

**ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



***ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ
ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΣΤΑ
ΚΟΥΚΛΙΑ ΠΑΦΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ.***

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΚΑΛΙΑ
ΞΕΝΟΦΩΝΤΟΣ ΞΕΝΙΟΣ**

**Υπεύθυνος Καθηγητής
Παπαδόπουλος Ηλίας**

**TECHNOLOGICAL INSTITUTE OF CRETE
DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT**



**Analysis and interpretation of geophysical data from the
Kouklia Pafou, Cyprus.**

KALIA CONSTANTINOU

XENOFONTOS XENIOS

Responsible Professor
Papadopoulos Ilias

Ευχαριστίες:

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε όλους εκείνους που συνέβαλλαν να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη προσπάθεια. Ευχαριστούμε καταρχήν τον κύριο Δρ. Σαρρή Απόστολο και την Σεφέρου Παρασκευή ,για τη συμμετοχή μας στο ερευνητικό πρόγραμμα γεωφυσικών διασκοπίσεων που διεξήχθησαν στον αρχαιολογικό χώρο στα Κούκλια Πάφου στην Κύπρο, για την παραχώρηση των δεδομένων από τις διασκοπίσεις αυτές, καθώς επίσης και για το πολύτιμο γραφικό υλικό το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην εργασία μας. Επιπλέον, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον κ. Παπαδόπουλο Ηλία για το φιλικό κλίμα συνεργασίας καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας, καθώς επίσης και για την πολύτιμη συνεισφορά της. Ολοκληρώνοντας ευχαριστούμε την εξεταστική επιτροπή για το χρόνο που μας διέθεσε.

Περίληψη:

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η παρουσίαση της επεξεργασίας και των αποτελεσμάτων της από την γεωφυσική διασκόπιση στον αρχαιολογικό χώρο στα Κούκλια Πάφου, που βρίσκεται ανατολικά της Κύπρου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήσαμε είναι η μαγνητική μέθοδος, ηλεκτρική μέθοδος και μέθοδος με radar. Η περιοχή αυτή αποτελεί αντικείμενο μελέτης για τους αρχαιολόγους. Ταυτόχρονα με την παρουσίαση της επεξεργασίας εντοπίζονται και οι κύριες πηγές θορύβου για την χαρτογράφηση στην συγκεκριμένη περιοχή.

Abstract

The purpose of this thesis is to present the results from the geophysical measurements taken at the Kouklia Pafou, cyprus. Methods used are electric, magnetic and georadar. The area is also a research study for the archaeologists. Same time, main noise sources are presented during the cartography in this area.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΧΩΡΟ ΣΤΑ ΚΟΥΚΛΙΑ	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Ιστορία για τα Κούκλια	6
2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ.....	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.1.1 Μαγνητική μέθοδος.....	10
2.1.2 Περιγραφή της μαγνητικής μεθόδου.....	10
2.1.3 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη.....	11
2.1.4 Γεωμαγνητισμός.....	12
2.1.5 Οργάνωση επίγειων μετρήσεων.....	13
2.1.6 Ερμηνεία μαγνητικών ανωμαλιών.....	14
2.2 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	15
2.2.1 Περιγραφή ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου.....	15
2.2.2 Θεμελιώδεις ηλεκτρομαγνητικές αρχές.....	16
2.3 Ηλεκτρική μέθοδος.....	17
2.3.1 Περιγραφή της ηλεκτρικής μεθόδου.....	17
2.3.2 Θεμελιώδη ηλεκτρικά μεγέθη.....	18
2.3.3 Μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης.....	19
2.3.4 Αρχή μεθόδου.....	20
2.3.5 Όργανα μετρήσεων.....	24
2.4 Μέθοδος με radar.....	25
2.5 Τα όργανα της γεωφυσικής διασκόπησης.....	27
2.5.1 Αρχή λειτουργίας RM15.....	28
2.5.2 Μαγνητόμετρο G-601.....	29
2.5.3 Noge radar.....	31
3 Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΑ ΚΟΥΚΛΙΑ ΚΑΙ Η	
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	36
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Επεξεργασία των γεωφυσικών μετρήσεων.....	36
3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων της γεωφυσικής επεξεργασίας.....	38
3.4 Φίλτρα.....	39
3.4.1 Εισαγωγή.....	39
3.4.2 Ερμηνεία φίλτρων.....	39
4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	42
4.1 Η γεωφυσική έρευνα.....	42
4.2 Ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων με την βοήθεια του GIS.....	42

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΥΚΛΙΑ ΤΗΣ ΠΑΦΟΥ

Κούκλια ένα χωριό με ιστορία...

Τα Κούκλια είναι χωριό της επαρχίας Πάφου και απέχει 16 περίπου χιλιόμετρα από την πόλη της Πάφου. Είναι κτισμένο σε μέσο υψόμετρο 85 μέτρων, στην παράκτια πεδιάδα της Πάφου, βόρεια του κεντρικού αυτοκινητόδρομου Λεμεσού – Πάφου, όπου κατά τη μυθολογία αναδύθηκε η θεά της ομορφιάς και του έρωτα, Αφροδίτη.

Τα Κούκλια δέχονται μια μέση ετήσια βροχόπτωση γύρω στα 420 χιλιοστόμετρα και πάνω στη εύφορη περιοχή τους καλλιεργούνται αμπέλια (οινοποιήσιμες και επιτραπέζιες ποικιλίες), μπανάνες, όλων των ειδών τα εσπεριδοειδή, τα αβοκάτο, βερούκοκκο, ακτινίδια, ελιές, χαρουπιές, όσπρια, φυστίκια και μεγάλη ποικιλία λαχανικών. Μέσα στα διοικητικά του όρια βρίσκεται και το δάσος Ραντί στα νοτιοανατολικά καθώς επίσης και μέρος του δάσους Ορείτες στα βορειοανατολικά.

Η κτηνοτροφία στην κοινότητα είναι πάρα πολύ ανεπτυγμένη.

Η πολύ καλή γεωγραφική θέση του χωριού καθώς επίσης και οι προσοδοφόρες γεωργικές και κτηνοτροφικές εκμεταλλεύσεις είναι παράγοντες που βοήθησαν στην αξιόλογη πληθυσμιακή ανάπτυξη. Οι κάτοικοι των Κουκλιών το 1881 ανέρχονταν στους 404, που αυξήθηκαν στους 520 το 1921. Το 1946 οι κάτοικοι ανήλθαν στους 791 (437 ελληνοκύπριοι και 354 τουρκοκύπριοι) και το 1973 στους 1110 (613 ελληνοκύπριοι, 494 τουρκοκύπριοι και 3 άλλων εθνικοτήτων) Μετά την Τουρκική εισβολή του 1974 οι τουρκοκύπριοι κάτοικοι του χωριού εξαναγκάστηκαν από την ηγεσία τους να εγκαταλείψουν το χωριό τους και να μεταφερθούν μαζί με όλους του άλλους τουρκοκύπριους των ελεύθερων περιοχών, για εγκατάσταση στις κατεχόμενες περιοχές. Το 1976 οι κάτοικοι των Κουκλιών ήταν 732 που μειώθηκαν στους 681 το 1982. Στην απογραφή του 2001 οι κάτοικοι ήταν 669

Το χωριό βρίσκεται κτισμένο στην τοποθεσία όπου βρισκόταν η Παλαίπαφος, έδρα του βασιλείου της Πάφου, ενός από τα πιο σημαντικά αρχαία βασίλεια της Κύπρου.

Ολόκληρη η περιοχή της κοινότητας περιλαμβανομένου και του χώρου που βρίσκονται κτισμένα τα σημερινά σπίτια του χωριού, αποτελεί σημαντικότερο αρχαιολογικό χώρο. Έχουν γίνει κατά καιρούς ανασκαφές που έφεραν στην επιφάνεια τον περίφημο ναό της Παφίας Αφροδίτης, κατάλοιπα των οχυρώσεων της Παλαίπαφου και διάφορα άλλα κινητά ευρήματα τα οποία βρίσκονται στο αρχαιολογικό Μουσείο που βρίσκεται στο χωριό και στεγάζεται στη μεσαιωνική έπαυλη στα νότια του χωριού.

Το χωριό υπήρχε κατά τα Βυζαντινά χρόνια και πρέπει να αποτελούσε ιδιοκτησία Βυζαντινού αξιωματούχου κουβικουλαρίου. Η λέξη κουβούκλιον σήμαινε νεκρικό

θάλαμο, αλλά και τον κοιτώνα των Βυζαντινών αυτοκρατόρων. Οι σωματοφύλακες των Βυζαντινών αυτοκρατόρων που φρουρούσαν τον αυτοκρατορικό κοιτώνα ονομάζονταν κουβικουλάριοι και συχνά τους παραχωρούσαν τεμάχια γης στις επαρχίες ως ανταμοιβή για τις υπηρεσίες που πρόσφεραν. Τέτοιος κουβικουλάριος πιθανότατα έγινε κύριος του χωριού και ονομάστηκε Κου(βού)κλια. Συνεπώς αν τα Κούκλια δεν αποτελούσαν ιδιοκτησία κουβικουλάριου θα πρέπει να αποτελούσαν εξοχικά καταλύματα άλλων Βυζαντινών αξιωματούχων.

Το χωριό εξακολουθούσε, μέχρι και την περίοδο της Φραγκοκρατίας, να ονομάζεται Κουβούκλια, αντί του συντομευμένου Κούκλια. Ο Ντε Μας Λατρί αναφέρει ότι κατά την περίοδο της Φραγκοκρατίας το χωριό ήταν μεγάλο βασιλικό κτήμα στο οποίο εκαλλιεργείτο ζαχαροκάλαμο. Το ότι το χωριό αποτελούσε σημαντικό φέουδο αποδεικνύεται και από την μεγάλη μεσαιωνική έπαιλη των Κουκλιών.

Κατά την περίοδο της Τουρκοκρατίας τα Κούκλια θα κατασχεθούν από τον νέο κατακτητή και θα αποτελέσουν τσιφλίκι.

Σήμερα τα Κούκλια είναι μια ακμάζουσα κοινότητα. Η είσοδος του χωριού από τον κύριο δρόμο είναι φυτεμένη με φοινικίες και προσδίδει ιδιαίτερη ομορφιά. Οι δρόμοι του χωριού καθαροί και προσεγμένοι, φέρνουν τον επισκέπτη στην κεντρική πλατεία του χωριού, πού βρίσκεται και η εκκλησία του Αποστόλου και Ευαγγελιστή Λουκά. Οι κάτοικοι του χωριού διακρίνονται για την ευσέβεια και τον σεβασμό τους προς τα ιερά. Γύρω από το χωριό υπάρχουν είτε παρεκκλήσια είτε ερείπια παρεκκλησιών τα οποία μαρτυρούν την ευσέβεια των κατοίκων.

Στο χωριό υπάρχει περιφερειακό Δημοτικό Σχολείο στο οποίο φοιτούν τόσο οι μαθητές των Κουκλιών όσο και μαθητές από το διπλανό χωριό Νικόκλεια. Επίσης εδρεύει αστυνομικός σταθμός, υγειονομικό κέντρο και κυβερνητικό φυτώριο. Στην πλατεία του χωριού υπάρχουν αρκετά καφενεία και ταβέρνες που προσφέρουν πλούσια φαγητά και διασκέδαση.

Η ραγδαία τουριστική και οικοδομική ανάπτυξη, τα αρχαιολογικά ευρήματα της περιοχής, η Πέτρα του Ρωμιού, ο μύθος της Αφροδίτης, η απλόχερη φυσική ομορφιά της περιοχής, ο μοναδικός συνδυασμός του βουνού με την καταγάλανη θάλασσα, δίδουν στο χωριό των Κουκλιών μια μοναδικότητα που δεν μπορείς να βρεις αλλού.



Κούκλια



Φωτογραφίες από τα Κούκλια Πάφου:





2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο των γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην διασκόπιση για τα Κούκλια της Πάφου. Για την ακρίβεια, θα παρουσιαστούν τα θεωρητικά στοιχεία για την μαγνητική, ηλεκτρομαγνητική και ηλεκτρική μέθοδο (Παπαζάχος, Β.Κ., 1996).

2.1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.1.2. Περιγραφή της μαγνητικής μεθόδου

Οι μαγνητικές μέθοδοι διασκόπισης είναι οι παλιότερες μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπισης. Αρχικά, οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό μεταλλευμάτων και κυρίως μεταλλευμάτων σιδήρου. Στη διασκόπιση πετρελαίου εφαρμόστηκαν μετά το 1920. Η αρχή κάθε μεθόδου γεωμαγνητικής διασκόπισης 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



Σχήμα 2.1 Διασκόπιση με μαγνητόμετρο

Η μαγνητική ανωμαλία εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την ένταση μαγνήτισης της μάζας που την προκαλεί.

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.

Η μαγνητική μέθοδος διασκόπισης βασίζεται στη μέτρηση και την ανάλυση των τοπικών ανωμαλιών του γεωμαγνητικού πεδίου, που οφείλονται σε διαφορές της έντασης μαγνήτισης των πετρωμάτων (Ράμπελος, 1991). Η μαγνήτιση των πετρωμάτων οφείλεται τόσο στη μόνιμη μαγνήτιση τους όσο και στην επαγωγή του γεωμαγνητικού πεδίου. Η μόνιμη μαγνήτιση εξαρτάται από τη γεωλογική ιστορία του πετρώματος, ενώ η επαγωγική από τη μαγνητική επιδεκτικότητα του πετρώματος και την ένταση του πεδίου που προκαλεί τη 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.

