφών.

Η μέθοδος των αναβαθμίδων δεν αποτελεί αντιστροφή στη συνήθη της έννοια. Δεν γίνονται υπολογισμοί αντιστροφής, αλλά οι βαρυτικές ή μαγνητικές τιμές αυξάνονται και μειώνονται επαναληπτικά με σκοπό την προσέγγιση της αναβαθμισμένης μορφής. Συγκεκριμένα, η τιμή σε κάθε σημείο ενός πλέγματος αναθεωρείται κατά θέση είτε προς τα άνω είτε προς τα κάτω ανάλογα με το αλγεβρικό πρόσημο της καμπυλότητας (δηλαδή της δεύτερης κατακόρυφης παραγώγου) σε αυτό το σημείο. Έτσι γίνονται συνεχείς διορθώσεις μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό αναβαθμισμένο αποτέλεσμα. Οι αναβαθμίδες που προκύπτουν δεν αναπαριστούν άμεσα πυκνότητα ή μαγνήτιση αλλά μπορούν να βαθμονομηθούν για να το κάνουν. Για παράδειγμα, η μαγνήτιση ή η πυκνότητα κάθε αναβαθμίδας μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ένας άγνωστος σε ένα υπέρ-καθορισμένο σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Με υπόθεση της πάνω και κάτω επιφάνειας του στρώματος, μπορεί να γίνει χρήση τεχνικών ελαχίστων τετραγώνων για να βρεθεί έτσι η καλύτερη δυνατή τιμή της μαγνήτισης ή της πυκνότητας για κάθε αναβαθμίδα.

4.4 Φίλτρα αντιστροφής – Γενικά

Οι ανωμαλίες που προκαλούνται από μαγνητικά επιδεκτικές δομές του υπεδάφους μπορούν να θεωρηθούν ως συνέλιξη μιας συνάρτησης πλάτους και μιας συνάρτησης μορφής. Η συνάρτηση πλάτους ελέγχει το πλάτος, και είναι ένας παλμός του οποίου το μέγεθος εξαρτάται από τις διαστάσεις και τη μαγνήτιση της δομής. Από την άλλη πλευρά, όπως υποδηλώνει και το όνομα, η συνάρτηση μορφής ελέγχει την μορφή της ανωμαλίας. Επομένως αυτή εξαρτάται από την απόσταση από την πηγή, την κλίση, το βάθος ταφής της πηγής και τον προσανατολισμό της μετρούμενης τομής σε σχέση με το μαγνητικό βορρά.

Ο στόχος της αρχαιομετρίας είναι να εντοπίσει και να αποσαφηνίσει θαμμένες αρχαιότητες. Ωστόσο, επειδή συχνά συναντώνται προβλήματα στην απαλλοτρίωση

εκτάσεων για αρχαιολογικούς σκοπούς, απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες από την απλή οριοθέτηση μιας περιοχής που πιθανόν να περιέχει κάποια αρχαιότητα. Η έρευνα θεωρείται πως έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς εάν ως τελικό προϊόν έχει ένα χάρτη ο οποίος λίγο πολύ να δίνει μια γενική κάτοψη των κρυμμένων δομών, δηλαδή το αποτέλεσμα που θα είχε η απεικόνιση μιας περιοχής μετά το τέλος κάποιας ανασκαφής (Scollar et al. 1986, Wynn 1986).

Η προσπάθεια που καταβάλλεται έχει ως στόχο να καταστήσει τους χάρτες του ολικού μαγνητικού πεδίου πάνω από αρχαιολογικές θέσεις εύκολα αναγνώσιμους. Αυτή η μορφή θα πρέπει να σκιαγραφήσει τις διαστάσεις των θαμμένων αρχαιοτήτων, να τοποθετήσει τα κέντρα τους στις πραγματικές τους θέσεις (με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια) και να είναι φυσικά όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη.

Το πρόβλημα αυτό λύνεται με χρήση των φίλτρων αντιστροφής. Για να είναι εφαρμόσιμη η διαδικασία είναι απαραίτητο το συνελκτικό μοντέλο της ανωμαλίας ολικού πεδίου. Ένα ανάλογο μοντέλο προτάθηκε από τους Bhattacharyya & Navolio (1975) και τους Bhattacharyya & Chan (1977).

Οι Karousova & Karous (1989) πρότειναν τη χρήση των φίλτρων αντιστροφής στη γεωφυσική διασκόπηση με σκοπό την αναζήτηση αρχαιοτήτων. Κατασκεύασαν τα κατάλληλα φίλτρα για ένα κατακόρυφο κύλινδρο και για ένα άπειρο πρίσμα με χρήση των εξισώσεων Logacev & Zacharov (1973). Οι Tsokas et al. (1991) προσπάθησαν να τροποποιήσουν τη διαδικασία που περιγράφηκε από τους προηγούμενους ερευνητές. Χρησιμοποίησαν φίλτρα βασισμένα σε ανωμαλίες που οφείλονται σε πεπερασμένα πρίσματα και συνέλιξαν κάθε όδευση ενός γεωφυσικού χάρτη με αυτά. Με αυτό τον τρόπο, το πιο συχνά εφαρμόσιμο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την ψευδο-δισδιάστατη διαδικασία. Επιπλέον, σχολίασαν και το μήκος αποκοπής του φίλτρου και διατύπωσαν την εξής πρόταση: το κατάλληλο μήκος φίλτρου είναι αυτό που είναι ίσο με τη χρονική καθυστέρηση στο σημείο που η αυτοσυσχέτιση της συνάρτησης μορφής ελαττώνεται σε μηδέν. Και οι δυο από τις προηγούμενες μελέτες αφορούσαν στην περίπτωση του μονοδιάστατου προβλήματος. Μια πλήρης δισδιάστατη διαδικασία προτάθηκε από τους Tsokas & Papazachos (1992). Η περαιτέρω βελτίωση της διαδικασίας αυτής, και η προσαρμογή της σε διαφορετικά δεδομένα, επιχειρείται στην παρούσα εργασία.

4.5 Μονοδιάστατα (1D) φίλτρα αντιστροφής

4.5.1 Εκτίμηση του φίλτρου

Η ανωμαλία ολικού πεδίου ενός πρίσματος με κατακόρυφες πλευρές και έχει πεπερασμένη έκταση σε βάθος μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από την αφαίρεση των αποτελεσμάτων δύο πρισμάτων με άπειρη έκταση σε βάθος. Το αποτέλεσμα κάθε ενός από τα πρίσματα αυτά δίνεται από τη σχέση (Logacev & Zacharov 1973)

$$\Delta T(\xi) = 4bJ \frac{\cos^2 In}{\xi^2 + h^2} \left[h(\tan^2 In - \cos^2 A) - 2\xi \tan In \cos A \right]$$

όπου,

J είναι η μαγνήτιση

In είναι η έγκλιση του κανονικού μαγνητικού πεδίου

A είναι ο προσανατολισμός της τομής

ξ είναι η απόσταση από το κέντρο του σώματος

$2b$ είναι το πλάτος της πλάκας

h είναι το βάθος ταφής

Θεωρώντας $D = 4bJ$ ως την συνάρτηση πλάτους τότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής

$$\Delta T(\xi) = D \cdot R(\xi),$$

όπου $R(\xi)$ είναι η συνάρτηση μορφής.

Για το μαγνητικό αποτέλεσμα του πεπερασμένου πρίσματος έχουμε την παρακάτω σχέση όπου οι δείκτες 1 και 2 αντιστοιχούν στα δυο πρίσματα με άπειρη σε βάθος διάσταση

$$\Delta T = \Delta T_1 - \Delta T_2 = 4bJ(R_1(\xi) - R_2(\xi)) = 4bJR(\xi)$$

Ας υποθεθεί ότι η μαγνήτιση είναι επαγόμενη μόνο και ότι η αρχική εξίσωση περιγράφει ένα πρίσμα δυο διαστάσεων το οποίο έχει άπειρη την εγκάρσια διάστασή του. Με αυτή την υπόθεση μπορεί να θεωρηθεί ότι το πρίσμα της τελευταίας σχέσης αποτελείται από μια σειρά λεπτών πλακών, που βρίσκονται τοποθετημένες στο ίδιο βάθος σε σημεία $x_j = j \cdot \Delta x$ και ότι όλες οι πλάκες είναι ίσα μαγνητισμένες.

Χρησιμοποιώντας την αρχή της υπέρθεσης έχουμε

$$\Delta T(x_i) = \sum_{j=m}^n D_j \cdot R(x_i - x_j)$$

που είναι μια έκφραση ψηφιακής ανάλυσης. Αυτό γίνεται πιο εμφανές αν η σχέση αυτή γραφεί ως εξής

$$T_j = \sum_{j=m}^n D_j R_{ij} \text{ που ισοδυναμεί με } T = D * R$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την έκφραση του συνελκτικού μοντέλου για την ανωμαλία ολικού πεδίου T . Επομένως μπορεί να γραφεί ως εξής

$$D = T * R^{-1}$$

όπου R^{-1} είναι ο αντίστροφος του R και εξ ορισμού δίνεται από τη σχέση

$$R * R^{-1} = \theta$$

όπου θ είναι ο μοναδιαίος πίνακας ταυτότητα. Από την θεωρία z-μετασχηματισμού η σειρά R^{-1} είναι άπειρη και στην πράξη είναι αναγκαίο να γίνει χρήση μιας μερικής προσέγγισης $\bar{R}^{-1}$. Η καλύτερη προσέγγιση αυτού με χρήση ελαχίστων τετραγώνων είναι

$$\sum_{j=L/2}^{L/2} \bar{R}_j^{-1} A_{k-j} = R_{-k}$$

όπου $A_k = \sum_{j=m}^n R_{j+k} R_j$ η αυτοσυσχέτιση της συνάρτησης μορφής (Kanasewich 1975).

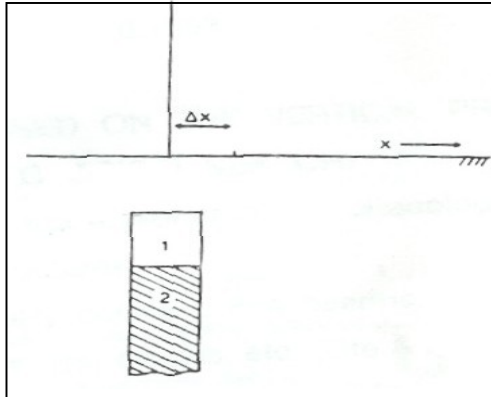
4.5.2 Καταλληλότητα των φίλτρων στην Αρχαιομετρία

Οι στόχοι ενδιαφέροντος στην διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων με γεωφυσικές μεθόδους είναι συνήθως οι κάτωθι:

(α) Δομές θετικής αντίθεσης μαγνήτισης. Εστίες, κάμινοι, δομές με τούβλα, οροφές που κατέρρευσαν, εδαφικές δομές όπως είναι αυλάκια, χαντάκια κλπ. (Tite & Mullins 1971)

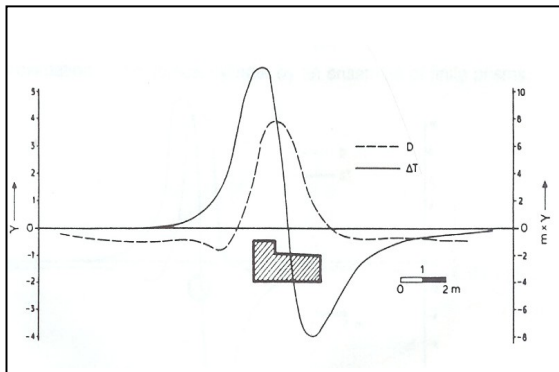
(β) Δομές αρνητικής αντίθεσης μαγνήτισης. Αμυντικά τείχη, θεμέλια κτιρίων, δρόμοι, δομές από λαξευμένες πέτρες κλπ.

Τα παραπάνω αποτελούν εμπειρικό κανόνα ο οποίος φυσικά έχει και τις εξαιρέσεις του (Munro & Paramarinopoulos 1978) που αφορούν στις περιπτώσεις στις.

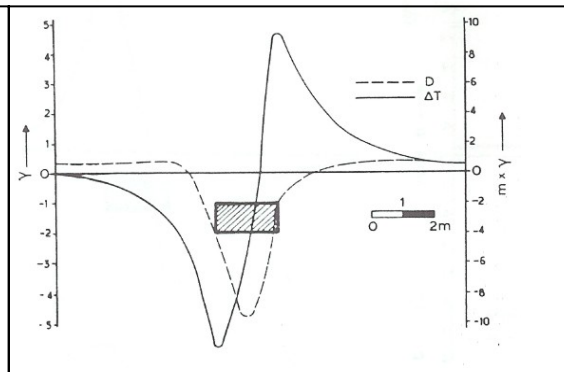


Σχήμα 4.2 Δισδιάστατο μοντέλο ενός πεπερασμένου πρίσματος για την κατασκευή φίλτρου αντιστροφής (Tsokas et al. 1991)

Γενικά οι παραπάνω δομές μπορούν να θεωρηθούν ότι προσομοιάζονται καλά από γεωμετρικά σχήματα, που αναπαρίστανται από έναν αριθμό πρισμάτων κατακόρυφων πλευρών όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα (4.2). Για παράδειγμα, στο σχήμα (4.3) φαίνεται ένα μοντέλο που εξομοιώνει τα ερείπια ενός τουβλόχτιστου τείχους. Η υπολογιζόμενη ανωμαλία ολικού πεδίου φαίνεται επίσης στο σχήμα μαζί με το αποτέλεσμα της συνέλιξης της ανωμαλίας με το φίλτρο αντιστροφής. Είναι εμφανές ότι το φίλτρο έχει ανορθώσει τη μαγνητική ανωμαλία. Η κορυφή του πλάτους βρίσκεται πλέον ακριβώς πάνω από το κέντρο του σώματος. Επιπλέον, το πλευρικό εύρος του σώματος σκιαγραφείται ευκρινώς από το πλευρικό εύρος της ανωμαλίας.



Σχήμα 4.3 Δισδιάστατο μοντέλο ερειπίων τείχους από τούβλα καθώς και το υπολογισμένο αποτέλεσμα και η προκύπτουσα συνάρτηση D μετά από συνέλιξη με φίλτρο (Tsokas 1993)

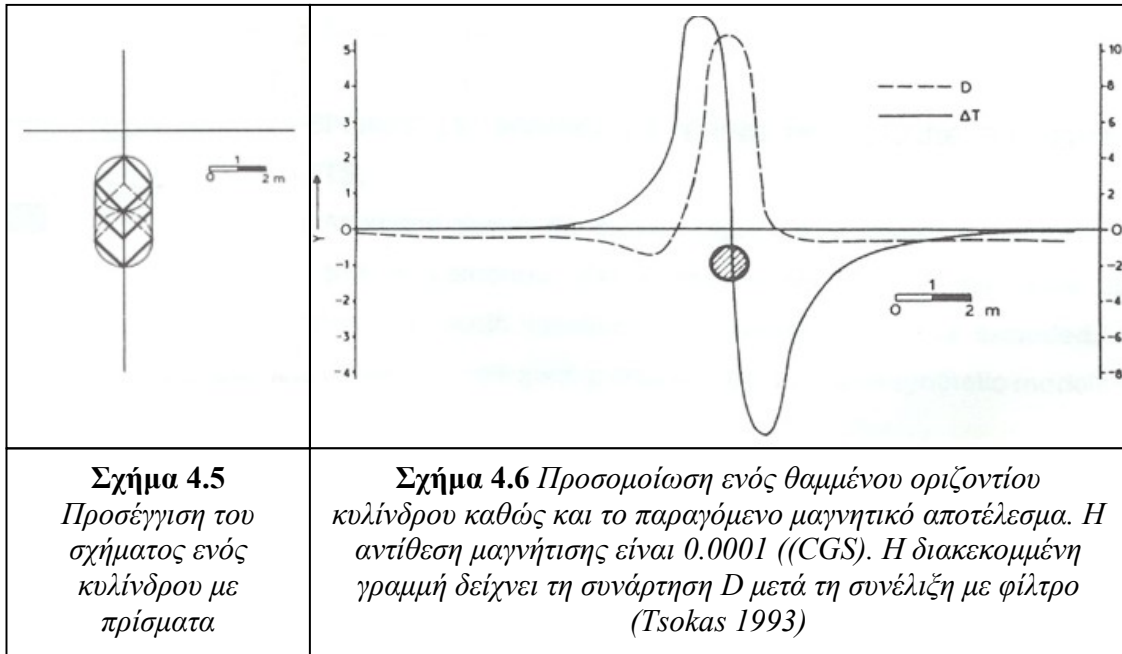


Σχήμα 4.4 Δισδιάστατο μοντέλο δομής με αντίθεση μαγνήτισης -0.0001 (CGS) καθώς και η προκύπτουσα συνάρτηση D μετά από συνέλιξη με φίλτρο (Tsokas 1993)

Το σχήμα (4.4) από την άλλη πλευρά δείχνει ένα μοντέλο μιας δομής με αρνητική αντίθεση μαγνήτισης. Είναι φανερό ότι μπορούν να εξαχθούν τα ίδια συμπεράσματα με προηγούμενως.

Γενικά, σχεδόν όλες οι δομές που αποτελούν τους στόχους σε αρχαιολογικές διασκοπήσεις μπορούν να προσεγγιστούν από μια ομάδα πεπερασμένων πρισμάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αντί για πρίσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατακόρυφοι ή οριζόντιοι κύλινδροι ή σφαίρες και ημισφαίρια. Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχουν δυο επιλογές. Μπορεί να γίνει χρήση αντί της αρχικής σχέσης ενός άλλου σχετικού τύπου για κάποιο άλλο θεμελιώδες σχήμα (Karousova & Karous 1989). Η εναλλακτική λύση είναι να γίνει χρήση ενός γενικού φίλτρου για όλα τα δεδομένα, το οποίο θα έχει

κατασκευαστεί με βάση το πρίσμα. Το πλεονέκτημα της δεύτερης προσέγγισης έχει δυο πτυχές: εάν γίνεται χρήση διαφόρων φίλτρων για διάφορα μέρη της ίδιας τομής, τότε απαιτείται επιπρόσθετος χρόνος. Κατά δεύτερο λόγο το τελικό αποτέλεσμα δεν αλλάζει πολύ αν για παράδειγμα το φίλτρο αντιστροφής συνελιχθεί με μια ανωμαλία που προκαλείται από κύλινδρο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μορφή της ανωμαλίας ελέγχεται κυρίως από την έγκλιση του πραγματικού μαγνητικού πεδίου και το αξιμούθιο της μετρούμενης τομής. Το σχήμα είναι σημαντικό για μεγάλες δομές μόνο.



Το παράδειγμα του σχήματος (4.6) αποδεικνύει του λόγου το αληθές, ενώ το σχήμα (4.5) δείχνει την προσέγγιση στο σχήμα ενός κυλίνδρου από ένα αριθμό κατακόρυφων πρισμάτων, και έτσι ενισχύεται ο ισχυρισμός για χρήση ενός μόνο φίλτρου αντιστροφής βασισμένου στο κατακόρυφο πρίσμα.

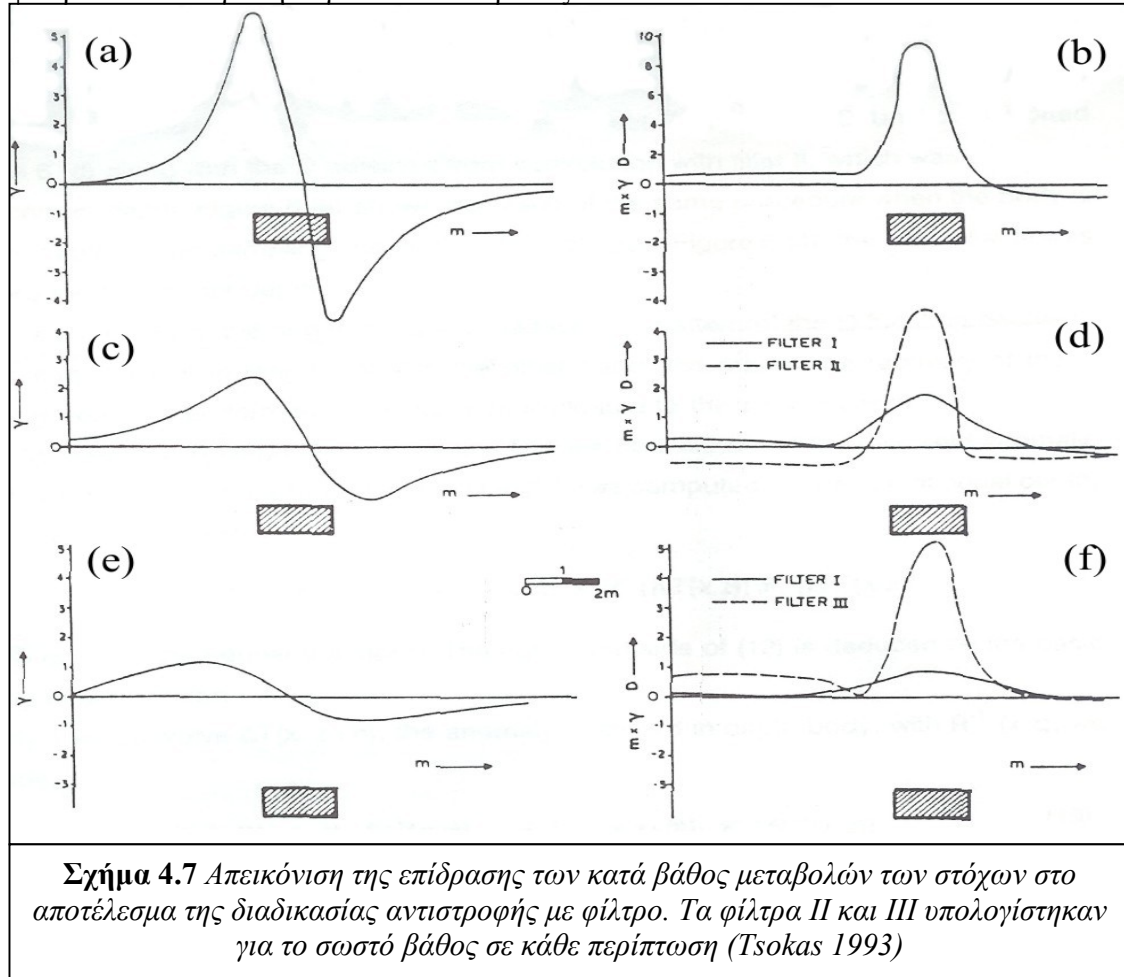
Υπάρχει ένα κρίσιμο σημείο στην δικαιολόγηση των παραπάνω: αυτό αναφέρεται στην υπόθεση ότι όλες οι υπό έρευνα δομές θα πρέπει να έχουν τα κέντρα τους στο ίδιο βάθος. Αυτή είναι και η βέλτιστη περίπτωση για την εφαρμογή των φίλτρων. Ωστόσο αυτή η συνθήκη συχνά ικανοποιείται σε αρχαιολογικές διασκοπήσεις.

4.5.3 Ανταπόκριση των φίλτρων στην κατά βάθος μεταβολή

Τα φίλτρα αντιστροφής κατασκευάζονται με βάση τη θεώρηση ότι το βάθος ταφής των στόχων είναι με κάποιο τρόπο γνωστό και σταθερό. Αυτές είναι και οι συνήθεις συνθήκες στις αρχαιολογικές διασκοπήσεις, αλλά μεταβολές στο βάθος των στόχων δεν μπορούν να αποκλειστούν.

Το σχήμα 4.7(a) και 4.7(b) αναπαριστούν την περίπτωση στην οποία ο στόχος βρίσκεται στο ίδιο βάθος με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του φίλτρου. Στο σχήμα 4.7(c) η ίδια δομή μετατοπίστηκε σε βάθος κατά ένα διάστημα δειγματοληψίας. Η συνάρτηση D που προκύπτει χαρτογραφείται στο σχήμα 4.7(d) μαζί με την συνάρτηση D που προκύπτει από την συνέλιξη της ανωμαλίας με ένα φίλτρο Π, το οποίο υπολογίστηκε για το σωστό βάθος. Το σχήμα 4.8της δείχνει το αποτέλεσμα της

ίδιας διαδικασίας όταν το σώμα μετατοπίζεται σε βάθος κατά δύο διαστήματα δειγματοληψίας. Στην τελευταία αυτή περίπτωση (σχήμα 4.7(f)) το χρησιμοποιούμενο φίλτρο III υπολογίστηκε για το σωστό βάθος.



Καθώς το βάθος του στόχου αυξάνεται, η μορφή της συνάρτησης D γίνεται όλο και πιο ευρεία και χάνει σε μέγεθος. Από την άλλη πλευρά, η εκτίμηση του πλάτους της ανωμαλίας με τη χρήση φίλτρου υπολογισμένου για το σωστό βάθος γίνεται πολύ καλά.

Η συνάρτηση D είναι το προϊόν της συνέλιξης της ανωμαλίας ολικού πεδίου ΔT με το φίλτρο R^{-1} . Με βάση το ότι το φίλτρο υπολογίστηκε για κάποιο συγκεκριμένο βάθος z του στόχου ισχύει

$$\mathfrak{F}[D(x, z)] = \mathfrak{F}[\Delta T(x, z) * R^{-1}(x, z)] = \mathfrak{F}[\Delta T(x, z)] \cdot \mathfrak{F}[R^{-1}(x, z)],$$

με το $\mathfrak{F}$ να υποδηλώνει μετασχηματισμό Fourier. Το δεξιό μέλος της παραπάνω εξίσωσης συνεπάγεται από τις βασικές ιδιότητες του μετασχηματισμού.

Ομοίως αν συνελιχθεί η ανωμαλία του μετατοπισμένου σε βάθος σώματος $\Delta T(x, z + h)$ με το φίλτρο $R^{-1}(x, z)$ θα προκύψει

$$\mathfrak{F}[\Delta T(x, z + h) * R^{-1}(x, z)] = \mathfrak{F}[\Delta T(x, z + h)] \cdot \mathfrak{F}[R^{-1}(x, z)],$$

και με χρήση βασικών ιδιοτήτων του μετασχηματισμού Fourier έχουμε

$$\mathfrak{F}[\Delta T(x, z + h)] = e^{-kh} \mathfrak{F}[\Delta T(x, z)]$$

η οποία σχέση αποτελεί την γνωστή προς τα άνω συνέχεια. Με συνδυασμό των δυο τελευταίων σχέσεων προκύπτει η παρακάτω σχέση

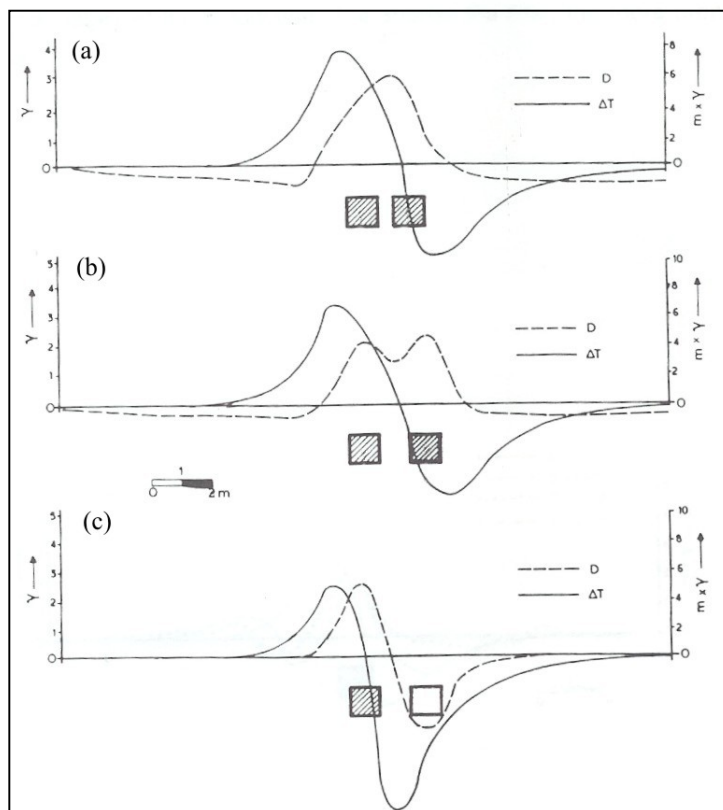
$$\Im[\Delta T(x, z+h) * R^{-1}(x, z)] = e^{-kh} \Im[\Delta T(x, z) * R^{-1}(x, z)],$$

ή σε πιο απλή μορφή

$$\Im[D(x, z+h)] = e^{-kh} \Im[D(x, z)]$$

Η τελευταία σχέση δηλώνει ότι το φάσμα της D που λαμβάνεται πραγματικά διαφέρει από την ιδανική κατά ένα πολλαπλασιαστικό παράγοντα ελάττωσης. Αυτή η ελάττωση είναι πιο έντονη σε υψηλότερους κυματάριθμους. Επομένως, το φάσμα της $D(x, z+h)$ έχει λιγότερο υψηλό περιεχόμενο σε κυματάριθμους από αυτό της $D(x, z)$ που έχει σαν συνέπεια την πλάτυνση της συνάρτησης πλάτους που ανακτάται μετά την αντιστροφή.

4.5.4 Πλευρική ανάλυση της διαδικασίας



Σχήμα 4.8 Απεικόνιση της διακριτικής ικανότητας της μεθόδου. Όλα τα πρίσματα έχουν διαστάσεις 1×1 m. Το βάθος ταφής είναι 1 m ενώ η αντίθεση μαγνήτισης 0.0001 (CGS) για τα σκιασμένα πρίσματα ενώ -0.0001 για το κενό. Οι αποστάσεις των κέντρων τους είναι 1.5 m (a) 2.0 m (b) και (c). (Tsokas 1993)

Το σχήμα 4.8(a) δείχνει δυο παρόμοιες ορθογώνιες δομές που έχουν την ίδια αντίθεση μαγνήτισης η οποία είναι 0.001 (CGS). Αυτές οι δομές θεωρούνται πως εκτείνονται απείρως κάθετα στο επίπεδο των σχημάτων. Η απόσταση των κέντρων τους είναι 1.5 διαστήματα δειγματοληψίας. Το υπολογιζόμενο αποτέλεσμα καθώς και η ολική ανωμαλία φαίνονται στο σχήμα (4.8). Είναι εμφανές ότι η ανωμαλία D δεν αναγνωρίζει δυο ξεχωριστές πηγές. Η μορφή της είναι παρόμοια με αυτή που θα προέκυπτε αν η ανωμαλία οφειλόταν σε μια μεγάλη πλάκα. Εάν το ένα σώμα μετακινηθεί σε θέση όπου το κέντρο του θα απέχει 2 διαστήματα δειγματοληψίας από το κέντρο του άλλου θα ληφθεί η εικόνα του σχήματος (4.8b). Σε αυτή την περίπτωση η μορφή της συνάρτησης D δείχνει να έχει διασπαστεί, διαχωρίζοντας

έτσι τις δύο πηγές που προκάλεσαν τη συγκεκριμένη ανωμαλία. Η πλευρική ανάλυση των στόχων είναι ακόμα καλύτερη όταν το δεύτερο σώμα έχει αρνητική αντίθεση μαγνήτισης όπως φαίνεται στο σχήμα (4.8c).

Το αποτέλεσμα που απεικονίζεται στο σχήμα (4.8) είναι άμεση συνέπεια του βήματος δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται. Σημειώνεται πως οι διαστάσεις κάθε πρίσματος είναι ίσες με 1 διάστημα δειγματοληψίας. Επίσης, η απόσταση $2\Delta x$ είναι το μήκος κύματος Nyquist.

Αν οι συναρτήσεις ΔT και R^{-1} ήταν συνεχείς και επιπροσθέτως η αντιστροφή δεν αποκόπτονταν, η συνάρτηση D που προέκυπτε θα έπρεπε να είναι

$$D = \Delta T * R^{-1}$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε $\Delta T = R$ γιατί χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο I και η ανωμαλία βάσει της οποίας κατασκευάστηκε το φίλτρο. Επομένως σε αυτή την περίπτωση ισχύει εξ ορισμού

$$D = R * R^{-1} = \begin{cases} 4bJ, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

δηλαδή έχουμε μια κορυφή στο $x = 0$. Όμως, έχουμε να κάνουμε με ψηφιοποιημένες ανωμαλίες και αποκομμένες αντιστροφές. Επομένως, το πλάτος της ανωμαλίας D ελέγχεται από το περιεχόμενο σε κυματάρια του φάσματος $[-K_N, K_N]$ όπου K_N είναι ο κυματάριας Nyquist.

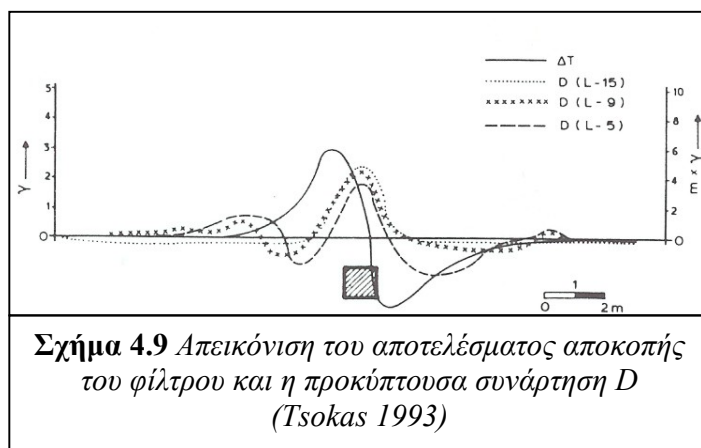
Στην πραγματικότητα, το πραγματικό φάσμα κυματάριας της συνεχούς συνάρτησης πολλαπλασιάζεται με ένα τετραγωνικό παράθυρο λόγω του ότι το εύρος ζώνης του είναι περιορισμένο. Αυτό αποδεικνύεται να είναι μια συνέλιξη στην περιοχή του χώρου. Η συνέλιξη της συνεχούς συνάρτησης D για την συνεχή περίπτωση με ένα συναρτησιοειδές του τύπου

$$\frac{\sin K_x x_n}{nx_n}, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

Η τελευταία σχέση έχει μηδενικές διασταυρώσεις στους κόμβους των μετρήσεων. Από την άλλη, το περιορισμένο μήκος του φίλτρου δεν παράγει ένα παλμό στο σημείο $x=0$. Επομένως, η πραγματική συνάρτηση D έχει κάποιο μέγεθος αν και μικρό, στους κόμβους που είναι διαφορετικοί από την αρχή των συντεταγμένων.

4.5.5 Αποτέλεσμα αποκοπής του φίλτρου

Οι Tsokas et al. (1991) απέδειξαν ότι το κατάλληλο μήκος φίλτρου, από τη στιγμή που δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν φίλτρα μεγάλου μήκους στην πράξη, είναι αυτό το οποίο είναι ίσο με την απόσταση που μηδενίζεται το διάγραμμα της αυτοσυσχέτισης της συνάρτησης μορφής.



Σχήμα 4.9 Απεικόνιση του αποτελέσματος αποκοπής του φίλτρου και η προκύπτουσα συνάρτηση D (Tsokas 1993)

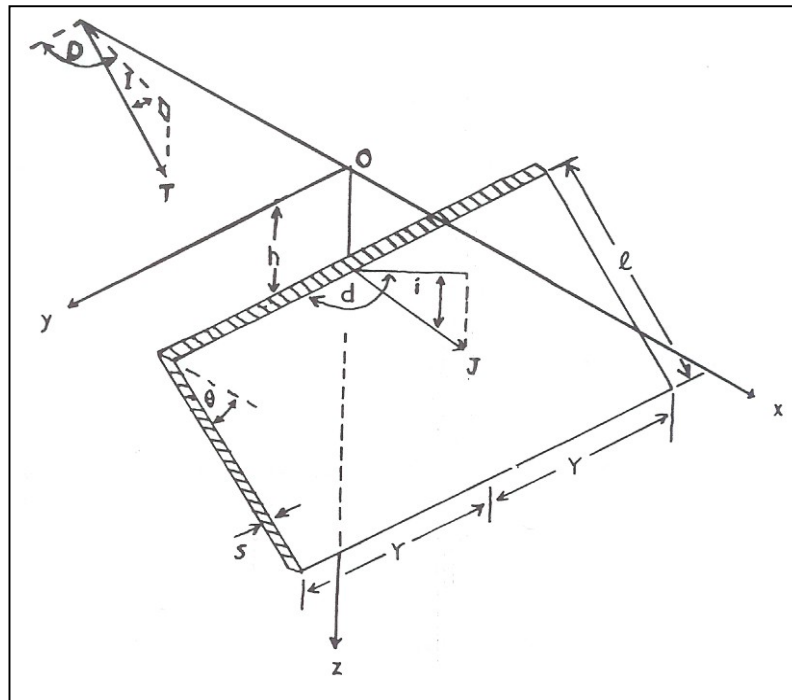
Το αποτέλεσμα της χρήσης φίλτρων μικρού μήκους θα παρουσιαστεί με το εξής παράδειγμα:

Το σχήμα (4.9) δείχνει το πρίσμα με βάση το οποίο υπολογίστηκε το φίλτρο αντιστροφής I. Η συνάρτηση D χαρτογραφήθηκε επίσης αλλά με χρήση διαφορετικών μηκών φίλτρου κάθε φορά. Το καλύτερο μήκος είναι αυτό των

15 θέσεων (14 διαστήματα δειγματοληψίας). Όπως φαίνεται και στο σχήμα (4.9) μείωση του μήκους του φίλτρου έχει ως συνέπεια την επαγωγή πλευρικών λοβών στη συνάρτηση D. Όσο πιο μικρό είναι το φίλτρο τόσο πιο έντονοι είναι οι λοβοί.

4.6 Δισδιάστατα (2D) φίλτρα αντιστροφής

4.6.1 Το συνελκτικό μοντέλο



Σχήμα 4.10 Άποψη του μοντέλου λεπτής πλάκας υπό κλίση (McGrath & Hood 1973)

Οι McGrath & Hood (1973) πρότειναν ένα αλγόριθμο για το μαγνητικό αποτέλεσμα πάνω από οποιοδήποτε σώμα πρισματικού σχήματος. Τα γεωμετρικά μοντέλα παράγονται από της πρόσθεση λεπτών πλακών και το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται με αριθμητική ολοκλήρωση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων των λεπτών πλακών. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτό η παρακάτω εξίσωση (Grant & West 1965, McGrath & Hood 1973) δίνει το μαγνητικό αποτέλεσμα πάνω από μια λεπτή πλάκα

$$\Delta T(x, y) = J \cdot s \cdot b \cdot c \cdot [f(x, y + Y) - f(x, y - Y)]$$

όπου $f(x, y + Y) = T_1 - T_2 - T_3 \cdot (T_4 - T_5) - T_6 \cdot T_7$

Το σχήμα (4.10) δείχνει μια λεπτή πλάκα υπό κλίση που η παράταξη της βρίσκεται στον άξονα Y ενός ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων. Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται και η έννοια τους παρουσιάζονται παρακάτω:

J = ένταση της μαγνήτισης

T = ένταση του ολικού μαγνητικού πεδίου της Γης

s = πάχος της πλάκας

$$b = (\sin^2 i + \cos^2 i \sin^2 d)^{1/2} = \sin i / \sin \gamma$$

$$c = (\sin^2 I + \cos^2 I \sin^2 D)^{1/2} = \sin I / \sin \beta$$

I = έγκλιση του μαγνητικού πεδίου της Γης

i = γωνία κλίσης της μαγνήτισης (-180 με 180 μοίρες)

d = γωνία μεταξύ της οριζόντιας προβολής της J και του θετικού άξονα Y

D = γωνία μεταξύ της οριζόντιας προβολής της T και του θετικού άξονα Y

Y = μισό μήκος κατά την παράταξη

$$c^2 = (x - l \cos \theta)^2 + (h + l \sin \theta)^2$$

θ = κλίση της πλάκας από το οριζόντιο επίπεδο

l = πλάτος της πλάκας

h = βάθος ταφής της πλάκας

$$E^2 = x^2 + h^2$$

$$B = x \sin \theta + h \cos \theta$$

$$c = h \sin \theta - x \cos \theta$$

β = γωνία κλίσης της xz συνιστώσας της $T = \tan^{-1}(\tan I / \sin D)$

γ = γωνία κλίσης της xz συνιστώσας της $J = \tan^{-1}(\tan i / \sin d)$

$$\alpha = \beta + \gamma - \theta$$

Οι εξισώσεις το δεξιό μέλος της δεύτερης εξίσωσης ορίζονται ως εξής:

$$T_1 = \left[\frac{y + Y}{(c^2 + (y + Y)^2)^{1/2}} \right] \cdot \left[\frac{(x - l \cos \theta) \cos a - (h + l \sin \theta) \sin a}{c^2} \right]$$

$$T_2 = \frac{y + Y}{(E^2 + (y + Y)^2)^{1/2}} \cdot \left[\frac{x \cos a - h \sin a}{E^2} \right]$$

$$T_3 = \frac{1}{B^2 + (y + Y)^2} \cdot \left[\frac{A + 1}{[c^2 + (y + Y)^2]^{1/2}} - \frac{A}{[E^2 + (y - Y)^2]^{1/2}} \right]$$

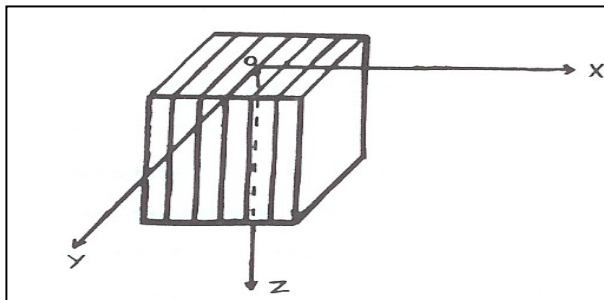
$$T_4 = (\cos a \cos \beta - \cos \beta \cos \gamma + \cos \beta \cot D \cos \gamma \cot d) \cdot (y + Y)$$

$$T_5 = (\cos \gamma \cot d \sin(\theta - \beta) + \cos \beta \cot D \sin(\theta - \gamma)) \cdot B$$

$$T_6 = \cos \gamma \cot d \cos(\theta - \beta) + \cos \beta \cot D \cos(\theta - \gamma)$$

$$T_7 = \frac{1}{[c^2 + (y + Y)^2]^{1/2}} - \frac{1}{[E^2 + (y + Y)^2]^{1/2}}$$

Θεωρούμε τώρα ένα μοντέλο το οποίο προσομοιάζει την πλειοψηφία των δομών που συναντώνται σε αρχαιολογικές διασκοπήσεις: ένα ορθογώνιο κατακόρυφο πρίσμα. Αυτή η επιλογή δικαιολογείται γιατί οι πιο κοινές δομές μπορούν να προσομοιωθούν από μια σειρά τέτοιων σχημάτων. Μάλιστα, οι θαμμένες δομές είναι συνήθως θεμέλια κτιρίων, δρόμοι, τάφοι, αμυντικά τείχη, αυλάκια κλπ.