2.1.3 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη

1. Ένταση: μαγνητικού πεδίου σε ορισμένο σημείο του, ονομάζεται το διανυσματικό μέγεθος H , που έχει την διεύθυνση και τη φορά της μαγνητικής δύναμης που ασκείται πάνω σε θετική μαγνητική ποσότητα η οποία βρίσκεται στο σημείο αυτό. Δίνεται από τον τύπο :

$H = F/P$ (2.1) όπου F είναι το μέτρο της μαγνητικής δύναμης η οποία ασκείται στη μαγνητική ποσότητα όταν ο χώρος είναι κενός και P είναι η θετική μαγνητική ποσότητα πάνω στην οποία ασκείται η μαγνητική δύναμη.

2. Μαγνητική ροπή: ενός μαγνητικού διπόλου του οποίου οι ποσότητες μαγνητισμού $+P, -P$ απέχουν απόσταση I , είναι ένα διανυσματικό μέγεθος M^* που έχει διεύθυνση του I και φορά από τον αρνητικό προς το θετικό πόλο και μέτρο το οποίο δίνεται από τη σχέση :

$$M^* = P I \text{ (2.2)}$$

1. Μαγνήτιση: του σώματος είναι ένα διανυσματικό μέγεθος \mathbf{J} που έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική ροπή και μέτρο, το οποίο δίνεται από τον εξής τύπο : $\mathbf{J} = \mathbf{M}^* / V$ (2.3) όπου V είναι ο όγκος του σώματος.
2. Μαγνητική επιδεκτικότητα: είναι ένα αδιάστατο μέγεθος κ το οποίο δείχνει το μέτρο ευκολίας της μαγνήτισης ενός υλικού και ορίζεται από τις σχέσεις: $\mathbf{k} = \mathbf{J} / \mathbf{H}$ ή $\mathbf{J} = \mathbf{k} \mathbf{H}$ (2.4).

Για το κενό η τιμή του κ είναι μηδέν, ανάλογα με τη τιμή του κ τα διάφορα υλικά χαρακτηρίζονται σαν παραμαγνητικά όταν $\kappa > 0$, σιδηρομαγνητικά όταν $\kappa \gg 0$ και διαμαγνητικά όταν $\kappa < 0$.

3. Μαγνητική διαπερατότητα : είναι μια σταθερά μ η οποία εξαρτάται από το υλικό που υπάρχει μεταξύ δυο ποσοτήτων μαγνητισμού. Είναι ίση με τη μονάδα στο κενό και σχεδόν ίση με την μονάδα στον αέρα.
4. Μια άλλη σταθερά, η μ_0 εξαρτάται από το σύστημα μονάδων και έχει τιμή ίση με τη μονάδα στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων.
5. Μαγνητική επαγωγή: είναι η ένταση \mathbf{B} η οποία χαρακτηρίζει την ολική ένταση ενός πεδίου το οποίο αποτελεί σύνθεση δυο άλλων μαγνητικών πεδίων. Είναι επίσης η ποσότητα την οποία μετράμε και ερμηνεύουμε κατά τη μαγνητική διασκόπηση και ορίζεται :

$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}$ (2.5), όπου \mathbf{H} είναι η ένταση του αρχικού μαγνητικού πεδίου.

2.1.4 Γεωμαγνητισμός

Στην επιφάνεια της γης υπάρχει μόνιμο μαγνητικό πεδίο με διεύθυνση όπως δείχνει η μαγνητική βελόνα, δηλ. περίπου από βορρά προς νότο. Η γη επομένως είναι ένας μεγάλος μαγνήτης με πόλους που γενικά δεν συμπίπτουν με τους γεωγραφικούς πόλους. Η προέλευση του γήινου μαγνητικού πεδίου δεν είναι ακριβώς γνωστή. Από τις μελέτες (Ράμπελος ,1991) που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, έχουμε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι το μαγνητικό πεδίο της γης συνίσταται από τρία μέρη, που είναι:

(i) το *εσωτερικό* ή κύριο πεδίο που οφείλει την ύπαρξη του σε εσωτερικά αίτια σύστημα ρευμάτων στο εσωτερικό της γης) δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται αργά με το χρόνο.

(ii) το *εξωτερικό πεδίο*, που είναι ένα μικρό κλάσμα του εσωτερικού, υπόκειται σε γρήγορες χρονικές μεταβολές (τόσο περιοδικές όσο και τυχαίες) και οφείλει την ύπαρξη του σε εξωτερικά αίτια (ιονόσφαιρα).

(iii) *διακυμάνσεις* του εσωτερικού πεδίου, κατά κανόνα μικρές σε σχέση με αυτό, που είναι σχετικά σταθερές τόσο σε σχέση με το χρόνο όσο και με τη θέση, που προκαλούνται από τοπικές ,μαγνητικές ανωμαλίες και αποτελούν το στόχο της μαγνητικής διασκόπισης.

Για την αναγνώριση των ανωμαλιών του γήινου μαγνητικού πεδίου θα πρέπει να εισάγουμε το *κανονικό γεωμαγνητικό πεδίο*. Με μεγάλη προσέγγιση το κανονικό πεδίο μπορεί να παρασταθεί με το πεδίο ενός δίπολου που είναι εγκατεστημένο στο κέντρο της γης με τη μαγνητική ροπή να κατευθύνεται στο γεωγραφικό νότο.

2.1.5 Οργάνωση επίγειων μετρήσεων

Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου της γης με σκοπό τη διασκόπιση μπορούν να είναι επίγειες ή από αέρος (Ράμπελος ,1991). Οι επίγειες μετρήσεις γίνονται όταν είναι απαραίτητη η λεπτομερής έρευνα ανωμαλιών που ήδη έχουν εντοπισθεί.

Οι επίγειες μετρήσεις είναι κύρια μετρήσεις της ολικής συνιστώσας ή της κατακόρυφης συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου της γης. Επειδή η **ευαισθησία** των **οργάνων** είναι μεγάλη θα πρέπει να λαμβάνεται μεγάλη φροντίδα ώστε οι σταθμοί μέτρησης να βρίσκονται μακριά από τεχνητές διαταραχές (σιδηροδρομικές γραμμές, ηλεκτρικά δίκτυα κλ.π.) του μαγνητικού πεδίου της γης. Όμοια, ο παρατηρητής δεν πρέπει να φέρει επάνω του μεταλλικά αντικείμενα (όπως π.χ. κλειδιά κλ.π.).

Οι μετρήσεις γίνονται σε τομές, κατά το δυνατό σε κανονικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις **εξαρτώνται** από το σκοπό της έρευνας (Ράμπελος ,1991). Στην περίπτωση που η έρευνα γίνεται με σκοπό την αναζήτηση **μεταλλευμάτων**, οι αποστάσεις κυμαίνονται συνήθως από 5-30 m.

Στο στάδιο της αναγνώρισης, η πρώτη τομή έχει διάταξη τέτοια ώστε να περνάει επάνω από την πιθανή θέση του αναζητούμενου κοιτάσματος. Αφού γίνουν οι μετρήσεις στην τομή αυτή, μια δεύτερη τομή γίνεται κάθετα στην πρώτη, στο σημείο που αυτή παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ανωμαλία. Για λεπτομερή έρευνα η διάταξη των τομών πρέπει να είναι τέτοια, ώστε τα σημεία των μετρήσεων να αποτελούν, κατά το δυνατό, κανονικό δίκτυο.

Για την παρακολούθηση της ημερήσιας μεταβολής του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου της γης που μετρούμε στο πεδίο, εγκαθίσταται ένας σταθμός μέτρησης του ομόλογου μεγέθους στο κέντρο της περιοχής των μετρήσεων και μακριά από τεχνητές διαταραχές. Η παραπάνω διαδικασία είναι απαραίτητη όχι

μόνο όταν επιζητείται μεγάλη ακρίβεια (όπως π.χ. στην περίπτωση μιας αρχαιομετρικής διασκόπισης (Ράμπελος ,1991), όπου οι μαγνητικές ανωμαλίες έχουν μικρό εύρος) αλλά ακόμη και σε εργασίες όπου οι αναμενόμενες τιμές των μαγνητικών ανωμαλιών έχουν εύρος μεγαλύτερο από 500 γ (όπως π.χ. στην περίπτωση αναζήτησης μεταλλευμάτων). Στην τελευταία περίπτωση δεν ενδιαφέρει τόσο η πληροφορία σχετικά με την ημερήσια μεταβολή, όσο η πληροφορία σχετικά με το αν συμβαίνει ή όχι μαγνητική καταιγίδα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Η κατακόρυφη βαθμίδα της ολικής έντασης κυμαίνεται από μια μέγιστη τιμή 0.03 γ/m στους μαγνητικούς πόλους, σε μια ελάχιστη τιμή 0.015 γ/m στο μαγνητικό ισημερινό. Η μεταβολή κατά την οριζόντια έννοια σπάνια είναι μεγαλύτερη από 6 γ/km μεταξύ ισημερινού και πόλων. Για τους παραπάνω λόγους αναγωγές τύπου ελεύθερου αέρα ή λόγω γεωγραφικού πλάτους δεν είναι απαραίτητες. Από το άλλο μέρος, η επίδραση της τοπογραφίας στις επίγειες μετρήσεις μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να είναι σημαντική (όπως π.χ. στην περίπτωση που οι μετρήσεις γίνονται σε φαράγγια, όπου τα πετρώματα των τοιχωμάτων μπορούν να προκαλέσουν επιδράσεις της τάξης αρκετών εκατοντάδων γ στους παρακείμενους σταθμούς).

Στις περιπτώσεις αυτές, η τοπογραφική διόρθωση θα μπορούσε να γίνει με αναγωγή των μετρήσεων που έγιναν στην (ανώμαλη) επιφάνεια $Z = h(x, y)$ σε ένα οριζόντιο επίπεδο $z = 0$. Αν υποθέσουμε ότι το μέγεθος που μας ενδιαφέρει είναι η κατακόρυφη συνιστώσα Z , μπορούμε σε πρώτη προσέγγιση να αναπτύξουμε τη

συνάρτηση $Z(x, y, h)$ σε σειρά Taylor παραλείποντας τους όρους ανώτερης τάξης, οπότε θα έχουμε :

$$Z(x,y,0) = Z(x,y,h) - h \frac{\partial Z}{\partial z}$$

Την τιμή της βαθμίδας $\frac{\partial Z}{\partial z}$ μπορούμε να τη μετρήσουμε : είτε απευθείας στο σταθμό (εκτελώντας μετρήσεις σε διαφορετικά υψόμετρα), είτε να την υπολογίσουμε από το χάρτη με καμπύλες ίσων τιμών του Z .

2.1.6 Ερμηνεία μαγνητικών ανωμαλιών

Γενικά οι μαγνητικές ανωμαλίες περιέχουν "θόρυβο", και έχουν μεγαλύτερο εύρος. Κατά συνέπεια, ο διαχωρισμός του πεδίου των μαγνητικών ανωμαλιών σε περιφερειακό και τοπικό πεδίο είναι πολύ δύσκολη διαδικασία και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν επιχειρείται καθόλου. Η πλέον συνηθισμένη μέθοδος ερμηνείας είναι η αντιπαραβολή της μαγνητικής ανωμαλίας με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν απλά γεωμετρικά σώματα (Ράμπελος ,1991). Η μέθοδος της αναγωγής του πεδίου σε ορισμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως και η μέθοδος της δεύτερης παραγωγού του δυναμικού, χρησιμοποιείται σε περιορισμένη κλίμακα. Η πρώτη από τις μεθόδους αυτές αποδίδει περισσότερο στο πρόβλημα του προσδιορισμού του πάχους των ιζηματογενών σχηματισμών που έχει σχέση με την αναζήτηση πετρελαίου. Η δεύτερη, δηλ. η μέθοδος της δεύτερης παραγωγού, είναι καταλληλότερη για την περίπτωση αναζήτησης μεταλλευμάτων, καθώς τονίζει ασθενή χαρακτηριστικά που προέρχονται από μικρά βάθη. Αντίθετα η μέθοδος αναγωγής του πεδίου σε ορισμένο ύψος πάνω από την επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση του πεδίου.

2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.2.1 Περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι (Ράμπελος ,1991) βασίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και έχουν πεδίο εφαρμογής την αναζήτηση κοιτασμάτων μεταλλικών ορυκτών που βρίσκονται μέσα σε μη αγώγιμα πετρώματα.

Σύμφωνα με το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, σε ένα αγώγιμο σώμα που βρίσκεται μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο αναπτύσσονται από επαγωγή εναλλασσόμενα ρεύματα των οποίων οι γραμμές ροής είναι κλειστές καμπύλες κάθετες σε κάθε σημείο στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν νέο μαγνητικό πεδίο, έτσι που σε κάθε σημείο το ολικό πεδίο είναι η συνισταμένη του αρχικού και του επαγόμενου πεδίου. Το ολικό αυτό πεδίο διαφέρει από το αρχικό κατά την ένταση, τη φάση και τη διεύθυνση.

Η αρχή των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπισης βασίζεται στον καθορισμό της γεωηλεκτρικής δομής (κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας) στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης με βάση τις ιδιότητες του δευτερογενούς ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που παράγεται μέσα στα στρώματα αυτά, σε σχέση με τις ιδιότητες του αρχικού (πρωτογενούς) πεδίου τις οποίες γνωρίζουμε όχι μόνο όταν αυτό παράγεται με τεχνητό τρόπο αλλά και όταν παράγεται από φυσικά αίτια.