Σχέση 4.11 Απεικόνιση του πρίσματος που αποτελείται από κάποιο αριθμό λεπτών πλακών (Tsokas & Papazachos 1992)

Επομένως, ακολουθώντας τον αρχικό αλγόριθμο, θεωρούμε ότι το ορθογώνιο κατακόρυφο πρίσμα του σχήματος (4.11) αποτελείται από μια σειρά λεπτών πλακών. Λόγω της αρχής της υπέρθεσης το μαγνητικό αποτέλεσμα που παράγει το πρίσμα μπορεί να υπολογιστεί ως άθροισμα των αποτελεσμάτων των επιμέρους λεπτών πλακών. Αυτό εκφράζεται με τη σχέση

$$\Delta T(x, y) = J \cdot s \cdot b \cdot c \cdot \sum_{i=1}^N [f_i(x, y + Y) - f_i(x, y - Y)]$$

όπου N είναι ο αριθμός των λεπτών πλακών που αναπαριστούν το πρίσμα.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως το γινόμενο δυο συναρτήσεων, έστω D και R . Εάν ορίσουμε $D = J$ τότε αυτός ο παράγοντας μπορεί απολύτως λογικά να θεωρηθεί ως η συνάρτηση πλάτους, επειδή ελέγχει την ένταση της ανωμαλίας.

Η συνάρτηση

$$R(x, y) = s \cdot b \cdot c \cdot \sum_{i=1}^N [f_i(x, y + Y) - f_i(x, y - Y)]$$

μπορεί να ονομαστεί συνάρτηση μορφής αφού ελέγχει το σχήμα της ανωμαλίας. Έτσι έχουμε

$$\Delta T(x, y) = D \cdot R(x, y)$$

Για να προχωρήσουμε στο συνελκτικό μοντέλο θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω υποθέσεις:

1. Η μαγνήτιση των λεπτών πλακών είναι επαγόμενη ή τουλάχιστον γνωστής διεύθυνσης
2. Κάθε δομή μη κανονικού σχήματος μπορεί να προσομοιωθεί από ένα σύνολο βασικών σχημάτων απλού γεωμετρικού σχήματος. Μεταξύ τους όμως θα πρέπει να είναι όμοια και να είναι θαμμένα στο ίδιο βάθος.

Η ισχύς των παραπάνω υποθέσεων δεν λειτουργεί εις βάρος της γενικότητας. Η επαγόμενη μαγνήτιση είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι είναι κατά βάση υπεύθυνη για τις ανωμαλίες πάνω από θαμμένες αρχαιότητες, εκτός ειδικών περιπτώσεων (όπως είναι οι θαμμένες κλίβανοι) όπου δεν υπάρχει καμία αναγκαιότητα για εφαρμογή φίλτρου. Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη υπόθεση είναι αυταπόδεικτη στην αρχαιομετρία.

Θεωρούμε ένα σύνολο σωμάτων παρόμοια με αυτό που φαίνεται στο σχήμα (4.11) τοποθετημένα στο ίδιο βάθος σε σημεία (x, y) που δίνονται από σχέσεις

$$x_l = {}^l\Delta x \quad l = L_1, \dots, L_2$$

$$y_m = {}^m\Delta y \quad m = M_1, \dots, M_2$$

όπου Δx και Δy είναι τα διαστήματα ψηφιοποίησης κατά μήκος των αξόνων x και y αντίστοιχα.

Από την αρχή της υπέρθεσης η ανωμαλία ολικού πεδίου που προκαλούν τα σώματα μπορεί να γραφεί ως

$$\Delta T(x_i, y_i) = \sum_{l=L_1}^{L_2} \sum_{m=M_1}^{M_2} D_{l,m} \cdot R(x_i - x_l, y_i - y_m)$$

$$i = L_1, \dots, L_2 \quad m = M_1, \dots, M_2$$

Η παραπάνω σχέση είναι μια έκφραση της 2-D συνέλιξης κάτι που γίνεται πιο εμφανές αν ξαναγραφεί ως

$$T_{ij} = \sum_{l=L_1}^{L_2} \sum_{m=M_1}^{M_2} D_{lm} \cdot R_{i-l, j-m},$$

όπου $\Delta T(x_i, y_i) = T_{ij}$ και $R(x_i - x_l, y_j - y_m) = R_{i-l, j-m}$. Η ίδια εξίσωση μπορεί πλέον να εκφραστεί σε απλούστερη μορφή ως εξής:

$$T = D * R$$

Η χωρική κατανομή της συνάρτησης πλάτους D μπορεί να ληφθεί από την προηγούμενη εξίσωση με συνέλιξη της με το φίλτρο αντιστροφής R^{-1} . Επομένως

$$D = T * R^{-1}$$

και ισχύει $R * R^{-1} = \theta$ όπου θ είναι το μοναδιαίο στοιχείο της αποσυνέλιξης, δηλαδή ένας άπειρος πίνακας για τον οποίο ισχύει $\theta_{ij} = 0$ εκτός από το στοιχείο θ_{00} το οποίο ισούται με 1. Ο πίνακας T αναπαριστά το μετρούμενο πεδίο είτε αυτό αποτελείται από μετρήσεις του ολικού πεδίου, είτε από διαφορικά δεδομένα δηλαδή την αλγεβρική αφαίρεση μεταξύ μετρήσεων ολικού πεδίου που έχουν ληφθεί για δυο διαφορετικά ύψη αισθητήρων και άρα και για δυο διαφορετικά βάθη ταφής μιας πιθανής δομής. Το συνελκτικό μοντέλο είναι το ίδιο και στις δυο περιπτώσεις με μόνη διαφορά το ότι για τη διαφορική περίπτωση η συνάρτηση μορφής που χρησιμοποιείται είναι αυτή που αντιστοιχεί στη διαφορά δυο συναρτήσεων μορφής για δυο διαφορετικά ύψη. Η μορφή της ανωμαλίας είναι η ίδια.

Η αντιστροφή του πίνακα R_{ij} έχει σαν αποτέλεσμα ένα φίλτρο το οποίο εκτείνεται απείρως και στις δυο διευθύνσεις. Για λόγους απλότητας, προτιμάται το αποκομμένο φίλτρο αντιστροφής το οποίο αναφέρεται ως $\bar{R}^{-1}$. Οι ιδανικοί συντελεστές του φίλτρου $\bar{R}_{ij}^{-1}$ βρίσκονται με ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγωνικών σφαλμάτων $E = R * R^{-1} - \theta$.

Ένα τέτοιο πεπερασμένο φίλτρο, το οποίο είναι το ιδεατό κατά την έννοια των ελαχίστων τετραγώνων δίνεται από τη σχέση

$$\sum_{l=L_1}^{L_2} \sum_{m=M_1}^{M_2} R_{i,j}^{-1} \cdot A_{k-i,l-j} = R_{-k,-l}$$

$$k = M_1, \dots, M_2 \quad l = L_1, \dots, L_2$$

όπου $A_{k,l}$ είναι η αυτοσυσχέτιση της συνάρτησης μορφής. Η τελευταία σχέση αποτελεί την επέκταση στις δυο διαστάσεις της εξίσωσης της παλμικής αποσυνέλιξης (Spiking deconvolution – Kanasevich 1975).

4.6.2 Βοηθητικές σημειώσεις στην εφαρμογή της μεθόδου

Το σύστημα των εξισώσεων της τελευταίας σχέσης μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$\bar{R}^{-1} \cdot A = R,$$

όπου $\bar{R}^{-1}$ και R είναι 2-D πίνακες διαστάσεων $(M_2 - M_1 + 1) \times (L_2 - L_1 + 1)$ και ο A είναι 4-D με διαστάσεις $(M_2 - M_1 + 1) \times (L_2 - L_1 + 1) \times (M_2 - M_1 + 1) \times (L_2 - L_1 + 1)$ και όπου

$$(\bar{R}^{-1})_{ij} = \bar{R}_{i,j}^{-1}, \quad (R)_{kl} = R_{-k,-l}$$

και

$$(A)_{ijkl} = A_{k-i,l-j}$$

Λόγω του ότι ο υπολογισμός του αντιστρόφου του A πίνακα είναι σύνθετος, θα ήταν συνετό να διατυπωθεί η εξίσωση του πεπερασμένου φίλτρου με διαφορετικό τρόπο. Για αυτό παίρνουμε τις $(L_2 - L_1 + 1)$ στήλες του $\bar{R}^{-1}$ και του R και τις αναδιαρθρώνουμε για να σχηματιστούν δυο διανύσματα στήλες, τα $\bar{R}'^{-1}$ και R' δηλαδή

$$\bar{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{R}_{M_1, L_1}^{-1} \\ \bar{R}_{(M_1+1), L_1}^{-1} \\ \vdots \\ \bar{R}_{M_2, L_1}^{-1} \\ \bar{R}_{M_1, (L_1+1)}^{-1} \\ \vdots \\ \bar{R}_{M_1, L_2}^{-1} \\ \vdots \\ \bar{R}_{M_2, L_2}^{-1} \end{bmatrix} \quad R' = \begin{bmatrix} R_{-M_1, -L_1} \\ R_{(M_1+1), -L_1} \\ \vdots \\ R_{-M_2, -L_1} \\ R_{-M_1, -(L_1+1)} \\ \vdots \\ R_{-M_1, -L_2} \\ \vdots \\ R_{-M_2, -L_2} \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία των παραπάνω διανυσμάτων είναι $(\bar{R}^{-1})_\mu = \bar{R}_{i,j}^{-1}$ και $(R')_\nu = R_{-k,-l}$ όπου

$$j = \text{int} \left[\frac{(\mu - 1)}{(M_2 - M_1 + 1)} \right] + L_1$$

$$l = \text{int} \left[\frac{(\nu - 1)}{(M_2 - M_1 + 1)} \right] + L_1$$

$$i = \mu - 1 - (j - L_1) \cdot (M_2 - M_1 + 1) + M_1$$

$$k = \nu - 1 - (l - L_1) \cdot (M_2 - M_1 + 1) + M_1$$

Έτσι η εξίσωση του πεπερασμένου φίλτρου γράφεται:

$$\sum_{\mu=1}^{(M_2-M_1+1)(L_2-L_1+1)} (\bar{R}^{-1})_\mu \cdot (A')_{\mu\nu} = (R')_\nu$$

$$\nu = 1, \dots, (M_2 - M_1 + 1) \cdot (L_2 - L_1 + 1)$$

ή

$$\bar{R}^{-1} \cdot A' = R'$$

όπου A' είναι ένας πίνακας διαστάσεων $[(M_2 - M_1 + 1) \cdot (L_2 - L_1 + 1)]^2$ και

$$(A')_{\mu\nu} = A_{k-i, l-j}$$

με βάση τις παραπάνω εξισώσεις για τα j, l, i και k είναι φανερό πως ο πίνακας A' είναι συμμετρικός και επομένως ισχύει

$$(A')_{\nu\mu} = A_{-k, j-l} = A_{-(k-i), -(l-j)} = A_{k-i, l-j}$$

αφού είναι γνωστό ότι για την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $A_{\alpha\beta} = A_{-\alpha, -\beta}$. Άρα

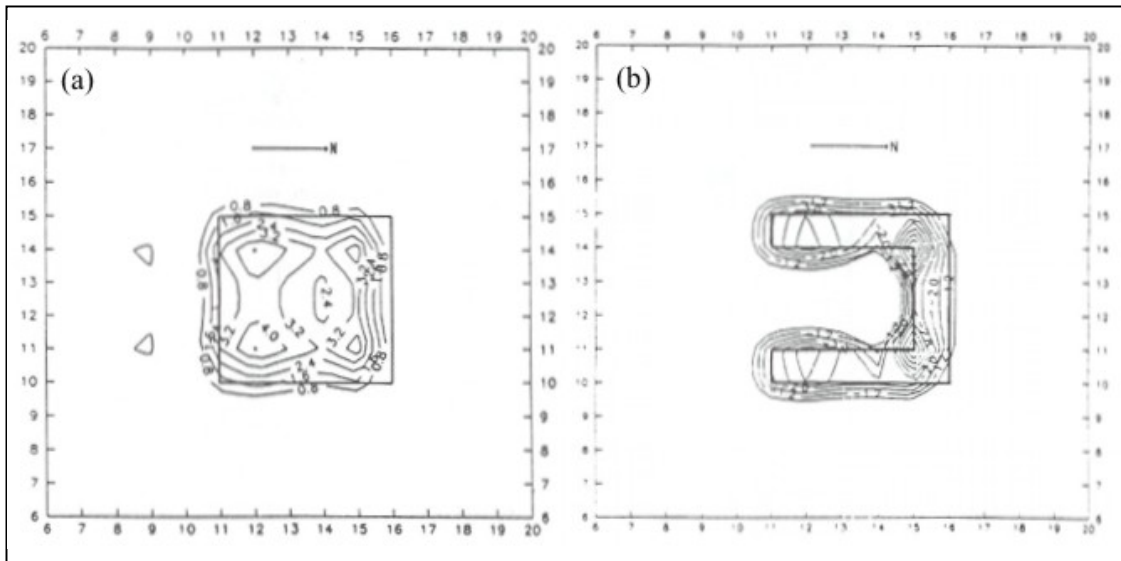
$$(A')_{\mu\nu} = (A')_{\nu\mu}$$

Επειδή ο A' είναι συμμετρικός πίνακας η εναλλακτική μορφή της εξίσωσης πεπερασμένου φίλτρου μπορεί να λυθεί πολύ γρήγορα με χρήση της μεθόδου Levinson για πίνακες Toeplitz.

4.6.3 Εφαρμογή 2D φίλτρων σε συνθετικά δεδομένα

Τα παρακάτω μοντέλα έχουν κατασκευαστεί από τους Tsokas & Papazachos (1993) για τον έλεγχο της απόδοσης και εφαρμοσιμότητας των φίλτρων αντιστροφής ολικού πεδίου. Χρησιμοποιήθηκαν μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν δομές που συναντώνται συχνά σε αρχαιολογικές διασκοπήσεις. Το συνολικό μαγνητικό αποτέλεσμα

υπολογίστηκε με βάση τον αλγόριθμο που δόθηκε από τον Bhattacharyya (1964) για όλα τα συνθετικά παραδείγματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.12 Το αποτέλεσμα της συνέλιξης του φίλτρου F2 με μια ανωμαλία ολικού πεδίου που οφείλεται (α) σε μια λεπτή οριζόντια πλάκα (b) σε μια δομή της οποίας το σχήμα φαίνεται με τη συνεχή γραμμή (Tsokas & Papazachos 1992)

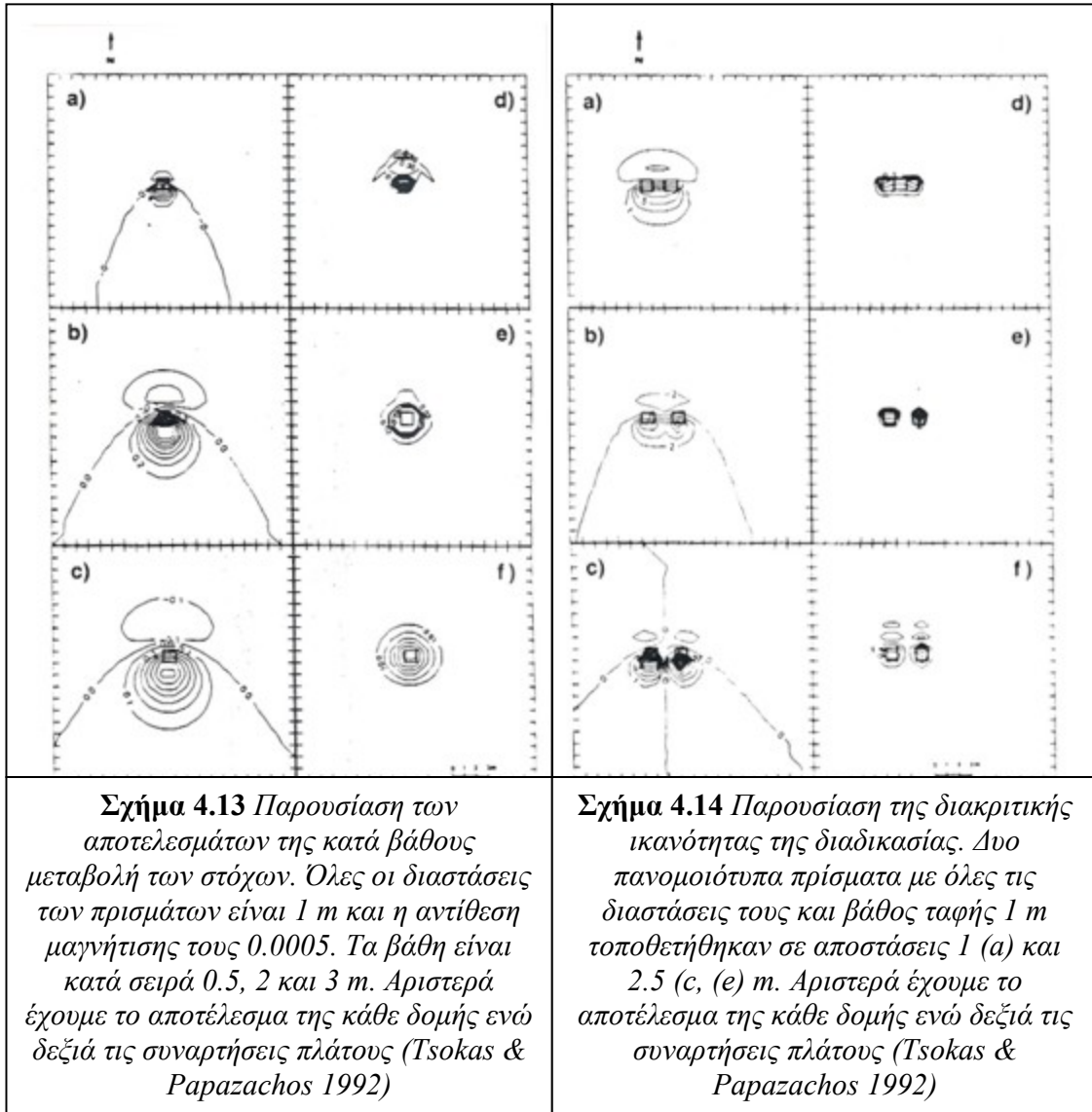
Το σχήμα (4.12a) δείχνει το αποτέλεσμα μετά την συνέλιξη του με το φίλτρο αντιστροφής της ανωμαλίας που οφείλεται σε μια λεπτή ορθογώνια πλάκα θαμμένη σε βάθος 1 μέτρου. Η πλάκα είναι θετικά μαγνητισμένη σε σχέση με το περιβάλλον, με αντίθεση μαγνήτισης ίση με 0.0005. Έχει κατακόρυφη διάσταση ίση με 1 μέτρο και εμβαδόν της πάνω επιφάνειας της ίσο με 5x5 m².

Το αποτέλεσμα της συνέλιξης του φίλτρου αντιστροφής με την ανωμαλία ολικού πεδίου που οφείλεται σε ένα μοντέλο που αναπαριστά τα ερείπια των θεμελίων ενός κτιρίου φαίνεται στο σχήμα (4.12b). Τα ερείπια θεωρείται ότι αποτελούνται από τοίχου μήκους 5 και πλάτους 1 μέτρου που βρίσκονται θαμμένα σε βάθος 1 μέτρο. Η αντίθεση μαγνήτισης είναι -0.0005.

Η επιρροή της κατά βάθος μεταβολής φαίνεται στο σχήμα (4.13) Το φίλτρο το οποίο κατασκευάστηκε με βάση ένα πεπερασμένο πρίσμα συνελίχθηκε με την ανωμαλία ενός πρίσματος. Το πρίσμα, θαμμένο σε διάφορα βάθη έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του φίλτρου. Τα βάθη είναι ίσα με 0.5, 2 και 3 μοναδιαία διαστήματα. Τα μοντέλα σε εποπτική εικόνα, καθώς και το μαγνητικό αποτέλεσμα τους δείχνονται στα (a), (b) και (c) του σχήματος (4.13). Οι προκύπτουσες κατανομές της συνάρτησης μορφής φαίνονται στα σχήματα (4.13) (d), της και (f). Καθώς το βάθος ταφής αυξάνεται, παρατηρείται μια πλάτυνση της προκύπτουσας μορφής και μια ελάττωση των μεγεθών. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω του ότι ουσιαστικά ασχολούμαστε με μια προς τα άνω συνέχεια της ανωμαλίας ολικού πεδίου.

Η πλευρική ανάλυση της διαδικασίας φαίνεται στο (4.14). Δυο πανομοιότυπα πρίσματα φαίνονται στο σχήμα (4.14a) θαμμένα σε βάθος 1 μοναδιαίου διαστήματος, με τα κέντρα τους να βρίσκονται σε απόσταση 2 μοναδιαίων διαστημάτων, μαζί με την ανωμαλία ολικού πεδίου που προκαλούν. Στο σχήμα (4.14b) τα ίδια πρίσματα

μεταφέρονται έτσι ώστε τα κέντρα τους να απέχουν 2.5 μοναδιαία διαστήματα. Στο σχήμα (4.14c) η αντίθεση μαγνήτισης του δεξιού πρίσματος αντιστρέφεται σε -0.0005 και η απόσταση μεταξύ των κέντρων τους διατηρείται ίση με 2.5. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η αντίθεση μαγνήτισης ισούται με 0.0005. Όταν η απόσταση των κέντρων τους είναι 2.5 μοναδιαία διαστήματα, η κατανομή της συνάρτησης μορφής παρουσιάζει δυο διακριτά μέγιστα (4.14e και .14f). Αυτό το αποτέλεσμα είναι επίσης αναμενόμενο, αφού ο κυματάρημος Nyquist στις παρούσες περιπτώσεις είναι 0.5 gu^{-1} .



Αν και ο διαχωρισμός των δύο κορυφών είναι εμφανής στο σχήμα (4.14d) μπορεί επίσης να δικαιολογηθεί και με χρήση του κριτηρίου Rayleigh. Στην περίπτωση μας, το κριτήριο αυτό ορίζεται με την ανισότητα

$$J_T < \frac{8}{\pi_2} J_P$$

όπου J_T και J_P είναι τα μεγέθη της συνάρτησης πλάτους (μαγνήτιση) στο διάκενο μεταξύ των κορυφών και τις ίδιες τις κορυφές αντίστοιχα. Στο σχήμα (4.14d) η ανισότητα Rayleigh ικανοποιείται. Αυτή είναι και η λιγότερο έντονη περίπτωση στην οποία τα κέντρα των σωμάτων βρίσκονται σε απόσταση ενός μήκους κύματος Nyquist. Συγκεκριμένα η τιμή στο μέγιστο είναι 1.18 ενώ στο διάκενο 0.83.

4.7 Σύγκριση φίλτρων αντιστροφής και αποσυνέλιξης Werner

Η αποσυνέλιξη Werner είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την αυτόματη ερμηνεία δεδομένων πεδίων δυναμικού. Η μέθοδος δεν έχει κάποια προφανή σχέση με την αποσυνέλιξη, αλλά ονομάστηκε έτσι από τους Hartman et al. (1971). Από τότε ο όρος αυτός χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει μια ομάδα αλγορίθμων που σαν κοινό χαρακτηριστικό έχουν την μετατροπή του αντίστροφου προβλήματος σε γραμμικό, απαλείφοντας τους παρονομαστές των κλασματικών συναρτήσεων που περιγράφουν τις ανωμαλίες τους όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.6.2.

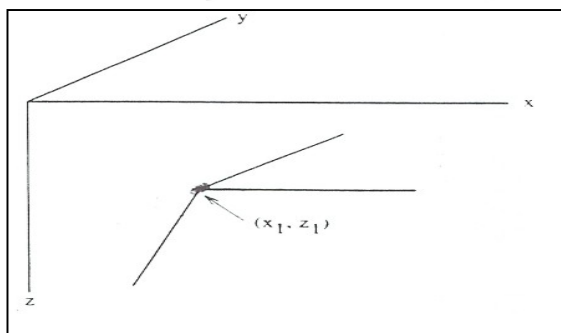
Η μέθοδος αυτή δίνει τη θέση και το βάθος ταφής των κορυφών μαγνητικών επαφών και έχει εφαρμοσθεί με επιτυχία σε μεγάλο αριθμό ερευνών (Hartman et al. 1971, Jain 1976). Τελευταία η χρήση της έχει επεκταθεί στον ταυτόχρονο υπολογισμό της θέσης και της γωνίας κλίσης για οποιοδήποτε αριθμό σωμάτων (πηγών) (Hansen και Simmonds 1993). Ο όρος «αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών» προτάθηκε για να περιγράψει αυτή ακριβώς τη διάταξη.

Η αποτελεσματικότητα και εφαρμοσιμότητα της μεθόδου αυτής εξετάζεται με την μελέτη της χρήσης της στην έρευνα θαμμένων αρχαιοτήτων. Σε αυτό το σημείο γίνεται σύγκριση της με τη μέθοδο των φίλτρων αντιστροφής Wiener.

4.7.1 Αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών

Για την ερμηνεία της μεθόδου ο Nabighian (1972) παρουσίασε ένα θεωρητικό σχέδιο που ήταν βασίστηκε στο αναλυτικό σήμα $A(x)$ του ολικού πεδίου, $T(x)$. Το αναλυτικό σήμα ορίζεται ως εξής:

$$A(x) = \frac{\partial T}{\partial z}(x) + i \frac{\partial T}{\partial x}(x)$$



Σχήμα 4.15 Η μαγνητική επαφή (Tsokas & Hansen 1995)

Για μια μαγνητική ανωμαλία της οποίας η κορυφή βρίσκεται στη θέση (x_1, z_1) σε θέση κατακόρυφη ως προς το επίπεδο (x, z) όπως φαίνεται στο σχήμα (4.15), το αναλυτικό σήμα είναι

$$A(x) = \frac{\alpha_1}{x - x_1 - iz_1}$$

Η μιγαδική σταθερά α_1 εξαρτάται από την αντίθεση επιδεκτικότητας της επαφής, την κλίση της και από την ένταση και την διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου της Γης

Απαλείφοντας τον παρονομαστή της παραπάνω εξίσωσης έχουμε:

$$xA(x) - x_1 A(x) - iz_1 A(x) = \alpha_1$$

που είναι της μορφής

$$\alpha_0 + b_0 A(x) + x A(x) = 0$$

Λαμβάνοντας το αναλυτικό σήμα που παράγεται από την επαφή είναι εύκολο να υπολογιστούν οι σταθερές α_0 και β_0 με τέσσερις τουλάχιστον παρατηρήσεις. Τότε οι α_l , x_l και z_l δίνονται από τις σχέσεις:

$$\alpha_0 = -\alpha_1,$$

$$b_0 = -x_1 - iz_1$$

Οι Hansen και Simmonds (1993) θεώρησαν το άθροισμα των αναλυτικών σημάτων από n μαγνητικές επαφές ως τη σύνθεση του σήματος ενός πολυγωνικού σώματος δυο διαστάσεων. Έχοντας υπόψη την αναλογία με την απλή περίπτωση μιας επαφής, μπορούμε να γράψουμε

$$A(x) = \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_j}{x - x_j - iz_j}$$

Η εξίσωση $\alpha_0 + b_0 A(x) + x A(x) = 0$ μπορεί να γενικευθεί σε

$$\sum_{k=0}^{n-1} \alpha_k x^k + \sum_{k=0}^{n-1} b_k x^k A(x) + x^n A(x) = 0$$

Η τελευταία εξίσωση μπορεί να λυθεί και να παράγει το σετ $\{\alpha_j, x_j, z_j\}$ το οποίο προκάλεσε την ανωμαλία. Έχει δειχθεί από τους Hansen και Simmonds (1993) ότι

$$\sum_{k=0}^{n-1} b_k (x_j + iz_j)^k + (x_j + iz_j)^n = 0$$

και

$$a_j = - \frac{\sum_{k=0}^{n-1} a_k (x_j + iz_j)^k}{\prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^n [(x_j + iz_j) - (x_l - iz_l)]}$$

Είναι γνωστό εξ αρχής ότι ο αριθμός των επαφών σε ένα παράθυρο δεδομένων είναι άγνωστος. Επομένως με εφαρμογή του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη διαδικασία υπολογίζονται οι συντελεστές για ένα μεγάλο αριθμό επαφών, γεγονός που επιτρέπει στον αναλυτή να επιλέξει τον πραγματικό αριθμό αλληλεπιδραστικά με βάση τις ιδιοτιμές του πίνακα ελαχίστων τετραγώνων και την προσαρμογή τους στα δεδομένα.

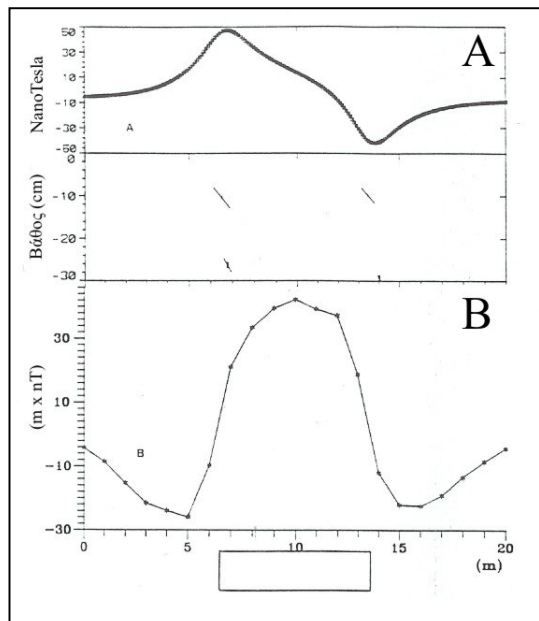
4.7.2 Εφαρμογή της αποσυνέλιξης Werner πολλαπλών πηγών και των φίλτρων αντιστροφής σε συνθετικά δεδομένα

Η εφαρμογή της αποσυνέλιξης Werner που παρουσιάζεται περιγράφηκε στην παράγραφο 3.6.2.

Οι Tsokas & Hansen (1995) που πραγματοποίησαν τη σύγκριση χρησιμοποίησαν ένα κοινό φίλτρο αντιστροφής για όλα τα δεδομένα το οποίο παράχθηκε κατά μήκος των γραμμών που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, με τις αριθμητικές του τιμές να είναι οι παρακάτω:

$$\begin{matrix} -0.8032 & 1.3139 & -2.9319 & 1.7589 & 0.3173 & -0.0064 & 0.3010 \end{matrix}$$

Το αρχικό μοντέλο για την παραγωγή του φίλτρου αποτελείται από ένα κύβο πλευράς 1 m. Για τα πειράματα του φίλτρου αντιστροφής χρησιμοποιήθηκε διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 1 m. Για την αποσυνέλιξη Werner στα δεδομένα εφαρμόστηκε παρεμβολή (interpolation) ίση με 0.1 m. Όλες οι ανωμαλίες που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία παράχθηκαν με χρήση μοντέλων στα οποία το μαγνητικό πεδίο της Γης ορίστηκε στα 46000 nT και η επιδεκτικότητα στα 0.0005 (SI).



Σχήμα 4.16: **A** Ανωμαλία ολικού πεδίου(κορυφή) παραγόμενη από μια παχιά πλάκα καθώς και τα αποτελέσματα των υπολογισμών της αποσυνέλιξης Werner πολλαπλών πηγών. **B** Μοντέλο παχιάς πλάκας καθώς και η υπολογισμένη συνάρτηση θέσης μετά την συνέλιξη των δεδομένων με τη χρήση της μεθόδου των φίλτρων Wiener (Tsokas & Hansen 1995)

Το σχήμα (4.16^A) δείχνει την μαγνητική ανωμαλία που προκαλείται από μια παχιά πλάκα που φαίνεται στο σχήμα (4.16^B), παράλληλα με το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αντιστροφής. Το μοντέλο προσομοιάζει τα πιο κοινά δομικά χαρακτηριστικά που συναντώνται στην γεωφυσική εξερεύνηση αρχαιολογικών χώρων, όπως οι φούρνοι και οι φάσεις καταστροφής, οι οποίες είναι τα ανιχνεύσιμα υπολείμματα μετά την κατάρρευση της οροφής ενός κτίσματος και της συνεπακόλουθης πτώσης των τοίχων. Πρόκειται για ένα συνοθύλευμα από θρυμματισμένα ξύλα, πλακάκια, καρφιά, τούβλα, κονιάματος κλπ.

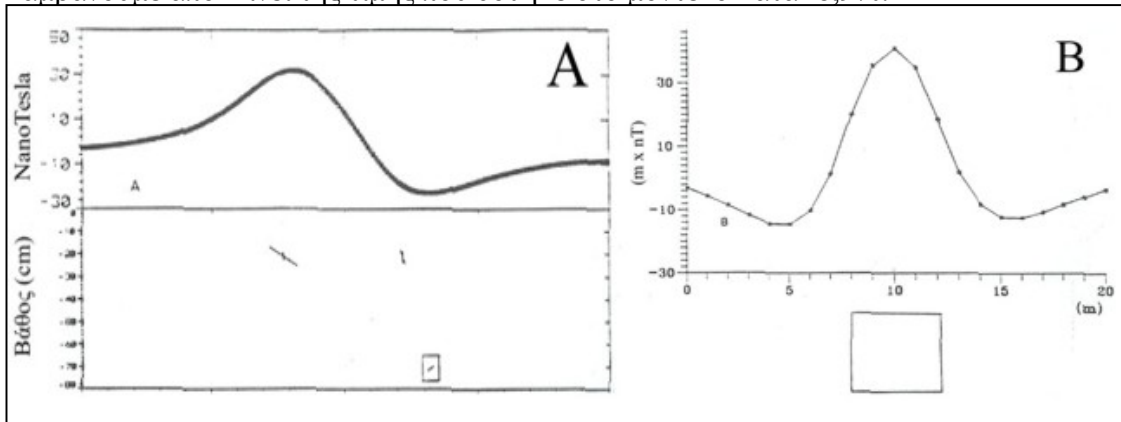
Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της αποσυνέλιξης Werner πολλαπλών πηγών παρουσιάζεται στο σχήμα (4.16^A). Στο κάτω μισό του διαγράμματος, οι υπολογισμένες θέσεις και βάθη που προκύπτουν από την ερμηνεία των κορυφών βρίσκονται στα κέντρα των ορθογωνίων, των οποίων το μέγεθος δείχνει την ασάφεια στους υπολογισμούς. Τα μήκη των γραμμών που έχουν το κέντρο τους σε αυτές τις θέσεις υποδεικνύουν τις αντιθέσεις επιδεκτικότητας ενώ οι διευθύνσεις τους δείχνουν τις γωνίες κλίσης των γωνιών. Το

σχήμα απεικονίζει τις υπολογισμένες θέσεις, βάθη και κλίσεις των ερμηνευμένων επαφών. Η υπολογισμένη αντίθεση επιδεκτικότητας φαίνεται από το μήκος των γραμμών των οποίων η διεύθυνση δείχνει τις γωνίες κλίσης κατά μήκος των επαφών. Το μεγαλύτερο σφάλμα παρατηρείται στη θέση της κάτω αριστερής γωνίας, και είναι της τάξης του +0.26 και -0.38 m κατά μήκος των αξόνων x και z αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή του φίλτρου αντιστροφής σε μια ευρεία ανωμαλία σκιαγραφεί καλύτερα τις άκρες της πλάκας αρκετά καλά. Το μέγεθος της ανωμαλίας φτάνει την τιμή 42.24, η οποία εξ ορισμού θα έπρεπε να είναι ίση με το διπλάσιο της μαγνήτισης της πλάκας, η οποία είναι:

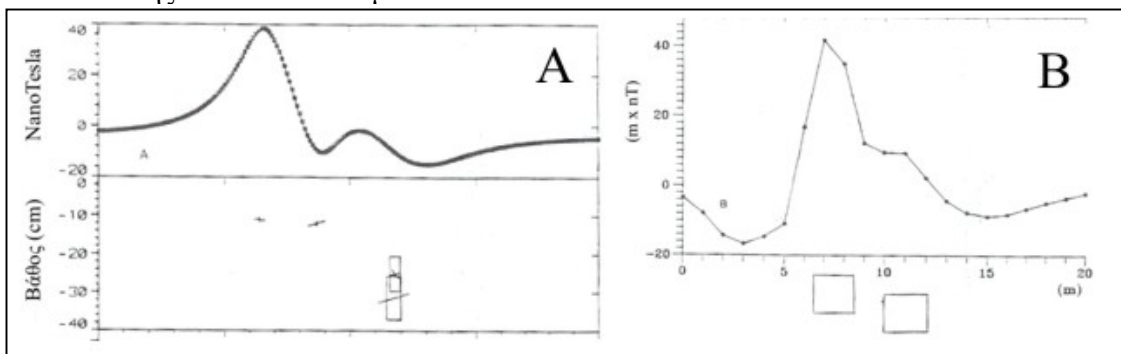
$$2kF$$

όπου k είναι η αντίθεση μαγνήτισης και F η ισχύς του επαγόμενου πεδίου. Η τιμή που λαμβάνουμε αποκλίνει της τιμής που δόθηκε στο μοντέλο κατά -8,9%.



Σχήμα 4.17 A Υπολογισμός της αποσυνέλιξης *Werner* πολλαπλών πηγών για την ανωμαλία που φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος, που παράχθηκε από ένα πρίσμα που επεκτάθηκε σε βάθος. Το πρίσμα δείχνεται στο **B** μαζί με το αποτέλεσμα της εφαρμογής φίλτρου αντιστροφής (Tsokas & Hansen 1995)

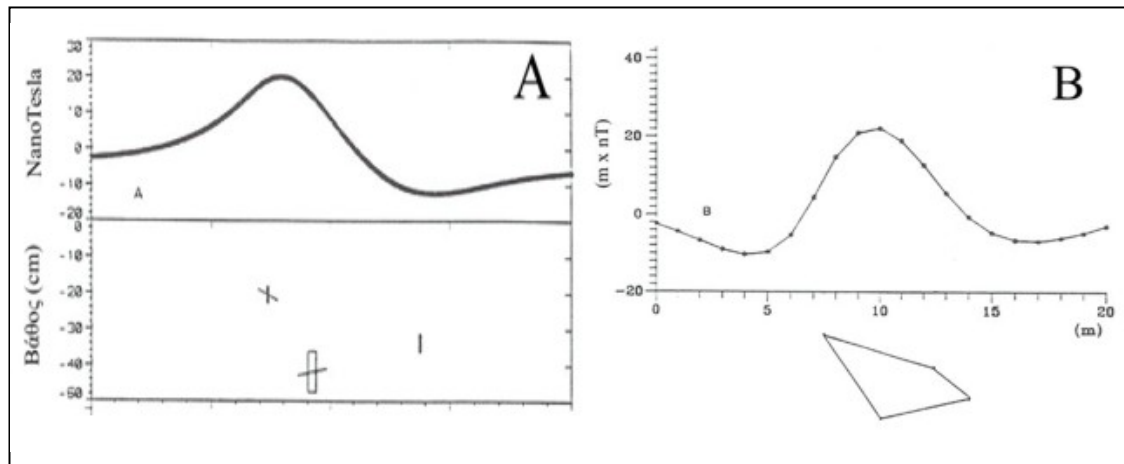
Ένα πρίσμα το οποίο να προσομοιώνει το εύρος βάθους των ερειπίων ενός φούρνου παρουσιάζεται στο σχήμα (4.17B) παράλληλα με το αποτέλεσμα της συνέλιξης της ανωμαλίας την οποία προκαλεί με το φίλτρο αντιστροφής. Το αποτέλεσμα της αποσυνέλιξης *Werner* παρουσιάζεται στο σχήμα (4.17^A) παράλληλα με το σήμα. Τα μέγιστα σφάλματα είναι της τάξης των +0.25 και +0.18 κατ' αντιστοιχία στους άξονες x και y . Το πρόγραμμα εντόπισε μια βαθιά κορυφή. Το φίλτρο αντιστροφής από την άλλη έδωσε επίσης καλά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.18 A Υπολογισμός της αποσυνέλιξης *Werner* πολλαπλών πηγών για την ανωμαλία που φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος, που παράχθηκε από δύο όμοια πρίσματα που βρίσκονται θαμμένα σε διαφορετικά βάθη και σε κοντινή θέση μεταξύ τους. Τα πρίσματα δείχνονται στο **B** μαζί με το αποτέλεσμα της εφαρμογής φίλτρου αντιστροφής (Tsokas & Hansen 1995)

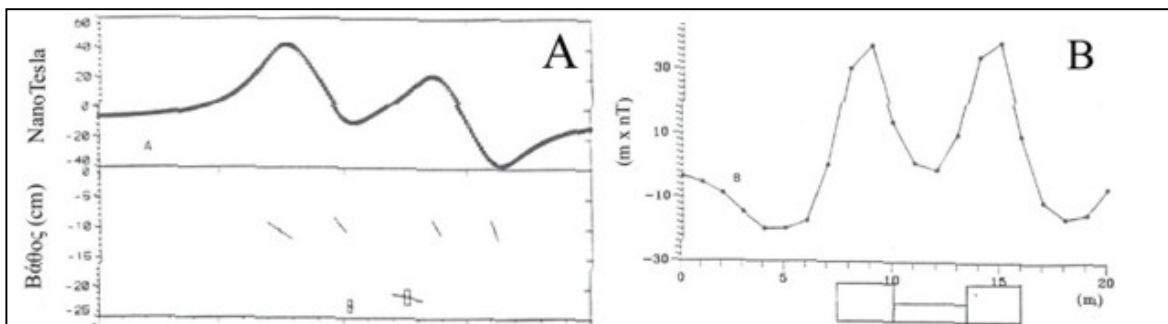
Το σχήμα (4.18A) δείχνει την ανωμαλία που προκαλούν δύο όμοιοι κύβοι, με τον πρώτο να είναι θαμμένος βαθύτερα από τον δεύτερο, καθώς και τον υπολογισμό της αποσυνέλιξης *Werner* πολλαπλών πηγών. Τα κέντρα των κύβων απέχουν απόσταση ίση με 3.5 m ενώ οι πλευρές τους 1.5 m. Μόνο οι τέσσερις από τις αναμενόμενες οκτώ κορυφές εντοπίστηκαν, αλλά αυτός ο αριθμός είναι αρκετός για να δείξει ότι υπάρχει μια

μεταβολή στο επίπεδο που βρίσκονται οι στόχοι. Η μεταβολή επιπέδου αυτή μπορεί να φανεί και από την ανωμαλία του ολικού πεδίου. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής των φίλτρων αντιστροφής δείχνει δύο σήματα διαφορετικού μεγέθους και περιεχομένου σε κυματάρια που παρεμβάλλεται το ένα στο άλλο. Το σώμα που βρίσκεται ψηλότερα παριστάνεται από μια καλά σχηματισμένη ανωμαλία που ενέχει όλα τα χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητό να υπολογιστούν, λόγω του ότι το φίλτρο κατασκευάστηκε για το σωστό βάθος. Το αποτέλεσμα του βαθύτερου σώματος είναι το μισό αναμενόμενο μέγεθος, αφού το βάθος ταφής του είναι μεγαλύτερο κατά ένα παράγοντα ή δύο.



Σχήμα 4.19 Α Υπολογισμός της αποσυνέλιξης Werner πολλαπλών πηγών για την ανωμαλία που φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος, που παράχθηκε από το πρίσμα του ακαθόριστου σχήματος που δείχνεται στο **B** μαζί με το αποτέλεσμα της εφαρμογής φίλτρου αντιστροφής (Tsokas & Hansen 1995)

Στο σχήμα (4.19) παρουσιάζεται ένα σώμα ανώμαλου σχήματος, καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής των δύο εξεταζόμενων μεθόδων στην ανωμαλία που προκαλεί. Η εφαρμογή των φίλτρων αντιστροφής στα δεδομένα αυτά θα μπορούσε να έχει αποτελέσματα των οποίων η ερμηνεία να μπορεί να γίνει σε σχέση με το πλευρικό εύρος και την μαγνήτιση του σώματος. Ο ασύμμετρος χαρακτήρας του στόχου είναι επίσης εμφανής στο γράφημα της ανωμαλίας. Η αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών εντόπισε τις τρεις από τις τέσσερις κορυφές, με μέγιστα σφάλματα της τάξης των -0.81 και -0.23 m στους άξονες x και y αντίστοιχα.



Σχήμα 4.20 Α Υπολογισμός της αποσυνέλιξης Werner πολλαπλών πηγών για την ανωμαλία που φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος, που αντανακλά τις υπόγειες συνθήκες που δείχνονται στο **B**. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής φίλτρου αντιστροφής φαίνεται επίσης στο **B** (Tsokas & Hansen 1995)

Τέλος, στο σχήμα (4.20) παρουσιάζεται ένα μοντέλο που προσομοιάζει θαμμένες αρχαιότητες. Οι γωνίες του εντοπίστηκαν αρκετά καλά, παρόλο που δύο από αυτές δεν εμφανίστηκαν καθόλου. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου αντιστροφής δείχνει καθαρά δύο οξείες κορυφές που αντανακλούν στα ανυψωμένα μέρη του μοντέλου. Το αποτέλεσμα του κατωτέρου μέρους είναι μάλλον δύσκολο να ερμηνευθεί.

4.7.3 Αποτελέσματα σύγκρισης των δυο μεθόδων

Σύμφωνα με τους Tsokas & Hansen (1995), πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε συγκριτική διαδικασία, θα πρέπει να οριστούν οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή των δύο μεθόδων. Η αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών απαιτεί ένα πολύ μικρό διάστημα δειγματοληψίας σε σύγκριση με τις πλευρικές διαστάσεις του στόχου. Στην αρχαιομετρία αυτό μπορεί να επιτευχθεί με χρήση οργάνου ικανού για πυκνή δειγματοληψία, η παράγοντας περισσότερα σημεία με παρεμβολή των δεδομένων.

Αντίθετα, τα φίλτρα αντιστροφής έχουν αποδειχθεί να αποδίδουν ικανοποιητικά με τα συνήθη διαστήματα δειγματοληψίας των 0.5 και 1.0 m και για ανωμαλίες που συναντώνται συνήθως στην αρχαιομετρία, όπως είναι οι φούρνοι και οι καταστροφικές φάσεις. Στην εφαρμογή της μεθόδου, το βάθος ταφής θεωρείται γνωστό και σταθερό κατά μήκος της τομής προς ερμηνεία. Ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι μια ανορθωμένη ανωμαλία, που το κέντρο της βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο του στόχου δίνοντας επίσης ένα πρόχειρο υπολογισμό του πλευρικού αποτελέσματος των στόχων. Επομένως για την περίπτωση των δύο διαστάσεων αυτή είναι μια κατάλληλη επεξεργασία που μπορεί να γίνει πριν την τελική μετατροπή της εικόνας, όπως δείχθηκε από τους Tsokas & Papazachos (1992). Η αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών δεν μπορεί να επεκταθεί στις δύο διαστάσεις, λόγω εγγενών περιορισμών. Ωστόσο εφαρμόσιμες μέθοδοι μπορεί να είναι είτε η αποσυνέλιξη Euler (Reid et al. 1990) είτε μια μέθοδος αντιστροφής που προτάθηκε από τους Wang & Hansen (1990).

Οι πληροφορίες για το βάθος που προσφέρει η αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών είναι και το μεγαλύτερο της πλεονέκτημα, καθώς και η έλλειψη υποθέσεων για το ειδικό σχήμα του σώματος. Είναι μια ημιαυτόματη διαδικασία η οποία επιτρέπει την παρέμβαση του ερευνητή με έναν αλληλεπιδραστικό τρόπο.

Οι συνήθεις στόχοι στην αρχαιομετρία είναι ερείπια των θεμελίων των τοίχων, απομεινάρια δρόμων, φούρνοι, φάσεων καταστροφής, τάφοι κλπ. Όλες αυτές οι δομές έχουν συνήθως πρισματικό σχήμα. Επομένως, τόσο τα φίλτρα αντιστροφής όσο και η αποσυνέλιξη Werner πολλαπλών πηγών είναι κατάλληλες μέθοδοι για μελέτη των αποτελεσμάτων τους και άντληση ερμηνευτικών συμπερασμάτων.

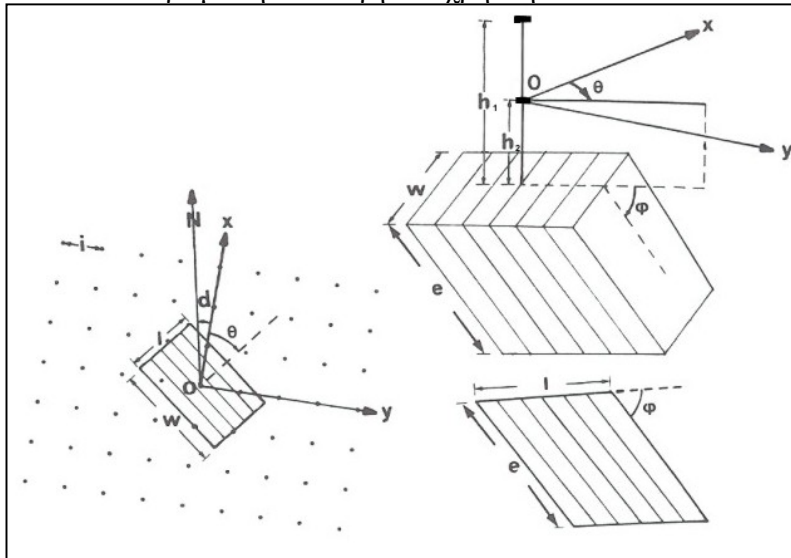
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Κατασκευή λογισμικού και εφαρμογή του

5.1 Λογισμικό κατασκευής φίλτρων αντιστροφής

Ως βάση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό που κατασκευάστηκε από τους Tsokas & Papazachos (1993). Το λογισμικό αυτό υπολογίζει το φίλτρο αντιστροφής για την μαγνητική ανωμαλία ενός παραλληλεπίπεδου πρίσματος. Το φίλτρο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες ομάδες δεδομένων (υπορουτίνα APPLY) με αποτέλεσμα τους αντίστοιχους χάρτες μαγνήτισης.

Για τη λειτουργία του προγράμματος χρησιμοποιείται ένα σταθερό σύστημα αναφοράς, το οποίο συμπίπτει με το σύστημα αναφοράς των δεδομένων. Οι άξονες Ox και Oy είναι οριζόντιοι ενώ ο Oz είναι θετικός προς τα πάνω. Η γωνία d κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού μεταξύ του μαγνητικού βορρά και του άξονα Ox , είναι η απόκλιση του μαγνητικού πεδίου (σχήμα 5.1). Σε οποιαδήποτε στιγμή γίνεται αποθήκευση δεδομένων σε αρχεία εξόδου, οι αντίστοιχοι δείκτες γράφονται επίσης με βάση το σύστημα “-xOx και -yOy”. Επομένως ο δείκτης x μεταβάλλεται πιο γρήγορα από τον y με τους δείκτες να ακολουθούν μια αυξανόμενη σειρά του τύπου (1,1), (2,1),..., (n,1), (1,2), (2,2),..., (n,2),.... Οι δείκτες μπορούν να αρχίζουν είτε από 0 είτε από 1 ανάλογα με την επιλογή του χρήστη.



Σχήμα 5.1 Σύστημα αναφοράς και στοιχεία του πρίσματος που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του ευθέως προβλήματος. Το σχήμα προέρχεται από την εργασία των Papazachos & Tsokas (1993). Προστέθηκαν μόνο τα δυο διαφορετικά επίπεδα μέτρησης

Το πρίσμα θεωρείται ότι κατασκευάζεται από την ένωση λεπτών πλακών υπό κλίση, με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και μαγνητίσεις (σχήμα 5.1). Το πρίσμα κλίνει υπό γωνία ϕ . Η διεύθυνση κλίσης, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η οριζόντια προβολή της κλίσης με τον άξονα Ox ορίζεται ως θ . Εάν η γωνία ϕ γίνει ίση με 90° τότε το πρίσμα μετατρέπεται σε πεπερασμένο κατά-κόρυφων πλευρών. Οι αποστάσεις h_1 και h_2 της κορυφής του σώματος από τους δυο

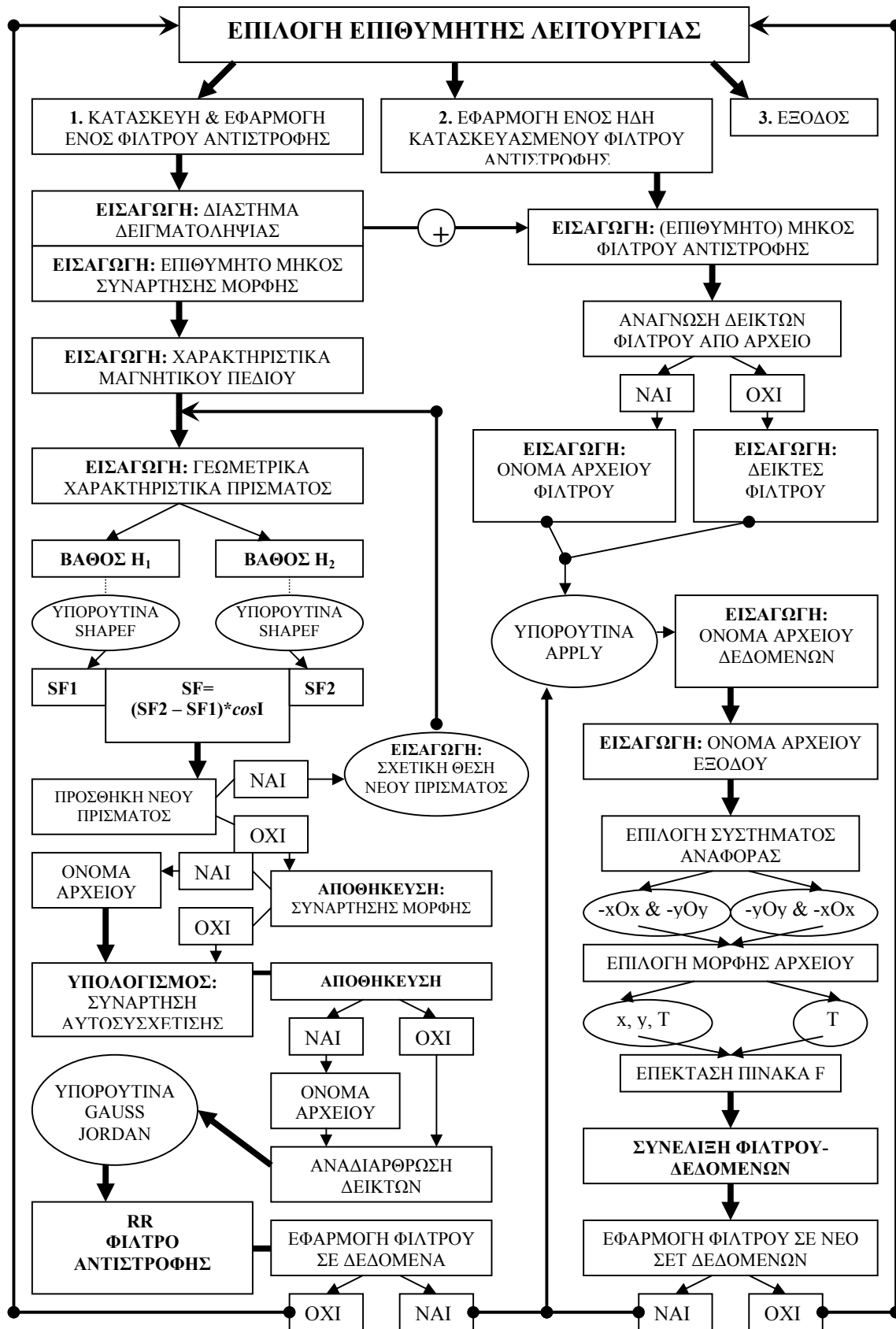
αισθητήρες θεωρούνται ως δυο διαφορετικά βάθη ταφής για τα διαφορικά δεδομένα. Η κατά βάθος διάσταση του πρίσματος e μετράται κατά μήκος της κλίσης. Η πάνω

επιφάνεια του πρίσματος θεωρείται ορθογώνια πλάτους w και μήκους l όπως φαίνεται στο σχήμα (5.1).

Το κυρίως πρόγραμμα μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη:

1. Το διάστημα δειγματοληψίας και οι παράμετροι του πρίσματος εισάγονται αρχικά στο πρόγραμμα. Όλες οι γωνίες είναι θετικές κατά την φορά των δεικτών του ρολογιού. Επιλέγεται επίσης και ο αριθμός των λεπτών πλακών που θα συγκροτούν το πρίσμα. Μεγάλος αριθμός πλακών αυξάνει τόσο την ακρίβεια όσο και το χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων. Το μήκος του φίλτρου αντιστροφής και του παραθύρου της συνάρτησης μορφής R , εισάγονται επίσης από τον χρήστη. Οι μέγιστες τιμές αυτών των παραμέτρων ελέγχονται από τις δηλώσεις της εντολής PARAMETER λόγω του ότι επηρεάζουν τις διαστάσεις πινάκων του προγράμματος. Το μέγεθος του παραθύρου της αποκομμένης συνάρτησης μορφής ορίζει την ακρίβεια της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης A_{ij} , επειδή για το φίλτρο αντιστροφής $n \times n$ σημείων, θα πρέπει να υπολογιστούν συντελεστές αυτοσυσχέτισης της τάξης του $A_{n-1,n-1}$. Επομένως απαιτούνται τουλάχιστον $n \times n$ τιμές του R_j δεδομένου ότι οι συντελεστές της συνάρτησης μορφής είναι πρακτικά μηδέν για $i,j \notin [-n, n]$. Προτείνεται να δοθεί στο μήκος παραθύρου της συνάρτησης μορφής ένα μήκος ίσο με 3 ή 4 φορές αυτό του φίλτρου αντιστροφής.
2. Στο δεύτερο μέρος του προγράμματος υπολογίζεται η συνάρτηση μορφής με διπλή κλήση της υπορουτίνας SHAPEF. Στα διαφορικά δεδομένα η λήψη μετρήσεων γίνεται με ένα όργανο δυο αισθητήρων τοποθετημένων κατά την κατακόρυφη έννοια σε απόσταση 0.5 μέτρου ο ένας από τον άλλο. Το ανώτερο πηνίο είναι προσανατολισμένο στη διεύθυνση A-Δ ενώ το κατώτερο σε διεύθυνση B-N. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι λαμβάνονται μετρήσεις του ολικού μαγνητικού πεδίου για δυο διαφορετικά βάθη ταφής. Για κάθε βάθος ταφής καλείται η υπορουτίνα SHAPEF που υπολογίζει την αντίστοιχη συνάρτηση μορφής. Έτσι, με αφαίρεση των δυο συναρτήσεων μορφής για τα αντίστοιχα βάθη και πολλαπλασιασμό επί το συνημίτονο της έγκλισης προκύπτει η τελική συνάρτηση μορφής και μετά ακολουθεί ο υπολογισμός της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Οι δυο τελευταίες συναρτήσεις αποθηκεύονται στους πίνακες R' και A' αντίστοιχα (RR και ALPHA στο πρόγραμμα) ύστερα από αναδιάρθρωση των δεικτών τους.
3. Τέλος, στο τρίτο μέρος του προγράμματος η εξίσωση $\bar{R}'^{-1} \cdot A' = R'$ λύνεται ως προς $\bar{R}'^{-1}$ (αντικαθιστά τον R' με RR στο πρόγραμμα) με χρήση μιας υπορουτίνας Gauss – Jordan ή εναλλακτικά με τη μέθοδο Levinson. Οι υπορουτίνες αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται στον κατάλογο αλλά μπορούν να βρεθούν εύκολα (Press and others, 1986). Ύστερα από κάποιες αναδιαρθρώσεις δεικτών οι τιμές του $\bar{R}'^{-1}_{i,j}$ αποκαθίστανται, και εάν είναι επιθυμητό καλείται η υπορουτίνα APPLY για εφαρμογή του φίλτρου αντιστροφής σε δεδομένα. Η εφαρμογή του φίλτρου σε περισσότερες από μια ομάδες δεδομένων ή διαδοχική κατασκευή πολλών φίλτρων είναι επίσης δυνατή. Η συνάρτηση μορφής, το φίλτρο αντιστροφής και ο χάρτης μαγνήτισης που προκύπτει αποθηκεύονται κατά βούληση σε διαφορετικά αρχεία.

Ακολουθεί ένα λεπτομερές διάγραμμα ροής του προγράμματος για πιο ενδελεχή παρατήρηση της πορείας που ακολουθείται κατά την λειτουργία του.



5.2 Εφαρμογή σε συνθετικά δεδομένα

Το επόμενο λογικό βήμα στη διαδικασία αυτή είναι ο έλεγχος του προγράμματος με δοκιμές σε συνθετικά δεδομένα. Έτσι μπορούμε να διαπιστώσουμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την απόκριση που έχει σε δομές των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι πλήρως γνωστά και με λεπτομέρεια. Υπάρχει δηλαδή δυνατότητα κατασκευής διαφόρων προσομοιώσεων δομών που θα καλύπτουν τις περισσότερες από τις συνήθεις συνθήκες που συναντώνται σε αρχαιολογικούς χώρους. Όπως είναι γνωστό, οι στόχοι της αρχαιομετρίας αποτελούνται από δομές που δημιουργήθηκαν με ανθρώπινη προσπάθεια και για εξυπηρέτηση σκοπών κατοίκησης, εργασίας, κοινωνικής δραστηριότητας, οχύρωσης κλπ. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι έχουμε γεωμετρικές δομές κατά βάση με σαφές σχήμα (πολύπλοκο ή όχι). Έτσι τα συνθετικά δεδομένα που κατασκευάζονται σε κάποιο υπολογιστή δεν απέχουν και πολύ από τις πραγματικές συνθήκες που είναι δυνατόν να απαντηθούν κατά την επεξεργασία πραγματικών δεδομένων. Αν και είναι λογικό να υπάρχει μια κάποια απλούστευση των πραγματικών συνθηκών, η δοκιμή σε συνθετικά δεδομένα δεν παύει να είναι ένα άκρως απαραίτητο εργαλείο πριν την τελική δοκιμή σε πραγματικές μετρήσεις.

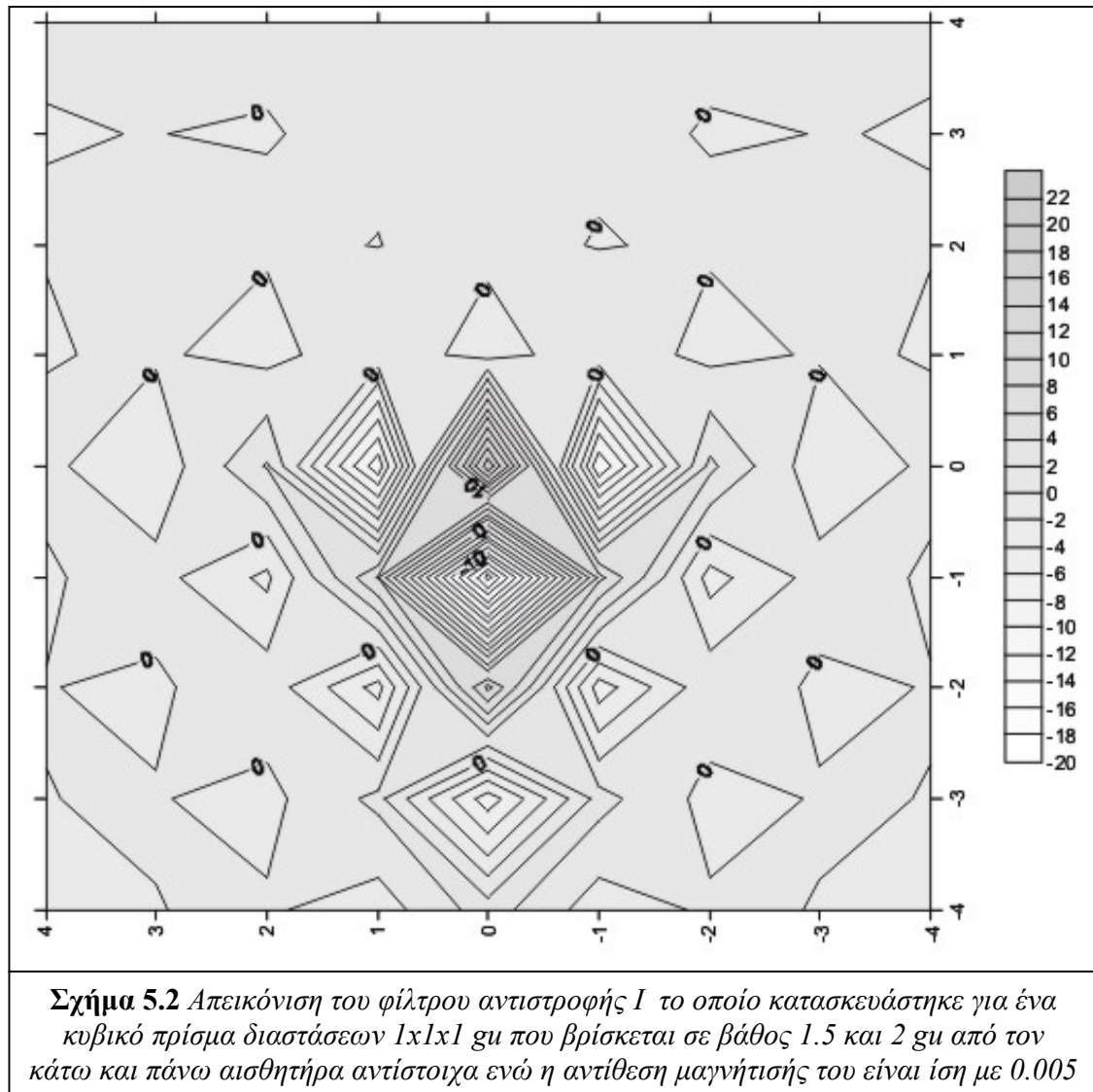
Το σύνολο των παρακάτω συνθετικών δεδομένων κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος MAG3 του USGS με βάση την εξίσωση Talwani (Talwani, 1965). Συνοπτικά οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν αφορούσαν στις εξής κατηγορίες:

1. **Κατά βάθος μεταβολή των στόχων:** εξετάστηκαν τρία διαφορετικά βάθη για ένα πρίσμα καθώς και δυο περιπτώσεις στις οποίες η μεταβολή στο βάθος δεν αντιστοιχούσε σε ακέραιο πολλαπλάσιο ενός μοναδιαίου διαστήματος αλλά δεκαδικών πολλαπλασίων αυτού (0.1 και 0.5 μονάδες δικτύου ή αλλιώς gu) για την διαπίστωση της απόκρισης του προγράμματος σε δομές που βρίσκονται ελαφρώς εκτός της ιδανικής τους θέσης.
2. **Διακριτική ικανότητα των στόχων:** σε αυτή την κατηγορία δύο πρίσματα τοποθετήθηκαν σε ποικιλία αποστάσεων μεταξύ των κέντρων τους. Επίσης ένα πρίσμα τοποθετήθηκε σε ελαφρώς μετατοπισμένες θέσεις σε σχέση με την αρχή του χρησιμοποιούμενου συστήματος αναφοράς (0.1 και 0.5 gu επίσης).
3. **Προσανατολισμός των στόχων:** για αυτή την κατηγορία εξετάστηκε ένα μοντέλο του οποίου οι γραμμικές διαστάσεις του βρίσκονται υπό γωνία με το σύστημα αναφοράς. Το πάχος της δομής αυτής ορίστηκε ελαφρώς μεγαλύτερο από 1 gu.
4. **Στόχοι πολύπλοκου σχήματος:** τα δεδομένα που κατασκευάστηκαν στην περίπτωση αυτή περιλαμβάνουν δομές πολλαπλών πρισμάτων, σε ποικιλία βαθών ταφής και προσανατολισμών, ρεαλιστικού πάχους τοίχων, αρνητικής και θετικής αντίθεσης μαγνήτισης, συμπαγούς σχήματος και γραμμικού χαρακτήρα και τέλος πρισμάτων σε κατακόρυφη ανάπτυξη.
5. **Επίδραση θορύβου στην αναγνώριση στόχων:** σε ορισμένα από τα παραπάνω μοντέλα προστέθηκε Gauss-ιανός θόρυβος σε ποσοστό 2, 5 και 10% και εξετάστηκε η επίδραση του στην αναγνώριση των στόχων.

Στο τέλος παρατίθεται ένα αρκετά πολύπλοκο μοντέλο που συνδυάζει όλες τις παραπάνω κατηγορίες και ουσιαστικά αποτελεί την πιο κοντινή σε πραγματικές συνθήκες περίπτωση.

Στις παραπάνω κατηγορίες τα περισσότερα πρίσματα και σώματα τοποθετήθηκαν σε βάθος 1 gu κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και είχαν αντίθεση μαγνήτισης 0.005

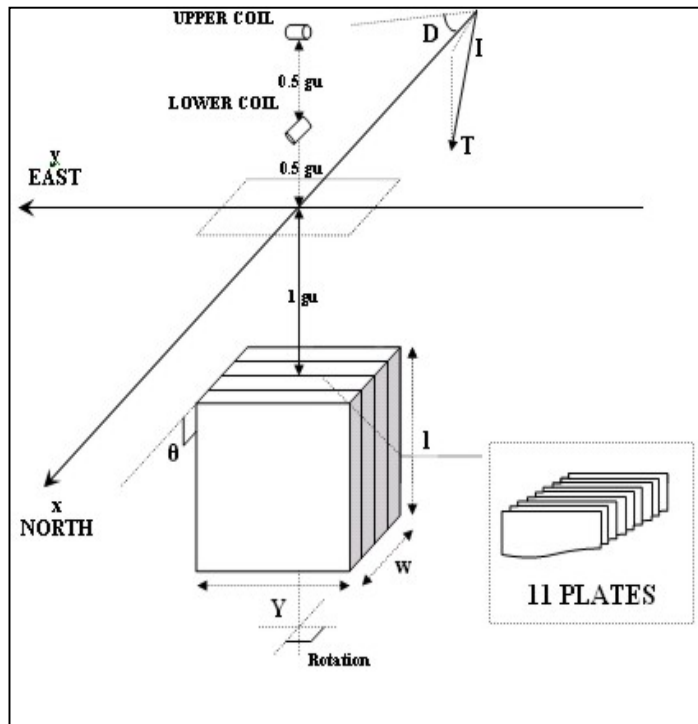
CGS. Έτσι για την πλειοψηφία των περιπτώσεων το φίλτρο που κατασκευάστηκε (σχήμα 5.2) χρησιμοποίησε τη συνάρτηση μορφής ενός κυβικού πρίσματος διαστάσεων $1 \times 1 \times 1$ gu και σε βάθος 1 gu κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το φίλτρο αυτό ήταν 9 θέσεων.



Σχήμα 5.2 Απεικόνιση του φίλτρου αντιστροφής I το οποίο κατασκευάστηκε για ένα κυβικό πρίσμα διαστάσεων $1 \times 1 \times 1$ gu που βρίσκεται σε βάθος 1.5 και 2 gu από τον κάτω και πάνω αισθητήρα αντίστοιχα ενώ η αντίθεση μαγνήτισής του είναι ίση με 0.005

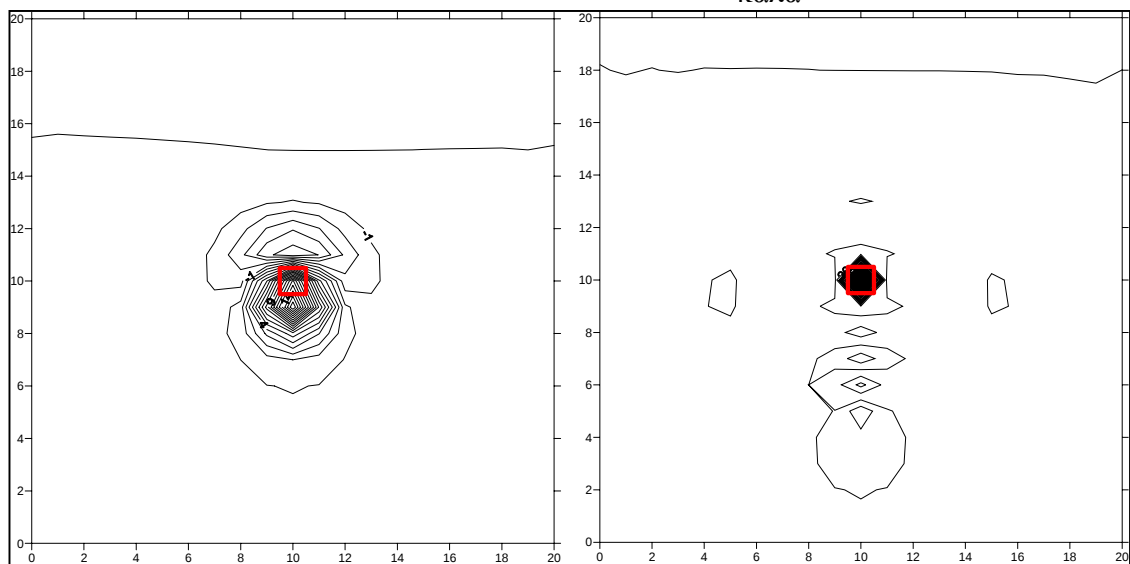
Η χαρτογράφηση του φίλτρου φαίνεται στο σχήμα (5.2). Οι μόνες περιπτώσεις στις οποίες κατασκευάστηκε διαφορετικό φίλτρο ήταν για το κατάλληλο βάθος στην κατά βάθος μεταβολή και για τον σωστό προσανατολισμό της δομής σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση του κάθε μοντέλου.

5.2.1 Κατά βάθος μεταβολή των στόχων – ΑΠΛΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 1 gu

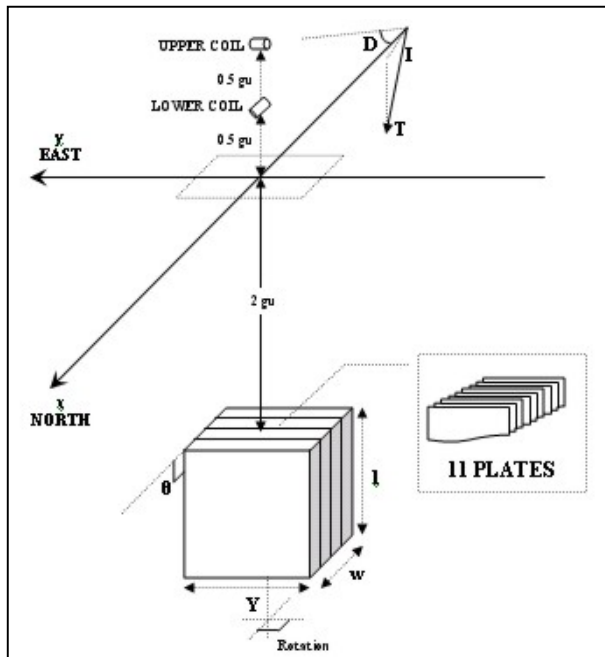


Σχήμα 5.3 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις $1 \times 1 \times 1$ gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Το πρίσμα θεωρείται ότι αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα.

Τα συνθετικά δεδομένα κατασκευάστηκαν για ένα κυβικό πρίσμα όμοιο με αυτό που φαίνεται στο σχήμα (5.3). Ουσιαστικά πρόκειται για ακριβώς το ίδιο σώμα με βάση το οποίο υπολογίστηκε το φίλτρο. Είναι αναμενόμενο λοιπόν η εφαρμογή του φίλτρου αυτού στα δεδομένα μας να έχει πολύ καλά αποτελέσματα δηλαδή να αποσαφηνίσει πλήρως το σώμα. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου φαίνεται στο σχήμα (5.4). Στο αριστερό μέρος του σχήματος φαίνεται η χαρτογράφηση των συνθετικών δεδομένων ενώ στο δεξιό το αποτέλεσμα της συνέλιξης τους με το φίλτρο αντιστροφής I του σχήματος (5.2). Είναι φανερό πως η θέση του σώματος είναι σωστή αλλά και το σχήμα του σκιαγραφήθηκε πάρα πολύ καλά



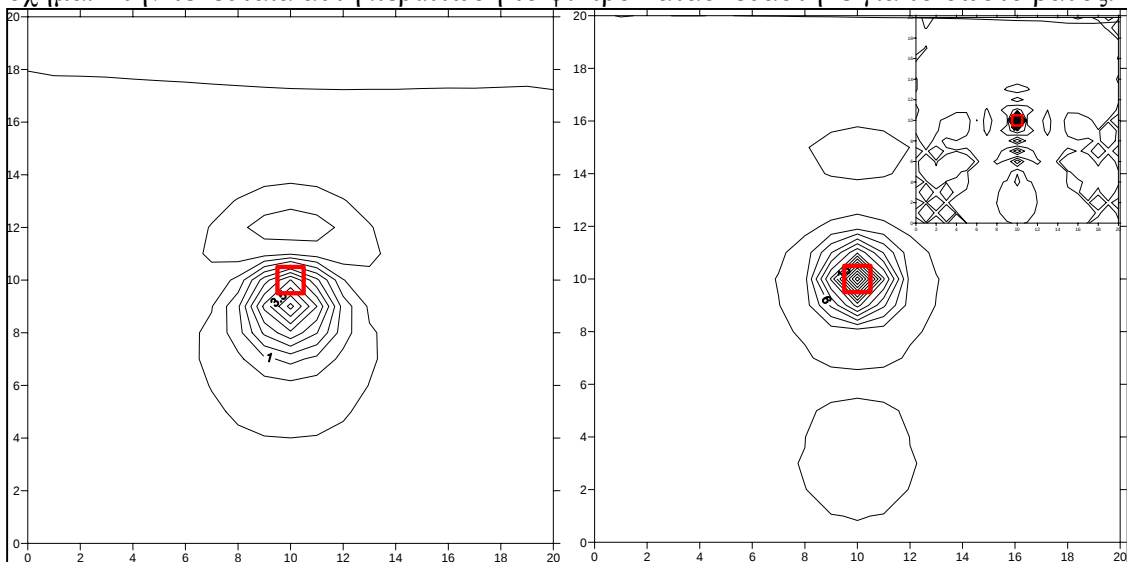
Σχήμα 5.4 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος ακμής μιας μονάδας δικτύου και θαμμένου σε βάθος επίσης μιας μονάδας. Δεξιά είναι το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

ΑΠΛΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 2 gu

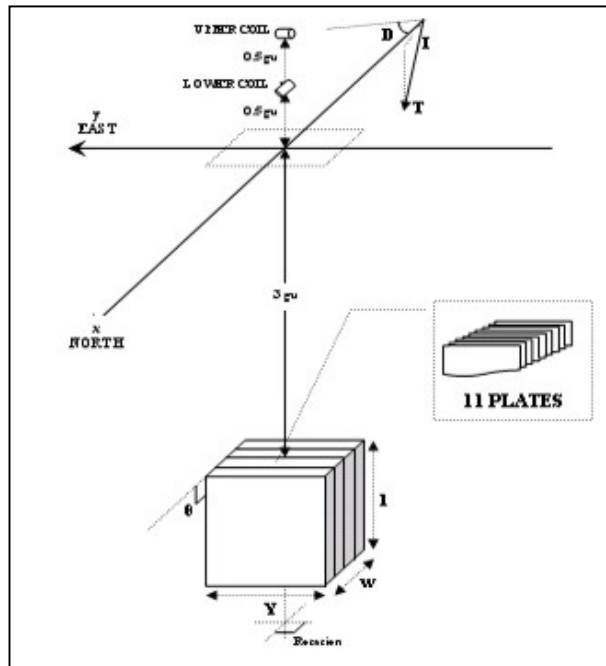
Σχήμα 5.5 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος σε βάθος 2 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Το πρίσμα θεωρείται ότι αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα

Στο μοντέλο αυτό, ακριβώς το ίδιο σώμα με την προηγούμενη περίπτωση έχει μετατοπιστεί σε βάθος κατά 1 gu, δηλαδή το νέο βάθος του είναι 2 gu από την επιφάνεια του εδάφους. Στο σχήμα (5.5) φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σώματος. Το φίλτρο I έχει κατασκευαστεί για μικρότερο βάθος ταφής (1 gu) γι αυτό στο συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόστηκε και ένα φίλτρο II που αντιστοιχεί στο σωστό βάθος για σύγκριση των εικόνων. Επομένως έχει ενδιαφέρον να δούμε τι επίδραση θα έχει αυτή η σημαντική αλλαγή στο βάθος. Από το σχήμα (5.6) συμπεραίνουμε ότι η ανωμαλία στο χάρτη μαγνήτισης έχει διευρυνθεί και επομένως αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καθορισμό των ορίων του πρίσματος. Βέβαια, η θέση του κέντρου του πρίσματος ευρίσκεται σωστά αφού ταυτίζεται με το κέντρο της νέας ανορθωμένης ανωμαλίας. Το αποτέλεσμα δεν μπορεί να συγκριθεί με αυτό που φαίνεται στο ένθετο

σχήμα. Στην τελευταία αυτή περίπτωση το φίλτρο κατασκευάστηκε για το σωστό βάθος.

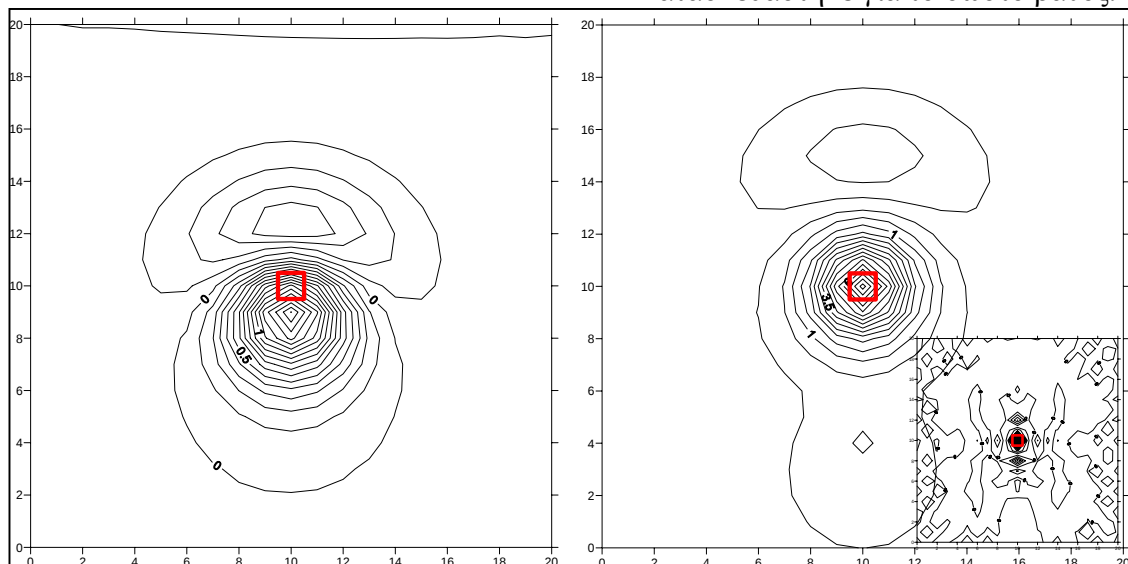


Σχήμα 5.6 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος σε βάθος 2 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I ενώ πάνω δεξιά με το φίλτρο II

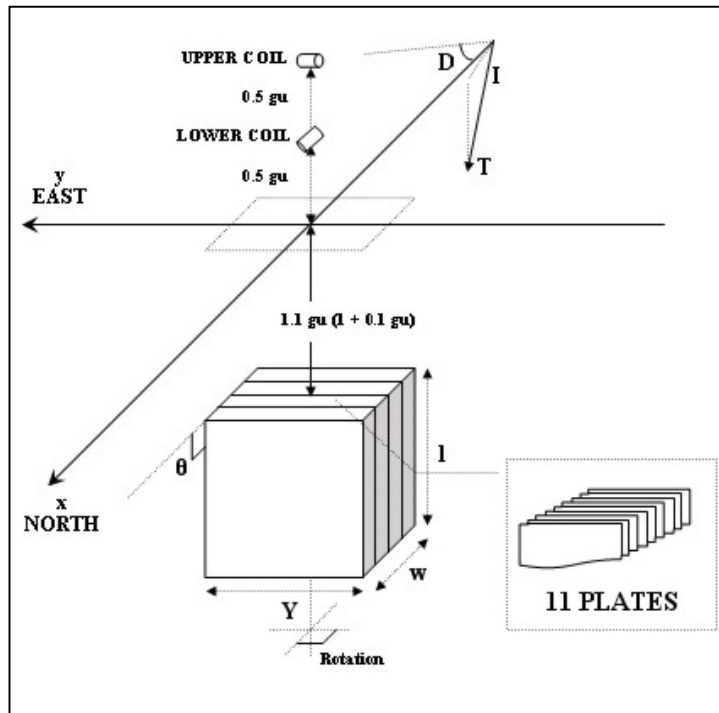
ΑΠΛΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 3 gu

Σχήμα 5.7 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος σε βάθος 3 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Το πρίσμα θεωρείται ότι αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα.