Αν δημιουργήσουμε στο υπέδαφος ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, τότε στην περίπτωση που υπάρχει στο υπέδαφος αγώγιμο σώμα θα αναπτυχθεί από επαγωγή ένα νέο μαγνητικό πεδίο που θα παραμορφώσει το αρχικό πεδίο. Η παραμόρφωση αυτή αφού ανιχνευθεί με κατάλληλες μετρήσεις θα οδηγήσει στον εντοπισμό του αγώγιμου σώματος.

Η δημιουργία του αρχικού πεδίου στο υπέδαφος γίνεται με τη βοήθεια του πομπού που αποτελείται από μονωμένους αγωγούς ή πηνία που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα σχετικά χαμηλής συχνότητας (π.χ. 500 c S^{-1}) και η ανίχνευση της παραμόρφωσης του αρχικού πεδίου γίνεται με τη βοήθεια του δέκτη που αποτελείται από πηνίο το οποίο μετακινούμε σε διάφορες θέσεις της υπό μελέτη περιοχής. Οι τοπικές

μεταβολές του πεδίου που οφείλονται στην παρουσία αγώγιμου σώματος προσδιορίζονται από τις μεταβολές της τάσης που αναπτύσσεται από επαγωγή στο δέκτη.

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι έχουν το πλεονέκτημα, σε σχέση με τις ηλεκτρικές μεθόδους, ότι αυτές μπορούν να εφαρμοστούν και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες δε μπορεί να γίνει ηλεκτρική σύνδεση με το έδαφος επειδή αυτό έχει μεγάλη ειδική αντίσταση (παγωμένο σε σημαντικό βάθος, κλπ) οπότε οι ηλεκτρικές μέθοδοι δε μπορούν να εφαρμοστούν. Όμως, οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι δε μπορούν να εφαρμοστούν για την ανίχνευση αγώγιμων σωμάτων σε μεγάλα βάθη όταν το επιφανειακό τμήμα του εδάφους είναι εξαιρετικά αγώγιμο.

Με τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους μπορεί να γίνει διασκόπιση σε βάθη μεγαλύτερα από ότι με τις ηλεκτρικές. Όμως, και με τις μεθόδους αυτές, με εξαίρεση τη μαγνητοτελλουρική, τα βάθη αυτά είναι μικρά και για το λόγο αυτό οι μέθοδοι αυτές εφαρμόζονται κατά κύριο λόγο στη διασκόπιση των μεταλλευμάτων και όχι στη διασκόπιση πετρελαίου.

2.2.2 Θεμελιώδεις ηλεκτρομαγνητικές αρχές

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι βασίζονται σε ορισμένες αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας τις οποίες θα περιγράψουμε παρακάτω (Παπαζάχος, 1999):

Ένας από τους σημαντικότερους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού είναι ο νόμος του FARADAY σύμφωνα με τον οποίο :

<< η χρονική μεταβολή του μαγνητικού πεδίου σε ένα χώρο έχει ως συνέπεια την γένεση ηλεκτρικού πεδίου σε αυτό το χώρο, τέτοιου ώστε η παραγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη να είναι ανάλογη αλλά αντίθετη προς το ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής .>>

Ο νόμος αυτός εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση του Maxwell: $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$

(2.7) όπου B είναι η μαγνητική επαγωγή , t είναι ο χρόνος και E η ένταση του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Ο δεύτερος σημαντικός νόμος του ηλεκτρομαγνητισμού είναι ο νόμος του AMPERE σύμφωνα με τον οποίο :

<< όταν ένας χώρος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα , παράγεται μαγνητικό πεδίο του οποίου η ένταση είναι ανάλογη του ολικού ρεύματος που διαρρέει το χώρο και έχει διεύθυνση κάθετη προς την διεύθυνση ροής του ρεύματος .>>

Ο νόμος αυτός εκφράζεται απ' την ακόλουθη σχέση του Maxwell : $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

(2.8) όπου $D = \epsilon \cdot H$ για ομογενές και ισότροπο μέσο και ϵ είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου.

2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

2.3.1 Περιγραφή της ηλεκτρικής μεθόδου

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπισης (Ράμπελος ,1991) βασίζονται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης ηλεκτρικών ρευμάτων στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια.

Οι περισσότερες από τις ηλεκτρικές μεθόδους βασίζονται στη διαφορετική *ηλεκτρική αγωγιμότητα* που παρουσιάζουν τα διάφορα πετρώματα της ανώτερης λιθόσφαιρας, ανάλογα με το είδος και τη φυσική τους κατάσταση. Σε σχέση με το είδος, τα μεταλλοφόρα κοιτάσματα παρουσιάζουν μεγάλη αγωγιμότητα ενώ τα εκρηξιγενή πετρώματα ή τα μάρμαρα παρουσιάζουν μικρή αγωγιμότητα. Σε σχέση με τη φυσική κατάσταση, τα συμπαγή πετρώματα και τα ξηρά εδάφη δείχνουν μικρή αγωγιμότητα, ενώ τα πορώδη πετρώματα και τα υγρά εδάφη δείχνουν μεγάλη αγωγιμότητα.



Σχήμα 2.2 Ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση για χαρτογράφηση αρχαιολογικού χώρου

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Η ποσότητα που μετράμε είναι, συνήθως, η **ηλεκτρική τάση**, ενώ η ποσότητα η οποία παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός της και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης είναι η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση**.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι εφαρμόζονται συχνότερα στην περίπτωση αναζήτησης μετάλλων και ορυκτών και λιγότερο στην περίπτωση αναζήτησης πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει γιατί η διακριτική ικανότητα των περισσότερων από τις ηλεκτρικές μεθόδους περιορίζεται αισθητά καθώς αυξάνει το βάθος.

Γενικά οι ηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες: στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν φυσικά πεδία και στη δεύτερη εκείνες που προϋποθέτουν τη δημιουργία τεχνητών πεδίων. Στην πρώτη κατηγορία υπάγονται:

- (α) η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και
- (β) η μέθοδος των γήινων ηλεκτρικών ρευμάτων.

Στη δεύτερη κατηγορία υπάγονται:

- (α) η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.
- (β) η μέθοδος των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών.
- (γ) η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης και

(δ) οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως, στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία, και στην Τεχνική Γεωλογία για την ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων, στην χαρτογράφηση αρχαιολογικών χώρων κλπ. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο στη διασκόπιση πετρελαίου, γιατί μ' αυτές μπορούμε να μελετήσουμε μόνο τα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης. Σε λίγες περιπτώσεις οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι μπορούν να δώσουν πληροφορίες για βάθη μεγαλύτερα των 2000m.

2.3.2Θεμελιώδη ηλεκτρικά μεγέθη

1. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Σαν ειδική αντίσταση ενός υλικού ορίζεται η ηλεκτρική αντίσταση ενός κυλίνδρου από το υλικό αυτό, που έχει μήκος ίσο με τη μονάδα και επιφάνεια τομής κάθετης στον άξονα του κυλίνδρου ίση με τη μονάδα. Αν η ηλεκτρική αντίσταση ενός κυλίνδρου που έχει μήκος l και επιφάνεια κάθετης τομής S είναι R , τότε η ειδική αντίσταση ρ του υλικού του κυλίνδρου είναι

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

Μονάδες μέτρησης της ειδικής αντίστασης είναι το ohm m ή το ohm cm.

Η ειδική αγωγιμότητα σ είναι το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης, δηλ. ίση με $1/\rho$.

Η σχέση ανάμεσα στο ρεύμα I , την αντίσταση R και την τάση V δίνεται από το νόμο

του Ohm $I = \frac{V}{R}$

2. Η ηλεκτροχημική δράση

Η ηλεκτροχημική δράση των πετρωμάτων εξαρτάται **από τη χημική** τους σύσταση και από τη σύσταση και την πυκνότητα των ηλεκτρολυτών που είναι διαλυμένοι στα υδροφόρα στρώματα με τα οποία τα πετρώματα αυτά βρίσκονται σε επαφή. Η ηλεκτροχημική δράση ρυθμίζει το μέγεθος και την πολικότητα της τάσης που αναπτύσσεται όταν ένα πέτρωμα βρίσκεται σε ισορροπία με ένα ηλεκτρολύτη.

Η διηλεκτρική αγωγιμότητα - Διηλεκτρική σταθερά

Με τον όρο διηλεκτρική αγωγιμότητα (Ράμπελος ,1991) εννοούμε την ηλεκτρική αγωγιμότητα που παρατηρείται όταν ένα υλικό, που είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού, βρεθεί κάτω από την επίδραση μεταβαλλόμενου με το χρόνο εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Η διηλεκτρική σταθερά ενός υλικού είναι ένα μέτρο της πόλωσης του υλικού κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου. Σε αναλογία με τις μαγνητικές ποσότητες J , H , k , B και μ έχουμε τις ποσότητες: ηλεκτρική πόλωση P (ηλεκτρική διπολική ροπή ανά μονάδα όγκου), ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E , ηλεκτρική επιδεκτικότητα η , ηλεκτρική μετατόπιση D (ροή ανά μονάδα επιφάνειας), και διηλεκτρική σταθερά ϵ . Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων αυτών σε ηλεκτροστατικές μονάδες είναι

$$P = \eta E, \quad D = E + 4\pi P = E (1 + 4\pi \eta) = \epsilon E$$

Σε ηλεκτροστατικές μονάδες τα μεγέθη P , E και D εκφράζονται σε Volts cm^{-1} και τα η και ϵ είναι αδιάστατα μεγέθη.

2.3.3 Μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Ράμπελος ,1991) είναι η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος. Βασίζεται στην ύπαρξη διαφορών στην ηλεκτρική αγωγιμότητα των πετρωμάτων. Βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της γεωλογικής και μεταλλευτικής έρευνας. Ιδιαίτερα χρησιμοποιείται:

στην τεχνική γεωλογία για τη μελέτη φραγμάτων και μεγάλων τεχνικών έργων, για τον προσδιορισμό του βάθους και της μορφολογίας του στερεού υπόβαθρου και για τον εντοπισμό μεταπτώσεων ή άλλων τεκτονικών ανωμαλιών.

στην υδρογεωλογία για τη διερεύνηση της ανάπτυξης και τον προσδιορισμό του πάχους υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων και για τη διαπίστωση διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτιους σχηματισμούς.

στην χαρτογράφηση αρχαιολογικών χώρων.

Ακόμη, βρίσκει εφαρμογή στον εντοπισμό ορισμένων κοιτασμάτων, όπως γύψου, ορυκτού αλατιού, στη διερεύνηση λιγνιτοφόρων λεκανών, στον προσδιορισμό του πάχους φερτών σχηματισμών, υπερκειμένων στρωμάτων οικονομικού ενδιαφέροντος κλ.π.

2.3.4 Αρχή μεθόδου

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης βασίζεται στον προσδιορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης στο υπέδαφος με κατάλληλες μετρήσεις. Από την κατανομή αυτή μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τη γεωλογική δομή της περιοχής που γίνεται η διασκόπιση. Η πλέον συνηθισμένη μέθοδος για να γίνουν τέτοιες μετρήσεις είναι να διοχετευθεί συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα πολύ χαμηλής συχνότητας στο έδαφος. Για τις μετρήσεις γενικά χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια: δύο για να διοχετευθεί το ρεύμα και δύο για να μετρηθεί το δυναμικό που συνεπάγεται η ροή του ρεύματος αυτού.

Το δυναμικό V σε ένα σημείο ομογενούς και ισότροπου μέσου, που οφείλεται σε σημειακή ηλεκτρική πηγή, είναι ανάλογο του ρεύματος I , της ειδικής αντίστασης ρ του μέσου και αντίστροφα ανάλογο της απόστασης r της πηγής από το θεωρούμενο σημείο. Αν θεωρήσουμε το υπέδαφος σαν ηλεκτρικά ομογενή χώρο άπειρης έκτασης και τη σημειακή πηγή στην επιφάνεια, τότε ο συντελεστής αναλογίας αποδεικνύεται ότι είναι $\frac{1}{2\pi}$,

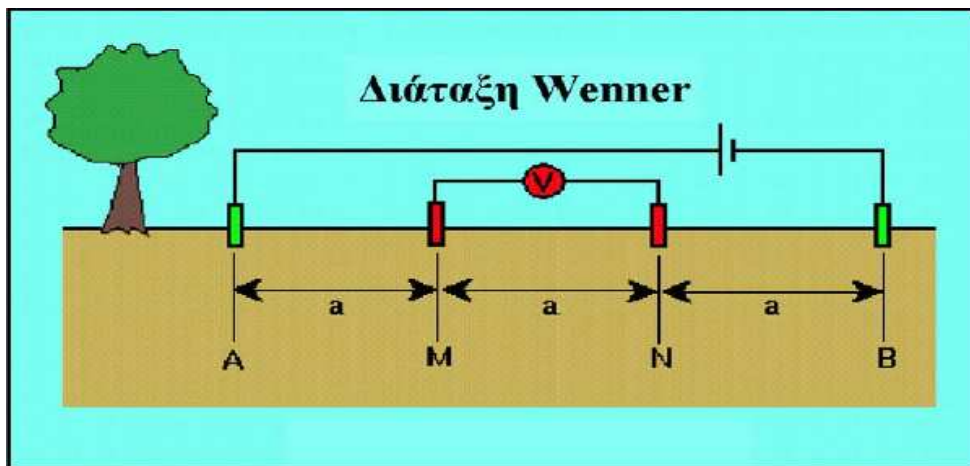
$$\text{δηλαδή } V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού (Ράμπελος, 1991). Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ηλεκτρόδια ρεύματος και τα ηλεκτρόδια δυναμικού τοποθετούνται στην ίδια ευθεία γραμμή. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος συνήθως τοποθετούνται εξωτερικά των ηλεκτροδίων δυναμικού. Στα επόμενα αναφέρονται οι διατάξεις που είναι περισσότερο σε χρήση.