Στην περίπτωση αυτή το σώμα έχει μετατοπιστεί σε βάθος κατά 1 gu επιπλέον με συνέπεια το νέο βάθος του να είναι 3 gu από την επιφάνεια του εδάφους. Στο σχήμα (5.7) φαίνονται επίσης τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Το φίλτρο I έχει όπως και πριν κατασκευαστεί για μικρότερο βάθος ταφής (1 gu), γι αυτό και στο συγκεκριμένο μοντέλο εφαρμόστηκε ένα ακόμα φίλτρο III που αντιστοιχεί στο σωστό βάθος για σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα (5.8) μπορούμε να δούμε ότι η ανωμαλία στο χάρτη μαγνήτισης έχει διευρυνθεί ακόμα περισσότερο ενώ πλέον η εκτίμηση της θέσης του σώματος γίνεται μόνο αν θεωρηθεί ως κέντρο του το κέντρο των συσσωρευμένων ισανώμαλων. Πλέον δεν υπάρχει καμία ένδειξη για το μέγεθος του σώματος αυτού. Αντίθετα η ένθετη εικόνα αποκαλύπτει τις σωστές διαστάσεις του σώματος. Αυτό γίνεται γιατί το φίλτρο αντιστροφής κατασκευάστηκε για το σωστό βάθος.

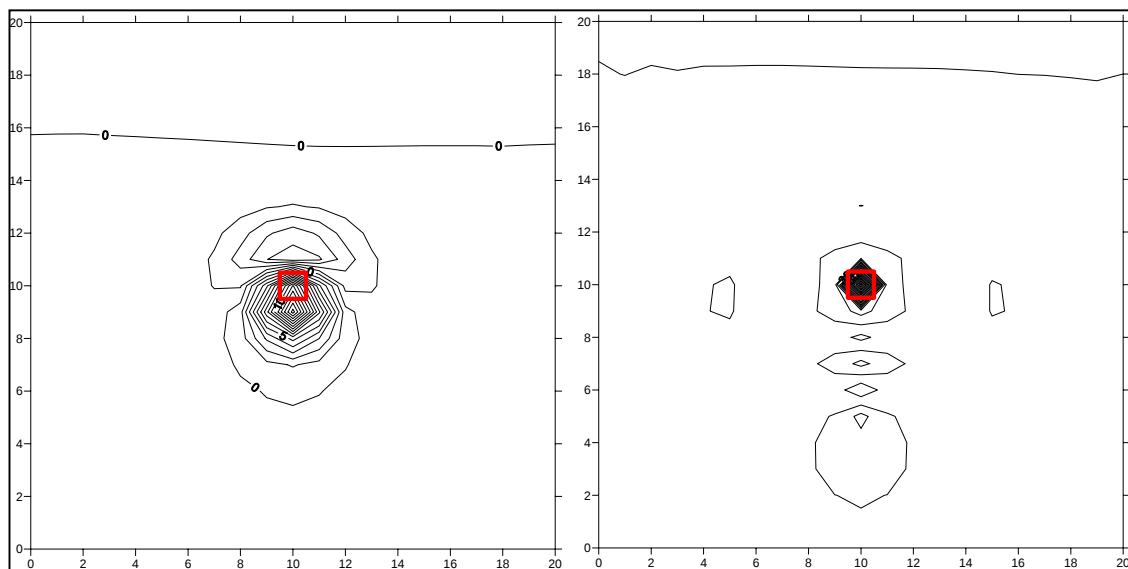


Σχήμα 5.8 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος σε βάθος 3 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I ενώ κάτω δεξιά με το φίλτρο III

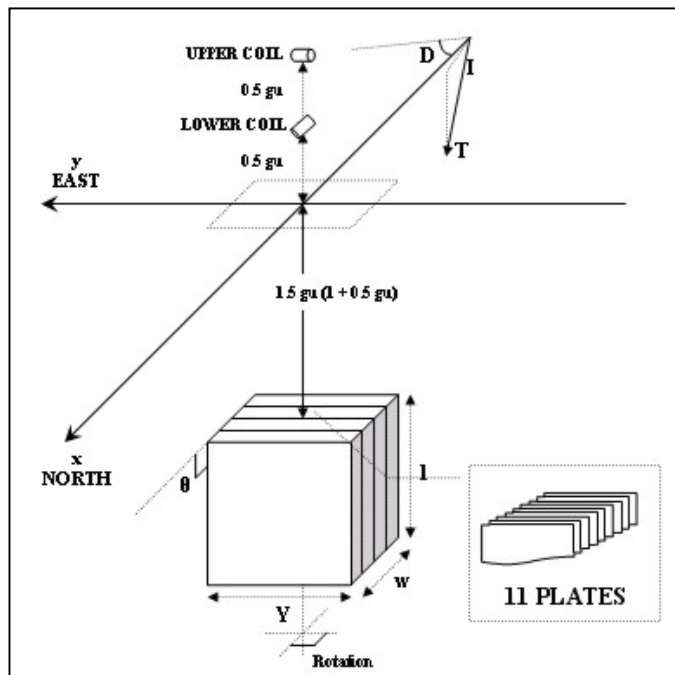
ΑΠΛΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 1.1 gu

Σχήμα 5.9 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος σε βάθος 1.1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις $1 \times 1 \times 1$ gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Το πρίσμα θεωρείται ότι αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα

Το μοντέλο του οποίου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά απεικονίζονται στο σχήμα (5.9) αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο σκέλος της δοκιμής του φίλτρου I σε δομές των οποίων το βάθος είναι μη ακέραιο πολλαπλάσιο ενός μοναδιαίου διαστήματος, δηλαδή για σώματα των οποίων η θέση είναι ελαφρώς διαφορετική από την ιδανική. Το πρίσμα βρίσκεται σε βάθος 1.1 gu που αντιστοιχεί σε μια μικρή μετατόπιση του πρίσματος προς τα κάτω (κατά 0.1 gu). Η εφαρμογή του φίλτρου I στα δεδομένα αυτά είχε τα ίδια αποτελέσματα με την περίπτωση στην οποία το πρίσμα βρισκόταν σε βάθος 1 gu (σχήμα 5.10). Έτσι μια μικρή μεταβολή στο βάθος δεν αλλοιώνει ορατά την ικανότητα της μεθόδου να διακρίνει το σώμα.

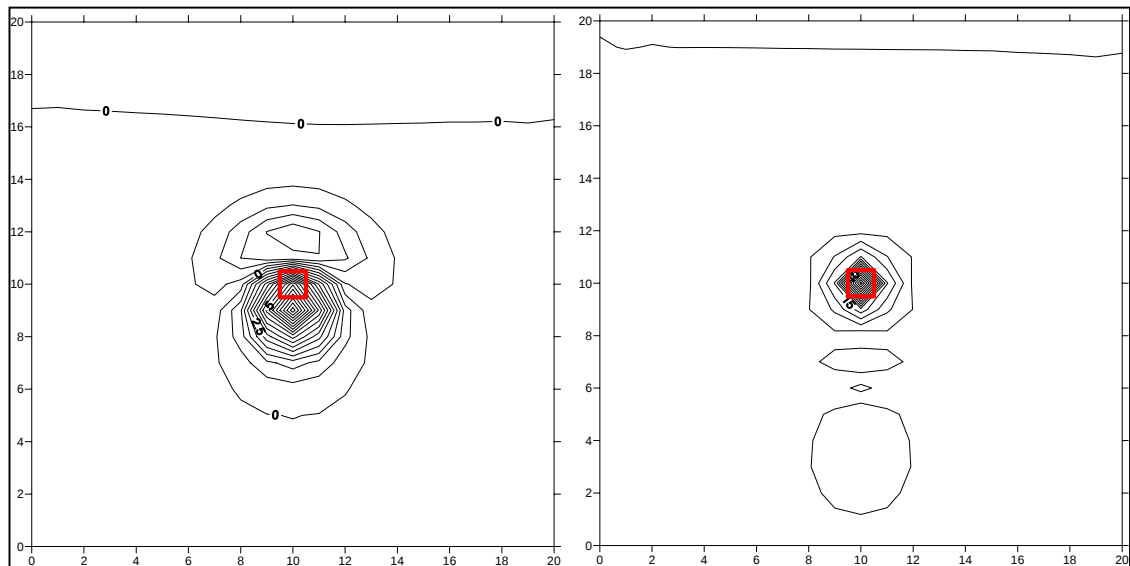


Σχήμα 5.8 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος σε βάθος 1.1 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

ΑΠΛΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 1.5 gu

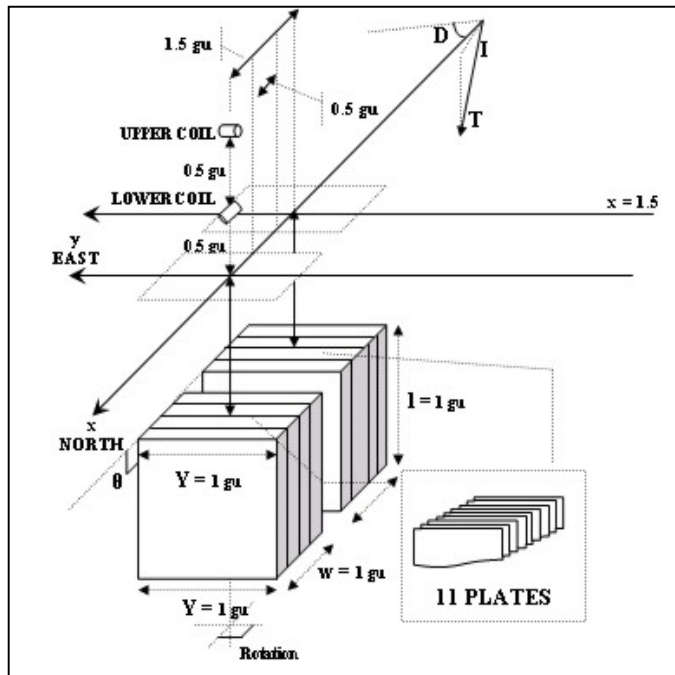
Σχήμα 5.11 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος σε βάθος 1.5 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Το πρίσμα θεωρείται ότι αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα

Το δεύτερο σκέλος της διερεύνησης της απόκρισης του φίλτρου αντιστροφής I σε δομές οι οποίες δεν βρίσκονται σε ιδανική θέση παρουσιάζεται στο σχήμα (5.11). Αυτή τη φορά το πρίσμα μετατοπίστηκε κατά 0.5 gu προς τα κάτω με συνέπεια το νέο βάθος ταφής του να είναι 1.5 gu. Αυτό σημαίνει πως η μετατόπιση από την ιδανική θέση είναι αρκετά σημαντική πλέον σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Στο σχήμα (5.12) φαίνεται ότι η εφαρμογή του φίλτρου I δεν είχε καλά αποτελέσματα γιατί στην εικόνα που προέκυψε δεν μπορούμε πλέον να πούμε με ασφάλεια που είναι τα όρια του σώματος αν και το κέντρο της δομής συμπίπτει με το κέντρο της ανορθωμένης ανωμαλίας.



Σχήμα 5.12 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος σε βάθος 1.5 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

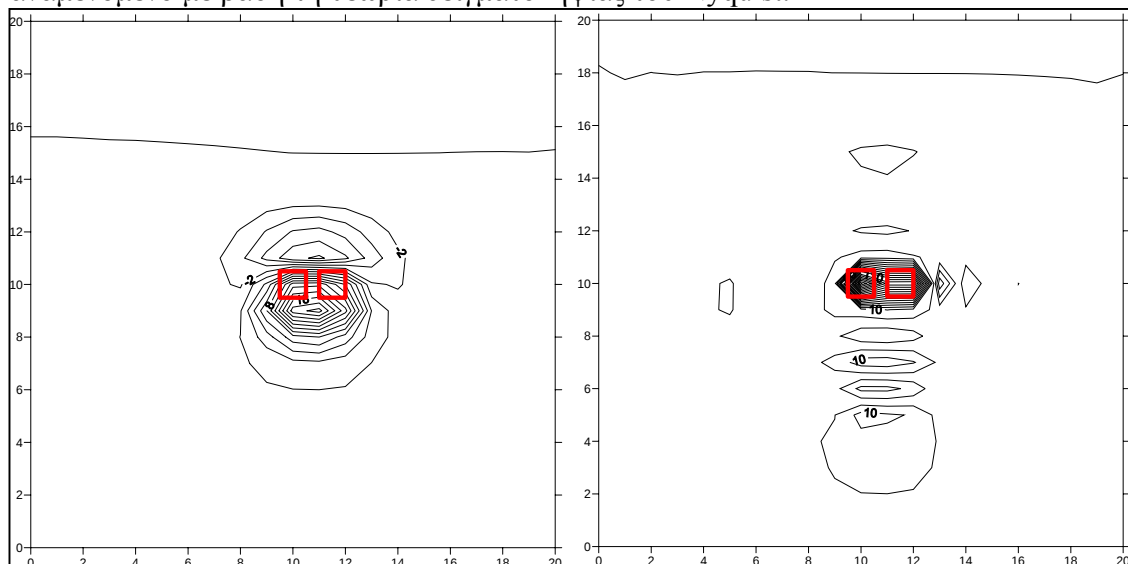
5.2.2 Διακριτική ικανότητα των στόχων – 2 ΠΡΙΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 0.5 gu



Σχήμα 5.13 Τρισδιάστατο σχήμα δυο πρισμάτων σε απόσταση 0.5 gu, σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Τα πρίσματα θεωρείται ότι αποτελούνται από 11 λεπτά ελάσματα

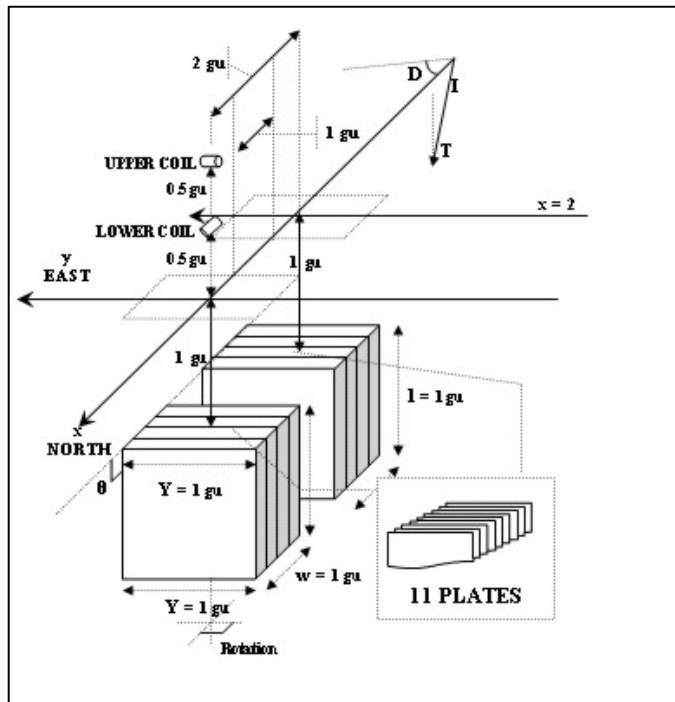
Αυτή είναι η πρώτη περίπτωση στην οποία εξετάζεται η διακριτική ικανότητα του λογισμικού σε διακριτές δομές. Αρχικά τα δυο όμοια πρίσματα τοποθετήθηκαν σε αποστάσεις 1.5 gu μεταξύ των κέντρων τους. Δηλαδή το διάκενο μεταξύ των πλευρών τους είναι μόνο 0.5 gu (σχήμα 5.13). Η εφαρμογή του φίλτρου I στα δεδομένα αυτά έχει το αποτέλεσμα που φαίνεται στο σχήμα (5.14). Όπως είναι φανερό στον τελικό χάρτη μαγνήτισης είναι αδύνατο να διαχωριστούν τα δυο αυτά σώματα, με συνέπεια να παρουσιάζονται ως ένα επίμηκες. Ουσιαστικά λοιπόν δυο σώματα τα οποία έχουν τις πλευρές τους σε αποστάσεις μικρότερης ενός μοναδιαίου διαστήματος δεν είναι δυνατόν να διαχωριστούν και δίνουν την λανθασμένη εντύπωση πως πρόκειται για μια δομή. Το γεγονός αυτό ήταν

αναμενόμενο με βάση τη θεωρία δειγματοληψίας του Nyquist.



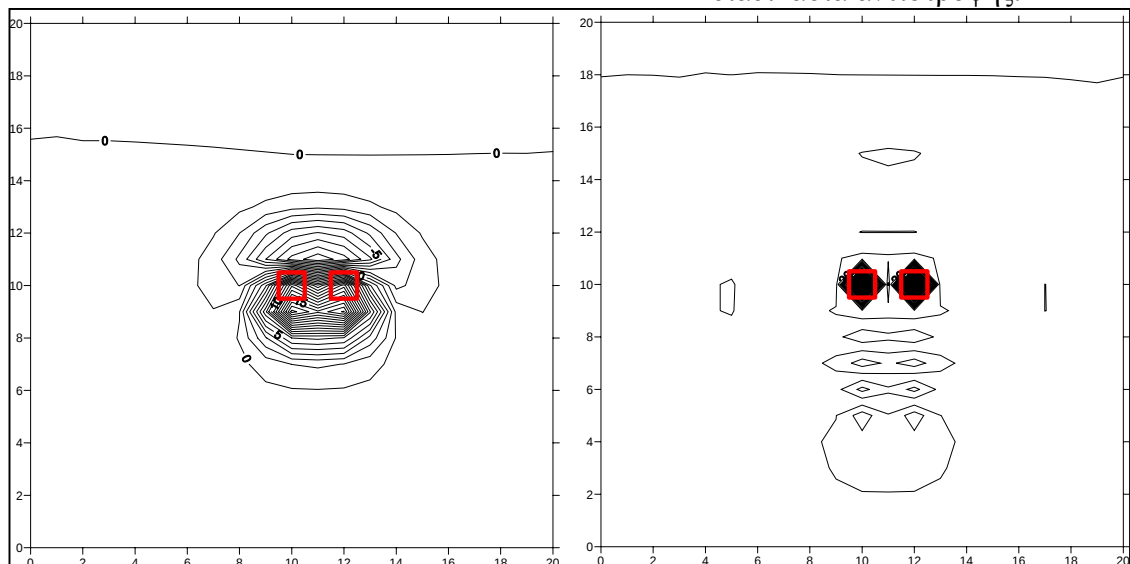
Σχήμα 5.14 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα δυο κυβικών πρισμάτων σε απόσταση 0.5 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

2 ΠΡΙΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 1 gu



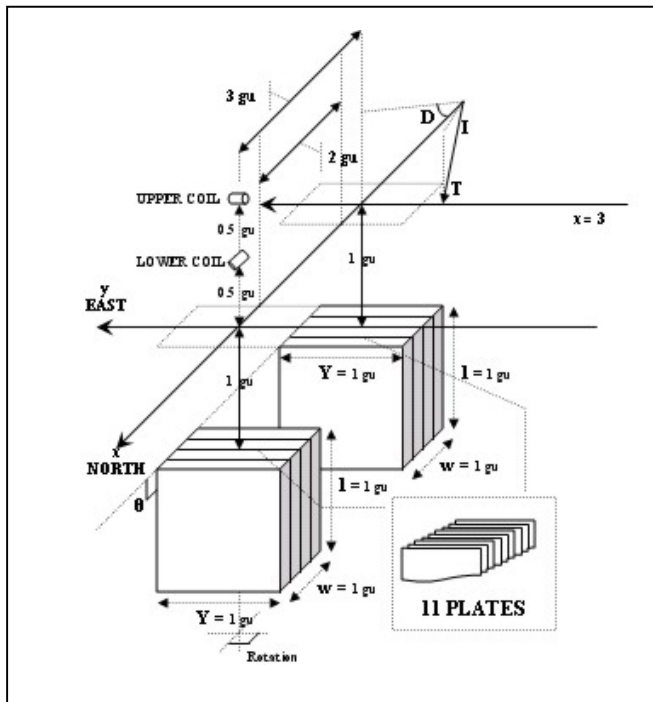
Σχήμα 5.15 Τρισδιάστατο σχήμα δυο πρισμάτων σε απόσταση 1 gu, σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Τα πρίσματα θεωρείται ότι αποτελούνται από 11 λεπτά ελάσματα

Σε αυτή την περίπτωση η απόσταση που επιλέχθηκε μεταξύ των κέντρων των δυο πρισμάτων ήταν 2 gu έτσι ώστε να εξεταστεί η αμέσως επόμενη περίπτωση από την προηγούμενη και σε ποιο ακριβώς όριο αρχίζει η σαφής διάκριση δυο σωμάτων. Το σχήμα (5.15) αναπαριστά αυτό το μοντέλο και τα χαρακτηριστικά του. Η εφαρμογή του φίλτρου στα συνθετικά δεδομένα του μοντέλου είχε σαν αποτέλεσμα τον χάρτη μαγνήτισης του σχήματος (5.16) στον οποίο φαίνεται πλέον ότι τα δυο σώματα έχουν διαχωριστεί πλήρως. Επιπλέον δεν υπάρχει καμία αμφιβολία για τον αριθμό των σωμάτων. Επομένως δυο σώματα θα πρέπει να είναι σε απόσταση τουλάχιστον ενός μοναδιαίου διαστήματος μεταξύ τους έτσι ώστε να μπορούν να διαχωριστούν σε αυτή τη διαδικασία αντιστροφής.



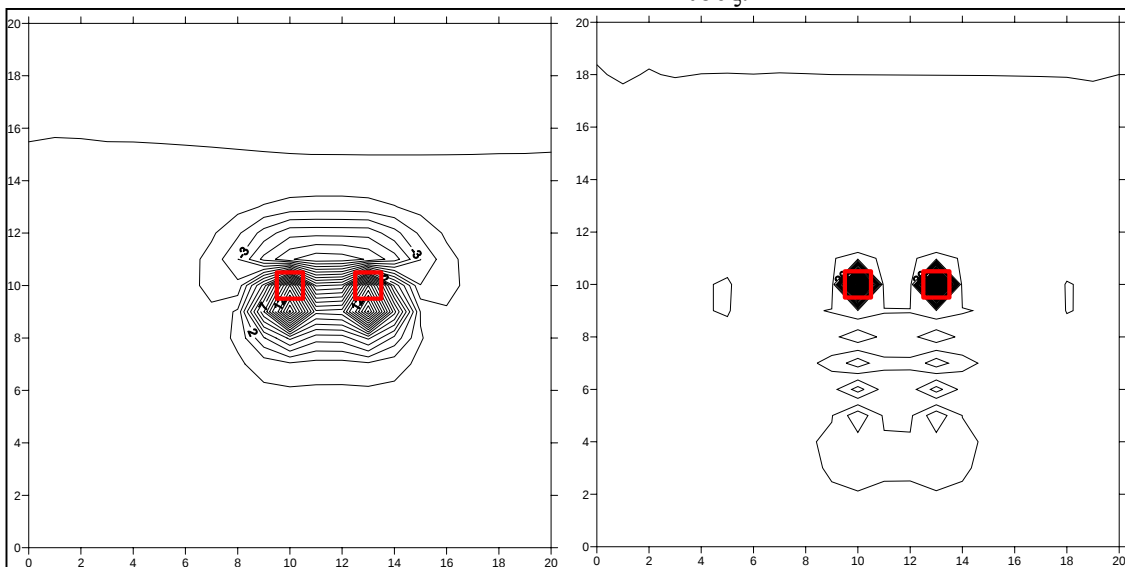
Σχήμα 5.16 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα δυο κυβικών πρισμάτων σε απόσταση 1 gu μεταξύ τους (δηλαδή τα κέντρα τους βρίσκονται σε 2 gu) και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

2 ΠΡΙΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 2 gu

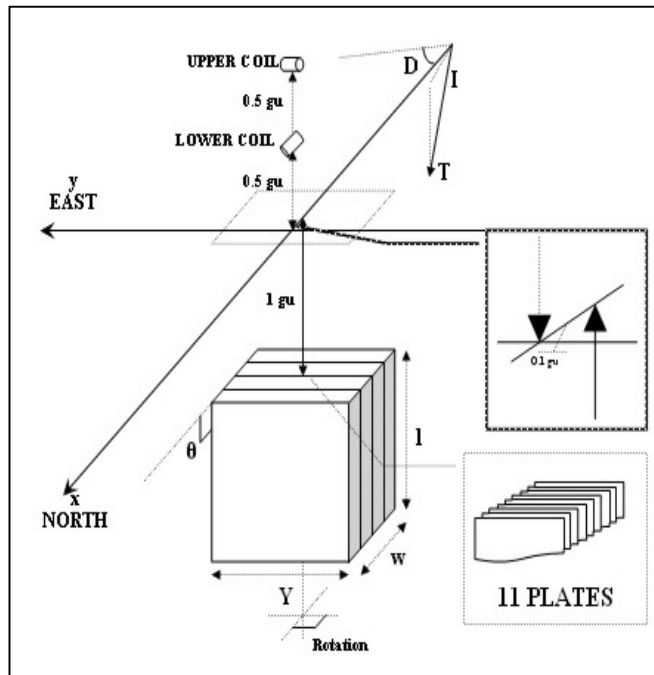


Σχήμα 5.17 Τρισδιάστατο σχήμα δυο πρισμάτων σε απόσταση 2 gu, σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Τα πρίσματα θεωρείται ότι αποτελούνται από 11 λεπτά ελάσματα

Αυτή η περίπτωση διαχωρίζει τα σώματα ακόμα περισσότερο και τα τοποθετεί πλέον σε απόσταση 2 gu, δηλαδή σε απόσταση 3 gu μεταξύ των κέντρων τους. Το σχήμα (5.17) δείχνει τη μορφή του μοντέλου αυτού στο χώρο καθώς και τις διαστάσεις των πρισμάτων. Η εφαρμογή του φίλτρου I στα δεδομένα αυτά είχε όπως είναι λογικό ένα πάρα πολύ καλό αποτέλεσμα διαχωρίζοντας με ευκολία τα δυο σώματα και με την καλύτερη δυνατή εκτίμηση τόσο της θέσης όσο και του μεγέθους τους όπως φαίνεται στο σχήμα (5.18). Επομένως από τη στιγμή που ξεπεράστηκε η κρίσιμη απόσταση των 2 gu το φίλτρο αντιστροφής εκτέλεσε την επιθυμητή λειτουργία, αποκάλυψε τον πραγματικό αριθμό των σωμάτων που προκάλεσαν την ανωμαλία και επιπλέον εντόπισε με ακρίβεια τα κέντρα τους και έδωσε με αρκετή σαφήνεια τα όρια τους.

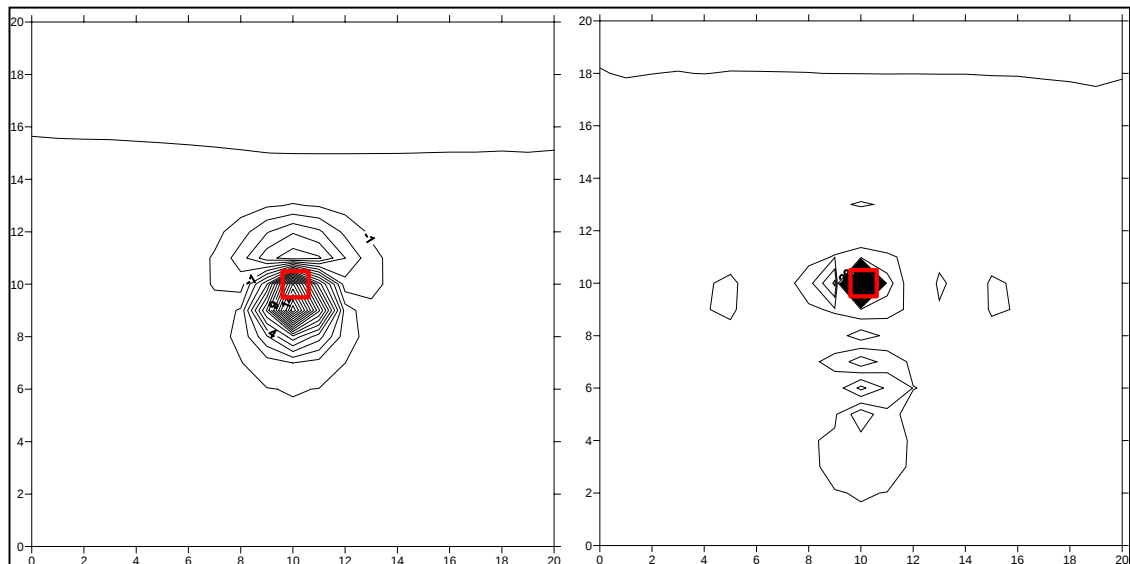


Σχήμα 5.18 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα δυο κυβικών πρισμάτων σε απόσταση 2 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

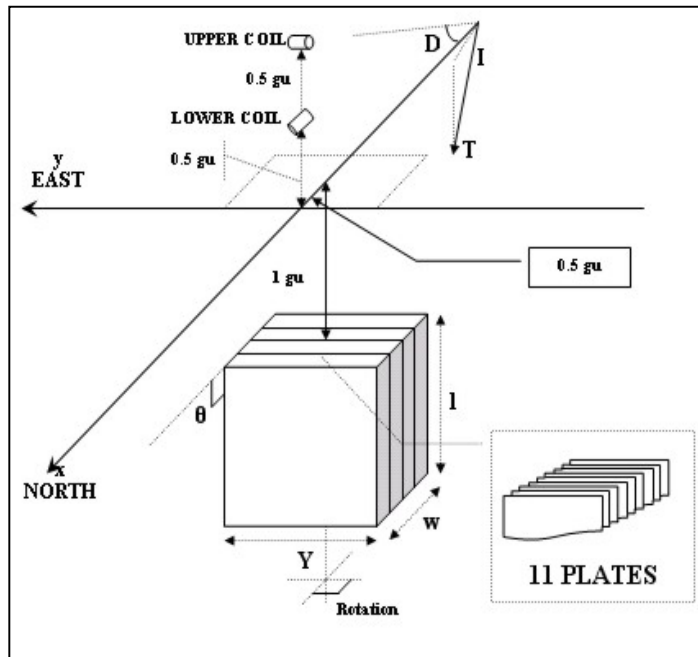
1 ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΘΕΣΗ 0.1 gu ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Σχήμα 5.19 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος με το κέντρο του σε θέση 0.1 gu από το κέντρο του συστήματος αναφοράς, σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις $1 \times 1 \times 1$ gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα

Αυτό το μοντέλο ενός πρίσματος κατασκευάστηκε για να διερευνηθεί η απόκριση του λογισμικού σε δομές των οποίων το κέντρο δεν συμπίπτει με το κέντρο του συστήματος αναφοράς και γενικά με οποιαδήποτε τομή αξόνων ακέραιων τιμών x & y του συστήματος αναφοράς. Στο σχήμα (5.19) παρουσιάζεται ένα πρίσμα μετατοπισμένο κατά 0.1 gu δεξιά της αρχής των αξόνων. Η συνέλιξη των δεδομένων αυτών με το φίλτρο I είχε σαν αποτέλεσμα το σώμα να εμφανιστεί μετατοπισμένο κατά 0.1 gu αριστερά έτσι ώστε να συμπίπτει με την αρχή του συστήματος αναφοράς (σχήμα 5.20). Αυτό σημαίνει πως σε αρχική φάση αν και το σχήμα του σώματος αποκαλύπτεται καλά, η θέση του χάνεται κατά ένα ποσοστό ανάλογο της αρχικής μετατόπισης του πρίσματος σε σχέση με το σύστημα αναφοράς.

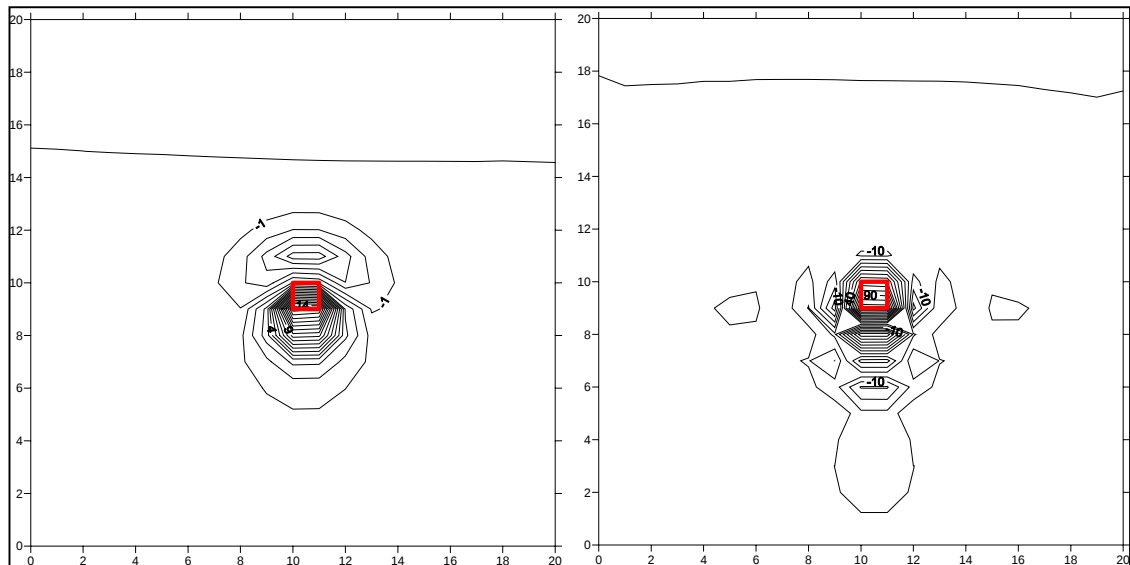


Σχήμα 5.20 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος σε θέση 0.1 gu δεξιά της αρχής του συστήματος αναφοράς (10,10) και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

1 ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΘΕΣΗ 0.5 gu ΑΠΟ ΤΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

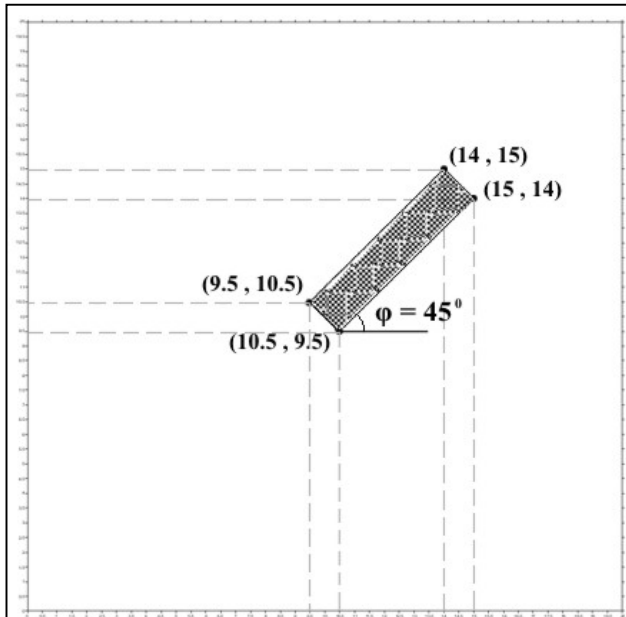
Σχήμα 5.21 Τρισδιάστατο σχήμα ενός πρίσματος με το κέντρο του σε θέση 0.5 gu από το κέντρο του συστήματος αναφοράς, σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους, με διαστάσεις 1x1x1 gu και με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 (CGS). Αποτελείται από 11 λεπτά ελάσματα.

Σε αυτή την περίπτωση το πρίσμα έχει μετατοπιστεί ακόμα περισσότερο προς τα δεξιά κατά μισό μοναδιαίο διάστημα (0.5 gu) όπως φαίνεται και στο σχήμα (5.21). Αυτή τη φορά η εφαρμογή του φίλτρου I στα δεδομένα μας δεν είχε τα καλύτερα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται στο σχήμα (5.22) η ανωμαλία στο χάρτη μαγνήτισης έχει λάβει ένα εντελώς ασαφές σχήμα και φυσικά καθόλου αντιπροσωπευτικό για το σώμα που την προκάλεσε. Αν και είναι φανερό πως κάποιο σώμα προκάλεσε την συγκεκριμένη ανωμαλία, η αντιστροφή δεν βοηθά καθόλου στην αποσαφήνισή του. Επομένως η θέση ενός σώματος σε σχέση με το σύστημα αναφοράς παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη συγκεκριμένη διαδικασία



Σχήμα 5.22 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός κυβικού πρίσματος σε θέση 0.5 gu δεξιά της αρχής του συστήματος αναφοράς (10,10) και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

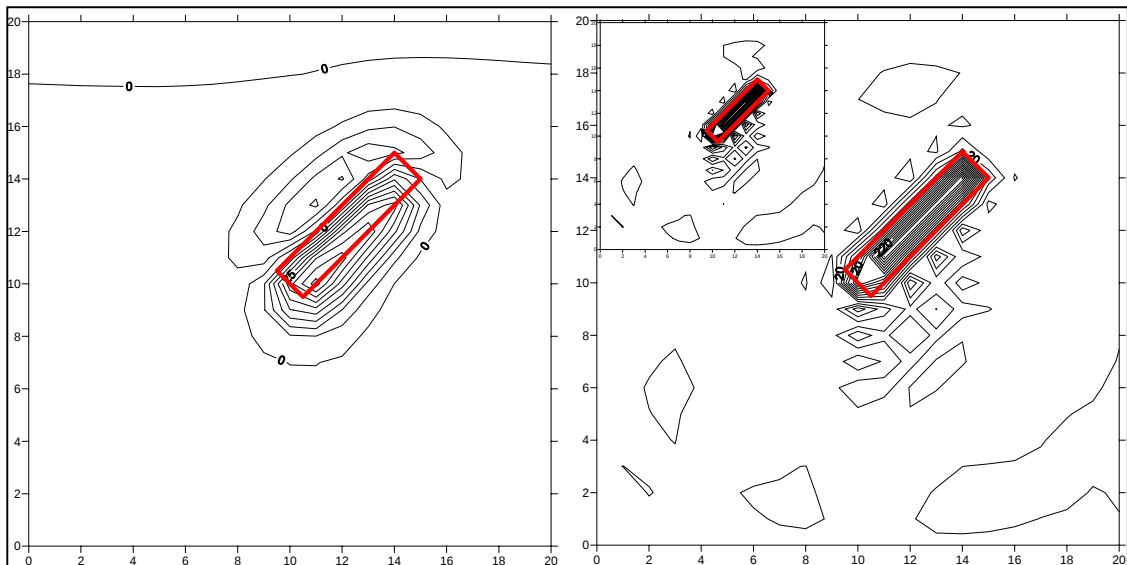
5.2.3 Προσανατολισμός των στόχων – ΠΛΑΚΑ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 45^ο



Σχήμα 5.23 Κάτοψη μιας πλάκας η οποία σχηματίζει γωνία 45^ο σε σχέση με τη διεύθυνση B-N. Εκτείνεται σε βάθος κατά 1 gu ενώ η μια οριζόντια διάσταση της είναι μεγαλύτερη από 1 gu. Η αντίθεση μαγνήτισης της είναι 0.005 CGS

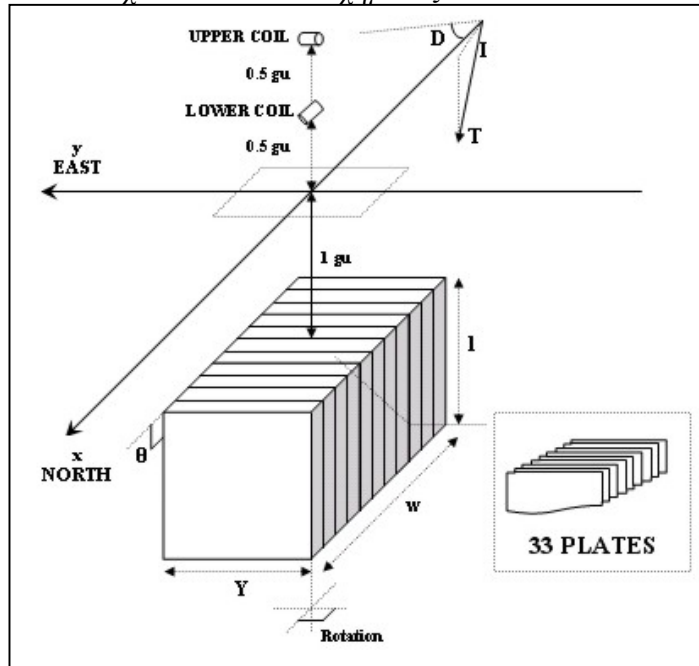
Η διερεύνηση της απόκρισης του λογισμικού σε δομές των οποίων οι πλευρές δεν είναι παράλληλες με το σύστημα αναφοράς περιλαμβάνει την περίπτωση που παρουσιάζεται στο σχήμα (5.23). Δηλαδή έχουμε μια οριζόντια πλάκα της οποίας η πλευρά σχηματίζει γωνία 45^ο με τους άξονες του συστήματος αναφοράς. Το φίλτρο I έχει κατασκευαστεί για πρίσμα του οποίου οι κάθετες πλευρές είναι παράλληλες προς το σύστημα αναφοράς. Επομένως πέρα από την εφαρμογή του φίλτρου I στα δεδομένα κατασκευάστηκε και δεύτερο φίλτρο IV το οποίο αντιστοιχεί σε πρίσμα το οποίο σχηματίζει την ίδια γωνία με την υπό εξέταση δομή. Στο σχήμα (5.24) φαίνεται ότι η εφαρμογή του φίλτρου I δίνει καλά αποτελέσματα. Η εφαρμογή του κατάλληλου φίλτρου IV (ένθετο στο σχήμα) δεν

επέφερε σχεδόν καμία βελτίωση στην τελική εικόνα.



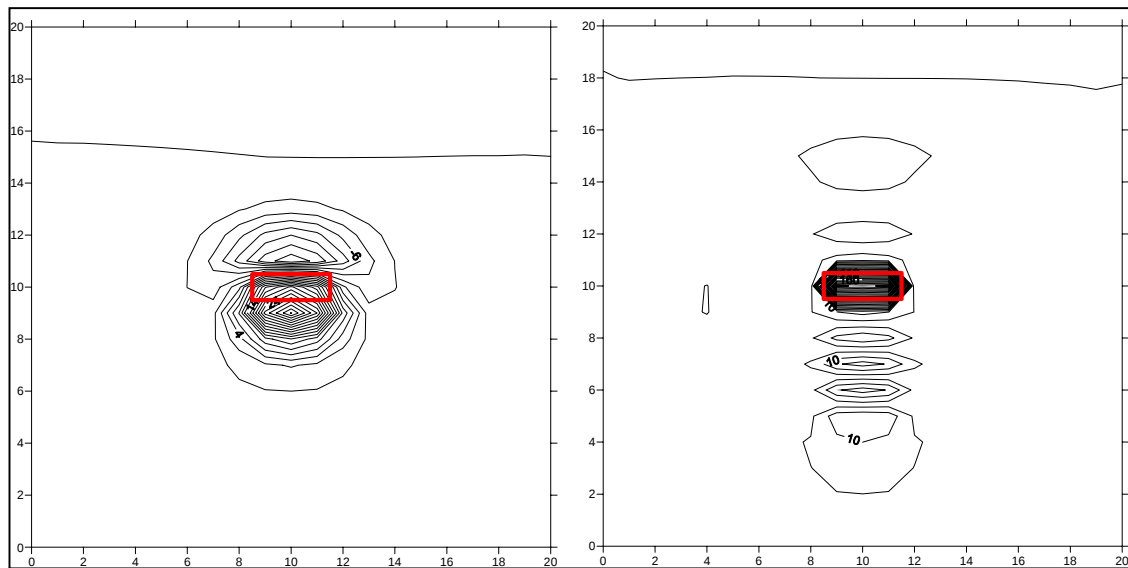
Σχήμα 5.24 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα μιας πλάκας υπό γωνία 45^ο με το σύστημα αναφοράς, δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I ενώ πάνω αριστερά με το φίλτρο IV (κατάλληλο για γωνία 45^ο)

5.2.4 Στόχοι πολύπλοκου σχήματος – **ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΤΟΙΧΙΟ ΜΗΚΟΥΣ 3 gu**



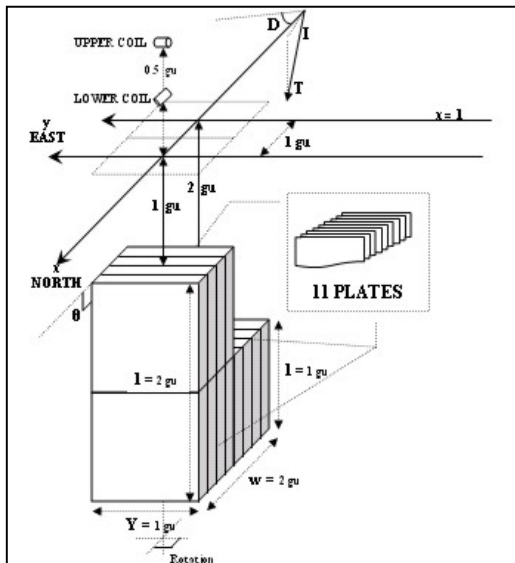
Σχήμα 5.27 Τρισδιάστατο σχήμα του μοντέλου ενός οριζόντιου τοιχίου μήκους 3 gu και πλάτους 1 gu σε βάθος 1 gu. Η αντίθεση μαγνήτισης τους είναι 0.005 (CGS). Αποτελείται από 33 ελάσματα (3 πρίσματα)

Το συγκεκριμένο μοντέλο αντιπροσωπεύει μια δομή που εκτείνεται αρκετά σε μήκος όπως φαίνεται και στο σχήμα (5.29). Το τοίχιο αυτό έχει μήκος 3 gu και πλάτος 1 gu, πρόκειται δηλαδή για τρία πρίσματα σε σειρά. Η συνέλιξη των δεδομένων με το φίλτρο I έδωσε πάρα πολύ καλά αποτελέσματα μιας και εμφανίζεται με τρόπο εντελώς αντιπροσωπευτικό τόσο του μήκους του όσο και της θέσης του στον τελικό χάρτη μαγνήτισης (σχήμα 5.30). Άρα η εφαρμογή του φίλτρου σε ανωμαλίες που οφείλονται σε επιμήκεις δομές δεν έχει κανένα πρόβλημα στο να τις αποκαλύψει και να τις αναδείξει.



Σχήμα 5.28 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα ενός οριζόντιου τοιχίου μήκους 3 gu και πλάτους 1 gu και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

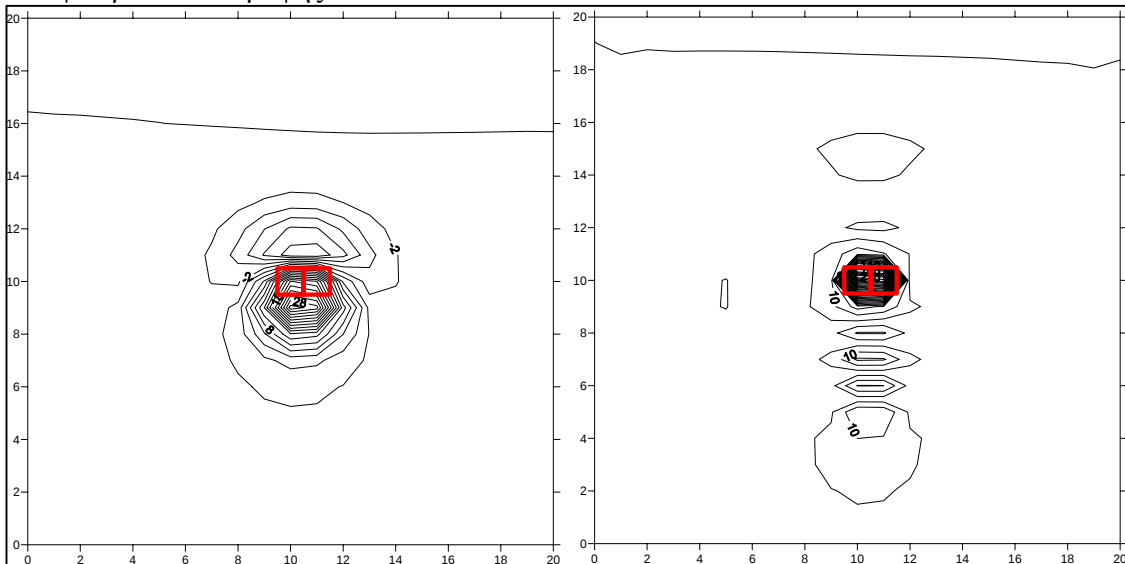
3 ΠΡΙΣΜΑΤΑ (2 ΣΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ ΒΑΘΟΣ)



Σχήμα 5.25 Τρισδιάστατο σχήμα τριών ομοίων πρισμάτων, δυο εκ των οποίων βρίσκονται σε βάθος 2 gu και το ένα σε 1 gu. Η αντίθεση μαγνήτισης τους είναι 0.005 (CGS)

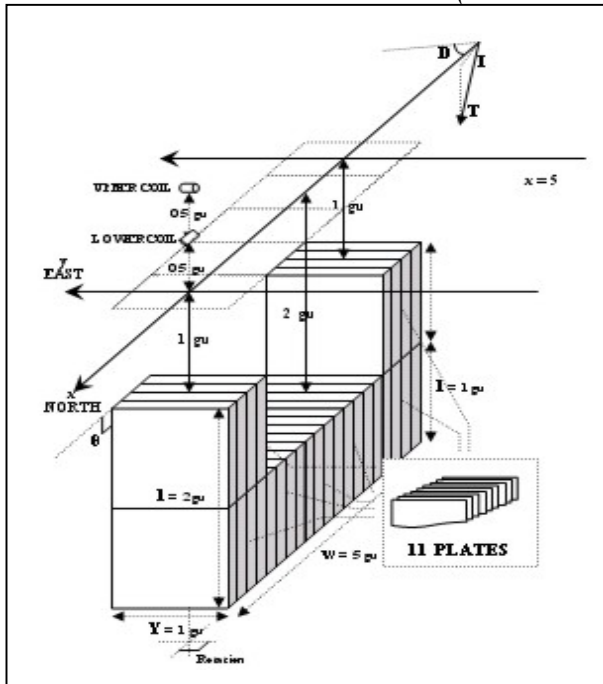
Στο σχήμα (5.25) βλέπουμε τρία όμοια πρίσματα τοποθετημένα κατά τέτοιο τρόπο ώστε δυο από αυτά να βρίσκονται σε βάθος 2 gu ενώ το ένα σε βάθος 1 gu καλύπτοντας το ένα από τα δυο βαθύτερα. Επομένως μπορεί να εξεταστεί το αποτέλεσμα καλυμμένων σωμάτων. Στο σχήμα (5.26) παρατηρούμε πως η κάτοψη των δυο σωμάτων που βρίσκονται πλευρικά, αν και σε διαφορετικά επίπεδα, αποκαλύπτονται αρκετά καλά με τις τιμές της μαγνήτισης να είναι μεγαλύτερες στο αριστερό πρίσμα, το οποίο βρίσκεται σε μικρότερο βάθος. Αυτή είναι η μόνη ένδειξη που έχουμε για το ότι το δεξί πρίσμα βρίσκεται βαθύτερα ενώ το τρίτο πρίσμα καλύπτεται εξολοκλήρου στην τελικά εικόνα από το πρώτο. Βέβαια αυτό το γεγονός από μόνο του δεν μπορεί να καθοδηγήσει την ερμηνεία προς τη σωστή κατεύθυνση. Δηλαδή, το συμπέρασμα που θα βγάζαμε βλέποντας την κατανομή της μαγνήτισης, θα ήταν ότι πρόκειται για μια επιμήκη υπεδάφια

δομή. Οι πιθανές αυξομειώσεις του βάθους ταφής της άνω επιφάνειας αρχαιολογικών λειψάνων δεν μπορούν να προκαλέσουν ισχυρές διαφοροποιήσεις του αποτελέσματος του φίλτρου αντιστροφής.



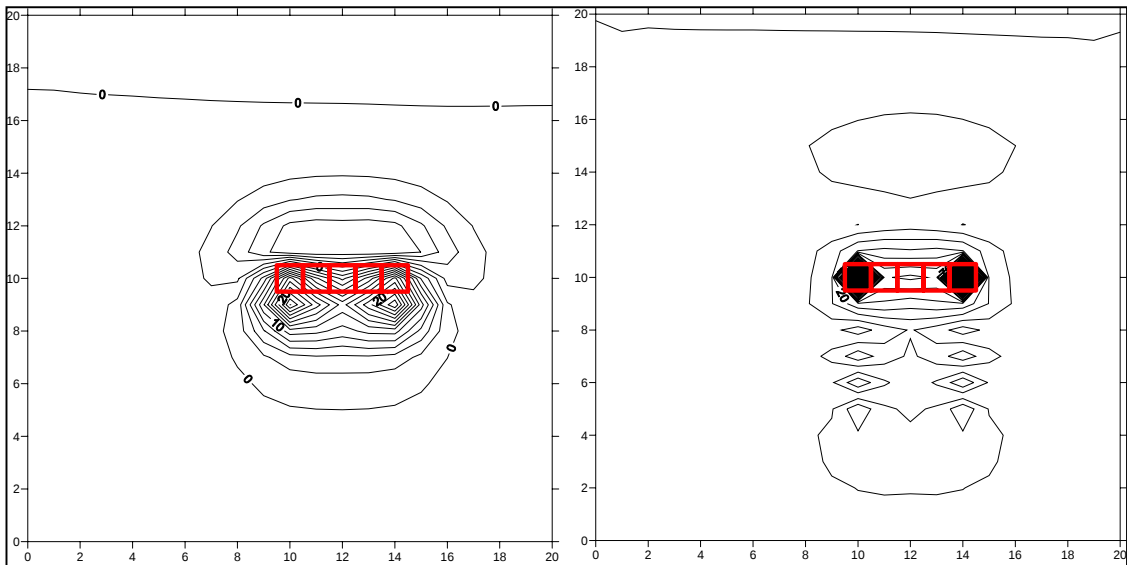
Σχήμα 5.26 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα τριών πρισμάτων δυο εκ των οποίων βρίσκονται κατά 1 gu βαθύτερα από το τρίτο και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

7 ΠΡΙΣΜΑΤΑ (5 ΣΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ ΒΑΘΟΣ)

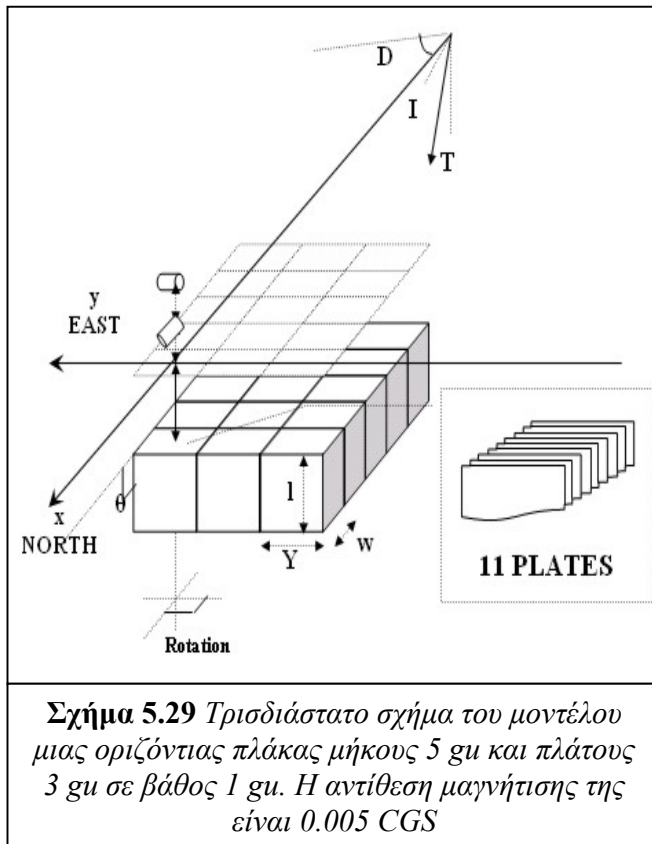


Σχήμα 5.27 Τρισδιάστατο σχήμα του μοντέλου επτά ομοίων πρισμάτων, πέντε εκ των οποίων βρίσκονται σε βάθος 2 gu και τα υπόλοιπα δυο σε 1 gu. Η αντίθεση μαγνήτισης τους είναι 0.005 CGS.

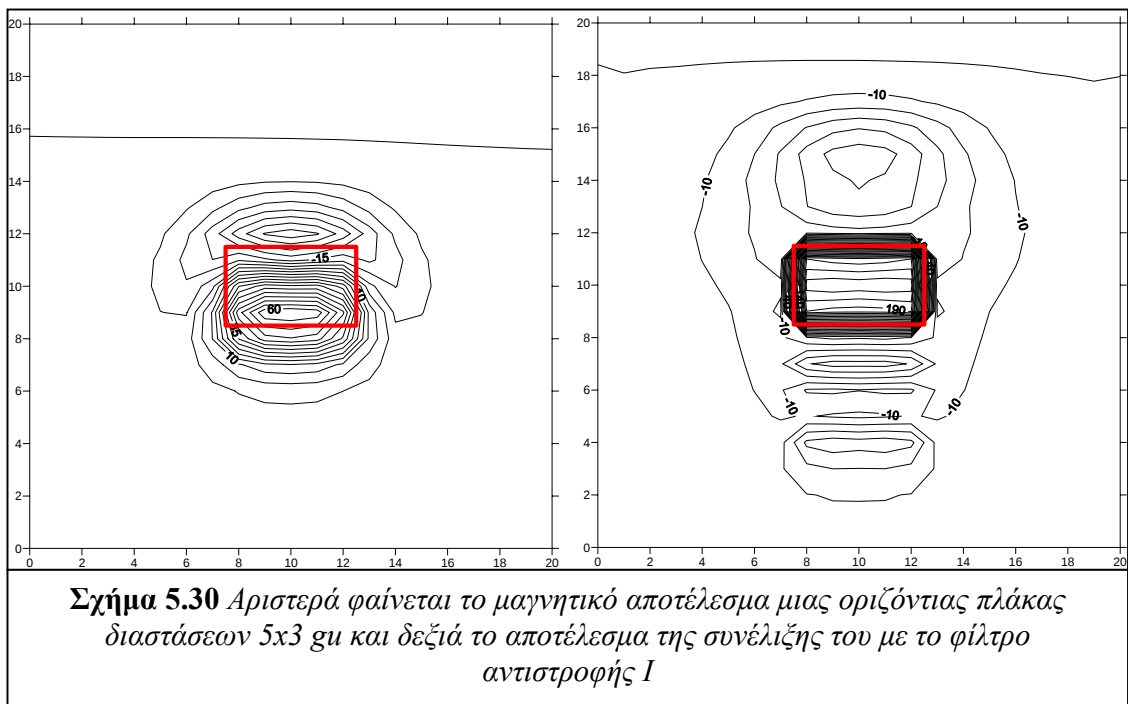
Σαν συνέχεια της προηγούμενης υποπερίπτωσης έχουμε το μοντέλο του σχήματος (5.27) στο οποίο έχουμε επτά πρίσματα αυτή τη φορά με τα πέντε να βρίσκονται σε βάθος 2 gu και τα δυο ακρινά σε 1 gu. Το ενδιαφέρον αυτή τη φορά έγκειται στον τρόπο που θα αποδοθούν τα ενδιάμεσα πρίσματα λαμβάνοντας υπόψη πως το διάκενο μεταξύ των δυο ρηχότερων είναι μεγαλύτερο. Στο σχήμα (5.28) φαίνεται το αποτέλεσμα της αντιστροφής. Όπως βλέπουμε τα δυο πρίσματα που βρίσκονται στις άκρες αυτής της δομής και σε μικρότερο βάθος αποκαλύπτονται πολύ καλά και με σαφήνεια όσον αφορά τη θέση και το σχήμα τους. Τα ενδιάμεσα πρίσματα δεν δίνουν τόσο ισχυρή ανωμαλία. Παρόλα αυτά το αποτέλεσμα είναι εξαιρετικό όσον αφορά το συνολικό μήκος της δομής.

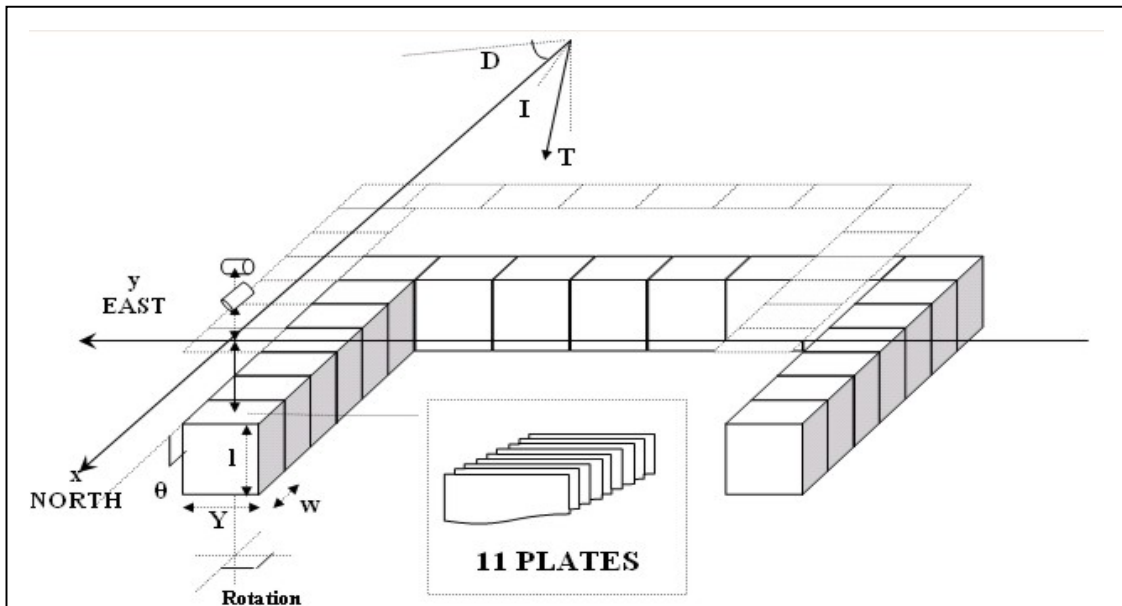


Σχήμα 5.28 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα επτά πρισμάτων πέντε εκ των οποίων βρίσκονται κατά 1 gu βαθύτερα από τα υπόλοιπα δυο και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο αντιστροφής I

ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΛΑΚΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 5x3 gu

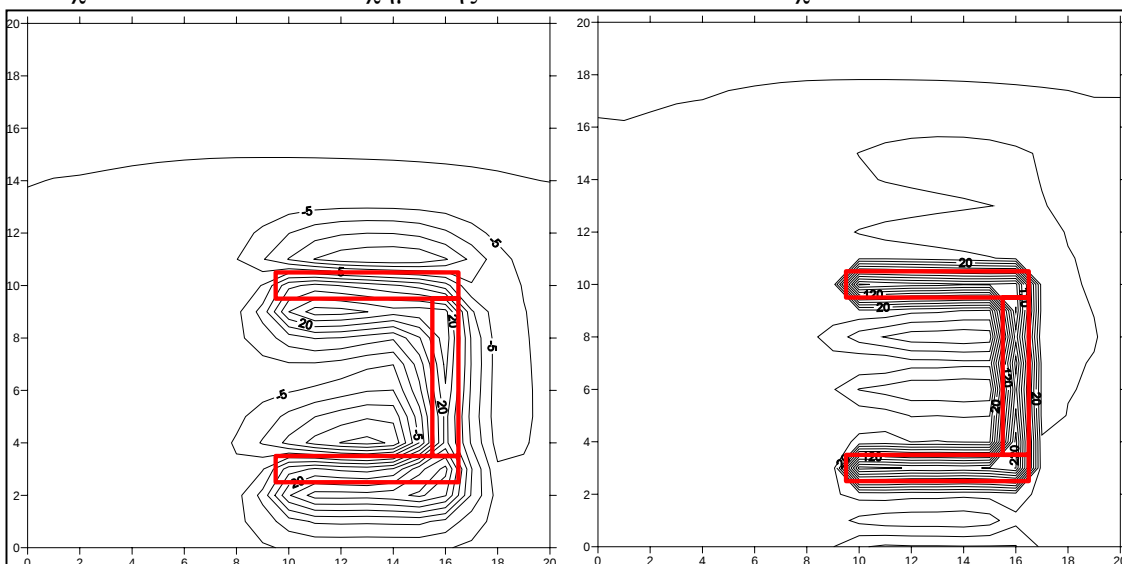
Αυτή η περίπτωση εξετάζει την απόκριση του φίλτρου σε συμπαγείς δομές όπως είναι η οριζόντια πλάκα του σχήματος (5.29). Οι διαστάσεις της είναι 3x5 gu ενώ βρίσκεται σε βάθος 1 gu. Ουσιαστικά θα μπορούσε να λεχθεί πως η πλάκα αυτή αποτελείται από 15 πρίσματα αλλά το μοντέλο κατασκευάστηκε ως ένα σώμα και με αυτό τον τρόπο αντιμετωπίζεται. Το φίλτρο I εφαρμόστηκε και σε αυτή την περίπτωση με τον τελικό χάρτη μαγνήτισης που προέκυψε να είναι ικανοποιητικός. Όπως φαίνεται στο σχήμα (5.30) η πλάκα οριοθετήθηκε με μεγάλη σαφήνεια και δεν χάθηκε καμία πληροφορία ούτε για το μέγεθος αλλά ούτε και για το σχήμα της. Η απόκριση του φίλτρου σε συμπαγείς δομές λοιπόν είναι άκρως επιτυχημένη.



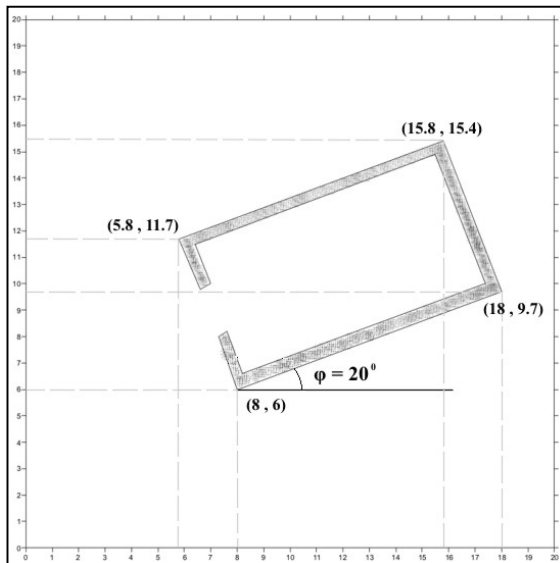
ΤΡΙΑ ΣΩΜΑΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΨΑΝΩΝ ΟΙΚΟΔΟΜΗΜΑΤΟΣ

Σχήμα 5.31 Τριδιάστατο σχήμα του μοντέλου τριών πλακών οι οποίες ορίζουν ένα δωμάτιο σε βάθος 1 gu. Η αντίθεση μαγνήτισης του είναι 0.005 CGS

Το παραπάνω σχήμα (5.31) αποτελεί την πρώτη δομή που προσεγγίζει κατά ένα μεγάλο ποσοστό πιθανές πραγματικές δομές σε κάποια αρχαιολογική έρευνα. Η δομή αυτή κάλλιστα θα μπορούσε να είναι τα ερείπια των θεμελίων κάποιας αρχαίας κατοικίας επομένως η αντιστροφή των δεδομένων που κατασκευάστηκαν με βάση το μοντέλο αυτό αποτελεί ένα καλό οδηγό για τα πραγματικά δεδομένα. Στο σχήμα (5.32) παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου I. Ακόμη μια φορά η δομή αποκαλύπτεται με επιτυχία και το πολύπλοκο σχήμα της δεν αλλοιώνεται στο ελάχιστο.



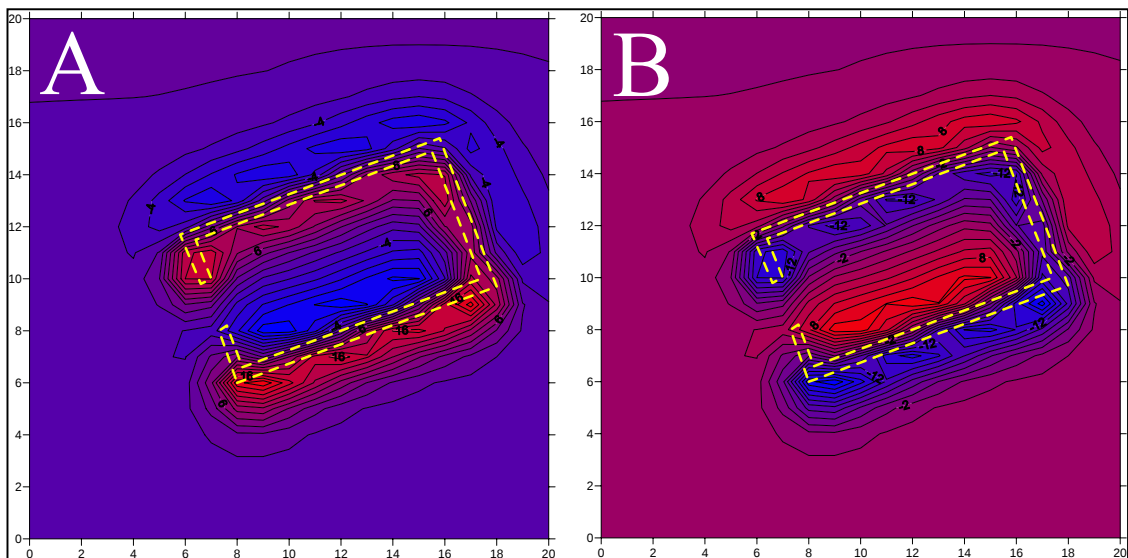
Σχήμα 5.32 Αριστερά φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα τριών πλακών σε ορθή γωνία και δεξιά το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο I

ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΕΡΕΙΠΙΩΝ ΜΙΑΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

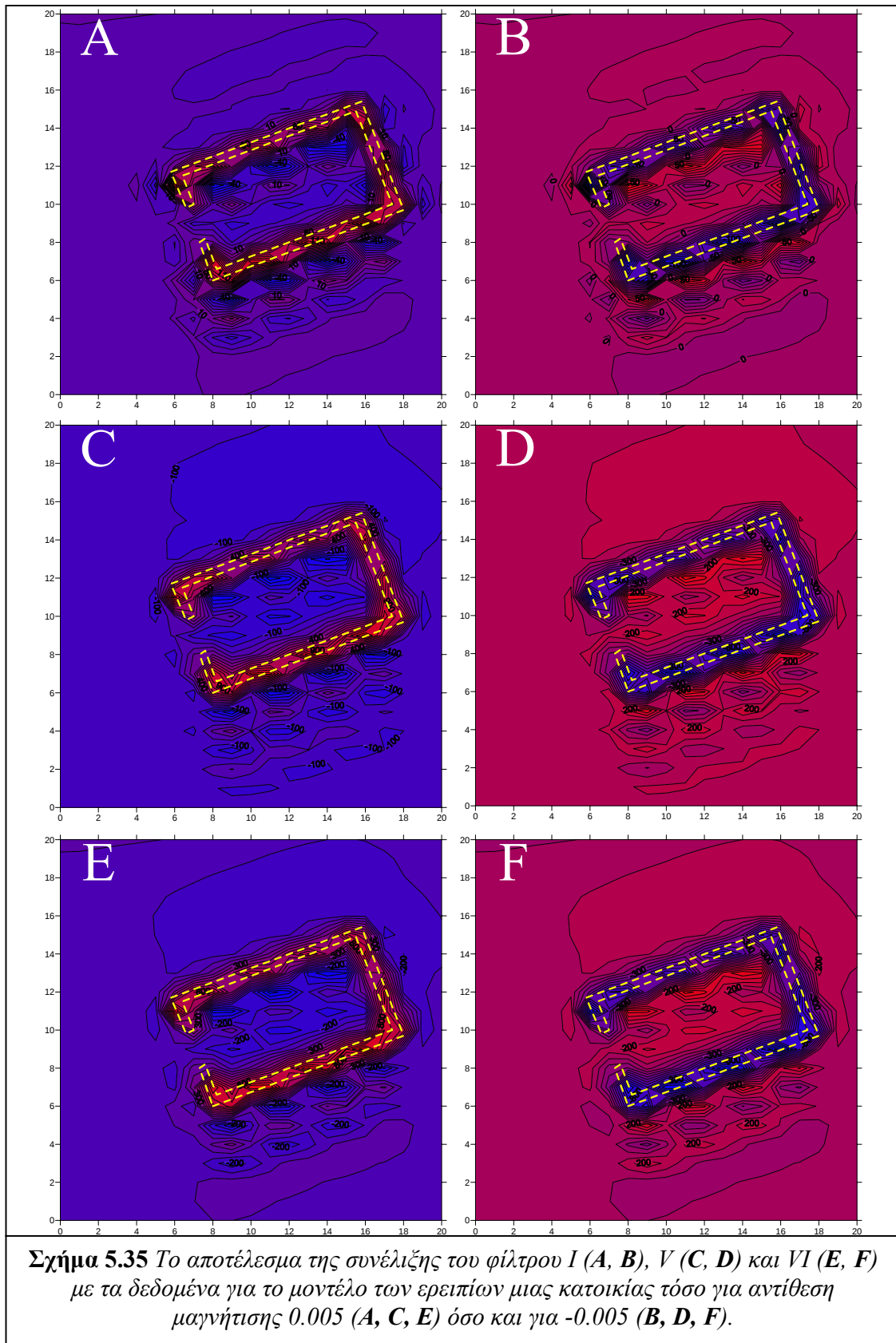
Σχήμα 5.33 Κάτοψη μοντέλου το οποίο αναπαριστά τα ερείπια μιας αρχαίας κατοικίας. Το πάχος των τοίχων της είναι 0.4 gu ενώ εξετάστηκε η απόκριση της τόσο για αντίθεση μαγνήτισης 0.005 όσο και για -0.005 CGS.

Στο διπλανό σχήμα (5.33) έχουμε την κάτοψη ενός μοντέλου που προσομοιώνει τα ερείπια των θεμελίων μιας κατοικίας. Η μια πλευρά της έχει τοποθετηθεί κατά τρόπο τέτοιο ώστε να σχηματίζει γωνία 20° με τη διεύθυνση Α-Δ ενώ το πάχος των τοίχων είναι ίσο με 0.4 gu. Η απόκριση του μοντέλου αυτού εξετάστηκε τόσο για θετική όσο και αρνητική τιμή αντίθεσης μαγνήτισης. Πέρα από την εφαρμογή του φίλτρου I, έγινε χρήση και δυο ακόμα φίλτρων, του V το οποίο κατασκευάστηκε για πρίσμα προσανατολισμένο σωστά σε σχέση με τη δομή και του VI το οποίο αντιστοιχεί στο ίδιο πάχος μεταξύ πρίσματος και δομής (0.4 gu). Το αποτέλεσμα της συνέλιξης με όλα τα φίλτρα και για την κάθε περίπτωση αντίθεσης μαγνήτισης (σχήμα 5.35) αποκαλύπτει πως η εφαρμογή των πιο εξειδικευμένων φίλτρων δεν βοηθά την τελική εικόνα σε βαθμό τέτοιο που να δικαιολογείται η κατασκευή τους. Η

χρωματική κλίμακα χρησιμοποιείται λόγω της πολυπλοκότητας των εικόνων για πιο εύκολη παρατήρηση των αποτελεσμάτων. Όπως βλέπουμε στο σχήμα η μόνη επίδραση των φίλτρων έγκειται στην εξομάλυνση της περιβάλλουσας περιοχής της δομής ενώ η ίδια η δομή αποκαλύπτεται σε κάθε περίπτωση με τον ίδιο τρόπο και αρκετά καλά.

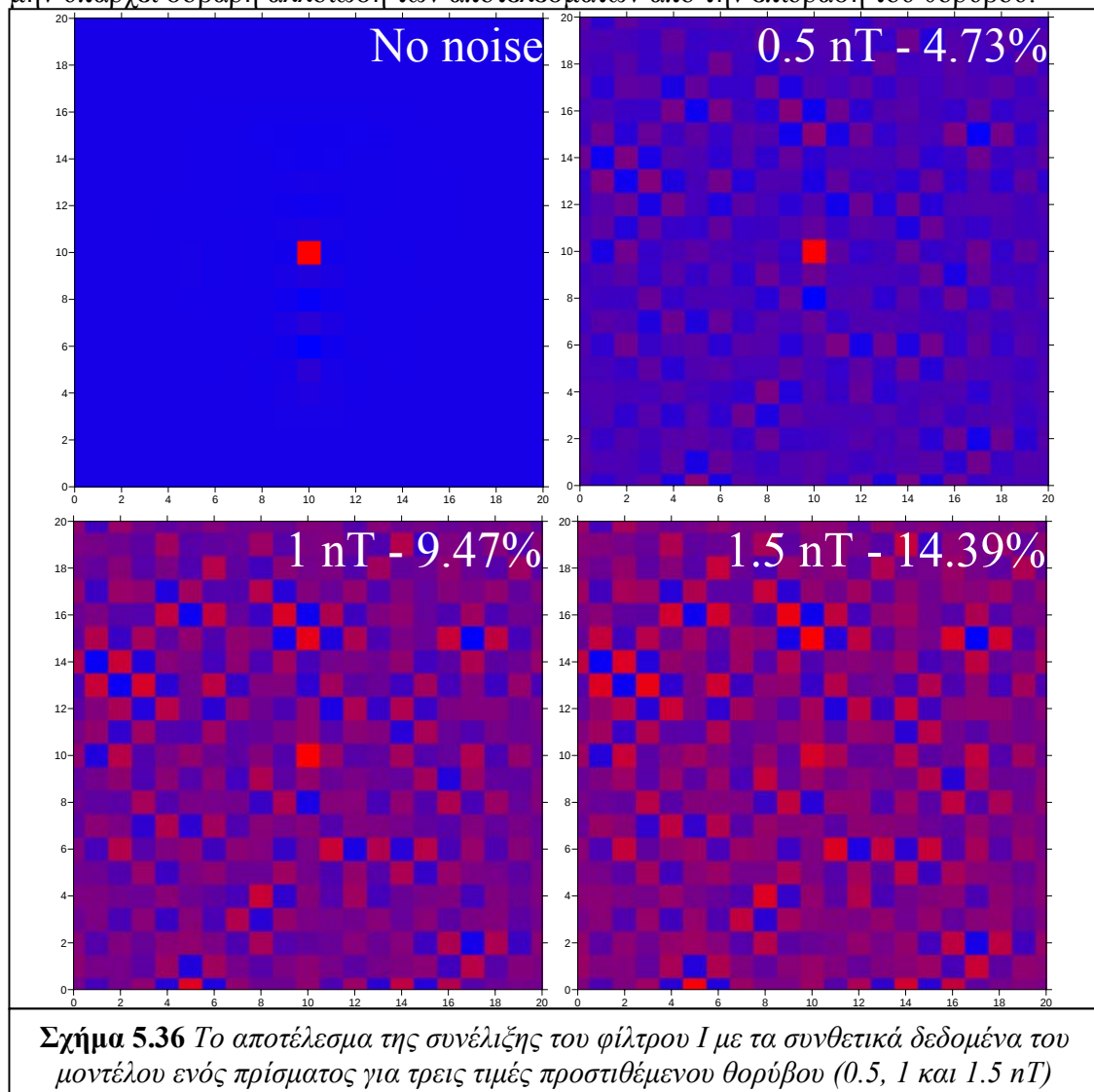


Σχήμα 5.34 Στο **A** φαίνεται το μαγνητικό αποτέλεσμα των ερειπίων μιας κατοικίας με αντίθεση μαγνήτισης 0.005 ενώ στο **B** για -0.005 CGS.



5.2.5 Επίδραση θορύβου στην αναγνώριση στόχων – ΑΠΛΟ ΠΡΙΣΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ 1 gu

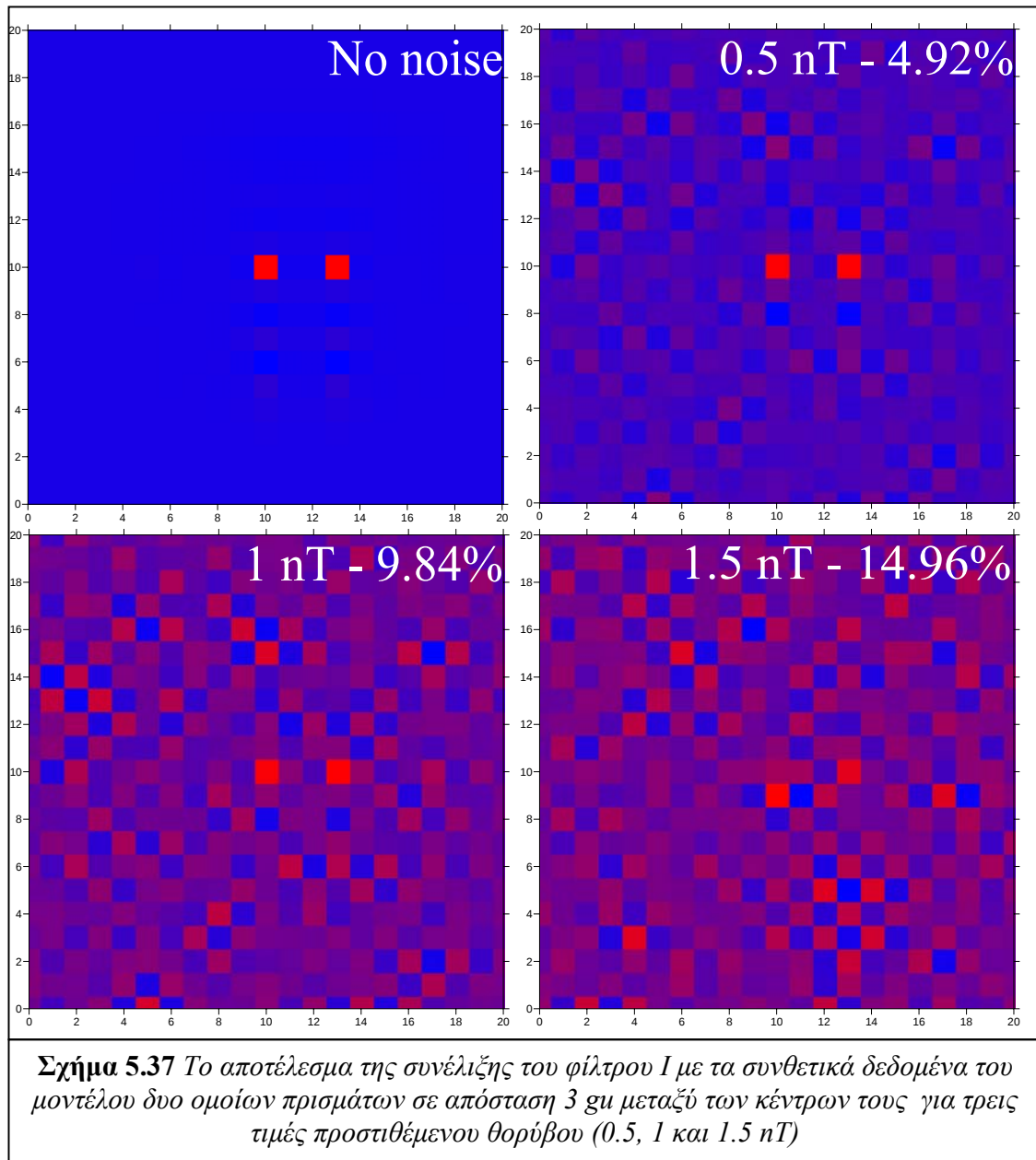
Η επίδραση του θορύβου είναι ένα θέμα το οποίο θα πρέπει να μας απασχολήσει μιας και υπάρχει σε κάθε θέση στην οποία γίνονται μετρήσεις. Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η επίδραση του σε διάφορα ποσοστά της μέγιστης τιμής κάθε ομάδας μετρήσεων. Αυτά ξεκινούν από μικρά έως αποδεκτά (0.5 nT) που είναι και τα συνηθέστερα που συναντώνται, και φτάνουν σε αρκετά μεγάλα (1 ή 1.5 nT) που είναι δυνατό να απαντηθούν σε άσχημες συνθήκες. Ο θόρυβος που προστίθεται είναι Gauss-ιανός και ουσιαστικά προσθέτει ή αφαιρεί με τυχαίο τρόπο από κάθε τιμή μέτρησης (των συνθετικών δεδομένων) τις παραπάνω τιμές. Αρχικά εξετάζεται η απλή περίπτωση ενός πρίσματος. Στο σχήμα (5.36) βλέπουμε πως σε χαμηλές τιμές θορύβου η επίδραση είναι σχετικά μικρή ενώ με θόρυβο 1 nT η εικόνα σταματά να είναι αντιπροσωπευτική της δομής που την προκαλεί. Η απλότητα του μοντέλου αυτού καθώς και το ότι το φίλτρο είναι κατασκευασμένο ακριβώς για να εντοπίσει τη συγκεκριμένη δομή βοηθούν στο να μην υπάρχει σοβαρή αλλοίωση των αποτελεσμάτων από την επίδραση του θορύβου.