- **Διάταξη WENNER**

Για μία διασκόπιση με τη μέθοδο Wenner, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (πράσινο) και τα δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (κόκκινο) τοποθετούνται σε μία ευθεία, συμμετρικά σε σχέση με το κέντρο της διάταξης που είναι το μέσο της απόστασης AB. Κάθε ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχει από το παρακείμενο ηλεκτρόδιο ρεύματος απόσταση a , ίση με το $1/3$ της μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος απόστασης. Η μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού απόσταση είναι επίσης a .



Σχήμα 2.3 Διάταξη Wenner

Η φαινόμενη ειδική αντίσταση που υπολογίζεται από τις μετρήσεις της τάσης, ΔV , και του ρεύματος, I , δίνεται από την απλή εξίσωση

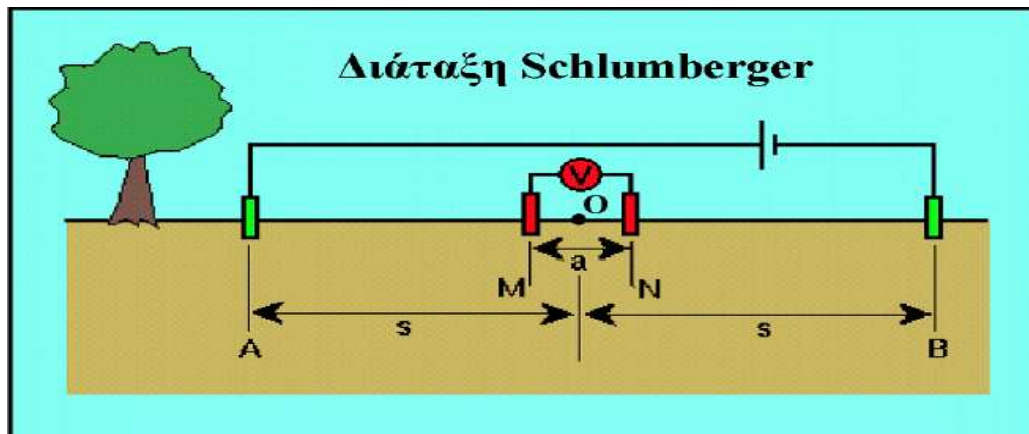
$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

Η εξίσωση αυτή δεν είναι τίποτε περισσότερο από την έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που είδαμε προηγουμένως, όπου οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι σταθερές και ίσες με a . Για να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα της φαινόμενης ειδικής αντίστασης συναρτήσει της απόστασης των ηλεκτροδίων, από το οποίο θα ερμηνεύσουμε τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το βάθος, πρέπει να υπολογίσουμε την φαινόμενη ειδική αντίσταση για διαφορές τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων, a . Δηλαδή, αφού ολοκληρώσουμε μια μέτρηση, πρέπει να μετακινήσουμε και τα τέσσερα ηλεκτρόδια σε νέες θέσεις.

- **Διάταξη SCHLUMBERGER**

Για την διενέργεια μιας ηλεκτρικής βυθομέτρησης Schlumberger στο πεδίο, τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού (σχ. 2.3) διατάσσονται στο έδαφος κατά μήκος ευθείας γραμμής σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος όσο και τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι συμμετρικά τοποθετημένα ως προς το κέντρο συμμετρίας, O , το οποίο ονομάζεται κέντρο της διάταξης. Όμως, τα τέσσερα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού δεν ισαπέχουν μεταξύ τους όπως στη διάταξη Wenner.

Διεξάγοντας βυθομετρήσεις με διάταξη ηλεκτροδίων κατά Schlumberger η απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού M, N πρέπει πάντοτε να διατηρείται μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2. Στις μετρήσεις πεδίου απομακρύνουμε διαδοχικά τα ηλεκτρόδια ρεύματος (αυξάνουμε την απόσταση AB) ενώ διατηρούμε σταθερή την απόσταση MN. Με αυτό το τρόπο έχουμε μια γρήγορη μείωση της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των ηλεκτροδίων δυναμικού MN, όπου από κάποια στιγμή και μετά ο θόρυβος γίνεται μεγαλύτερος του μετρούμενου σήματος ΔV στα άκρα M, N και η μέτρηση του ΔV καθίσταται αδύνατη. Σ' αυτό το σημείο μία αύξηση της απόστασης MN θεωρείται απαραίτητη, τέτοια όμως ώστε να ισχύει ο περιορισμός η MN να παραμένει μικρότερη του 40% της απόστασης AB/2, και η εργασία συνεχίζεται.



Σχήμα 2.4 Διάταξη Schlumberger

Για κάθε θέση των ηλεκτροδίων η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την

$$\text{σχέση } \rho_a = \frac{\pi s^2}{a} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

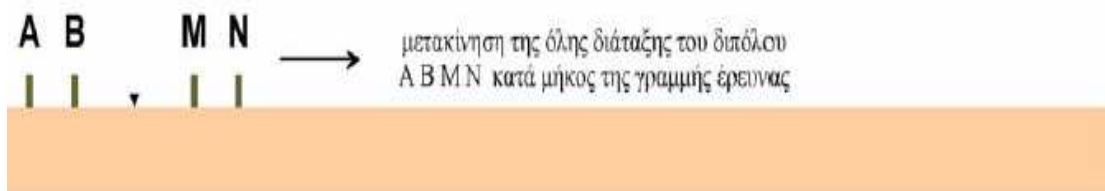
Οι τιμές της ρ_a προβάλλονται ως συνάρτηση του ημι-αναπτύγματος AB/2 των ηλεκτροδίων ρεύματος σε διλογαριθμικούς άξονες δημιουργώντας έτσι την ηλεκτρική καμπύλη της βυθομέτρησης (sounding curve) η οποία αποτελεί το βασικό τεκμήριο για την ερμηνεία.

Καθώς η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει ο συνολικός όγκος της γης που ελέγχεται από την μέτρηση αυξάνει επίσης, τόσο σε βάθος όσο και πλευρικά. Δεδομένου ότι το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και εκείνο που αλλάζει είναι οι

διαδοχικά διευρυνόμενες αποστάσεις AB είναι φανερό ότι οι διαδοχικά διευρυνόμενοι γήινοι όγκοι που ελέγχονται από τις μετρήσεις αλληλεπικαλύπτονται .

- **Διάταξη διπόλου-διπόλου**

Στη διάταξη δίπολου (σχ. 2.5) τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και δυναμικού M, N διατάσσονται κατά τη σειρά ABMN κατά μήκος της διεύθυνσης (γραμμής) που πρόκειται να ερευνηθεί. Εν γένει τα μήκη AB και MN είναι ίσα μεταξύ τους.



Σχήμα 2.5 Διάταξη διπόλου –διπόλου

Η απόσταση BM επιλέγεται να είναι είτε ίση με την απόσταση MN ή με κάποιο πολλαπλάσιο αυτής. Εφόσον η διάταξη είναι συμμετρική το σημείο μέτρησης (κέντρο διάταξης) θεωρείται ότι είναι το μέσον της απόστασης BM. Εφόσον διερευνούμε πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης των σχηματισμών σε μία ζώνη συγκεκριμένου πάχους η διάταξη ABMN κινείται ως έχει κατά μήκος της διεύθυνσης που διερευνούμε χωρίς να μεταβάλλονται οι μεταξύ των A, B, M, N αποστάσεις. Η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών κέντρων της διάταξης είναι συνήθως ίση με την απόσταση MN.

Σε κάθε θέση της διάταξης μετράται η διαφορά δυναμικού ΔV μεταξύ των M, N και η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a υπολογίζεται από την σχέση όπου η ποσότητα K είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη του δίπολου. Εφόσον επιθυμούμε να διερευνήσουμε πλευρικές μεταβολές της ρ για ζώνες μεγαλύτερου πάχους επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία αυξάνοντας την απόσταση BM διότι, όπως είναι γνωστό, το βάθος έρευνας αυξάνει καθώς αυξάνει η απόσταση BM.

Το κύριο πλεονέκτημα της τεχνικής του δίπολου είναι η ελαχιστοποίηση του κινδύνου εμφάνισης σύζευξης ή διαρροής στα κυκλώματα ρεύματος (AB) και δυναμικού (MN) καθόσον είναι πλήρως απομακρυσμένα μεταξύ τους.

2.3.5 Οργάνωση μετρήσεων

Το πρόβλημα του προσδιορισμού της κατανομής της ειδικής αντίστασης από τις μετρούμενες μεταβολές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης έχει μονοσήμαντη λύση μόνο για την περίπτωση που η ειδική αντίσταση παραμένει σταθερή κατά την οριζόντια έννοια και μεταβάλλεται μόνο με το βάθος. Το απλούστερο πρότυπο που θα συμφωνούσε με τις παραπάνω απαιτήσεις είναι αυτό που περιλαμβάνει ένα μικρό αριθμό διακριτών στρωμάτων, καθένα από τα οποία χωρίζεται από τα παρακείμενα στρώματα με οριζόντιες επιφάνειες ασυνέχειας, και έχει σταθερή ειδική αντίσταση, διαφορετική από την ειδική αντίσταση των άλλων στρωμάτων. Στο απλό αυτό πρότυπο ανταποκρίνονται με ικανοποιητική προσέγγιση ιζηματογενείς σχηματισμοί, ενώ οι περισσότεροι πραγματικά οικονομικού ενδιαφέροντος σχηματισμοί προσεγγίζονται με συνθετότερα πρότυπα.

Ανεξάρτητα από τη διάταξη των ηλεκτροδίων, η διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου στο πεδίο έχει σχέση με το ερώτημα, ποιες μεταβολές της ειδικής αντίστασης ενδιαφέρουν: οι μεταβολές κατά την οριζόντια έννοια ή οι μεταβολές μετά του βάθους. Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται η **γεωηλεκτρική χαρτογράφηση** (electric mapping-electric trenching - continuous profiling) και στη δεύτερη περίπτωση η **γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση** (electric drilling - vertical electric sounding) (Ράμπελος, 1991).

A) Με τη **γεωηλεκτρική χαρτογράφηση** εντοπίζονται ασυνέχειες κατά την οριζόντια ανάπτυξη των σχηματισμών, όπως π.χ. μεταπτώσεις. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση αναζήτησης μεταλλευμάτων και στην χαρτογράφηση αρχαιολογικών χώρων. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_a για σταθερή τιμή του k προσδιορίζεται σε σημεία που ανήκουν σε τομές κατά το δυνατό κάθετες στην παράταξη των σχηματισμών. Οι τιμές αυτές της ρ_a παριστάνονται γραφικά σε συνάρτηση με τις θέσεις των σημείων πάνω στην αντίστοιχη τομή. Από τη μορφή της γραφικής αυτής παράστασης μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τη δομή στο υπέδαφος. Η εκλογή της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος έχει μεγάλη σημασία για την επιτυχία της μεθόδου, αφού από την απόσταση αυτή εξαρτάται το βάθος μέχρι του οποίου οι σχηματισμοί στο υπέδαφος επιδρούν στη διαμόρφωση της τιμής της ρ_a .

B) Με τη **γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση** προσδιορίζεται η φαινόμενη ειδική αντίσταση ρ_a σε ένα σταθερό σημείο της επιφάνειας για διαδοχικά αυξανόμενες τιμές του γεωμετρικού συντελεστή k . Στην περίπτωση δηλ. αυτή η απόσταση AB των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνει διαδοχικά, ενώ το κέντρο O της διάταξης και η διεύθυνση AB, που θα πρέπει να είναι κατά το δυνατό παράλληλη με την παράταξη των γεωλογικών σχηματισμών, παραμένουν σταθερά. Η προσδιοριζόμενη μεταβολή της ρ_a αντικατοπτρίζει τη μεταβολή της κατανομής της ειδικής αντίστασης με το βάθος, αφού με κάθε αύξηση της απόστασης AB, διαδοχικά βαθύτεροι ορίζοντες επιδρούν στη διαμόρφωση της αντίστοιχης τιμής της ρ_a . Τις τιμές της ρ_a παριστάνουμε γραφικά σε συνάρτηση με την απόσταση σε λογαριθμική κλίμακα.

Αν το υπέδαφος είναι ομογενές, τότε η γραφική αυτή παράσταση της συνάρτησης

$$\rho_a = f\left(\frac{AB}{2}\right)$$
 ή καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης θα είναι ευθεία γραμμή,

παράλληλη προς τον άξονα των αποστάσεων. Στην περίπτωση δηλ. αυτή η ρ_a παραμένει σταθερή και ίση με την τιμή ρ της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

2.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕ RADAR

Η μέθοδος του υπεδάφους Radar (Ground Penetrating Radar - G.P.R.) παρουσιάζει την ίδια αρχή λειτουργίας με την μέθοδο της σεισμικής ανάκλασης. Πρόκειται για μία ηλεκτρομαγνητική γεωφυσική τεχνική που βρίσκει εφαρμογή στην χαρτογράφηση των στρωμάτων σε εδάφη και πετρώματα και στον εντοπισμό υπόγειων δομών, στηριζόμενη στις διαφορές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών.

Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία σειρά από εφαρμογές όπως είναι η χαρτογράφηση του βάθους του υποβάθρου, ο καθορισμός του πάχους των στρωμάτων και το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ο εντοπισμός φυσικών και τεχνητών εγκοίλων στο υπέδαφος, η ανίχνευση των αλλαγών της σύστασης των πετρωμάτων, ο εντοπισμός ρωγμών του υποβάθρου. Ιδιαίτερη εφαρμογή της μεθόδου

πραγματοποιείται στην Αρχαιομετρία για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων και αρχαιολογικών λειψάνων.



Σχήμα 2.6 διασκόπηση με radar.

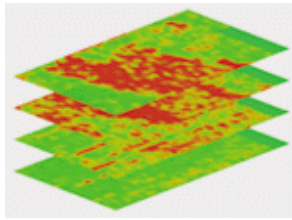
Η βασική αρχή της μεθόδου στηρίζεται στην εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, υψηλής συχνότητας, στο υπέδαφος και στην καταγραφή των επιστρεφόμενων κυμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που διαδίδεται στο υπέδαφος εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητές του, δηλαδή την διηλεκτρική σταθερά και την αγωγιμότητα. Βασικά, η μέθοδος στηρίζεται κυρίως στην καταγραφή των ανακλωμένων κυμάτων σε επιφάνειες που παρουσιάζουν διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες.

Όπως αναφέρθηκε η αρχή λειτουργίας της μεθόδου G.P.R. (γεωραντάρ) παρουσιάζει ομοιότητες με αυτή της μεθόδου της σεισμικής ανάκλασης. Ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής συχνότητας και μικρής διάρκειας παράγεται και διοχετεύεται στο έδαφος. Ο παλμός (το σήμα) διαδίδεται και διαχέεται στα υλικά που συνιστούν το υπέδαφος και η πορεία του εξαρτάται από τις ιδιότητες των περιβαλλόντων υλικών. Ένα μέρος της ενέργειας του παλμού ανακλάται στην διαχωριστική επιφάνεια υλικών με διαφορετικές ιδιότητες και καταγράφεται σε έναν δέκτη, ο οποίος βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ η υπολειπόμενη ενέργεια του παλμού διοχετεύεται σε βαθύτερα επίπεδα.

Ο τελικός σκοπός της γεωφυσικής είναι να μπορέσει να δώσει μια πλήρη τρισδιάστατη εικόνα των θαμμένων αρχαιολογικών χαρακτηριστικών, που προχωρεί πέρα από τα δισδιάστατα σχέδια που μας δίνουν οι παραδοσιακές μέθοδοι της μέτρησης ωμικής αντίστασης εδάφους και της μαγνητικής επισκόπησης. Αν και οι τεχνικές αυτές μπορούν να δώσουν κάποιες πληροφορίες σχετιζόμενες με το βάθος, ο χρόνος που χρειάζεται για τη συλλογή αυτών των δεδομένων μπορεί να είναι απαγορευτικός και περιορίζει την

έκταση που μπορούμε να καλύψουμε. Πρόσφατα, ο συνδυασμός των ραντάρ που μπορούν να εισχωρούν και να βλέπουν κάτω από το έδαφος και των ισχυρών ηλεκτρονικών υπολογιστών που χρησιμοποιήθηκαν για να επεξεργαστούμε τα δεδομένα, έδωσαν ένα νέο εργαλείο στους αρχαιολόγους για ν' αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα.

Το ραντάρ που εισχωρεί στο έδαφος λειτουργεί με την εκπομπή ενός σύντομου ηλεκτρομαγνητικού παλμού από μια κεραία εδάφους και με την καταγραφή τόσο της στιγμής άφιξης όσο και του μεγέθους του



Σχήμα 2.7 Απεικονίζοντας ευρήματα με ραντάρ

σήματος που επιστρέφει αφού ανακλαστεί στις διηλεκτρικές αντιθέσεις του υπεδάφους. Ένα γράφημα δημιουργείται τότε που δείχνει το μέγεθος της ανάκλασης σε συνάρτηση με το χρόνο που έκανε ο παλμός για να ταξιδέψει από τον πομπό μέχρι το στόχο και ξανά πίσω στο δέκτη. (εικόνα 2.7). Αυτό το παλμικό σήμα καλύπτει μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων, αλλά γενικά είναι συντονισμένο σε μια κεντρική συχνότητα μεταξύ των 100 και 1000 MHz, ανάλογα με την κεραία που χρησιμοποιείται για την έρευνα. Η ανάλυση της εικόνας και το βάθος που πετυχαίνει η διερεύνηση εξαρτώνται τόσο από τη κεντρική συχνότητα του παλμού όσο και από την ηλεκτρική διαπερατότητα του υπεδάφους. Αν και ένας υψίσυχνος παλμός μικρής διάρκειας, καλύπτει μικρότερη περιοχή, μπορεί εν τούτοις να διακρίνει μικρότερα αντικείμενα.

2.5 ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Στη γεωφυσική διασκόπηση που έγινε στην περιοχή της Αξού, Ρεθύμνου στις 17 Νοεμβρίου του 2008 χρησιμοποιήθηκαν τα εξής όργανα: **Nogge radar** , μαγνητόμετρο **G-601** και ηλεκτρικά **rm15** .

2.5.1 Αρχή λειτουργίας του RM15



Σχήμα 2.8 RM15

Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης, με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου ενός ζεύγους ηλεκτροδίων . Σε ένα δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων μετράται η πτώση τάσης που προκαλείται. Η ηλεκτρική αντίσταση που υπολογίζεται σαν το πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ .

2.5.2 ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟ G-601

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις έχουν στόχο την ανίχνευση της αλλαγής των μαγνητικών ιδιοτήτων του υπεδάφους λόγω της παρουσίας δομών που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Κατά την διεξαγωγή μιας μαγνητικής διασκόπησης μετριέται το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια αυτής. Το ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί μία μαγνητική διασκόπηση κυμαίνεται από 0.5 μέτρο, στην περίπτωση εντοπισμού θαμμένων αρχαιοτήτων, έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα πάνω από το τοπογραφικό ανάγλυφο μιας περιοχής, στην περίπτωση εντοπισμού ανωμαλιών που σχετίζονται με την γεωλογία της περιοχής.



Σχήμα 2.8.1 μαγνητόμετρο.

Για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούνται συνήθως μαγνητόμετρα μέτρησης της ολικής έντασης του μαγνητικού πεδίου (πρωτονιακά μαγνητόμετρα) ή διαφορικά μαγνητόμετρα (πρωτονιακά ή ροής), τα οποία μετρούν την κατακόρυφη βαθμίδα του μαγνητικού πεδίου. Η ακρίβεια που παρουσιάζουν αυτά τα όργανα είναι της τάξης του 0.1 - 1 nT. Στην περίπτωση εντοπισμού αρχαιολογικών λειψάνων οι μετρήσεις λαμβάνονται με ένα σταθερό βήμα δειγματοληψίας σε ορθογώνιους καννάβους, μικρών σχετικά διαστάσεων (10x10 ή 20x20), τοποθετώντας τον αισθητήρα (ή μετρητή) σε μία σταθερή και μικρή απόσταση από την επιφάνεια της γης.

Οι μαγνητικές ανωμαλίες σχετίζονται άμεσα με την μαγνητική επιδεκτικότητα του εδάφους. Περιοχές με αυξημένη μαγνητική επιδεκτικότητα (πάντα σε σχέση με το περιβάλλον) εμφανίζονται ως θετικές μαγνητικές ανωμαλίες ενώ αντίθετα περιοχές με μειωμένη μαγνητική επιδεκτικότητα παρουσιάζονται ως αρνητικές ανωμαλίες. Και τα δύο αυτά είδη μαγνητικών ανωμαλιών παρουσιάζουν ενδιαφέρον στην διαδικασία ερμηνείας των μαγνητικών δεδομένων.



Σχήμα 2.8.2 μαγνητόμετρο.

Γενικά η ύπαρξη αρχαιολογικών ερειπίων στο υπέδαφος συνοδευόμενη συνήθως από μία αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας στο υπέδαφος, προκαλεί ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλει το τοπικό μαγνητικό πεδίο της γης. Τα πυρηνικά μαγνητόμετρα μετρούν την συνισταμένη του ασθενούς τοπικού μαγνητικού πεδίου και του πιο ισχυρού γήινου μαγνητικού πεδίου. Τα διαφορικά μαγνητόμετρα (μαγνητόμετρα ροής) μετρούν την κάθετη ή την οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Τα δύο αυτά είδη μαγνητομέτρων αποτελούν τα πιο αποτελεσματικά όργανα μέτρησης του τοπικού μαγνητικού πεδίου και των μεταβολών αυτού λόγω παρουσία ανθρωπογενών λειψάνων.

Γενικά η μεταβολή του τοπικού μαγνητικού πεδίου λόγω της ύπαρξης υπεδάφειων αρχαιολογικών λειψάνων είναι σχετικά μικρή, εξαιτίας της ασθενούς παραμένουσας μαγνήτισης. Η μεταβολή αυτή αυξάνεται με την αύξηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας

των αρχαιολογικών στόχων (φαινόμενα καύσης, πυκνότητα σε σιδηρούχα συστατικά κ.α.) Τα όργανα τα οποία απαιτούνται για τον εντοπισμό αρχαιολογικών ερειπίων πρέπει να έχουν υψηλή ακρίβεια, μεγάλη ευαισθησία και αξιοπιστία μετρήσεων. Τα όργανα αυτά μετρούν το μαγνητικό πεδίο με μία ακρίβεια της τάξεως των 0.1 - 1 nT (δηλαδή 0.1 - 1 x 10⁻⁹ T). Ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, της τάξεως του pT (0.001 - 0.01 nT) είναι εφικτή με τα μαγνητόμετρα Καισίου, αλλά υπάρχει ο κίνδυνος εισαγωγής αυξημένων επιπέδων εξωτερικού θορύβου.

2.5.3 NOGE RADAR



Σχήμα 2.8.3 noge radar

Βασική αρχή λειτουργίας: Η μέθοδος του υπεδαφίου ραντάρ μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκεί που το βάθος υποβάθρου αναμένεται να είναι χαμηλό και το επιφανειακό κάλλυμα να μην περιέχει σημαντικά ποσοστά αργίλου. Εάν ισχύουν τα παραπάνω, τότε η διείσδυση μπορεί να είναι της τάξης κάποιων μέτρων ή δεκάδων μέτρων.

Το όργανο μέτρησης αποτελείται από ένα καταγραφέα και δύο κεραίες, μια εκπομπής και μια λήψης. Διάφορες κεραίες αντιστοιχούν και σε διαφορετικές συχνότητες. Χαμηλότερες συχνότητες δίνουν βαθύτερη διείσδυση αλλά μικρότερη ανάλυση ενώ συμβαίνει το αντίθετο με τις υψηλότερες συχνότητες. Παρακάτω φαίνεται η σύνθεση ενός συστήματος GPR.

Ο πομπός (transmitter) στέλνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής συχνότητας που εισέρχονται μέσα στο έδαφος και ανακλώνται από τις διάφορες επιφάνειες ή σώματα με διαφορετική ηλεκτρική σταθερά από το περιβάλλον τους. Τα ανακλώμενα κύματα συλλέγονται από τον δέκτη (receiver) και αποθηκεύονται στην μνήμη του καταγραφέα.

Συλλογή δεδομένων: Οι μετρήσεις με γεωραντάρ γίνονται σύροντας την κεραία στην επιφάνεια του εδάφους με ένα κανονικό βήμα. Ο καταγραφέας (συνήθως PC) αποθηκεύει τα δεδομένα και παρουσιάζει επίσης μια εικόνα της καταγραφής σε μια οθόνη.



Σχήμα 2.8.4 noge radar

Επεξεργασία δεδομένων: Τα δεδομένα επεξεργάζονται σχεδόν σαν εκείνα ενός μονοκάναλου σεισμικού προφίλ ανάκλασης. Πολλών ειδών επεξεργασίες είναι δυνατές όπως φίλτρα για το θόρυβο, οριζόντια και κάθετη βαθμονόμηση, διορθώσεις ταχύτητας και πολλές άλλες. Πολλές φορές όμως δεν χρειάζεται και ιδιαίτερη επεξεργασία γιατί το υπόβαθρο φαίνεται αμέσως στα δεδομένα που καταγράφονται.

Πλεονεκτήματα: Η μέθοδος GPR είναι σχετικά γρήγορη μέθοδος και παρουσιάζει δεδομένα κατευθείαν στο ύπαιθρο.

Περιορισμοί: Ο μόνος περιορισμός της μεθόδου είναι το βάθος διείσδυσης το οποίο εξαρτάται ισχυρά από την περιοχή των μετρήσεων. Αργιλικά υλικά στην επιφάνεια μειώνουν το βάθος διείσδυσης επειδή απορροφούν σημαντικά την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που εκπέμπεται. Χρήση κεραιών με μικρότερη συχνότητα, αυξάνει το βάθος, μειώνεται όμως και η ανάλυση. Οι θωρακισμένες κεραίες δίνουν καλύτερα αποτελέσματα γιατί η ενέργεια είναι κατευθυνόμενη και δεν λαμβάνονται ανακλάσεις παρά μόνο από το έδαφος. Αντίθετα οι μη θωρακισμένες κεραίες δίνουν πολλές ανακλάσεις από το χώρο και πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτική ερμηνεία όταν χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους κεραίες.