Σχήμα 5.36 Το αποτέλεσμα της συνέλιξης του φίλτρου I με τα συνθετικά δεδομένα του μοντέλου ενός πρίσματος για τρεις τιμές προστιθέμενου θορύβου (0.5, 1 και 1.5 nT)

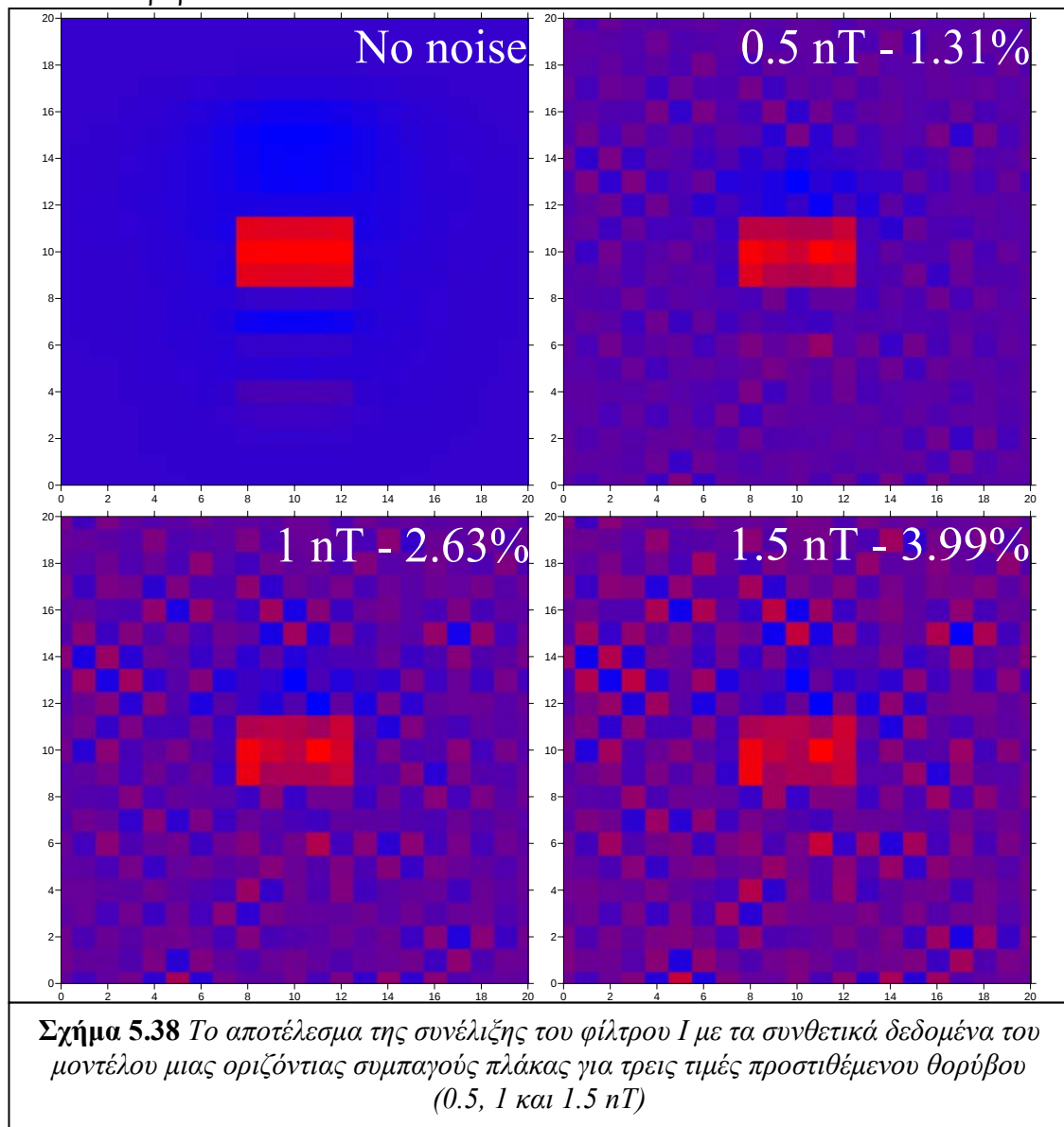
2 ΠΡΙΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 2 gu

Στην περίπτωση αυτή έχει εφαρμοστεί θόρυβος με τον ίδιο τρόπο για να εξακριβωθεί η απόκριση του φίλτρου I σε σώματα τα οποία βρίσκονται σε απόσταση και υπό καθεστώς θορύβου. Όπως βλέπουμε στο σχήμα (5.37) το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο με την περίπτωση του ενός πρίσματος στα χαμηλά ποσοστά θορύβου και δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα στη διάκριση των δομών. Και στην περίπτωση αυτή όμως ένα ποσοστό θορύβου της τάξης του 1 nT προκαλεί μια μεγαλύτερη παραμόρφωση της εικόνας μέχρι το επίπεδο του 1.5 nT όπου η διάκριση των δομών είναι πλέον αδύνατη.



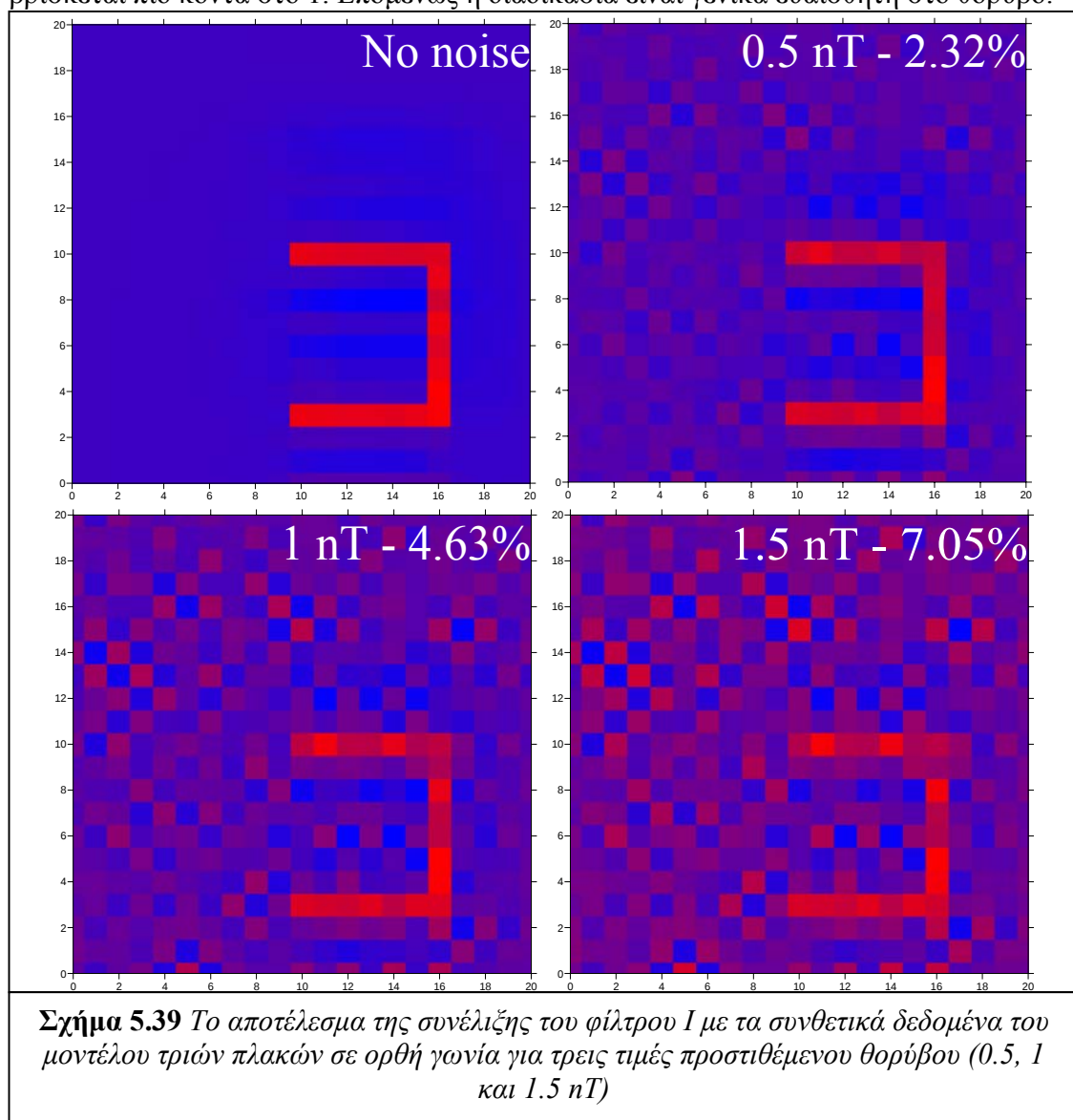
ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΠΛΑΚΑ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ 5x3 gu

Είναι ενδιαφέρον επίσης να εξετάσουμε την επίδραση του θορύβου σε συμπαγείς δομές όπως είναι μια οριζόντια πλάκα. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση εφαρμόστηκε στα δεδομένα μας θόρυβος σε ποσοστά 0.5, 1 και 1.5 nT και στη συνέχεια εφαρμόστηκε σε αυτά το φίλτρο αντιστροφής I. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα (5.38). Καταρχήν παρατηρούμε πως σε χαμηλά επίπεδα θορύβου (0.5 nT) το αποτέλεσμα της αντιστροφής είναι αρκετά καλό. Σε μέγεθος όμως 1 αρχικά και σε 1.5 nT στη συνέχεια βλέπουμε πως η ποιότητα του τελικού χάρτη μαγνήτισης μειώνεται σημαντικά σε βαθμό που με θόρυβο 1.5 nT χάνονται τα όρια του σώματος και η τελική εικόνα γίνεται ασαφής. Η διαδικασία είναι δηλαδή αρκετά ευαίσθητη σε μέτριο ποσοστό θορύβου.



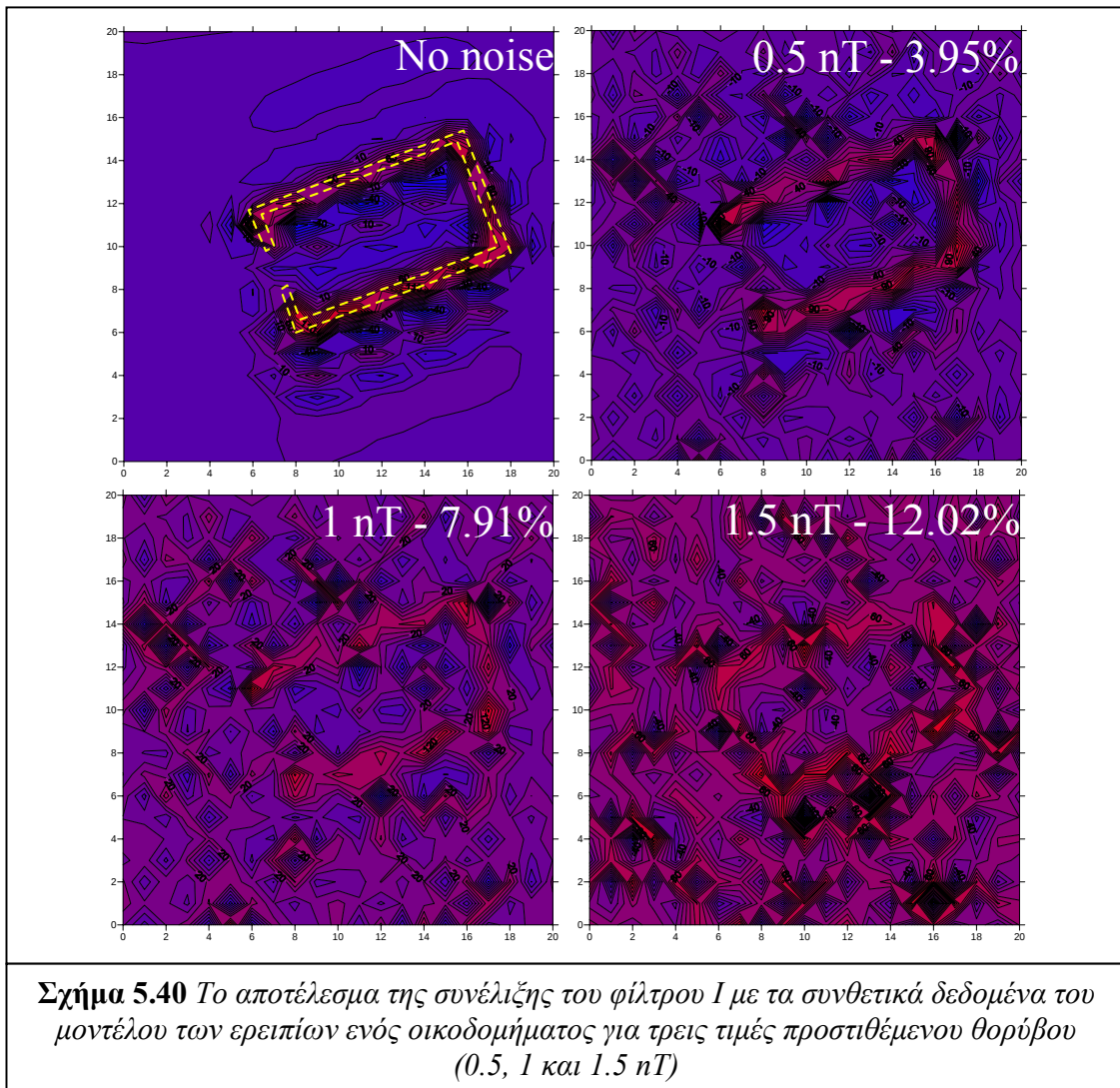
ΤΡΙΑ ΕΠΙΜΗΚΗ ΠΡΙΣΜΑΤΑ ΣΕ ΟΡΘΗ ΓΩΝΙΑ

Με αυτή την περίπτωση κάνουμε μια εισαγωγή σε πιο πολύπλοκα μοντέλα που αναπαριστούν πιο καλά πιθανές δομές που συναντώνται σε διασκοπήσεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Η δομή αυτή περιλαμβάνει τρία επιμήκη πρίσματα τα οποία προσομοιώνουν τα ερείπια της θεμελίωσης ενός οικοδομήματος. Όπως είναι φυσικό, αυτή η προσομοίωση είναι πιο πολύπλοκη από την προηγούμενη, επομένως μπορούμε να ελέγξουμε το αποτέλεσμα και σε μια πιο εξεζητημένη δομή. Από το σχήμα (5.39) μπορούμε να δούμε ότι ισχύουν περίπου τα ίδια με πριν, δηλαδή σε χαμηλά επίπεδα θορύβου η εικόνα δεν επηρεάζεται ενώ όσο το ποσοστό του θορύβου αυξάνεται τόσο ελαττώνεται και η ποιότητα του τελικού χάρτη μαγνήτισης, κάτι που είναι αναμενόμενο και λογικό. Σαν όριο μεταξύ της τελευταίας καλής εικόνας και της πρώτης συγκεχυμένης πιθανόν θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι μια τιμή μεταξύ 1 και 1.5 nT με αυτή να βρίσκεται πιο κοντά στο 1. Επομένως η διαδικασία είναι γενικά ευαίσθητη στο θόρυβο.

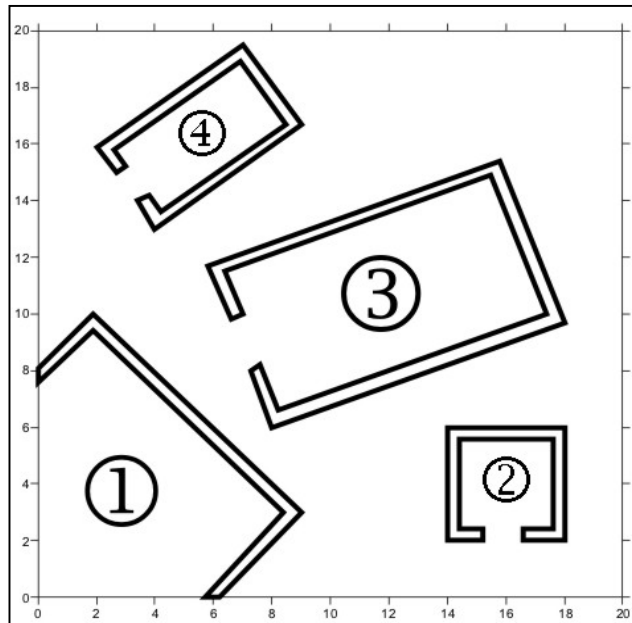


ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΨΑΝΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΟΙΚΟΔΟΜΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μια δομή υπό γωνία με το σύστημα αναφοράς επομένως είναι χρήσιμο να δούμε την επίδραση του θορύβου σε τέτοιες περιπτώσεις που αποτελούν και την συντριπτική πλειοψηφία. Αυτό είναι προφανές γιατί είναι μάλλον θέμα τύχης το αν ο προσανατολισμός μιας κρυμμένης δομής συμπίπτει με το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιούμε. Έτσι προστέθηκε θόρυβος 0.5, 1 και 1.5 nT στα δεδομένα αυτού του μοντέλου ενώ μετά την εφαρμογή του φίλτρου I είχαμε το αποτέλεσμα που απεικονίζεται στο σχήμα (5.40). Όσον αφορά το αποτέλεσμα της αντιστροφής, μπορούμε να κάνουμε τα ίδια σχόλια όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτή τη φορά όμως παρατηρούμε μια πιο ραγδαία μείωση της ποιότητας ακόμη και για ποσοστό θορύβου της τάξης του 1 nT με την εικόνα να προσφέρεται για ερμηνεία οριακά και με πολύ ελαστικά κριτήρια. Αποτελεί δηλαδή σαφώς βελτίωση της εικόνας του αρχικού πεδίου εφόσον ανορθώνεται η ανωμαλία και επιπλέον μεταφέρεται έτσι ώστε να έχει κέντρο το επίκεντρο του σώματος. Όμως, τα όρια διαγράφονται με αυξανόμενη ασάφεια καθώς ανέρχεται το ποσοστό θορύβου.



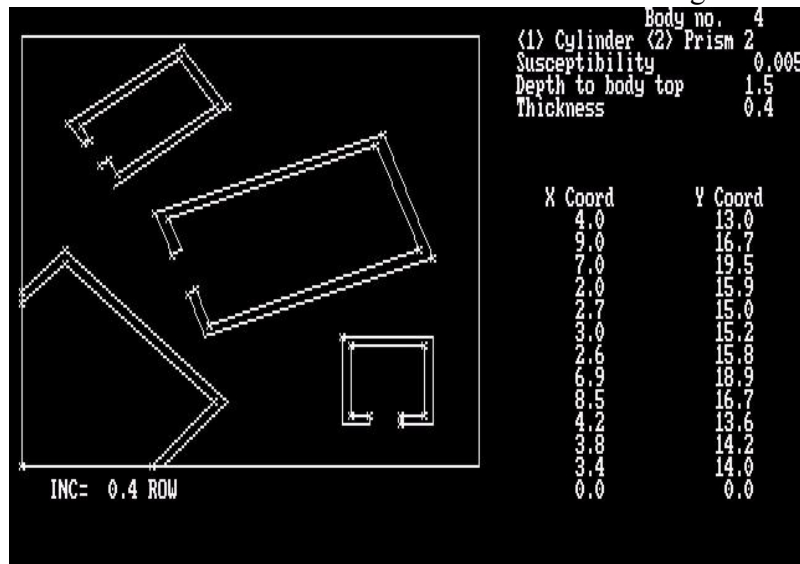
5.2.6 Σύνθετο μοντέλο προσομοίωσης ερειπίων



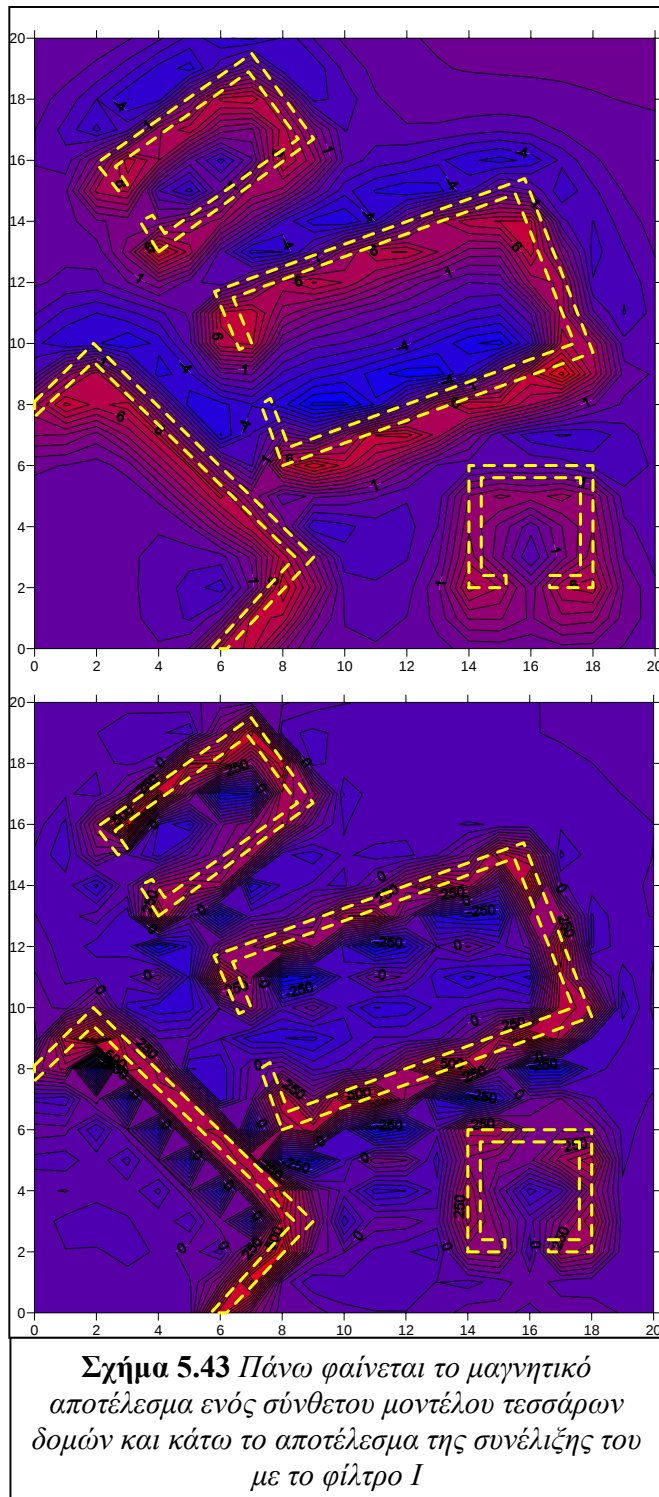
Σχήμα 5.41 Κάτοψη μοντέλου με το οποίο αναπαρίστανται τα ερείπια τεσσάρων αρχαίων κατοικιών. Το πάχος των τοίχων τους είναι 0.4 gu, βρίσκονται σε βάθος 1 gu εκτός από την (2) η οποία βρίσκεται σε βάθος 1.2 ενώ η αντίθεση μαγνήτισης όλων των δομών είναι 0.005 CGS

Σαν επιστέγασμα όλων των προηγούμενων περιπτώσεων που εξετάστηκαν, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο το οποίο περιέχει κατά ένα μεγάλο ποσοστό χαρακτηριστικά από όλες τις παραπάνω περιπτώσεις. Όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα (5.41) τα συνθετικά δεδομένα προέρχονται από τέσσερις διακριτές δομές οι οποίες βρίσκονται σε ποικιλία θέσεων σε ότι αφορά τόσο τον προσανατολισμό τους όσο και τη θέση τους σε σχέση με το σύστημα αναφοράς του καννάβου. Πιο ειδικά η δομή (1) σχηματίζει γωνία 45^ο με τη διεύθυνση Α-Δ, ενώ οι δομές (3) και (4) γωνίες 20^ο και 30^ο αντίστοιχα. Η δομή (4) βρίσκεται σε θέση παράλληλη με το σύστημα αναφοράς αλλά έχει την ιδιαιτερότητα ότι βρίσκεται σε βάθος ελαφρώς μεγαλύτερο από τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα οι δομές (1), (3) και (4) βρίσκονται σε βάθος 1 gu από την επιφάνεια του εδάφους

ενώ η (2) σε βάθος 1.2 gu. Όλες οι δομές έχουν αντίθεση μαγνήτισης 0.005 CGS ενώ το πάχος των τοίχων τους όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα είναι ίσο με 0.4 gu. Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά τα δεδομένα ήταν το φίλτρο I. Σε αυτή την περίπτωση οι ενέργειες που έγιναν ήταν παρόμοιες με την αντιμετώπιση μιας πραγματικής ομάδας δεδομένων.



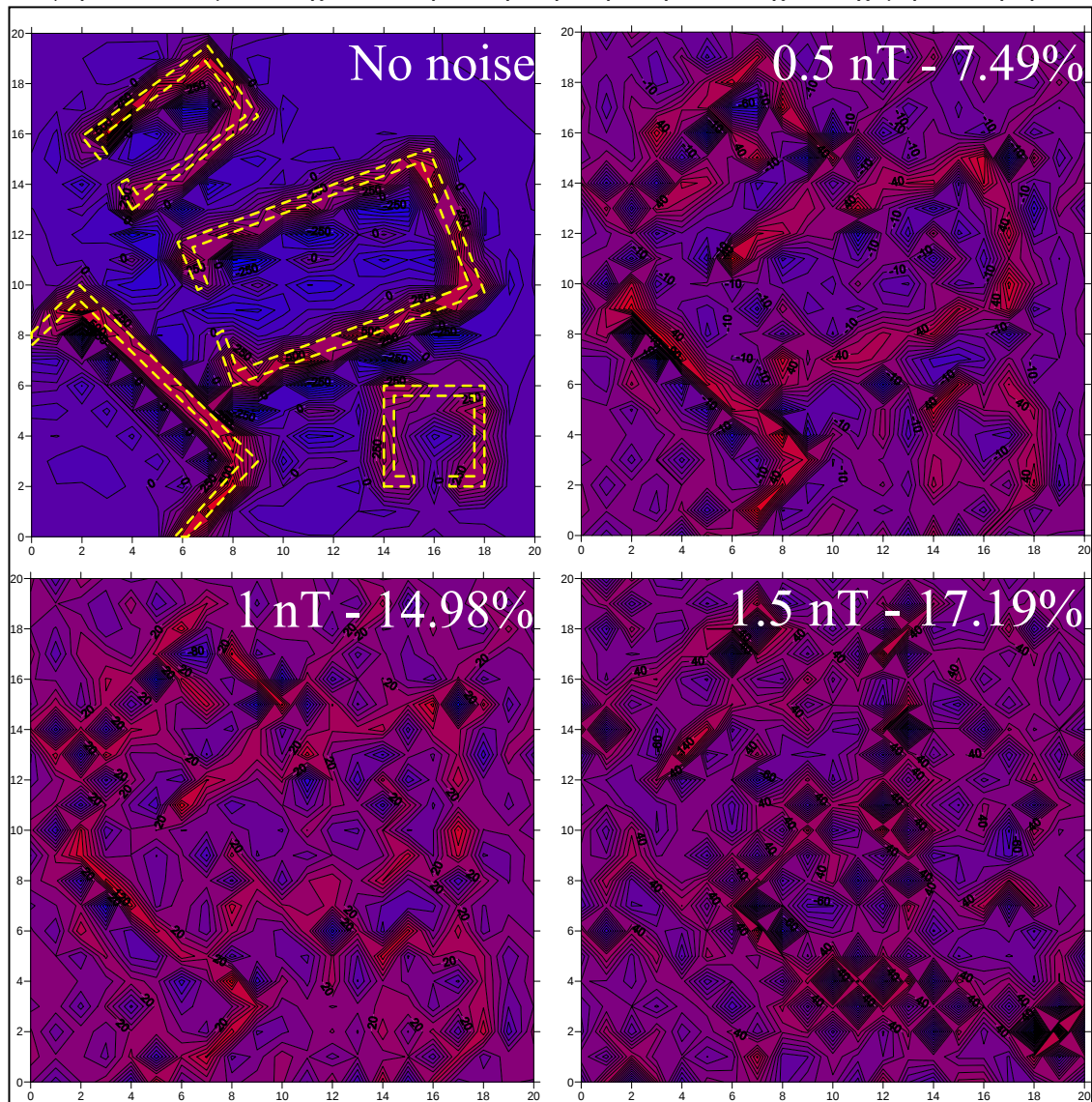
Σχήμα 5.42 Άποψη της οθόνης του προγράμματος MAG3 κατά την κατασκευή των συνθετικών δεδομένων



πρόσθεση Gauss-ιανού θορύβου σε τρία τιμές (0.5, 1 και 1.5 nT) και στη συνέχεια εκ νέου αντιστροφή των δεδομένων.

Στο σχήμα (5.43) πάνω μέρος του βλέπουμε τα συνθετικά δεδομένα του μοντέλου που περιγράφηκε ενώ στο κάτω το αποτέλεσμα της συνέλιξης του με το φίλτρο I. Με την κίτρινη διακεκομμένη γραμμή ορίζεται η θέση των δομών όπως αυτές τοποθετήθηκαν κατά την κατασκευή των συνθετικών δεδομένων. Όπως μπορούμε να δούμε στο κάτω μέρος του σχήματος (5.43) η αντιστροφή των δεδομένων είχε αρκετά καλά αποτελέσματα αποκαλύπτοντας και διαχωρίζοντας όλες τις δομές οι οποίες βρίσκονται σε βάθος 1 gu καταρχάς καθώς και την δομή που βρίσκεται σε βάθος 1.2 gu κατά δεύτερο λόγο. Η ανωμαλία της τελευταίας δομής είναι λιγότερο έντονη και σχετικά πεπλατυσμένη σε σχέση με τις υπόλοιπες και αυτό είναι λογικό γιατί βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος. Όπως είναι φυσικό η δομή αυτή δεν απεικονίζεται με τον καλύτερο τρόπο σε σχέση με το μέγεθος της. Επίσης, η δομή η οποία σχηματίζει γωνία 45^0 με το σύστημα αναφοράς εμφανίζεται αρκετά καλά αλλά με συγκεκριμένο τρόπο κατά μήκος της μιας διάστασης της. Γενικά μπορούμε να πούμε πως η εφαρμογή του φίλτρου είχε πολύ καλά αποτελέσματα σε ένα αρκετά σύνθετο μοντέλο όπως αυτό του σχήματος (5.41). Τώρα μπορούμε να προχωρήσουμε και στην εξέταση της επίδρασης του θορύβου στην αναγνώριση των δομών αυτών με το ίδιο τρόπο που έγινε και πριν, δηλαδή με την

Στο σχήμα (5.44) βλέπουμε την εικόνα της επίδρασης του θορύβου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε πως με την αύξηση του ποσοστού του θορύβου τα όρια των δομών χάνονται και η ερμηνεία καθίσταται αδύνατη. Σε χαμηλή τιμή προστιθέμενου θορύβου (0.5 nT) σχεδόν όλες οι δομές παραμένουν ευδιάκριτες αλλά τα όρια τους είναι πιο συγκεχυμένα σε σχέση με την περίπτωση της ανυπαρξίας θορύβου. Παρατηρούμε όμως ότι μια τιμή θορύβου 0.5 nT είναι αυτή τη φορά αρκετά μεγαλύτερη σε ποσοστό επί της μέγιστης τιμής των δεδομένων αυτών επομένως ο θόρυβος ακόμα και σε αυτή την περίπτωση είναι αρκετά μεγάλος. Αυτό αποδεικνύει ότι τα φίλτρα αντιστροφής διαφορικών δεδομένων έχουν καλή απόκριση στην παρουσία σχετικά χαμηλού θορύβου.



Σχήμα 5.44 Το αποτέλεσμα της συνέλιξης του φίλτρου I με τα συνθετικά δεδομένα του σύνθετου μοντέλου τεσσάρων δομών για τρεις τιμές προστιθέμενου θορύβου (0.5, 1 και 1.5 nT)

5.3 Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα

Επομένως αφού πλέον έχει διαπιστωθεί η καλή απόκριση του προγράμματος σε δεδομένα τα οποία προσεγγίζουν στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τα πραγματικά, μπορούμε να εφαρμόσουμε τα φίλτρα αυτά και σε αληθινές ομάδες δεδομένων. Αυτός εξάλλου είναι και ο τελικός σκοπός της κατασκευής των φίλτρων αυτών.

Στην παράγραφο αυτή φτάνουμε ουσιαστικά στον στόχο της παρούσας δουλειάς που δεν είναι άλλος από την διαπίστωση της αποτελεσματικότητας των φίλτρων αντιστροφής διαφορικών δεδομένων σε πραγματικές συνθήκες. Ως αυτό το σημείο, η εφαρμογή των φίλτρων μέσω του προγράμματος που αναπτύχθηκε με βάση το παλαιότερο για την αντιστροφή δεδομένων ολικού πεδίου, έγινε για περιπτώσεις των οποίων τα χαρακτηριστικά των δομών που διερευνήθηκαν ήταν απολύτως γνωστά και με λεπτομέρεια. Αυτό όμως είναι κάτι που όπως είναι φυσικό δεν συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας διασκόπησης. Στην πραγματικότητα λαμβάνονται οι μετρήσεις και στη συνέχεια υφίστανται την όποια επεξεργασία με βάση δομές που εικάζεται πως προκάλεσαν κάποιες ανωμαλίες ανάλογα με την περίπτωση και το αντικείμενο της αναζήτησης.

Η λογική που ακολουθήθηκε για την δοκιμή των φίλτρων σε πραγματικά δεδομένα είναι αυτή της απομόνωσης ενός τμήματος μιας μεγαλύτερης έρευνας, δηλαδή ενός ή δυο κελιών από τη συνολική κατάτμηση της επιφάνειας, στο εσωτερικό των οποίων εμφανίζονται κάποιες πιθανές δομές ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν διάφορα φίλτρα στα συγκεκριμένα δεδομένα και έτσι έγινε η επιλογή του βέλτιστου. Με τον τρόπο αυτό διαπιστώθηκε ποιο ακριβώς από τα φίλτρα ενισχύει καλύτερα την ανωμαλία σε σχέση με το περιβάλλον και κατά πόσον η νέα εικόνα υπερτερεί της χαρτογράφησης μετρημένου πεδίου.

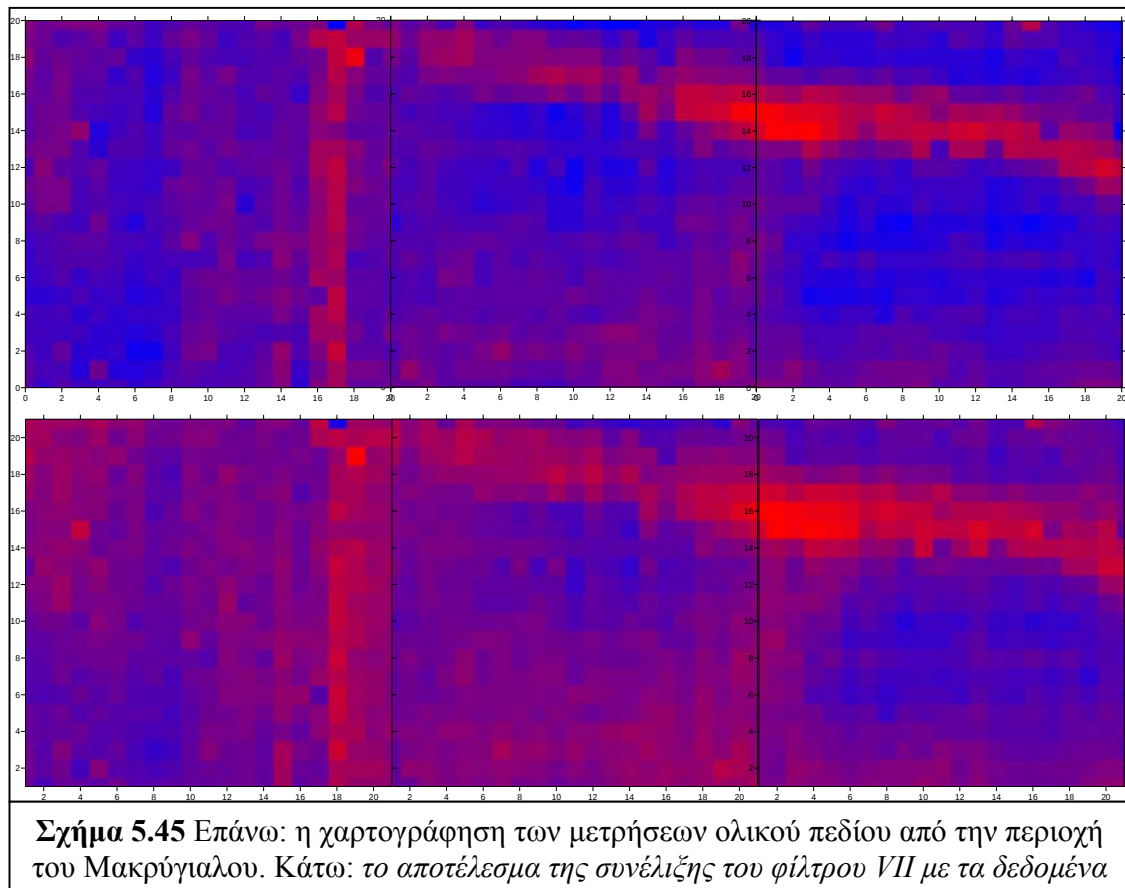
Αρχικά στο κεφάλαιο αυτό έγινε χρήση του παλαιότερου προγράμματος και εφαρμόστηκαν φίλτρα αντιστροφής σε δεδομένα ολικού πεδίου από την περιοχή του Μακρύγιαλου. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε αντιστροφή των διαφορικών μαγνητικών δεδομένων από τις περιοχές της Αυγής και της Μαρώνειας με τη βοήθεια του νέου προγράμματος. Έτσι έγινε μια κάποια σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο αυτών μεθόδων. Ακολουθεί η αναλυτική παρουσίαση των δοκιμών αυτών.

5.3.1 Εφαρμογή φίλτρων αντιστροφής σε δεδομένα ολικού πεδίου από την περιοχή του Μακρύγιαλου με τη χρήση του υπάρχοντος λογισμικού

Για τα δεδομένα αυτά το φίλτρο VII που εφαρμόστηκε είχε σαν συνάρτηση μορφής, αυτή ενός κυβικού πρίσματος διαστάσεων $1 \times 1 \times 1$ μοναδιαία διαστήματα (gu) που βρισκόταν σε βάθος 1 gu κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ενώ το φίλτρο κατασκευάστηκε για 11 θέσεις. Οι πλευρές του βρίσκονταν σε απόλυτη παραλληλία με το σύστημα αναφοράς.

Στα δεδομένα και πριν αυτά υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία παρατηρούνται (σχήμα 5.45) δυο μεγάλες επιμήκεις δομές, η μια κατά την διεύθυνση Α-Δ και η άλλη κατά την διεύθυνση Β-Ν οι οποίες τέμνονται. Η όλη εικόνα δίνει το αποτέλεσμα της εξερεύνησης 3 κελιών. Μπορούμε να πούμε επίσης πως η Α-Δ δομή είναι αρκετά συνεχής και καθαρή, ενώ αυτή που εκτείνεται κατά Β-Ν είναι σχετικά ασθενής και όχι όσο συνεχής όσο η πρώτη. Επομένως αποκτά ενδιαφέρον το αν το φίλτρο αντιστροφής ολικού πεδίου θα μπορέσει να αναδείξει περισσότερο την δομή αυτή. Είναι λογικό επίσης η πιο εμφανής δομή να μην λάβει κάποια σημαντική βελτίωση αλλά αναμένουμε

τουλάχιστον την σωστή χωροθέτησή της σε σχέση με το κέντρο της δομής που την προκαλεί. Κάτι στο οποίο θα πρέπει να δοθεί προσοχή είναι η επίδραση του φίλτρου στο περιβάλλον των δομών. Στην περίπτωση μας οι δομές που μας ενδιαφέρουν έχουν θετική αντίθεση μαγνήτισης σε σχέση με το περιβάλλον επομένως καλό θα ήταν να δούμε τι ακριβώς θα προκαλέσει το φίλτρο στις περιοχές χαμηλότερης μαγνήτισης. Ακολουθεί το σχήμα όπου φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου που περιγράφηκε πιο πάνω.



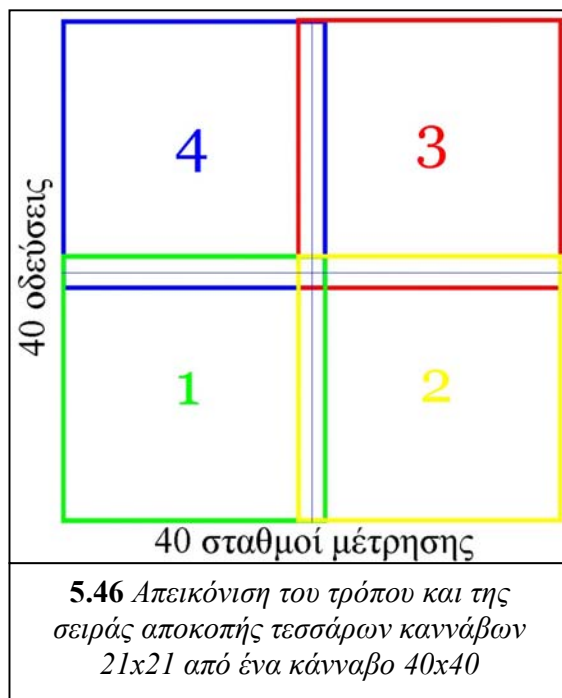
Υπάρχουν διάφορα σχόλια που μπορούν να γίνουν για το αποτέλεσμα της αντιστροφής όπως απεικονίζεται στο σχήμα (5.45). Αρχικά παρατηρούμε πως το δεξί τμήμα της Α-Δ δομής έχει παραμείνει σχεδόν το ίδιο από άποψη σχήματος ενώ. Η δομή που εκτείνεται στη διεύθυνση Β-Ν έχει ενισχυθεί αρκετά ώστε πλέον το σχήμα της να είναι πιο σαφές. Γενικά παρατηρείται μια γενική ενίσχυση όλων των υψηλότερων τιμών του ολικού πεδίου τα οποία απέδωσαν μετά την αντιστροφή και υψηλότερες τιμές μαγνήτισης. Αυτό γενικά απεικονίζεται στο σχήμα (5.45) με αύξηση των περιοχών υψηλότερων τιμών μαγνήτισης (κόκκινο χρώμα) όπως φαίνεται σε όλο τον πρώτο κάναβο και στο κάτω μέρος των υπολοίπων δυο. Οι περιοχές χαμηλότερης μαγνήτισης παρέμειναν αναλογικά ίδιες.

Το παράδειγμα αυτό λοιπόν αναδεικνύει την ενισχυτική δύναμη της μεθόδου αυτής αν και στην περίπτωση μας η ανωμαλία ήταν ήδη μεγάλη και αρκετά σαφής από μόνη της. Γενικά όμως βλέπουμε πως στο επίπεδο των μετρήσεων ολικού πεδίου τα φίλτρα

αντιστροφής έχουν αποτελέσματα και δουλεύουν αρκετά καλά. Επομένως έχουμε μια γερή βάση για την διαπίστωση της απόδοσης της ίδιας μεθόδου ελαφρώς τροποποιημένης για την εφαρμογή της σε διαφορεικά δεδομένα.

5.3.2 Εφαρμογή φίλτρων αντιστροφής σε διαφορεικά δεδομένα με τη χρήση του νέου λογισμικού

Αυτή είναι η πρώτη από τις δυο περιπτώσεις στις οποίες εφαρμόστηκαν φίλτρα αντιστροφής με βάση το νέο πρόγραμμα το οποίο είναι εξειδικευμένο για διαφορεικά δεδομένα. Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε στην αρχή είχε να κάνει με τη μορφή των δεδομένων έτσι όπως λαμβάνονται και αποθηκεύονται από το όργανο μέτρησης. Το πρόγραμμα έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να επεξεργάζεται αριθμό δεδομένων ίσο με $21 \times 21 = 441$. Αυτό σημαίνει πως ουσιαστικά θα πρέπει τα δεδομένα μας να έχουν ληφθεί από ένα καννάβο 20×20 μέτρων με διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 1 m. Τις περισσότερες φορές όμως στο πεδίο οι μετρήσεις λαμβάνονται σε κελιά $20 \times 20 \text{ m}^2$ μεν αλλά με διάστημα δειγματοληψίας ίσο με 0.5 μέτρο, δηλαδή συνολικά έχουμε 1600 μετρήσεις ανά κελί. Αυτό συμβαίνει για λόγους πυκνότερης δειγματοληψίας που τελικά οδηγεί σε πιο λεπτομερείς εικόνες. Όπως είναι φυσικό, 1600 μετρήσεις δεν μπορούν να διαιρεθούν ακριβώς σε 4 ομάδες των 441 σημείων.

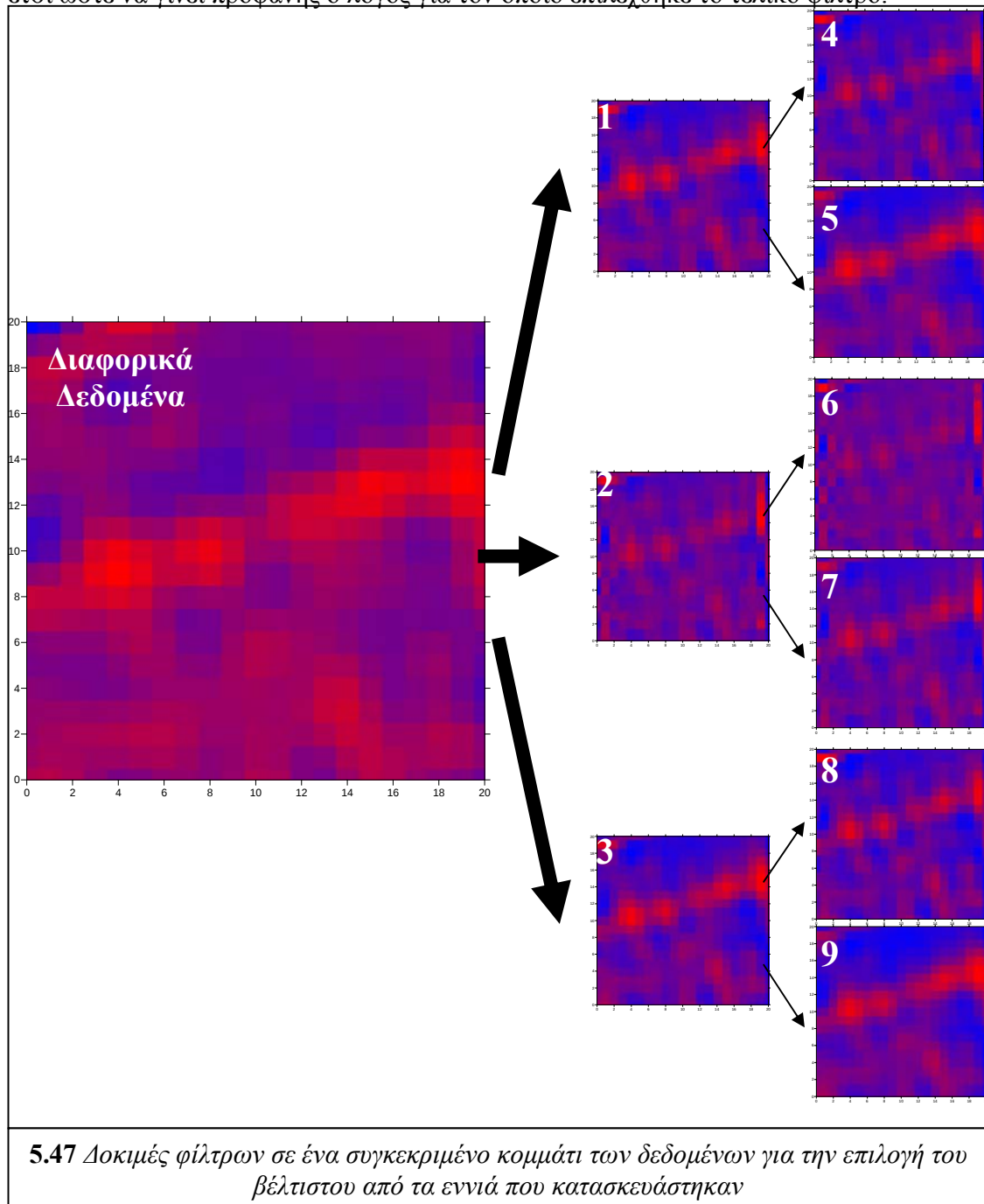


Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν δυο ακόμη προγράμματα FORTRAN τα οποία έχουν σαν σκοπό να προετοιμάσουν τα δεδομένα που προέρχονται από κάποιο βαθμιδόμετρο για είσοδο στο πρόγραμμα της αντιστροφής. Το πρώτο από αυτά διαχωρίζει ένα καννάβο 1600 μετρήσεων σε 4 των 441 με αλληλοεπικάλυψη στηλών για να βρεθεί ο απαραίτητος αριθμός $4 \times 441 = 1764$ των σημείων που θα πληρώσουν τα επιμέρους κελιά. Ο τρόπος και η σειρά με την οποία το πρόγραμμα αποκόπτει τα κατάλληλα κομμάτια του μεγάλου καννάβου απεικονίζεται στο σχήμα (5.46). Όπως βλέπουμε οι 4 καννάβοι που προκύπτουν έχουν κοινές γραμμές ή στήλες ανάλογα με το πώς συνορεύουν. Το ίδιο πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επανένωσης των μικρότερων αυτών

καννάβων σε ένα μεγαλύτερο ύστερα από την αντιστροφή τους. Το δεύτερο πρόγραμμα μετατρέπει τον τρόπο γραφής των δεικτών ενός αρχείου έτσι ώστε να είναι συμβατό με το πρώτο. Στην περίπτωση δηλαδή που στο αρχείο που πρέπει να διαιρεθεί ο δείκτης x αυξάνεται πιο αργά από τον y, τότε αλλάζει αυτή τη σειρά, ή αλλιώς το μετατρέπει στο να σαρώνει το αρχείο κατά γραμμές.

5.3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΑΥΓΗΣ

Από τη στιγμή που έχουμε τα αρχεία σε μορφή συμβατή με το πρόγραμμα μπορούμε να ξεκινήσουμε τη διαδικασία αντιστροφής. Όπως είναι φυσικό, αρχικά διερευνήθηκαν τα φίλτρα. Η διερεύνηση αυτή είχε να κάνει με τους συνδυασμούς διαστάσεων του πρίσματος από το οποίο υπολογίζεται η συνάρτηση μορφής, καθώς και με διαφοροποίηση του βάθους ταφής του πρίσματος. Όλα τα φίλτρα που δοκιμάστηκαν φαίνονται στον πίνακα Ι. Στο σχήμα (5.47) μπορούμε να δούμε και όλα τα αποτελέσματα της αντιστροφής με κάθε ένα από αυτά τα φίλτρα σε ένα μικρό κομμάτι των δεδομένων έτσι ώστε να γίνει προφανής ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε το τελικό φίλτρο.

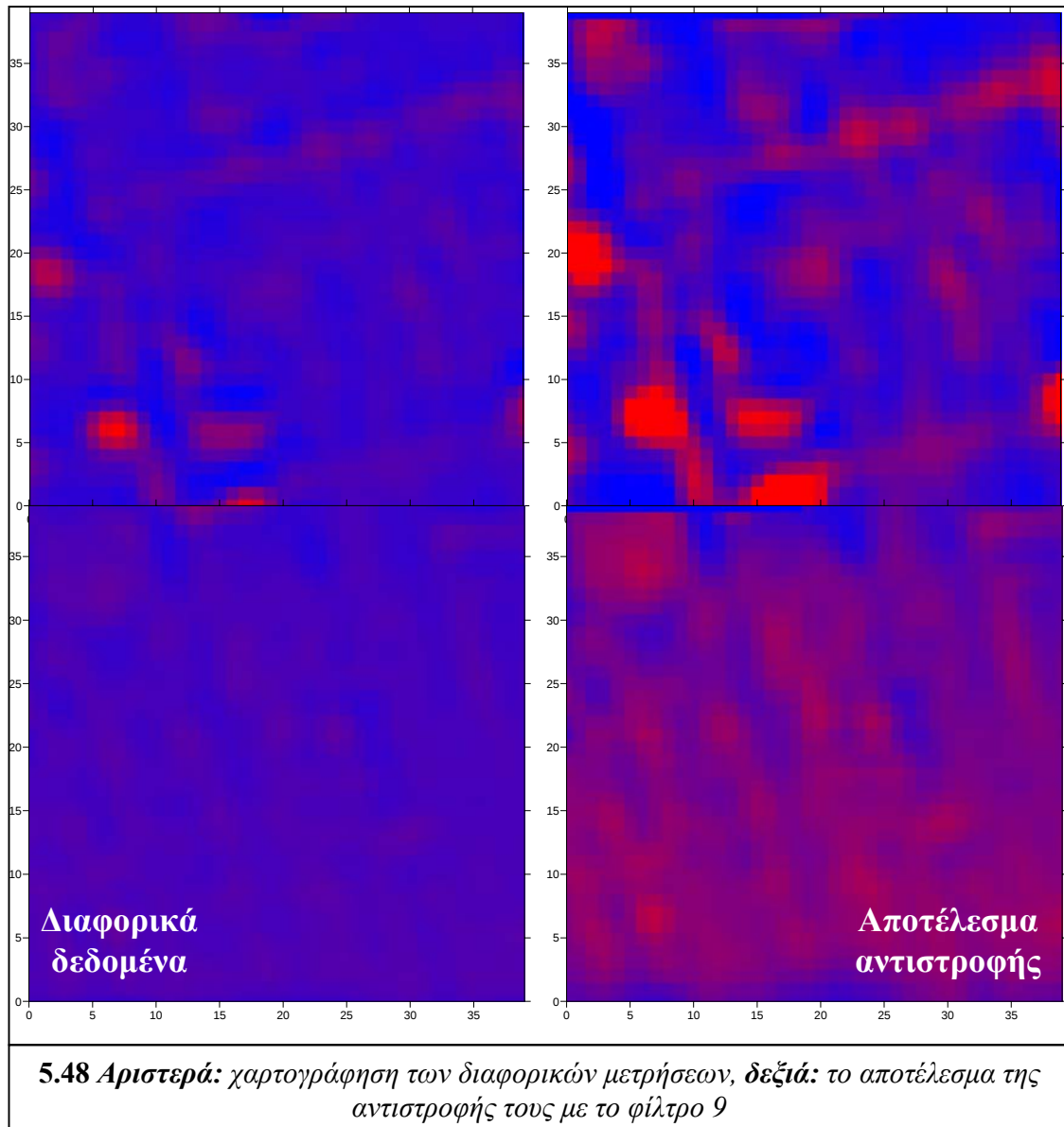


Grid Units	ΦΙΛΤΡΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Διάσταση κύβου	1	2	0.5	1	1	2	2	0.5	0.5
Βάθος από πάνω αισθητήρα	2	2	2	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5
Βάθος από κάτω αισθητήρα	1.5	1.5	1.5	2	1	2	1	2	1

ΠΙΝΑΚΑΣ I

Όπως εύκολα μπορούμε να δούμε στο σχήμα (5.47) το φίλτρο με τα καλύτερα αποτελέσματα ήταν το ένατο το οποίο σύμφωνα με τον πίνακα I υπολογίστηκε στη βάση ενός κυβικού πρίσματος διαστάσεων 0.5 gu σε ύψος, πλάτος και μήκος και το οποίο βρίσκεται σε βάθος 1.5 gu από τον ανώτερο αισθητήρα και 1 gu από τον κατώτερο. Μπορούμε να πούμε επίσης πως τα φίλτρα τα οποία υπέθεσαν τη θέση του πρίσματος σε μεγαλύτερο βάθος από το κανονικό (2 και 1.5 gu αντίστοιχα) είχαν λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίθετα σε κάθε περίπτωση στην οποία το βάθος ήταν μικρό τα αποτελέσματα σιγά-σιγά προσέγγιζαν μια επιθυμητή εικόνα. Οι δομές που προκαλούν τις παρατηρούμενες ανωμαλίες πρέπει να είναι μικρών διαστάσεων, ενώ το βέλτιστο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ορίζεται ως 0.5 gu.

Κάποιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν αρχικά στη χαρτογράφηση των διαφορικών δεδομένων που απεικονίζεται στο σχήμα (5.48). Είναι φανερό πως υπάρχει μια δομή η οποία πιθανότατα είναι τα ερείπια των θεμελίων μιας προϊστορικής κατοικίας η οποία σχηματίζει γωνία με το σύστημα του καννάβου περίπου ίση με 20-25^ο. Η ανωμαλία που μας δίνει η δομή αυτή είναι σχετικά ασθενής επομένως το φίλτρο αντιστροφής 9 θα πρέπει να την ενισχύσει αρκετά για να θεωρηθεί η εφαρμογή του επιτυχημένη. Πέρα από τη δομή αυτή μπορούμε να δούμε και διάφορες άλλες μικρές περιοχές υψηλότερων τιμών μετρήσεων οι οποίες είναι κυρίως συσσωρευμένες στο επάνω τμήμα. Στο κάτω τμήμα, το σημείο που έχει ενδιαφέρον είναι κάποιες παράλληλες γραμμές οι οποίες εκτείνονται σε διεύθυνση περίπου κάθετη στην μεγάλη διάσταση της πιθανής δομής μας και είναι πολύ αχνές. Αυτές οι γραμμές στην πραγματικότητα οφείλονται σε αρόσεις στην επιφάνεια του εδάφους εφόσον η θέση στην οποία λήφθηκαν οι μετρήσεις είναι χωράφια σιταριού. Οι διαφορές στις τιμές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι κατά την όδευση πάνω από έναν αγρό το οποίο έχει αυλακώσεις, η σχετική θέση του οργάνου αλλάζει συνεχώς με αποτέλεσμα οι τιμές να λαμβάνονται από διαφορετικά ύψη κάθε φορά ανάλογα με το που βρίσκεται ο ερευνητής – στην ράχη ή την κοιλάδα μιας άροσης. Επομένως μπορούμε να δούμε την αντίδραση του φίλτρου σε μια τέτοια επιφανειακή δομή η οποία συναντάται παρά πολύ συχνά σε αρχαιολογικές θέσεις του Ελληνικού χώρου.



Στο σχήμα (5.48) φαίνεται καθαρά η επιτυχία της εφαρμογής του φίλτρου 9. Αρχικά μπορούμε να δούμε πως το αποτέλεσμα της υποθετικής δομής έχει ενισχυθεί σε μεγάλο βαθμό, όπως και οι υπόλοιπες υψηλές θετικές περιοχές που βρίσκονται στο κάτω αριστερό τεταρτημόριο του επάνω τμήματος. Παρατηρούμε πως η πάνω γραμμική διάσταση αυτής της δομής έχει προσομοιωθεί σαν το σύνολο μικρότερων τεμαχών, όπως περίπου είχε γίνει και σε μια αντίστοιχη περίπτωση συνθετικών δεδομένων. Πρέπει να σημειωθεί πως στην εικόνα μας κάποιες γραμμικές ασυνέχειες, οι οποίες φαινομενικά χωρίζουν τον κάθε κάνναβο σε 4 περιοχές οφείλονται στην ένωση τεσσάρων μικρότερων κελιών με το πρόγραμμα που περιγράφηκε πιο πριν. Λόγω του ότι αυτά τα 4 κελιά έχουν κοινές πλευρές είναι λογικό μετά την αντιστροφή να μην υπάρχει απόλυτη ταύτιση στα σημεία αυτά. Παρόλα αυτά όμως η εικόνα παραμένει σαφής στην ερμηνεία της. Ένα άλλο σημείο ενδιαφέροντος είναι οι αρόσεις, οι οποίες ενισχύονται παράλληλα με τη δομή, όπως φαίνεται και στο κάτω τμήμα. Επομένως το φίλτρο δεν μπορεί να διαχωρίσει

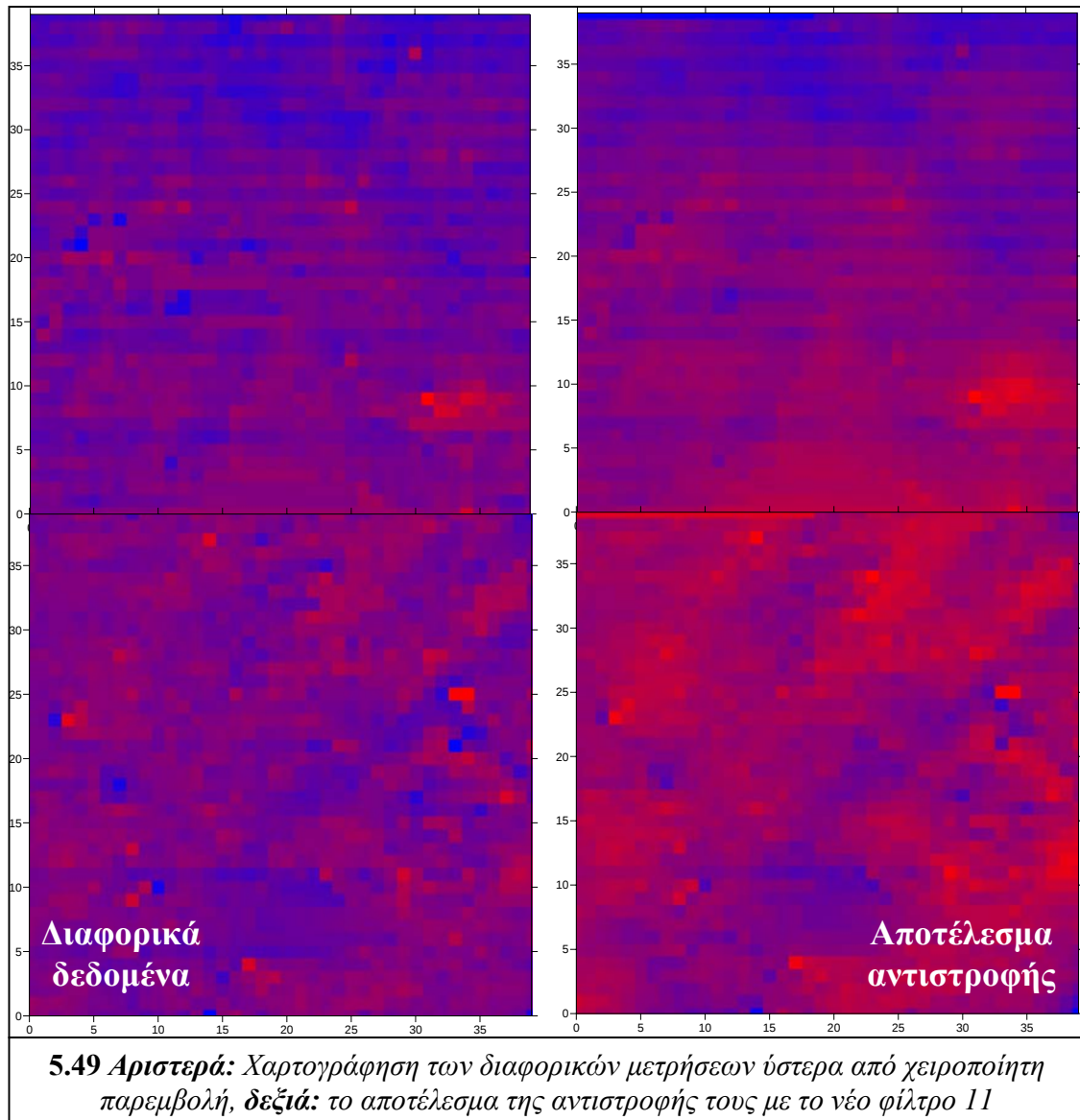
όπως είναι λογικό τις δομές ενδιαφέροντος ενισχύοντας αδιακρίτως οποιαδήποτε δομή συναντήσει. Η αφαίρεση των επιφανειακών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν τις μετρήσεις μας όπως είναι οι αρόσεις είναι ένα θέμα το οποίο θα πρέπει να απασχολήσει στο μέλλον την έρευνα στα φίλτρα αντιστροφής. Όσον αφορά την παρούσα εργασία, βλέπουμε πως το φίλτρο αντιστροφής ενίσχυσε τελικά την πιθανή δομή σε τέτοιο βαθμό ώστε αυτή να φαίνεται στον τελικό χάρτη μαγνήτισης πολύ καθαρά.

5.3.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΜΑΡΩΝΕΙΑΣ

Ενώ στα δεδομένα που λήφθηκαν στην Αυγή η πιθανή δομή είχε θετική αντίθεση μαγνήτισης σε σχέση με το περιβάλλον, στα δεδομένα της Μαρώνειας οι δομές ενδιαφέροντος έχουν αρνητική. Πέρα από αυτή την ιδιαιτερότητα τους τα δεδομένα της Μαρώνειας έχουν και κάποια ακόμη χαρακτηριστικά που κάνουν την περίπτωση αρκετά πιο ιδιαίτερη. Αρχικά υπάρχουν ομάδες σημείων στον κάνναβο στα οποία για λόγους αδυναμίας λήψης μέτρησης τοποθετήθηκε ψευδής τιμή (dummy - 2047 nT). Δεδομένου ότι στις διασκοπήσεις αρχαιολογικού ενδιαφέροντος αναζητούμε διαφορές στην μαγνήτιση της τάξης των μερικών nT, και σε ένα εύρος τιμών επίσης μικρό σε σχέση με την πιο πάνω τιμή, βλέπουμε πως μια τέτοια υπερβολική τιμή στα δεδομένα μας θα έχει ως συνέπεια την αδυναμία του φίλτρου να λειτουργήσει σωστά.

Σε πολλές θέσεις υπάρχουν μεταλλικά αντικείμενα είτε θαμμένα σε μικρό βάθος είτε στην επιφάνεια, αλλά κρυμμένα με κάποιο τρόπο, τα οποία προκαλούν δυσανάλογα μεγάλες ανωμαλίες με θετικές αλλά και αρνητικές τιμές. Επιπλέον οι ανωμαλίες αυτές είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερες και μικρότερες αντίστοιχα από τις συνήθειες της περιοχής. Αυτές οι ανωμαλίες λέγονται παλμοί (spikes) και θεωρούνται θόρυβος στις μετρήσεις μας. Παλμούς μπορεί επίσης να προκαλέσει και το όργανο σε στιγμές μη κανονικής λειτουργίας. Επομένως θα πρέπει στις θέσεις των τιμών αυτών να παρεμβάλλουμε κάποιες άλλες υποθετικές με μαθηματικό τρόπο για να επιτευχθεί ομοιομορφία. Για αυτό το λόγο εφαρμόστηκε τεχνική παρεμβολής (interpolation), με απλό τρόπο (σχεδόν γραμμική παρεμβολή - θεωρήθηκε ότι δυο σημεία και τα ενδιάμεσα τους συνδέονται με γραμμική σχέση τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα (5.49).

Καταρχήν μπορούμε να κάνουμε κάποια σχόλια στην εικόνα της χαρτογράφησης των απλών διαφορικών δεδομένων. Μια πρώτη ανωμαλία ενδιαφέροντος εντοπίζεται στο πάνω μέρος του πάνω κελιού. Είναι φανερό ότι αυτή προκαλείται από ορθογώνια δομή. Μάλιστα η ανωμαλία διακόπτεται στο πάνω μέρος της και εισέρχεται διαγώνια στον κάνναβο. Όπως είναι προφανές έχει αρνητική αντίθεση μαγνήτισης σε σχέση με το περιβάλλον γι αυτό και απεικονίζεται με το μπλε χρώμα που αντιστοιχεί σε χαμηλές τιμές ενώ το περιβάλλον τείνει προς το κόκκινο, δηλαδή σε υψηλότερες τιμές. Στο κάτω κελί υπάρχουν αρκετές γραμμικές αρνητικές ανωμαλίες οι οποίες σχηματίζουν γωνία περίπου 45° με το χρησιμοποιούμενο σύστημα αναφοράς, σε θέση παράλληλη με την πρώτη ανωμαλία (οι ανωμαλίες αυτές αντανakλούν την ύπαρξη υπολειμμάτων του αρχαίου πολεοδομικού ιστού), όμως είναι συγκεχυμένες και το σχήμα τους ασαφές. Μια ακόμη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως τα δεδομένα του πάνω κελιού εμφανίζουν ένα είδος ζώνωσης το οποίο οφείλεται στην μέτρια ποιότητά τους. Είναι ενδιαφέρον επίσης να δούμε την αντίδραση του φίλτρου σε παλμούς καθώς και σε θέσεις στις οποίες έχει γίνει παρεμβολή με ψευδείς τιμές.

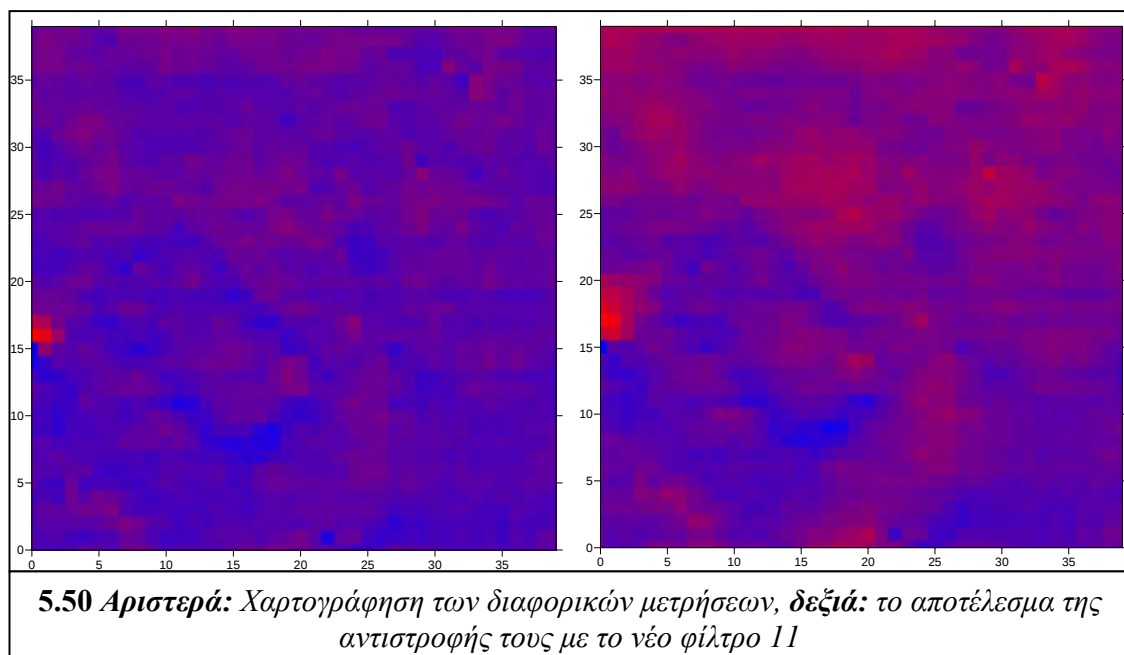


Για τη συγκεκριμένη ομάδα δεδομένων αναπτύχθηκε ένα ακόμη φίλτρο, το φίλτρο 11, γιατί το φίλτρο 9 δεν έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση. Το πρίσμα που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του φίλτρου 11 έχει διαστάσεις $0.25 \times 0.25 \times 0.25$ gu ενώ βρίσκεται σε βάθος 0.25 gu κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Στο σχήμα (5.49) βλέπουμε πως το φίλτρο 11 λειτούργησε σχεδόν σε όλες τις επιμέρους περιοχές ενισχύοντας τις αρνητικές ανωμαλίες των δομών που μας ενδιαφέρουν. Δηλαδή όξυναν απλά τη διαφορά μεταξύ αυτών και του περιβάλλοντος. Το ίδιο συμβαίνει και με όλες τις μικρές περιοχές αρνητικής μαγνήτισης που μπορούν να εντοπιστούν στο χάρτη. Στο πάνω κελί η ενίσχυση αυτή ξεκινά να γίνεται ορατή στο κάτω μισό του, ενώ στο κάτω κελί είναι ολική. Η γωνιακή δομή στο ανώτερο τμήμα του πάνω κελιού δεν ενισχύεται σε καλό βαθμό με μόνη βελτίωση ίσως την ασθενή ενίσχυση των γύρω θετικών περιοχών που αναδεικνύει ελαφρώς καλύτερα τα όρια της. Από το μέσο του πάνω κελιού και προς τα κάτω μπορούμε να διαχωρίσουμε ποικιλία δομών με

ίδιο προσανατολισμό, όπως μια επιμήκης διαγώνια δομή στο κέντρο του κάτω κελιού, οι οποίες θα ήταν ανέφικτο να σημειωθούν στην αρχική εικόνα. Η αντίθεση των χρωμάτων μεταξύ μπλε και κόκκινου τις καθιστά πλέον ορατές ακόμη και σε ένα μη εκπαιδευμένο μάτι. Οι περιοχές στις οποίες έγινε παρεμβολή δεν παρουσιάζουν καμία μεταβολή σε σχέση με τις υπόλοιπες, επομένως μπορούμε να πούμε πως δεν επηρεάζουν αρνητικά την εικόνα πέρα από τις όποιες δομές μπορούν να κρύβουν και δεν είναι δυνατόν να εκτιμήσουμε. Οι περιοχές των παλμών έχουν μείνει ανέπαφες μετά το πέρας της αντιστροφής χωρίς να αλλοιώνουν τις γειτονικές σε αυτούς περιοχές. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως τμήματα κελιών με ψευδείς τιμές στα οποία έχουν παρεμβληθεί τιμές καθώς και διάσπαρτοι παλμοί δεν αλλοιώνουν την εικόνα. Δηλαδή η επίδραση τους κρίνεται ουδέτερη.

5.3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΝΗΣΙΔΑΣ ΜΗΤΡΟΥ

Στα δεδομένα που λήφθηκαν στη Νησίδα Μήτρου έχουμε απομονώσει ένα κάρναβο στον οποίο εμφανίζεται μια πολύ ισχυρή αρνητική ανωμαλία μιας καταπληκτικής ορθογώνιας δομής που πιθανότατα αντιπροσωπεύει τα ερείπια της θεμελίωσης κάποιας αρχαίας κατοικίας. Όπως προαναφέρθηκε η ανωμαλία που μας ενδιαφέρει είναι αρνητικής αντίθεσης μαγνήτισης, επομένως μπορούμε να εξετάσουμε την επίδραση των φίλτρων σε μια δομή της οποίας τα χαρακτηριστικά είναι ήδη ορατά με αρκετή ευκρίνεια. Στο σχήμα (5.50) φαίνεται καθαρά η δομή για την οποία γίνεται λόγος πιο πάνω.

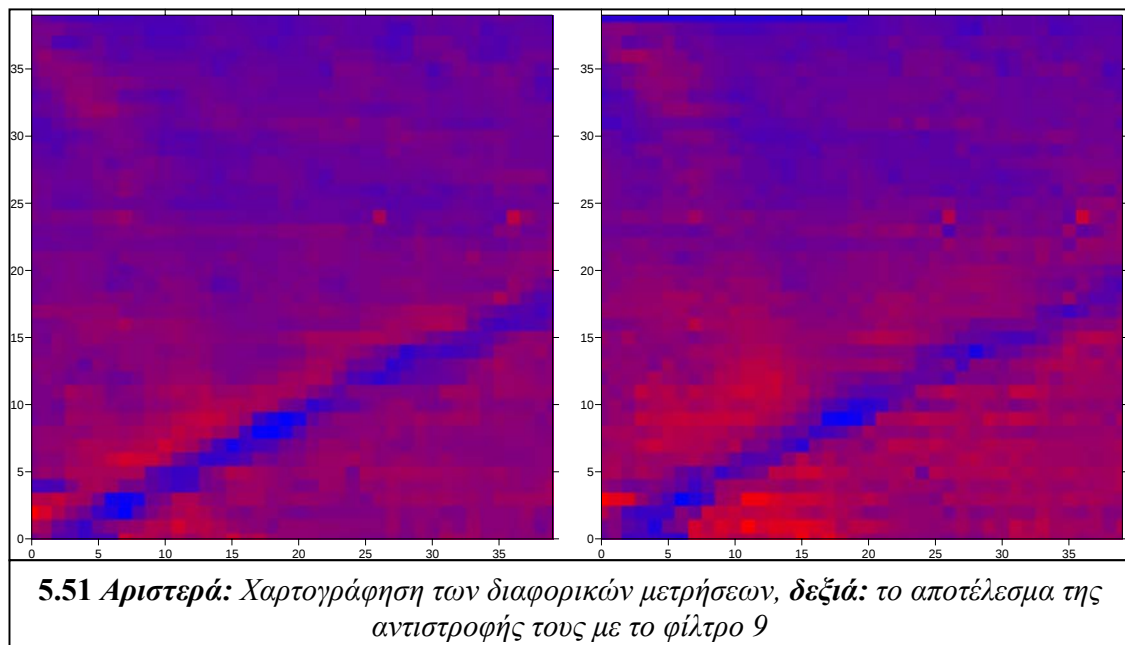


Είναι προφανές πως η επίδραση του φίλτρου δεν θα έχει εντυπωσιακά αποτελέσματα στην συγκεκριμένη περίπτωση αφού η δομή ενδιαφέροντος είναι ήδη προφανής. Μπορούμε όμως να δούμε ποιο θα είναι το αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή του φίλτρου αντιστροφής για την ποιοτική αξιολόγηση της θετικής του επίδρασης, δηλαδή ποιος είναι ο τομέας αυτός στον οποίο η συγκεκριμένη διαδικασία συνεισφέρει περισσότερο. Η εξέταση της τελικής εικόνας μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως το φίλτρο αντιστροφής και

στη συγκεκριμένη περίπτωση έδρασε με τρόπο όμοιο όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα. Ενίσχυσε δηλαδή τις γύρω θετικές περιοχές αυξάνοντας έτσι την αντίθεση στο χρώμα μεταξύ δομής και περιβάλλοντος, καθιστώντας με αυτό τον τρόπο την εικόνα ευκολότερη στην ερμηνεία. Η δομή συνεχίζει να παραμένει εμφανής τόσο σε θέση όσο και σε διαστάσεις. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί πως και σε αυτή την ομάδα δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο 11.

5.3.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΤΗΣ ΣΠΑΡΤΗΣ

Το τελευταίο αυτό παράδειγμα παρουσιάζει μια αρκετά μεγάλη επιμήκη ανωμαλία η οποία αντανακλά την ύπαρξη γνωστού ορύγματος το οποίο διανοίχτηκε για να διέρθει ο αγωγός ύδρευσης. Όπως και στην περίπτωση της Νησίδας Μήτρου, η ανωμαλία είναι αρκετά εμφανής και ισχυρή και επιπλέον αυτή τη φορά μεγαλύτερου μεγέθους. Το σχήμα (5.51) απεικονίζει τη χαρτογράφηση τόσο των διαφορικών δεδομένων όσο και το αποτέλεσμα μετά την αντιστροφή.



Για ακόμη μια φορά παρατηρούμε πως το φίλτρο έχει ενισχύσει τις γειτονικές προς την μεγάλη αρνητική ανωμαλία περιοχές, ιδιαίτερα στο κάτω αριστερό μέρος του κελιού. Επομένως η επίδραση του φίλτρου είναι η ίδια ανεξάρτητα της περίπτωσης και ως κύρια επίδραση έχει την όξυνση της σχετικής διαφοράς μεταξύ μεγάλων και μικρών τιμών μαγνήτισης με τελικό αποτέλεσμα την οπτική βελτιστοποίηση της τελικής εικόνας.

5.4 Συμπεράσματα

Αρχικά μπορούμε να σημειώσουμε τη γενική επιτυχία που είχε η εφαρμογή των φίλτρων στην αντιστροφή διαφορικών δεδομένων. Στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων που εξετάστηκαν, τα χαρακτηριστικά των υπό μελέτη δομών αναδείχθηκαν πολύ καλά. Σε κάθε περίπτωση προέκυψαν χωρικές κατανομές της συνάρτησης πλάτους οι οποίες χωροθέτησαν με ακριβή τρόπο τις διάφορες δομές από κάθε άποψη (όρια, διαστάσεις, επίκεντρα, θέση). Η εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα είχε επίσης καλά

αποτελέσματα αλλά αναδείχθηκαν επίσης και κάποια αδύνατα σημεία της μεθόδου, τα οποία αποτελούν μια πολύ καλή αφορμή για περαιτέρω έρευνα στα φίλτρα αντιστροφής διαφορικών δεδομένων.

Με βάση τη διερεύνηση που έλαβε χώρα σε αυτή την εργασία μπορούμε να κάνουμε κάποια πιο εξειδικευμένα σχόλια για την επίδραση διαφόρων παραγόντων στην αντιστροφή, όπως αυτά προέκυψαν από τα αποτελέσματα. Τα πρώτα συμπεράσματα που προέκυψαν αφορούν στο βάθος ταφής των σωμάτων. Παρατηρήθηκε πως όσο αυξάνει το βάθος στο οποίο βρίσκεται ένα σώμα σε σχέση με το βάθος για το οποίο κατασκευάστηκε κάποιο φίλτρο, τόσο πιο διευρυμένη μορφή προκύπτει στην τελική εικόνα της αντιστροφής με συνέπεια να μην μπορεί να γίνει ερμηνεία για τα όρια και τις διαστάσεις του σώματος. Παράλληλα παρατηρείται και μια μείωση στα μεγέθη της μαγνήτισης, πράγμα αναμενόμενο εφόσον είναι δεδομένη η προς τα άνω συνέχεια των ανωμαλιών ολικού πεδίου, άρα ως άμεση συνέπεια και των διαφορικών. Στα παραπάνω μπορούμε να προσθέσουμε και το ότι σε περιπτώσεις που το βάθος ταφής είναι το ίδιο τόσο για το φίλτρο όσο και για τη δομή τότε η τελική εικόνα είναι σαφώς καλύτερη και πιο αντιπροσωπευτική. Τέλος διαπιστώθηκε πως μικρές έως μέτριες διαφορές στα βάθη ταφής των διαφόρων σωμάτων με το φίλτρο αντιστροφής δεν επηρεάζουν την τελική εικόνα. Μπορούμε όμως να πούμε πως η κατά το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του βάθους των πιθανών δομών κατά την κατασκευή ενός φίλτρου, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που κρίνει την επιτυχία στην εφαρμογή της μεθόδου.

Ακολούθως διερευνήθηκε η διακριτική ικανότητα της μεθόδου σε γειτονικές δομές και τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής: αρχικά μπορούμε να θέσουμε ένα όριο στην ικανότητα αναγνώρισης πλευρικών δομών της μεθόδου, που στην συγκεκριμένη περίπτωση αφορά στην ελάχιστη απόσταση για την οποία το φίλτρο αντιστροφής δίνει τα τελευταία καλά αποτελέσματα. Διαπιστώθηκε πως το όριο αυτό βρίσκεται κοντά στο ένα ακέραιο μοναδιαίο διάστημα δειγματοληψίας μεταξύ των πλευρών των δομών. Για παράδειγμα σε απόσταση μισού μοναδιαίου διαστήματος η μέθοδος απέτυχε να διαχωρίσει τα σώματα, γεγονός αναμενόμενο με βάση τη θεωρία δειγματοληψίας του Nyquist. Από τους ελέγχους σε συνθετικά δεδομένα προκύπτει ότι για τιμές ίσες ή μεγαλύτερες από αυτό το μοναδιαίο διάστημα δειγματοληψίας η μέθοδος λειτουργεί άψογα, με πλήρη διαχωρισμό δομών που οι πλευρές τους απείχαν τουλάχιστον ένα μοναδιαίο διάστημα μεταξύ τους. Δηλαδή σαν ένα τελικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε πως θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την ερμηνεία γιατί είναι πολύ πιθανό δυο ξεχωριστές δομές να μην διαχωριστούν από το φίλτρο αντιστροφής εφόσον η μεταξύ τους απόσταση είναι μικρότερη του ενός βήματος δειγματοληψίας.