3.Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΑ ΚΟΥΚΛΙΑ ΚΑΙ Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν λεπτομέρειες για την γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο στα Κούκλια της Πάφου. Επίσης θα περιγράψουν με συντομία η αρχή λειτουργίας των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η επεξεργασία που ακολούθησε στο εργαστήριο. Τέλος θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την άποψη της ποιότητας τους καθώς και τα προβλήματα θορύβου που προέκυψαν.

3.2 Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται η επεξεργασία των γεωφυσικών μετρήσεων, η οποία είναι κοινή για όλα τα είδη της γεωφυσικής διασκόπησης. Σκοπός της επεξεργασίας είναι η εξομάλυνση των δεδομένων και η κατά το δυνατόν απαλοιφή του θορύβου, έτσι ώστε να είναι αναγνωρίσιμες οι υπεδάφινες δομές. Οι κύριες πηγές θορύβου κατά την γεωφυσική διασκόπηση στα Κούκλια ήταν:

- Το επιφανειακό διαταραγμένο στρώμα λόγω άρωσης και καλλιέργειας
- Τα επιφανειακά διεσπαρμένα μεταλλικά αντικείμενα αλλά και τα θαμμένα

Η επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων έγινε με το λογισμικό **Surfer 8**. Είναι ένα λογισμικό με ειδικά στατιστικά εργαλεία τα οποία μας δίνουν την δυνατότητα να κάνουμε επεξεργασία των δεδομένων μας σε διάφορα επίπεδα.

Τα επίπεδα επεξεργασίας τα οποία έλαβαν χώρα κατά την συγκεκριμένη επεξεργασία είναι τα εξής:

1) MUTING – ΑΠΟΚΟΠΗ

Σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας αφού πάρουμε τα δεδομένα πεδίου (raw data), γίνεται αποκοπή των πολύ ακραίων τιμών καθώς επίσης και των dummy values (ψευδοτιμών) [204.7 ή 2047.5]. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό αφορά τις μαγνητικές και τις ηλεκτρικές μεθόδους.

2) MEAN CORRECTION – ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ Η ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ

Στο στάδιο αυτό γίνεται διόρθωση στο επίπεδο αναφοράς διότι έχουμε μεταβολή του ύψους του οργάνου λόγω της τοπογραφίας. Όσον αφορά τα μαγνητικά και την μαγνητική επιδεκτικότητα στα ηλεκτρομαγνητικά, η διόρθωση επιπέδου γίνεται με επίπεδο αναφοράς το μηδέν. Ενώ όσον αφορά τα ηλεκτρικά και την αγωγιμότητα στα ηλεκτρομαγνητικά, η διόρθωση επιπέδου γίνεται με επίπεδο αναφοράς την μέση τιμή όλων των καννάβων.

Στην συνέχεια προσθέτουμε ή αφαιρούμε σε κάθε καννάβο την διαφορά μέσης τιμής όλων των καννάβων μείον την μέση τιμή κάθε καννάβου Αυτό ισχύει για τα ηλεκτρικά και την αγωγιμότητα στα ηλεκτρομαγνητικά. Στα μαγνητικά και την μαγνητική επιδεκτικότητα στα ηλεκτρομαγνητικά, προσθέτουμε το αντίθετο της μέσης τιμής για να μηδενίσουμε την μέση τιμή του κάθε καννάβου.

3) DESPIKING – ΑΠΟΚΟΠΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ

Από την διόρθωση επιπέδου προκύπτουν τα mean corrected data, από τα οποία στην συνέχεια αποκόπτονται οι πολύ ακραίες τιμές ως εξής: ελέγχεται η τυπική απόκλιση του συνόλου των τιμών σε σχέση με την μέση τιμή και κρατούνται οι τιμές που απέχουν +/- μία ή δύο φορές την τυπική απόκλιση από την μέση τιμή. Οι τιμές που βρίσκονται έξω από αυτό το διάστημα, αντικαθίστανται με τιμή ίση με την μέση τιμή +/- τυπική απόκλιση. Έτσι προκύπτουν τα despiked data.

4) LINE EQUALIZATION X AND Y – ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ X ΚΑΙ Ψ

Τέλος στα despiked data γίνεται η γραμμική διόρθωση η οποία αποτελείται από τα εξής στάδια :

α) line equalization x – Γίνεται ταξινόμηση των δεδομένων ως προς τον άξονα X και προσθέτουμε ή αφαιρούμε την μέση τιμή για κάθε βήμα ξεχωριστά στην διεύθυνση X, πχ.0.5m , 1m, 1.5m κ.τ.λ.

β) line equalization y Γίνεται ταξινόμηση των δεδομένων ως προς τον άξονα Y και προσθέτουμε ή αφαιρούμε την μέση τιμή για κάθε βήμα ξεχωριστά στην διεύθυνση Y, πχ.0.5m , 1m, 1.5m κ.τ.λ.

Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία των αρχείων χωριστά, ακολουθεί η ένωση των καννάβων (grids), με τις πραγματικές συντεταγμένες για κάθε κάρναβο. Στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της παρεμβολής (gridding με την μέθοδο του kriging) για να προκύψουν οι χάρτες των περιοχών διασκόπισης. Το βήμα της παρεμβολής στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ίσο με 0.1 m.

5) GRID DATA - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ:

Είναι ένα σύστημα υπολογισμού πλέγματος που εξετάζει τα στοιχεία η ελεγχόμενη διανομή και η διαχείριση των μεγάλων διανεμημένων στοιχείων. Από το grid χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο kriging και πήραμε το interpolation αρχείο και η τελική Παρουσίαση του χάρτη έγινε με image map.

3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων της γεωφυσικής επεξεργασίας

Γενικά στους μαγνητικούς χάρτες πριν την επεξεργασία, όπως θα παρουσιαστεί και στην συνέχεια αναλυτικά παρατηρείται γραμμικός θόρυβος λόγω άρωσης και πιθανότατα λόγω υπεδάφιου ποτιστικού συστήματος, αλλά και μεμονωμένος θόρυβος από μεταλλικά αντικείμενα που βρίσκονται επιφανειακά διεσπαρμένα αλλά και σε μικρό βάθος. Στα άκρα που υπάρχουν συρματοπλέγματα καταστρέφεται το σήμα. Στους χάρτες των ηλεκτρομαγνητικών, όπου μελετάται η κατανομή της μαγνητικής επιδεκτικότητας, τα προβλήματα που συναντώνται είναι ίδια με εκείνα των μαγνητικών.

Στους χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης πριν την επεξεργασία παρατηρούνται γενικά μεμονωμένες ζώνες υψηλών και χαμηλών αντιστάσεων. Αντίστοιχα προβλήματα με τα ηλεκτρικά συναντώνται στους χάρτες των ηλεκτρομαγνητικών, όπου μελετάται η αγωγιμότητα. Στους χάρτες αυτούς παρατηρούνται ζώνες χαμηλής και υψηλής αγωγιμότητας, γεγονός που καταστρέφει την εικόνα. Η εικόνα διορθώνεται μόνο όταν γίνει γραμμική διόρθωση κατά την διεύθυνση x και y.

3.4 ΦΙΛΤΡΑ

3.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα φίλτρα εφαρμόζονται για ποικίλους σκοπούς σε μια εικόνα, όπως η γενίκευσή της, η απομάκρυνση του τυχαίου θορύβου, το γέμισμα των κενών μεταξύ των εικονοστοιχείων που προκύπτουν από τη μετατροπή ανυσματικών δεδομένων σε δεδομένα που έχουν τη δομή εικονοστοιχείων, των εντοπισμό απότομων αλλαγών της τιμής φωτεινότητας, την ενίσχυση/εντοπισμό της πληροφορίας υψηλών συχνοτήτων, κ.α.

Μια εικόνα μπορεί να θεωρηθεί σαν το άθροισμα συνιστωσών υψηλής και χαμηλής συχνότητας η απόσπαση των οποίων μπορεί να γίνει με την εφαρμογή φίλτρων.

3.4.2 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΦΙΛΤΡΩΝ

Φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (high pass) :

Μια μεθοδολογία προσδιορισμού τους βασίζεται στη αφαίρεση των φίλτρων διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (φίλτρα εξομάλυνσης) από την αρχική εικόνα. Κατά αυτό των τρόπο προκύπτουν τα φίλτρα διέλευσης υψηλών συχνοτήτων που είναι αντίστοιχα στα φίλτρα εξομάλυνσης.

Διωνυμικά φίλτρα (low pass):

Μια παραλλαγή τους είναι τα διωνυμικά φίλτρα στα οποία δίνεται βάρος αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση από το κέντρο του πίνακα συνέλιξης με αποτέλεσμα να προκύπτουν διαφορετικοί(μικρότεροι) συντελεστές για τα εικονοστοιχεία που είναι στις διαγώνιους.

Φίλτρα Laplacian:

Η Laplacian μιας εικόνας τονίζει περιοχές έντασης της ταχείας αλλαγής και για το λόγο αυτό συχνά χρησιμοποιούνται για ανίχνευση ακμής. Η Laplacian συχνά εφαρμόζεται σε μια εικόνα που έχει για πρώτη φορά κάτι εξομαλύνεται με την προσέγγιση ενός Gaussian εξομάλυνσης φίλτρο, για να μειώσει την ευαισθησία στο θόρυβο, και συνεπώς και οι δύο

παραλλαγές θα πρέπει να περιγράφονται μαζί εδώ. Ο επιχειρηματίας έχει συνήθως μια ενιαία εικόνα graylevel ως είσοδο και παράγει μια άλλη εικόνα graylevel ως παραγωγή.

Πως Λειτουργεί:

Το Laplacian $L(x, y)$ της εικόνας με pixel τιμών έντασης $I(x, y)$ δίνεται από τον τύπο:

$$L(x, y) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$$

Αυτό μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση συνέλιξη φίλτρο.

Δεδομένου ότι η συμβολή της εικόνας, είναι ως ένα σύνολο από διακριτά εικονοστοιχεία, πρέπει να βρούμε μια διακριτή συνέλιξη πυρήνα που μπορεί να προσεγγίσει το δεύτερο παραγώγων στον ορισμό του Laplacian. Δύο πυρήνες που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι μικρές φαίνεται στο Σχήμα 1.

0	-1	0	-1	-1	-1
-1	4	-1	-1	8	-1
0	-1	0	-1	-1	-1

Σχήμα 1 Δύο διακριτές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως για την Laplacian φίλτρο. Επειδή αυτές οι πυρήνες της προσέγγισης είναι ένα δεύτερο παράγωγο μέτρηση για την εικόνα, που είναι πολύ ευαίσθητες στο θόρυβο. Για να αντισταθμιστεί αυτό, η εικόνα είναι συχνά Gaussian άνοιξαν πριν από την εφαρμογή του φίλτρου Laplacian. Αυτή η προ-επεξεργασία βήμα μειώνει την υψηλή συχνότητα θορύβου συστατικά πριν από τη διαφοροποίηση βήμα.

Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι η λειτουργία είναι συνέλιξη συνεργασίας, μπορούμε να συνελίξουμε το Gaussian φίλτρο εξομάλυνσης με το φίλτρο Laplacian πρώτα από όλα και, στη συνέχεια, αυτό το υβριδικό συνέλιξης φίλτρο με την εικόνα για να επιτευχθεί το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Κάνοντας τα πράγματα τον τρόπο αυτό έχει δύο πλεονεκτήματα:

Δεδομένου ότι τόσο η Gaussian και η Laplacian είναι συνήθως πολύ μικρότερη από την εικόνα, αυτή η μέθοδος συνήθως απαιτεί πολύ λιγότερες αριθμητικές πράξεις.