Εν συνεχεία, έγιναν κάποιες χρήσιμες παρατηρήσεις για την επίδραση της μη σύμπτωσης μεταξύ των προσανατολισμών του πρίσματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την κατασκευή του φίλτρου και των υπό μελέτη δομών. Οι δοκιμές που έγιναν μας οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι δεν είναι απόλυτη αναγκαιότητα για ένα φίλτρο να κατασκευαστεί με προσανατολισμό όμοιο με αυτόν των υπό εξέταση δομών, το σήμα των οποίων επιθυμούμε να ανορθωθεί. Μια μικρή βελτίωση επέρχεται στην τελική εικόνα, αλλά αυτή δεν είναι σε βαθμό τέτοιο, που να δικαιολογεί μια σχετική διερεύνηση πριν την κατασκευή ενός φίλτρου αντιστροφής. Γενικά παρατηρήθηκε πως δομές των οποίων οι διαστάσεις σχηματίζουν γωνία με το σύστημα αναφοράς, προσομοιώνονται

μετά την αντιστροφή σαν ένα σύνολο όρθιων πρισμάτων τοποθετημένα σε διαγώνια θέση.

Πολύ χρήσιμα συμπεράσματα αντλήθηκαν και από την εφαρμογή των φίλτρων αντιστροφής σε πιο πολύπλοκες δομές. Αρχικά σημειώνουμε την επιτυχία της μεθόδου στην αποκάλυψη του σχήματος και της θέσης επιμηκών, συμπαγών αλλά και πιο σύνθετων δομών. Στην περίπτωση των κατακόρυφων διαβαθμίσεων του σχήματος κάποιων πιο πολύπλοκων δομών είδαμε πως δεν υπάρχει κάποια σοβαρή επίδραση στην τελική εικόνα με τις βαθύτερες δομές να δίνουν πιο ασθενείς ανωμαλίες. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως γενικά οι απαιτήσεις μας στην διερεύνηση βαθύτερων δομών που συνυπάρχουν με πιο ρηχές θα πρέπει να περιορίζονται στη σωστή απόδοση του συνολικού σχήματος τους, το οποίο και επιτυγχάνεται πάρα πολύ καλά.

Σε ότι αφορά την επίδραση του θορύβου στο αποτέλεσμα της εφαρμογής των φίλτρων αντιστροφής, συμπεράναμε δυο πράγματα. Το πρώτο από αυτά αφορά στο ότι γενικά υπάρχει μια αυξημένη ευαισθησία της μεθόδου σε μέσα και υψηλά επίπεδα θορύβου, ανάλογα με την πολυπλοκότητα των δομών που διερευνώνται. Δηλαδή όσο πιο πολύπλοκη είναι μια δομή ή δομές που συμπεριλαμβάνονται σε μια περιοχή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αρνητική επίδραση του θορύβου στην τελική εικόνα. Το δεύτερο συμπέρασμα σχετικά με το θόρυβο έχει να κάνει με την πολύ καλή απόκριση της μεθόδου σε χαμηλά επίπεδα θορύβου για όλες τις περιπτώσεις. Γενικά τα επίπεδα του θορύβου στην πράξη είναι αυτής της χαμηλής τάξης, επομένως η αντίδραση των φίλτρων αντιστροφής είναι απολύτως ικανοποιητική. Επίσης υπάρχει μια εξάρτηση της επίδρασης του φίλτρου με βάση την τάξη των τιμών μιας ομάδας δεδομένων. Για παράδειγμα μια τιμή προστιθέμενου θορύβου της τάξης του 0.5 nT έχει μεγαλύτερη επίδραση σε πιο πολύπλοκα μοντέλα για το λόγο του ότι η τάξη τιμών είναι χαμηλότερη. Τέλος αν και ένα ποσοστό θορύβου της τάξης του 1 nT φαίνεται αρκετά μικρό, στην περίπτωση των διαφορικών δεδομένων και ειδικά της πρώτης διαφοράς της κατακόρυφης συνιστώσας είναι ήδη αρκετά μεγάλο αν αναλογιστούμε πως αναμενόμενες ανωμαλίες μπορεί να είναι και της τάξης των 2 nT.

Όλα τα παραπάνω διαπιστώθηκαν με την τελική εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα. Ένα συμπέρασμα το οποίο προέκυψε μετά την επεξεργασία αληθινών μετρήσεων αφορά στη σημασία που έχει το μέγεθος του πρίσματος με βάση το οποίο υπολογίζεται ένα φίλτρο αντιστροφής. Στα δεδομένα της Αυγής ειδικά, μεγάλες διαστάσεις πρίσματος δεν είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα ενώ με μείωση των διαστάσεων αυτών φτάσαμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Δηλαδή παράλληλα με το βάθος ταφής, ως απαραίτητη ενέργεια κρίνεται και η διερεύνηση των διαστάσεων του πρίσματος κατά την κατασκευή ενός φίλτρου. Επίσης διαπιστώθηκε πως τα φίλτρα δεν μπορούν να ανορθώσουν επιλεκτικά τις δομές που μας ενδιαφέρουν με συνέπεια παράπλευρες δομές όπως είναι οι αρόσεις να ενισχύονται επίσης. Η τελευταία διαπίστωση αποτελεί ένα επιπρόσθετο πεδίο έρευνας στα φίλτρα αντιστροφής, που αφορά στην αφαίρεση αυτών των πλευρικών επιδράσεων.

Ένα τελευταίο συμπέρασμα αφορά στο κατά πόσο είναι εφαρμόσιμη η μέθοδος σε δεδομένα, παρουσία ψευδών τιμών αλλά και παλμών. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό είναι πως είναι δυνατή.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι:

1. μεγάλη επίδραση στο αποτέλεσμα των φίλτρων αντιστροφής έχει το βάθος στο οποίο βρίσκεται το αρχικό πρίσμα καθώς και οι διαστάσεις του σε σχέση με τις

- υπό έρευνα δομές. Αν η εκτίμηση αυτών είναι σωστή, τότε η επίδραση αυτή κρίνεται θετική
2. μικρή έως αμελητέα επίδραση έχει ο προσανατολισμός του αρχικού πρίσματος ενός φίλτρου καθώς και τα χαμηλά ποσοστά θορύβου
 3. ουδέτερη επίδραση στην εφαρμογή της μεθόδου έχει η παρουσία ψευδών τιμών και παλμών, ενώ μέτρια αρνητική, αλλά αυξανόμενη με την πολυπλοκότητα των δομών επίδραση έχει ένα υψηλό ποσοστό σε θόρυβο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

I. Κώδικας FORTRAN εφαρμογής φίλτρων αντιστροφής

```

C*****
C**** PROGRAM TO COMPUTE INVERSE SPACE DOMAIN FILTERS
C**** FOR DUAL COIL MAGNETIC PROSPECTING
C****
C**** Input:   By a terminal keyboard
C**** Output:  In a terminal screen or various files
C**** Subroutines:
C****      SHAPEF-Compute the shape function
C****      APPLY -Apply an inverse filter on data
C****      GAUSSJ-User supplied subroutine for the inversion
C****            of ALPHA matrix and the calculation of the
C****            inverse filter coefficients. Vector RR contains
C****            the 'SHAPE' function coefficients when it is
C****            introduced in this subroutine but it is
C****            destroyed during the subroutine's execution
C****            and the inverse filter coefficients are stored
C****
C**** The coordinate system used should be that of the data measurements
C**** Z-axis is always pointing Down
C**** We choose X-axis(Ox) to look Northwards and Y-axis(Oy) to look Eastwards
C**** The magnetic North can form an angle with X-axis (referred as declination)
C****
C**** When more than one prism's are introduced in the calculation of the
C**** 'SHAPE' function the first one is positioned at the origin of the
C**** coordinate system
C*****
C**** Matrix dimensions are introduced via parameter statements
C****
C**** NM=Maximum filter length (also in subroutines GAUSSJ and APPLY)
C**** NSM=Maximum length for Shape function estimation
C**** NGM=Maximum length of grid points (only in subroutine APPLY)

PARAMETER (NM=11,NSM=21)
PARAMETER (N2M=NM*NM,NAM=2*NM-1)
DOUBLE PRECISION SF1(NSM,NSM),SF2(NSM,NSM),SF(NSM,NSM),
2AUTO(NAM,NM),RR(N2M,1),ALPHA(N2M,N2M)
CHARACTER FLAUTO*50,FLAUTO1*50,ANSWER*1
DRAD=3.1415926/180.000

10 WRITE(*,*) ' Select the desired application'
WRITE(*,*) ' 1. Create and apply an inverse filter'
WRITE(*,*) ' 2. Apply an already made inverse filter'
WRITE(*,*) ' 3. Exit'
WRITE(*,*) '      SELECTION :',\))
READ(*,*) ISEL
IF (ISEL.GT.3.OR.ISEL.LT.1) GO TO 10
IF (ISEL.EQ.3) STOP

C**** Apply an already made filter
IF (ISEL.EQ.2) THEN
WRITE(*,107) NM
107 FORMAT(10X,' Give the length of the inverse filter (= < ',I2,')',/,
1 10X,' (Must be an odd number)')

```

```

READ(*,*) LAT
LAAT=(LAT-1)/2
WRITE(*,*) ' Read filter coefficients from a file?(Y/N)'
READ(*,101) ANSWER
101 FORMAT(A)
IF (ANSWER.EQ.'Y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') THEN
WRITE(*,*) 'Give filename for inverse filter'
READ(*,101) FLAUTO
ELSE
FLAUTO='CON'
WRITE(*,*) ' Give inverse filter"s indeces and coefficients'
ENDIF
OPEN(10,FILE=FLAUTO,STATUS='OLD')
DO 11 I=1,LAT*LAT
READ(10,*) JJ,KK,RI
MM=JJ+1+LAAT+(KK+LAAT)*LAT
11 RR(MM,1)=RI
CALL APPLY(RR,LAAT)
GO TO 10
ENDIF

C**** Create a new filter
C**** Input of standard characteristics of the computation
2005 WRITE(*,*) ' Give the sampling interval'
READ(*,*) DX

WRITE(*,102) NSM
102 FORMAT(10X,' Give desirable length for the computation ',/,
1 10X,' of the "Shape" function only (=< ',I2,')',/,
2 10X,' (Must be an odd number)')
READ(*,*) LSF
LASF=(LSF-1)/2

WRITE(*,103) NM
103 FORMAT(10X,' Give desirable length for the computation ',/,
1 10X,' of the inverse filter (=< ',I2,')',/,
2 10X,' (Must be an odd number)')
READ(*,*) LAT

C**** Increase value for the computation of the autocorrelation function
C**** since it is calculated at twice as much points as the inverse filter
LAT=2*LAT-1
LAAT2=(LAT-1)/2

C**** Zero shape functions, prism number and first prism's position (in grid units)
DO I=1,LSF
DO J=1,LSF
SF1(I,J)=0.0
SF2(I,J)=0.0
SF(I,J)=0.0
IBLOCK=0
RELX=0.000
RELY=0.000
END DO
END DO

```

C**** Explain the reference coordinates system

```
WRITE(*,*) ' The coordinate system used should be the same'
WRITE(*,*) ' with the one used in the data grid'
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) ' X-axis is considered to look "Northwards"'
WRITE(*,*) ' Y-axis is considered to look "Eastwards"'
WRITE(*,*) ' Z-axis is going Downwards'
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) ' The declination of the magnetic field'
WRITE(*,*) ' is counted clockwise from X-axis'
WRITE(*,*) ' Please give the declination and inclination'
WRITE(*,*) ' of the magnetic field (in degrees)'
READ(*,*) D,GI
```

C**** Read in prism's features

```
12 WRITE(*,*) ' Please give prism clockwise rotation (in degrees)'
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) ' Prism"s rotation is considered to be the angle'
WRITE(*,*) ' of the prism"s dipping side with X-axis'
READ(*,*) DR
WRITE(*,*) ' Please give prism"s dipping length'
READ(*,*) GL
WRITE(*,*) ' Please give prism"s width and length'
WRITE(*,*) ' '
WRITE(*,*) ' Prism"s length is the length of its upper '
WRITE(*,*) ' rectangular side in the direction of its dipping'
READ(*,*) Y,THICK
Y=Y/2.
WRITE(*,*) ' Give the prism"s dipping angle'
READ(*,*) THETA
WRITE(*,*) ' Give number of small plates consisting the prism'
WRITE(*,*) ' (Must be an odd number)'
READ(*,*) NS
```

C**** Two different coil heights result in two different burial depths for

C**** the prism accordingly to each coil

```
WRITE(*,*) ' Give the prism s burial depth from the upper coil'
READ(*,*) H1
WRITE(*,*) ' Give the prism s burial depth from the lower coil'
READ(*,*) H2
```

```
IBLOCK=IBLOCK+1
THETA=THETA*DRAD
IF (IBLOCK.GT.1.0) GO TO 3000
GI=GI*DRAD
D=(90.+DR-D)*DRAD
DR=DR*DRAD
```

```
3000 WRITE(*,104)IBLOCK,D,GI,H1,H2,GL,Y,THICK,THETA,NS
```

C

```
104 FORMAT(' BLOCK NUMBER           = ',I3/
1 ' DECLINATION           = ',D13.6/
2 ' INCLINATION           = ',D13.6/
3 ' BURIAL DEPTH FROM UPPER COIL = ',D13.6/
4 ' BURIAL DEPTH FROM LOWER COIL = ',D13.6/
5 ' DEPTH EXTEND           = ',D13.6/
6 ' BLOCK HALF WIDTH (E-W)      = ',D13.6/
```

```

7  ' BLOCK THICKNESS (S-N)      = ',D13.6/
8  ' PLATE DIP                  = ',D13.6/
9  ' NUMBER OF SMALL PLATES    = ',I6)

C*****
C
C===== COMPUTE SHAPE FUNCTION =====
C
C*****

C**** Calling of subroutine SHAPEF twice for each burial depth H1 and H2
C**** A. Burial depth accordingly to the upper coil (H1)
      CALL SHAPEF(SF1,H1,THICK,NS,GI,D,THETA,LSF,LASF,RELX,RELY,
+DR,Y,GL,DX)
C**** B. For burial depth accordingly to the lower coil (H2)
      CALL SHAPEF(SF2,H2,THICK,NS,GI,D,THETA,LSF,LASF,RELX,RELY,
+DR,Y,GL,DX)

C**** Case of adding another prism
      WRITE(*,*) 'Do you want to add another prism?(Y/N)'
      READ(*,101) ANSWER
      IF (ANSWER.EQ.'y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') THEN
        WRITE(*,*) 'Give the position of the new prism '
        WRITE(*,*) 'in X-axis and Y-axis directions '
        WRITE(*,*) 'in sampling interval units'
        WRITE(*,*) '(Relative to the first prism) e.g. 0.75 1.32'
        READ(*,*) RELX,RELY
        GO TO 12
      ENDIF

105 FORMAT(1X,I3,3X,I3,3X,F15.7)

C**** Subtraction of the two shape functions
      DO I=1,LSF
        DO J=1,LSF
          SF(I,J)=COS(GI)*(SF2(I,J)-SF1(I,J))
        END DO
      END DO

      WRITE(*,*) 'Do you want to keep the shape function?(Y/N)'
      READ(*,101) ANSWER
      IF (ANSWER.EQ.'y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') THEN
        WRITE(*,*) 'Give filename for differential shape function'
        WRITE(*,*) 'Data will be written in X and Y axis configuration!!!'
        READ(*,101) FLAUTO
        OPEN(7,FILE=FLAUTO,STATUS='NEW')
        DO 4 J=-LASF,LASF
          DO 4 I=-LASF,LASF
            SF11=SF(I+LASF+1,J+LASF+1)
4      WRITE(7,105) I,J,SF11
        CLOSE(7)
      ENDIF

C*****
C

```

C===== COMPUTE AUTOCORRELATION FUNCTION
=====

C

C*****

C**** Compute AUTO(K,L) only for L>=0

DO 5 K=1,LAT

DO 5 L=1,LAAT2+1

KT=K-LAAT2-1

LT=L-1

AUTO(K,L)=0.000

DO 5 I=1,LSF

IF(KT.LT.1-I.OR.KT.GT.LSF-I) GO TO 5

DO 9 J=1,LSF-LT

9 AUTO(K,L)=AUTO(K,L)+SF(I+KT,J+LT)*SF(I,J)

5 CONTINUE

WRITE(*,*)'Do you want to keep the autocorrelation function?(Y/N)'

READ(*,101) ANSWER

IF (ANSWER.EQ.'y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') THEN

WRITE(*,*) 'Give filename for autocorrelation function'

READ(*,101) FLAUTO

OPEN(8,FILE=FLAUTO,STATUS='NEW')

DO 6 I=1,LAT

DO 6 J=1,LAAT2+1

II=I-LAAT2-1

JJ=J-1

AUTO1=SNGL(AUTO(I,J))

IF (JJ.EQ.0) GO TO 6

WRITE(8,105) -II,-JJ,AUTO1

6 WRITE(8,105) II,JJ,AUTO1

CLOSE(8)

ENDIF

C**** Restore old value of LAT

LAT=(LAT+1)/2

LAAT=(LAT-1)/2

LAT2=LAT*LAT

C**** Constract "new" autocorrelation matrix and shape function vector

C**** Make necessary index arrangements

DO 7 NN=1,LAT2

LL=-LAAT+(NN-1)/LAT

KK=NN-1-LAAT-(LL+LAAT)*LAT

RR(NN,1)=SF(LASF+1-KK,LASF+1-LL)

DO 7 MM=1,LAT2

JJ=-LAAT+(MM-1)/LAT

II=MM-1-LAAT-(JJ+LAAT)*LAT

KI=KK-II

LJ=LL-JJ

C**** Replace AUTO(K,L) with AUTO(-K,-L) in case L<0

IF (LJ.LT.0) THEN

LJ=-LJ

KI=-KI

ENDIF

7 ALPHA(NN,MM)=AUTO(LAAT2+1+KI,LJ+1)

CALL GAUSSJ(ALPHA,LAT2,N2M,RR,1,1)

```

WRITE(*,*) 'Do you want to keep the inverse filter?(Y/N)'
READ(*,101) ANSWER
IF (ANSWER.EQ.'y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') THEN
WRITE(*,*) 'Give filename for the inverse filter'
READ(*,101) FLAUTO
OPEN(9,FILE=FLAUTO,STATUS='NEW')
DO 8 MM=1,LAT2
JJ=-LAAT+(MM-1)/LAT
II=MM-1-LAAT-(JJ+LAAT)*LAT
8 WRITE(9,105) II,JJ,RR(MM,1)
CLOSE(9)
ENDIF
WRITE(*,*) 'Do you want to apply the inverse filter on data?(Y/N)'
READ(*,101) ANSWER
IF (ANSWER.EQ.'y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') THEN
CALL APPLY(RR,LAAT)
ENDIF
GO TO 10
END

C*****
SUBROUTINE SHAPEF(SF,H,THICK,NS,GI,D,THETA,LSF,LASF,RELX,RELY,
+DR,Y,GL,DX)
C-----
PARAMETER (NM=11,NSM=21)
DOUBLE PRECISION SF(NSM,NSM)

S=THICK/NS
BBB=SQRT(SIN(GI)**2+(COS(GI)**2)*SIN(D)**2)
CCC=BBB
B=ATAN(TAN(GI)/SIN(D))
C=B
A=B+C-THETA

DO 2 KK=1,NS
C**** Plate number in respect to the central plate
KKK=KK-(NS+1)/2
DO 2 IX=1,LSF
DO 2 IY=1,LSF
C**** Define X and Y position for each point
IXX=IX-1-LASF-RELX
IYY=IY-1-LASF-RELY
DXX=(IXX*COS(DR)+IYY*SIN(DR))*DX-KKK*S
DYY=(-IXX*SIN(DR)+IYY*COS(DR))*DX
C**** Quantities required for calculations (see McGrath and Hood, 1973)
CC2=(DXX-GL*COS(THETA))**2+(H+GL*SIN(THETA))**2
EE2=DXX**2+H**2
BB=DXX*SIN(THETA)+H*COS(THETA)
AA=H*SIN(THETA)-DXX*COS(THETA)
3 T1=((DYY+Y)/SQRT(CC2+(DYY+Y)**2))*((DXX-GL*COS(THETA))*COS(A)-(H+
+ GL*SIN(THETA))*SIN(A))/CC2
T2=((DYY+Y)/SQRT(EE2+(DYY+Y)**2))*(DXX*COS(A)-H*SIN(A))/EE2
T3=((AA+GL)/SQRT(CC2+(DYY+Y)**2)-AA/SQRT(EE2+(DYY+Y)**2))/(BB**2+
+ (DYY+Y)**2)
T4=(COS(A)*COS(THETA)-COS(B)*COS(C)+COS(B)*COS(C)/(TAN(D)**2))*
+ (DYY+Y)

```

```

T5=(COS(C)*SIN(THETA-B)/TAN(D)+COS(B)*COS(THETA-C)/TAN(D))*BB
T6=COS(C)*COS(THETA-B)/TAN(D)+COS(B)*COS(THETA-C)/TAN(D)
T7=1.000/SQRT(CC2+(DYY+Y)**2)-1.000/SQRT(EE2+(DYY+Y)**2)
FG1=T1-T2-T3*(T4+T5)-T6*T7
Y=-Y
IF (Y.GT.0.0) SF(IX,IY)=S*BBB*CCC*(FG-FG1)+SF(IX,IY)
FG=FG1
IF (Y.LT.0.0) GO TO 3
2 CONTINUE
  RETURN
  END

C*****
SUBROUTINE APPLY(RR,LT)
C**** NGM=Maximum length of grid points
PARAMETER (NM=11,N2M=NM*NM,NGM=121,NGMM=NGM+NM-1)
DOUBLE PRECISION RR(N2M,1),F(NGMM,NGMM),RES(NGM,NGM)
CHARACTER FLAUTO*50,ANSWER*1
11 WRITE(*,*) ' Give filename of data file'
  READ(*,101) FLAUTO
101 FORMAT(A)
  OPEN(3,FILE=FLAUTO,STATUS='OLD')
  WRITE(*,*) ' Give filename of output file'
  READ(*,101) FLAUTO
  OPEN(6,FILE=FLAUTO,STATUS='NEW')
1 WRITE(*,*) ' Give the format of the data file'
  WRITE(*,*) ' 1. -xOx & -yOy'
  WRITE(*,*) ' 2. -yOy & -xOx'
  WRITE(*,*) ' SELECTION :",\)'
  READ(*,*) ISLD
  IF (ISLD.NE.1.AND.ISLD.NE.2) GO TO 1
2 WRITE(*,*) ' 1. File contains X,Y(indexes) & T(anomaly) values'
  WRITE(*,*) ' 2. File contains only T(anomaly) values'
  WRITE(*,*) ' SELECTION :",\)'
  READ(*,*) ISLF
  IF (ISLD.NE.1.AND.ISLD.NE.2) GO TO 2
  WRITE(*,*) ' Give number of grid points on the Ox and Oy Axis'
  READ(*,*) NY,NX

C**** Read in data file
IF (ISLD.EQ.1) THEN
  DO 3 I=LT+1,NY+LT
    DO 3 J=LT+1,NX+LT
      IF (ISLF.EQ.1) READ(3,*) IX,IY,F(I,J)
      IF (ISLF.EQ.2) READ(3,*) F(I,J)
3 CONTINUE
  ELSE
    DO 4 J=LT+1,NX+LT
      DO 4 I=LT+1,NY+LT
        IF (ISLF.EQ.1) READ(3,*) IX,IY,F(I,J)
        IF (ISLF.EQ.2) READ(3,*) F(I,J)
4 CONTINUE
  END IF
  CLOSE(3)

C**** Expansion of data matrix

```

```

DO 7 I=1,LT
DO 5 J=LT+1,NX+LT
F(I,J)=F(LT+1,J)
5 F(I+NY+LT,J)=F(NY+LT,J)
DO 6 J=1,LT
F(I,J)=F(LT+1,LT+1)
F(I,J+NX+LT)=F(LT+1,NX+LT)
F(I+NY+LT,J)=F(NY+LT,LT+1)
6 F(I+NY+LT,J+NX+LT)=F(NY+LT,NX+LT)
7 CONTINUE
DO 8 I=LT+1,NY+LT
DO 8 J=1,LT
F(I,J)=F(I,LT+1)
8 F(I,J+NX+LT)=F(I,NX+LT)
C**** Perform the convolution
WRITE(*,*) ' Please give the starting point of your data'
WRITE(*,*) ' For example 0 0 or 1 1'
READ(*,*) OX,OY
DO 9 J=1,NX
DO 9 I=1,NY
RES(I,J)=0.0
DO 10 L=-LT,LT
DO 10 M=-LT,LT
IL=I-L+LT
JM=J-M+LT
NN=L+1+LT+(M+LT)*(2*LT+1)
10 RES(I,J)=RES(I,J)+F(IL,JM)*RR(NN,1)
9 WRITE(6,102) (J-1.0+OY),(I-1.0+OX),RES(I,J)
102 FORMAT(1X,F6.2,3X,F6.2,3X,F15.7)
CLOSE(6)
CLOSE(3)
WRITE(*,103)
103 FORMAT(' The output file is written in -xOx & -yOy configuration')
WRITE(*,*) 'Do you want to apply the filter on other data?(Y/N)'
READ(*,101) ANSWER
IF (ANSWER.EQ.'Y'.OR.ANSWER.EQ.'Y') GO TO 11
RETURN
END

```

II. Κώδικας διάσπασης και συγκόλλησης καννάβου 40x40

```

C*****
C***** PROGRAM TO SPLIT A 40x40 GRID INTO FOUR 21x21 GRIDS *****
C***** AND TO JOIN FOUR 21x21 GRIDS INTO ONE 40x40 *****
C*****-----Grid_Splitter&Joiner.exe-----*****
C***** When grids are split into 21x21 they can be used by *****
C***** the major inversion program and then be rejoined to *****
C***** create a homogeneous image *****
C***** Input file coordinate system before splitting is *****
C***** -xOx, -yOy and -yOy, -xOx when rejoining is intended *****
C***** All output files in -xOx, -yOy configuration *****
C*****
PARAMETER NGP=40,NGPS=21
DIMENSION A(NGP**2),A1(NGPS**2),A2(NGPS**2),A3(NGPS**2),A4(NGPS**2
+)
CHARACTER FDATA*50,FDAT1*50,FDAT2*50,FDAT3*50,FDAT4*50,ANS*1

```

```

50  WRITE(*,*) 'Choose the desired action:'
    WRITE(*,*) '1. Split a grid in four parts'
    WRITE(*,*) '2. Join four parts in one grid'
    WRITE(*,*) '3. Exit'
    READ(*,*) ACT

    IF (ACT.EQ.1) GO TO 100
    IF (ACT.EQ.2) GO TO 200
    IF (ACT.EQ.3) GO TO 300
C*****
C***** Grid splitting part *****
C*****
100  WRITE(*,*) 'Give filename for data'
    READ(*,*) FDATA
    OPEN(1,FILE=FDATA,STATUS='OLD')

    WRITE(*,*) 'Give the number of grid points along the X or Y axis'
    READ(*,*) ND

    DO i=1,ND*ND
    READ(1,*) IX,IY,A(i)
    END DO

    ND=(ND/2)+1

    DO i=1,ND
    DO j=1,ND
    A1(j+ND*(i-1))=A(j+2*(ND-1)*(i-1))
    END DO
    END DO

    DO i=1,ND
    DO j=1,ND
    A2(j+ND*(i-1))=A((ND-2)+j+2*(ND-1)*(i-1))
    END DO
    END DO

    DO i=1,ND
    DO j=1,ND
    A3(j+ND*(i-1))=A(2*((ND-1)**2)-ND+j+2*(ND-1)*(i-1))
    END DO
    END DO

    DO i=1,ND
    DO j=1,ND
    A4(j+ND*(i-1))=A(2*((ND-1)**2)-2*(ND-1)+j+2*(ND-1)*(i-1))
    END DO
    END DO

    CLOSE (1)

    WRITE(*,*) 'Data will be split in 4 parts in a counter-clockwise'
    WRITE(*,*) 'manner beginning from the lower left part'
    WRITE(*,*) 'Please give the filename for first part'
    READ(*,*) FDAT1

```

```

WRITE(*,*) 'Please give the filename for second part'
READ(*,*) FDAT2
WRITE(*,*) 'Please give the filename for third part'
READ(*,*) FDAT3
WRITE(*,*) 'Please give the filename for fourth part'
READ(*,*) FDAT4

OPEN(2,FILE=FDAT1,STATUS='NEW')
OPEN(3,FILE=FDAT2,STATUS='NEW')
OPEN(4,FILE=FDAT3,STATUS='NEW')
OPEN(5,FILE=FDAT4,STATUS='NEW')

WRITE (*,*) 'Please give the starting point of your data'
WRITE (*,*) 'For example 0 0 or 1 1'
READ (*,*) OX,OY

DO i=1,ND
DO j=1,ND
WRITE(2,*) (j-1.0+OY),(i-1.0+OX),A1(ND*(i-1)+j)
WRITE(3,*) (j-1.0+OY),(i-1.0+OX),A2(ND*(i-1)+j)
WRITE(4,*) (j-1.0+OY),(i-1.0+OX),A3(ND*(i-1)+j)
WRITE(5,*) (j-1.0+OY),(i-1.0+OX),A4(ND*(i-1)+j)
END DO
END DO

CLOSE (2)
CLOSE (3)
CLOSE (4)
CLOSE (5)

WRITE(*,*) 'Do you wish to split another grid? (y/n)'
READ(*,*) ANS
IF (ANS.EQ.'y') GO TO 100
IF (ANS.EQ.'n') GO TO 50
C*****
C***** Grid joining part *****
C*****
200 WRITE(*,*) 'Please give filenames of the four sub-grids to join'
WRITE(*,*) 'Follow a counter-clockwise notation starting from'
WRITE(*,*) 'the lower left sub-grid'
READ(*,*) FDAT1
READ(*,*) FDAT2
READ(*,*) FDAT3
READ(*,*) FDAT4

OPEN(6,FILE=FDAT1,STATUS='OLD')
OPEN(7,FILE=FDAT2,STATUS='OLD')
OPEN(8,FILE=FDAT3,STATUS='OLD')
OPEN(9,FILE=FDAT4,STATUS='OLD')

WRITE(*,*) 'Please give the dimension of the new grid'
READ(*,*) NN
WRITE(*,*) 'Please give the dimension of the sub-grid'
READ(*,*) NS

```

```

DO i=1,NS*NS
READ(6,*) IX1,IY1,A1(i)
READ(7,*) IX2,IY2,A2(i)
READ(8,*) IX3,IY3,A3(i)
READ(9,*) IX4,IY4,A4(i)
END DO

DO i=1,NS
DO j=1,NS
A(j+2*(NS-1)*(i-1))=A1(j+NS*(i-1))
END DO
END DO

DO i=1,NS
DO j=1,NS-2
A(NS+j+2*(NS-1)*(i-1))=A2(j+2+NS*(i-1))
END DO
END DO

DO i=1,NS-2
DO j=1,NS
A(2*(NS-1)**2+2*(NS-1)+NS-2+j+2*(NS-1)*(i-1))=A3(2*NS+j+NS*(i-1))
END DO
END DO

DO i=1,NS-3
DO j=1,NS-2
A(2*((NS-1)**2)+2*(NS-1)+j+2*(NS-1)*(i-1))=A4(2*NS+j+NS*(i-1))
END DO
END DO

CLOSE (6)
CLOSE (7)
CLOSE (8)
CLOSE (9)

WRITE(*,*) 'Please give filename for joined grid'
READ(*,*) FDATA

WRITE (*,*) 'Please give the starting point of your data'
WRITE (*,*) 'For example 0 0 or 1 1'
READ (*,*) OX,OY

OPEN(10,FILE=FDATA,STATUS='NEW')
DO i=1,NN
DO j=1,NN
WRITE(10,*) (j-1.0+OY),(i-1.0+OX),A(NN*(i-1)+j)
END DO
END DO

WRITE(*,*) 'Do you wish to join other sub-grids? (y/n)'
READ(*,*) ANS
IF (ANS.EQ.'y') GO TO 200
IF (ANS.EQ.'n') GO TO 50
STOP
END

```

300

III. Κώδικας αναδιάταξης γραμμών ενός αρχείου σε στήλες και τανάπαλιν

```
C*****
C**** PROGRAM TO REARRANGE ROWS TO COLUMNS AND THE OPPOSITE ****
C****-----Column2Row2Column.exe-----****
C****
C**** This program prepares grids to be rejoined with the ****
C**** Grid_splitter&joiner program ****
C*****
```

```
PARAMETER NGP=41
DIMENSION A(NGP**2),B(NGP**2),C(NGP**2),D(NGP**2)
CHARACTER FDATA*50

50 WRITE(*,*) 'Please choose the desired action:'
WRITE(*,*) '_____ '
WRITE(*,*) '1. Arrange column to rows'
WRITE(*,*) '_____ '
WRITE(*,*) 'North-South sampling pattern to the opposite'
WRITE(*,*) 'slow x - fast y change to the opposite'
WRITE(*,*) '_____ '
WRITE(*,*) '2. Arrange rows to columns'
WRITE(*,*) '_____ '
WRITE(*,*) 'West-East sampling pattern to the opposite'
WRITE(*,*) 'fast x - slow y change to the opposite'
WRITE(*,*) '_____ '
WRITE(*,*) '3. Exit'
WRITE(*,*) '_____ '
READ(*,*) ANS

IF (ANS.EQ.1) GOTO 100
IF (ANS.EQ.2) GOTO 200
IF (ANS.EQ.3) GOTO 300

100 WRITE(*,*) 'Give filename for data'
READ(*,*) FDATA
OPEN(1,FILE=FDATA,STATUS='OLD')

WRITE(*,*) 'Give the number of grid points along the X or Y axis'
READ(*,*) ND

DO i=1,ND*ND
READ(1,*) IX,IY,A(i)
END DO

DO i=1,ND
DO j=1,ND
B((i-1)*ND+j)=A((j-1)*ND+i)
END DO
END DO
CLOSE (1)

WRITE(*,*) 'Give filename for output file'
READ(*,*) FDATA
OPEN(2,FILE=FDATA,STATUS='NEW')
```

```

WRITE (*,*) 'Please give the starting point of your data'
WRITE (*,*) 'For example 0 0 or 1 1'
READ (*,*) OX,OY

DO i=1,ND
DO j=1,ND
WRITE(2,*) (j-1.0+OY),(i-1.0+OX),B(ND*(i-1)+j)
END DO
END DO
CLOSE (2)
WRITE(*,*) 'Your data has been saved successfully'
WRITE(*,*) ' '

GO TO 50

200 WRITE(*,*) 'Give filename for data'
READ(*,*) FDATA
OPEN(3,FILE=FDATA,STATUS='OLD')

WRITE(*,*) 'Give the number of grid points along the X or Y axis'
READ(*,*) NN

DO i=1,NN*NN
READ(3,*) IX,IY,C(i)
END DO

DO i=1,NN
DO j=1,NN
D((i-1)*NN+j)=C((j-1)*NN+i)
END DO
END DO

CLOSE (3)

WRITE(*,*) 'Give filename for output file'
READ(*,*) FDATA
OPEN(4,FILE=FDATA,STATUS='NEW')

WRITE (*,*) 'Please give the starting point of your data'
WRITE (*,*) 'For example 0 0 or 1 1'
READ (*,*) OX,OY

DO i=1,NN
DO j=1,NN
WRITE(4,*) (i-1.0+OY),(j-1.0+OX),D(NN*(i-1)+j)
END DO
END DO

CLOSE (4)
WRITE(*,*) 'Your data has been saved successfully'
WRITE(*,*) ' '
GO TO 50

300 STOP
END

```

Βιβλιογραφία

- Παπαζάχος Β. 1986**, *Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 1996
- Baranov V. & Naudy H. 1964**, *Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole*, *Geophysics* 29, 67-69
- Bhattacharrya B.K. 1966**, *Continuous spectrum of the total field anomaly due to a rectangular prismatic body*, *Geophysics*, v.31, no. 1, p. 97-121
- Bhattacharrya B.K. & Chan K.C. 1977**, *Computation of gravity and magnetic anomalies due to inhomogeneous distribution of magnetization and density in a localized region*, *Geophysics* 42, 602-609
- Bhattacharrya B.K. & Navolio M.D. 1975**, *Digital convolution for computing bodies*, *Geophysics*, v. 40, no. 6, p. 981-992
- Blakely 1994 R.J.**, *Potential theory in Gravity & Magnetic applications*, Cambridge University Press (1994)
- Bott M.H.P. & Hutton M.A. 1970**, *Limitations on the resolution possible in the direct interpretation of marine magnetic anomalies*, *Earth and Planetary Science Letters* 8, 317-19
- Colani C. & Aitken M.J., 1966**, *Utilization of Magnetic Viscosity Effects in Soils for Archaeological Prospection*, *Nature* 212, 1446-1447
- Cordell L. & McCafferty A.E. 1989**, *A terracing operator fro physical property mapping with potential field data*, *Geophysics* 54, 621-34
- Dalan R.A. & Banerjee S.K. 1998**, *Solving archaeological problems using techniques of soil magnetism*, *Geoarchaeology*, vol. 13, no. 1, 3-36 (1998), © John Wiley & Sons
- Dalan R.A. & Banerjee S.K. 1996**, *Soil Magnetism, an Approach for Examining Archaeological Landscapes*, *Geophysical Research Letters* 23, 185-188
- Fassbinder J.W.E. & Stanjek H., 1993**, *Occurrence of Bacterial Magnetite in Soils from Archaeological Sites*, *Archaeologia Polona* 31, 117-128
- Fluxgate gradiometer FM256**, *Instruction manual version 1.2*, Geoscan Research 2003
- Grant F.S. & West G.F., 1965**, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*, McGraw-Hill Book Company
- Hansen R.O. & Simmonds M. 1993**, *Multiple-source Werner deconvolution*, *Geophysics* 58, 792-800
- Hartman R.R., Teskey D.J. & Friedberg J.L. 1971**, *A system for rapid digital aeromagnetic interpretation*, *Geophysics* 36, 891-918
- Hunt C.P., Moskowitz B.M. & Banerjee S.K. 1995b**, *Magnetic properties of Rocks and Minerals*, In T.J. Ahrens, Ed. *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook Of Physical Constants* pp. 189-204. AGU Reference Shelf 3. Washington, D.C.: American Geophysical Union
- Jain S. 1976**, *An automatic method of direct interpretation of magnetic profiles*, *Geophysics* 41, 531-541
- Jakosky J. 1950**, *Exploration Geophysics*, Los Angeles, Trija Publishing Comp.
- Kanasewich E.R. 1981**, *Time sequence analysis in Geophysics*, Univ. Alberta Press, Edmonton, 364 p.
- Karousova O. & Karous M. 1989**, *Deconvolution of ΔT profile curves*: Presented at the International Symposium on computer applications and quantitative methods in archaeology: Univ. of York and York Archaeological Authorities, U.K.

- Ku C.C. & Sharp J.A. 1983**, *Werner deconvolution for automated magnetic interpretation and its refinement using Marquardt's inverse modeling*, Geophysics 48, 754-74
- Logacev A.A. & Zacharov V.P. 1973**, *Magnetic prospecting*, Moscow
- Marmet E., Bina M., Fedoroff N. & Tabbagh A. 1999**, *Relationships between human activity and the magnetic properties of soils: a case study in the Medieval Site of Roissy-en-France*, Archaeological Prospection, Archaeol. Prospect. 6, 161-170 (1999)
- McGrath P.H. & Hood P.J. 1973**, *An automatic least-squares multimodel method for magnetic interpretation*, Geophysics v. 38, no. 2, p. 349-358
- Morse P.M. & Feshbach H. 1953**, *Methods of Theoretical Physics*, McGraw-Hill, New York
- Nabighian M.N. 1972**, *The analytical signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation*, Geophysics 37, 507-17
- Nettleton L.L. 1971**, *Elementary Gravity and Magnetism for Geologists and Seismologists*, Tulsa Oklahoma, Society of Exploration Geophysics
- Papazachos C.B. & Tsokas G.N. 1992**, *A Fortran program for the computation of 2-dimensional inverse filters in magnetic prospecting*, Computers & Geosciences Vol. 19, No. 5 pp. 705-715, (1993)
- Rapp G., Jr. & Gifford J.A. 1985**, *Archaeological geology*, Yale University (1985)
- Ravat D. 1994**, *Use of fractal dimension to determine the applicability of Euler's homogeneity equation for finding source locations of gravity and magnetic anomalies*, In Proceedings of the Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Boston, Massachusetts, March 1994 1, 41-53; Environmental and Engineering Geophysical Society, Englewood CO
- Reid A.B., Allsop J.M., Granser H., Millett A.J. & Somerton I.W. 1990**, *Magnetic interpretation in three dimensions using the Euler deconvolution*, Geophysics 55, 80-91
- Scollar I., Weidner B. & Segeth K. 1986**, *Display of archaeological magnetic data*, Geophysics 51, 623-633
- Steenland N.C. 1968**, *Discussion on "The geomagnetic gradiometer" by H.A. Slack, V.M. Lynch & L. Langan (Geophysics, October 1967, pp. 877-992)*, Geophysics 33, 680-3
- Talwani M. 1965**, *Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape*, Geophysics 30, 797-817
- Tite M.S. & Mullins C.E. 1971**, *Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites*, Archaeometry 13, 209-219.
- Tsokas G.N. & Hansen O. 1995**, *A comparison of inverse filtering and multiple source Werner deconvolution for model archaeological problems*, Archaeometry 37,1 (1995)
- Tsokas G.N. & Papazachos C.B. 1992**, *Two-dimensional inversion filters in magnetic prospecting: application to the exploration of buried antiquities*, Geophysics Vol. 57 No. 8 (August 1992)
- Tsokas G.N. & Papazachos C.B. 1990**, *The applicability of two-dimensional inversion filters in magnetic prospecting for buried antiquities*, in Vogel A., Sarwar A.K.M., Gorenfio R. & Kounchev O.I. (Eds.) 1990, *Theory and practice of geophysical data inversion*, Proceedings of the 8th International Mathematical Geophysics Seminar on model optimization in exploration Geophysics (1990), Vieweg Verlag, Wiesbaden, p. 121-144

- Tsokas G.N., Papazachos C.B., Loucoyiannakis M.Z. & Karousova O. 1991,** *Inversion filters for the transformation of geophysical data from archaeological sites based on the vertical sided finite prism model:* *Archaeometry*, 33, 215-230
- Vogel A. & Tsokas G.N. 1993,** *Geophysical exploration of archaeological sites: An investigation of the effectiveness of inverse filtering in the Geophysical search for archaeological sites*, Series: Theory and practice of applied geophysics edited by Andreas Vogel, Vol. 7, Vieweg Publishing, Braunschweig/Wiesbaden (1993)
- Wang X. & Hansen R.O. 1990,** *Inversion for magnetic anomalies of arbitrary three-dimensional bodies*, *Geophysics* 55, 1321-26
- Werner S. 1953,** *Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies*, *Sveriges Geologiska Undersok, Arsbok* 43, no. 6, series C, no. 508
- Wynn J.C. 1986,** *Archaeological prospection: an introduction to the special issue*, *Geophysics* 51, 533-37