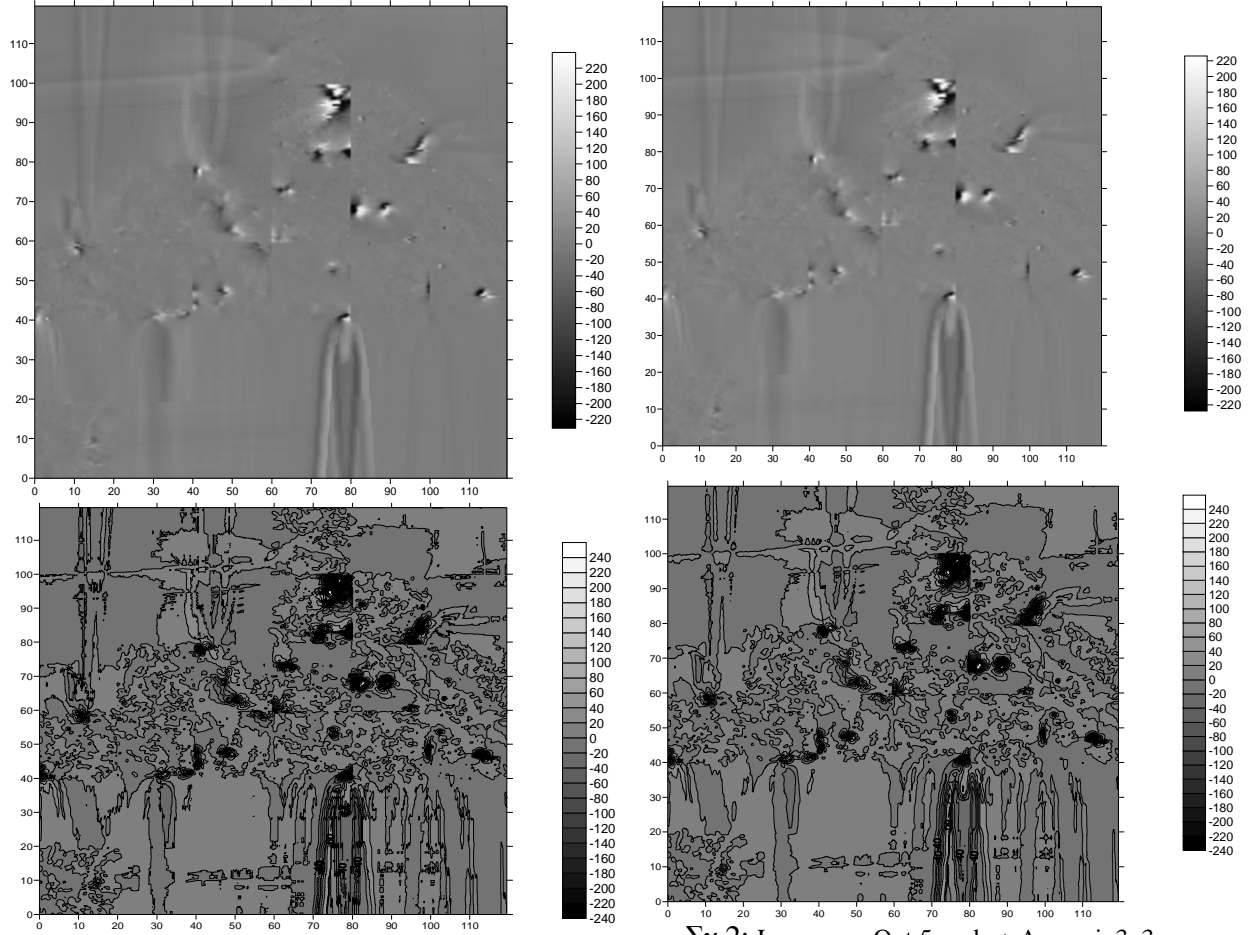
4. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.1 Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η χαρτογράφηση εστίασε το ενδιαφέρον της στην αποτύπωση των αρχαιολογικών χώρων καθώς και των γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Κατά την γεωφυσική διασκόπιση χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, της ηλεκτρικής αντίστασης, ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις. Επίσης συλλέχθηκαν οι διαθέσιμες για την περιοχή αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες.

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ ΠΟΥ ΕΓΙΝΑΝ:

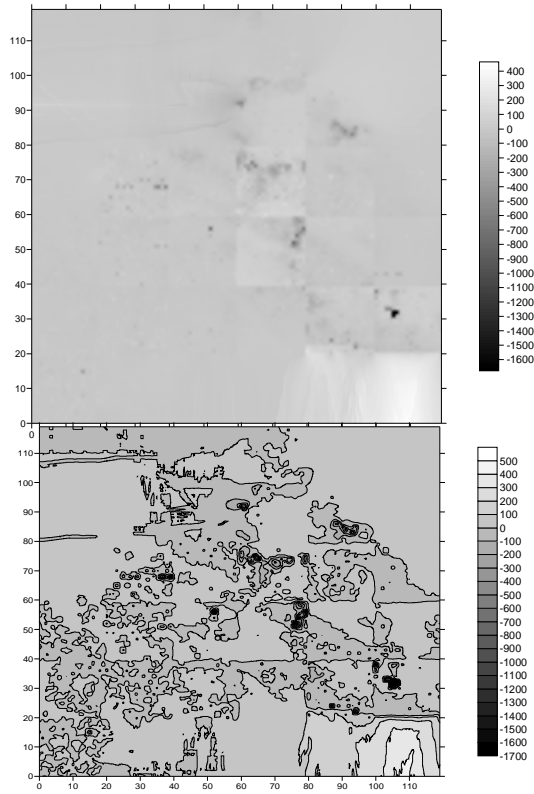
ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ:



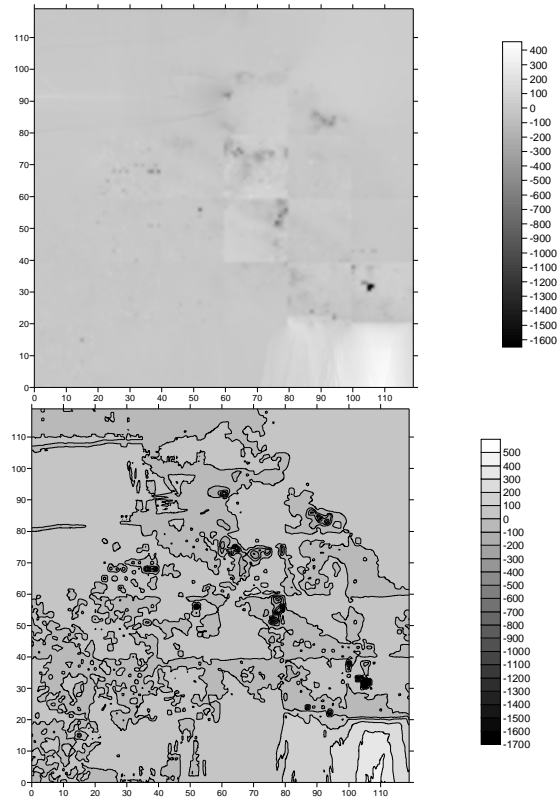
Σχ.1: Nonlinear filters-other nonlinear filters- out
Threshold averaging

Σχ.2: Low-pass- Out 5-node + Averagin3x3

ΗΛΕΚΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ:

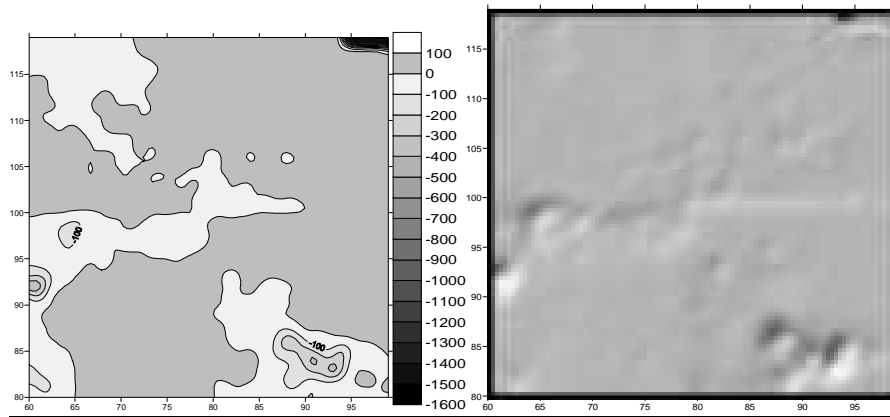


Σχ3: Low-pass filters-out 5-node X averaging 3x3
Threshold averaging

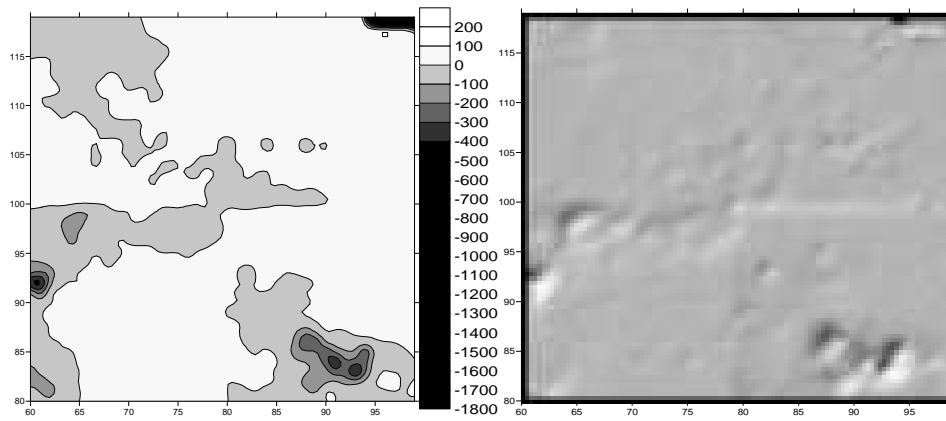


Σχ4: Nonlinear filters- other nonlinear filters-out

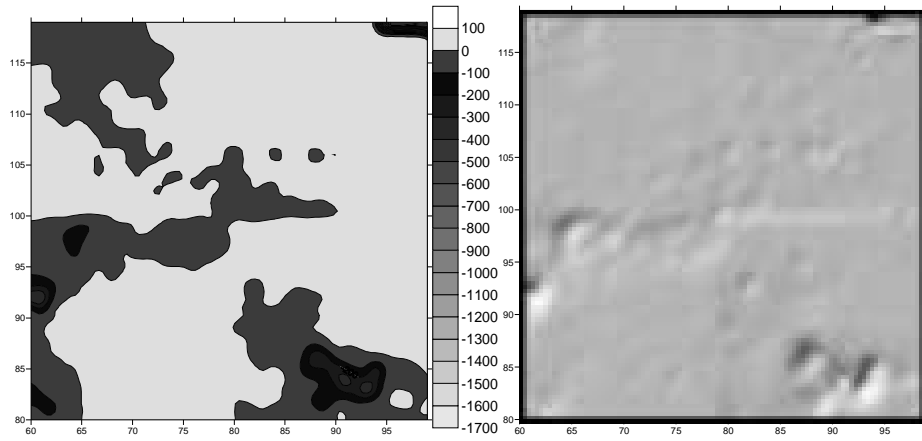
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ ΜΑΖΙ:



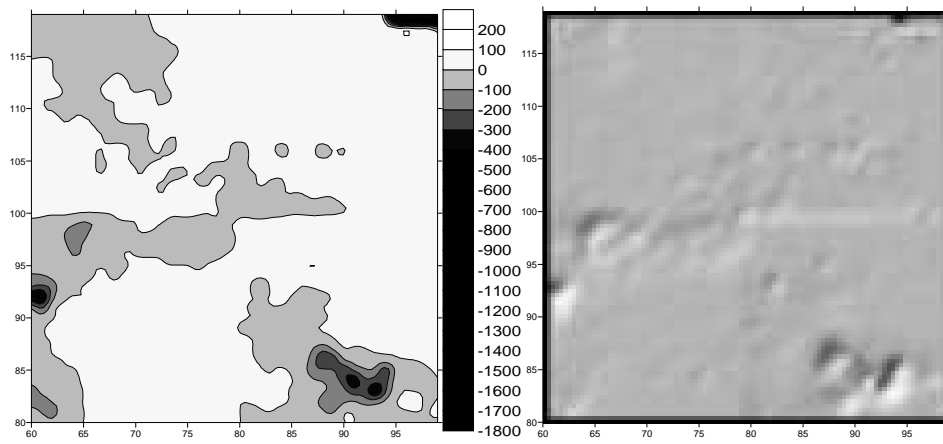
Σχ5: User Defined Filters-Low-Pass-Out Inverse Distance



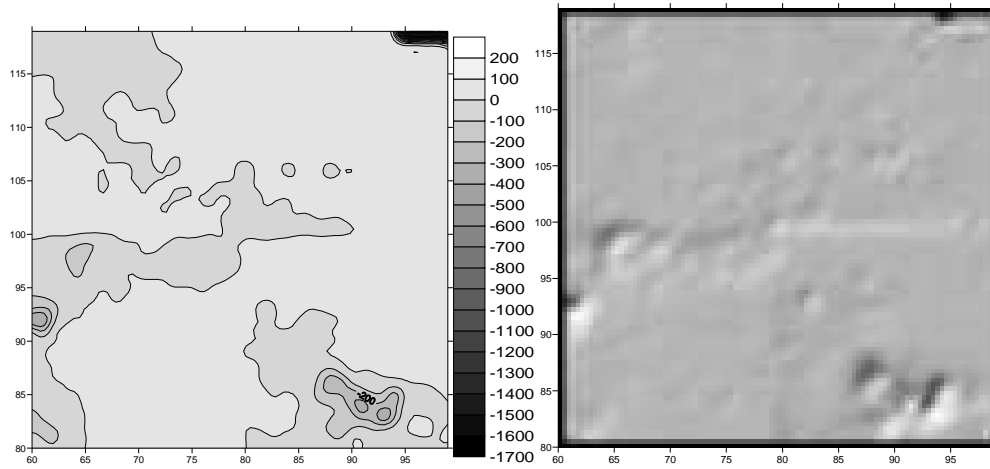
Σχ6: Predefined Filters-Low-Pass-Out Gaussian 3x3



Σχ.7: Predefined Filters-Low-Pass-Out 5-nodeX Averaging 3x3

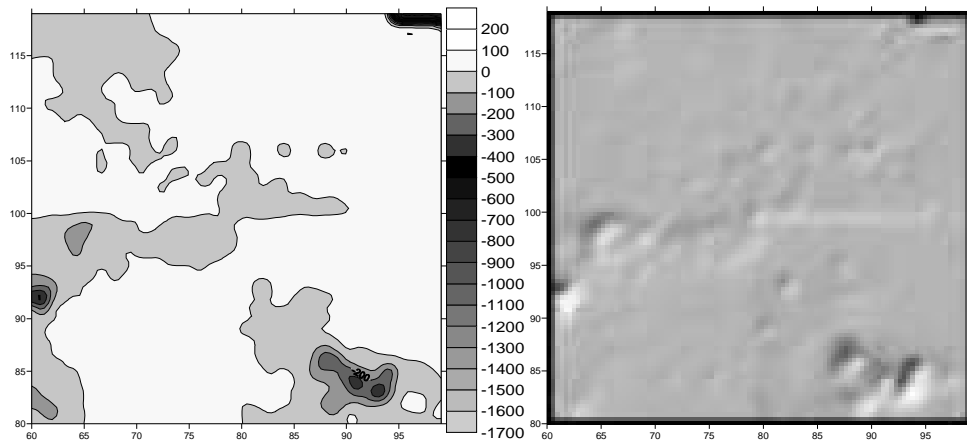


Σχ.8: Predefined Filters-Low-Pass-Out Low-Pass 2

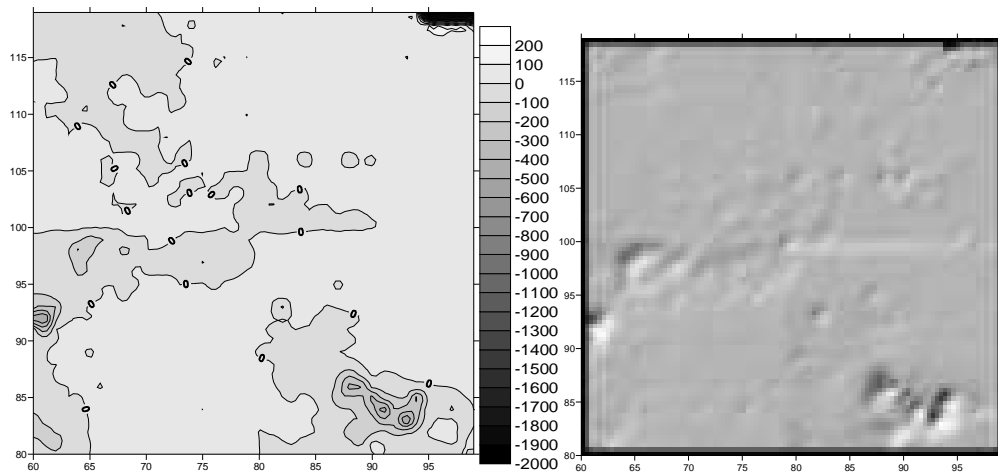


Σχ.9: Predefined Filters-Low-Pass-Out 9-node Averaging 3x3

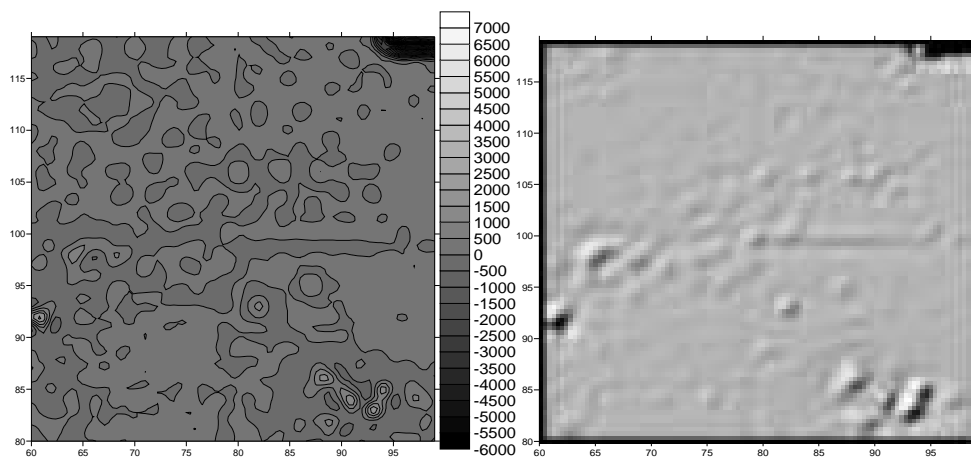
Στο σχήμα 9 μπορούμε να δούμε κάτι λόγω του ότι βλέπουμε ομοιόμορφη αλλαγή στα χρώματα τις κλίμακας μας.



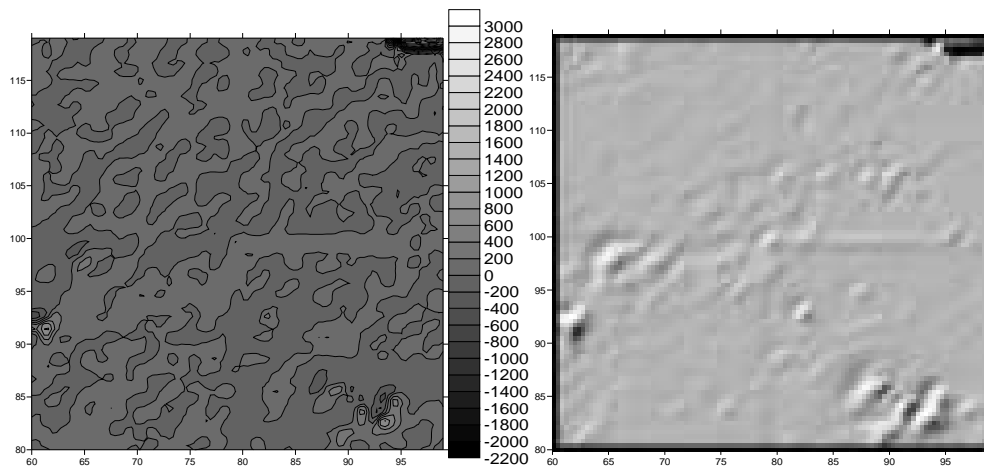
Σχ.10: Predefined Filters-Low-Pass-Out Low-Pass 1



Σχ.11: Predefined Filters- High-pass1- Out High-pass3

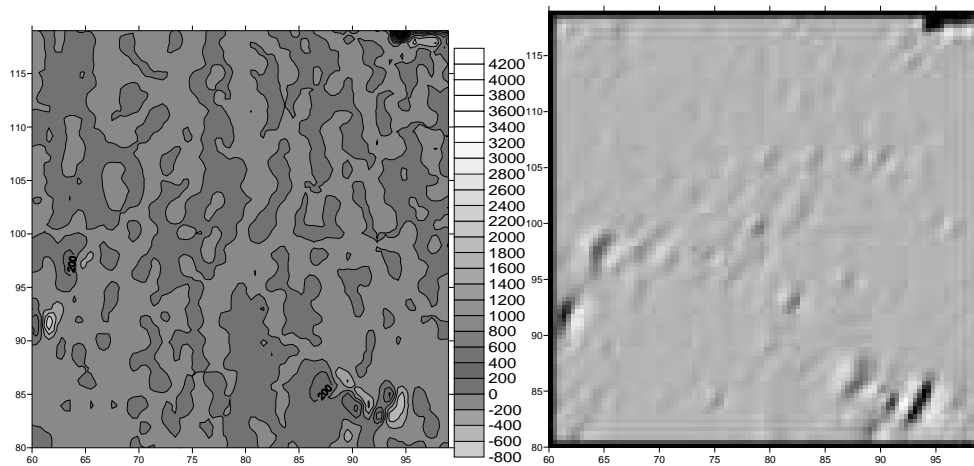


Σχ.12: Predefined Filters-Order 2 Derivative Filters-Out Difference Of Gaussian 9x9

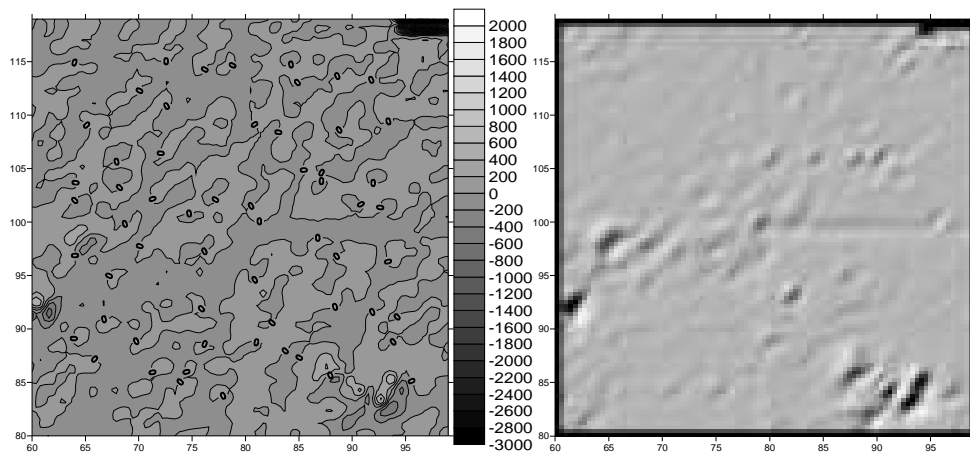


Σχ.13: Predefined Filters-Gradien Directional Filters-Out Southeast 3x3

Στο σχήμα 13 δεν μπορούμε να δούμε κάτι λόγω του ότι δεν βλέπουμε κάποια ουσιαστική αλλαγή στις τιμές και είναι πολύ μεγάλες.

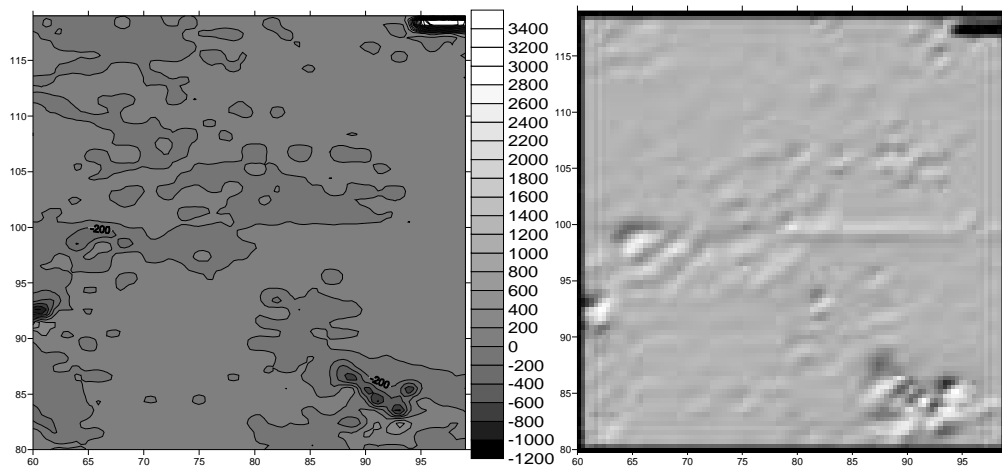


Σχ.14: Predefined Filters-Gradien Directional Filters-Out West 3x3

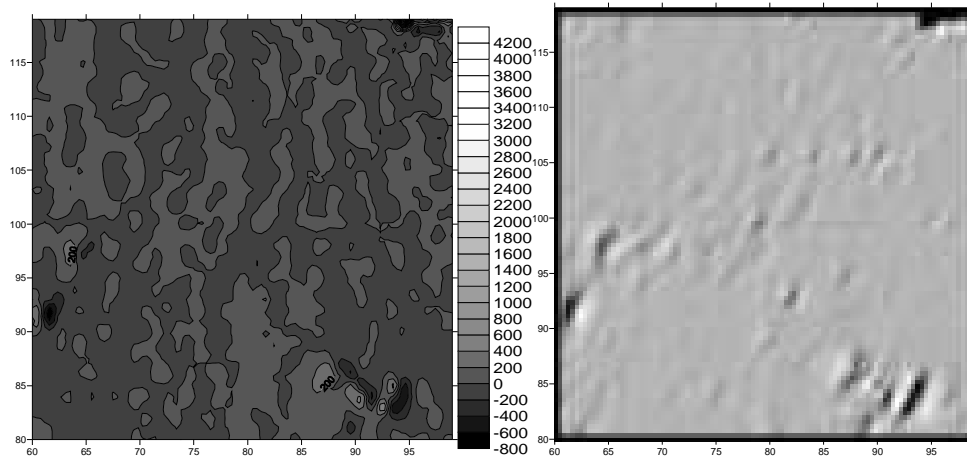


Σχ.15: Predefined Filters-Gradien Directional Filters-Out Northwest 3x3

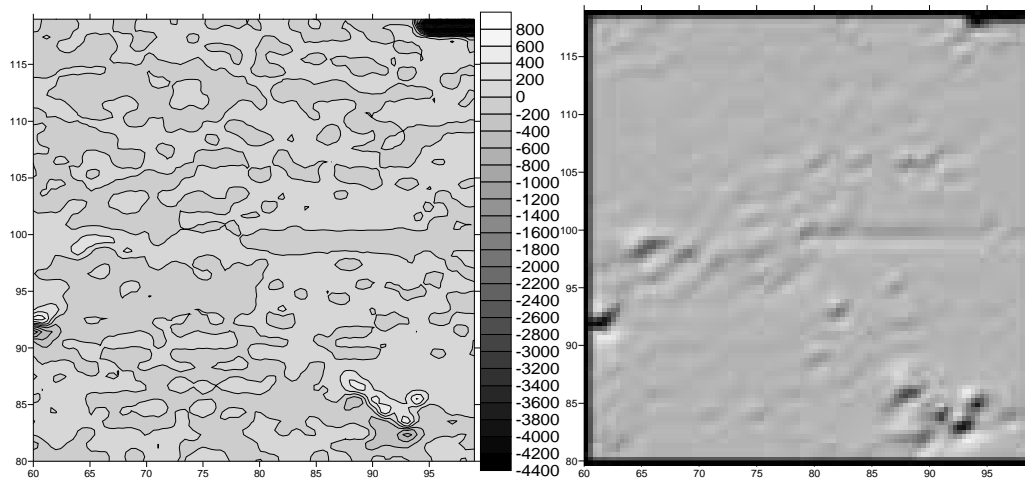
Στο σχήμα 15 δεν βλέπουμε τίποτα λόγω του ότι οι τιμες είναι πολύ μεγάλες.



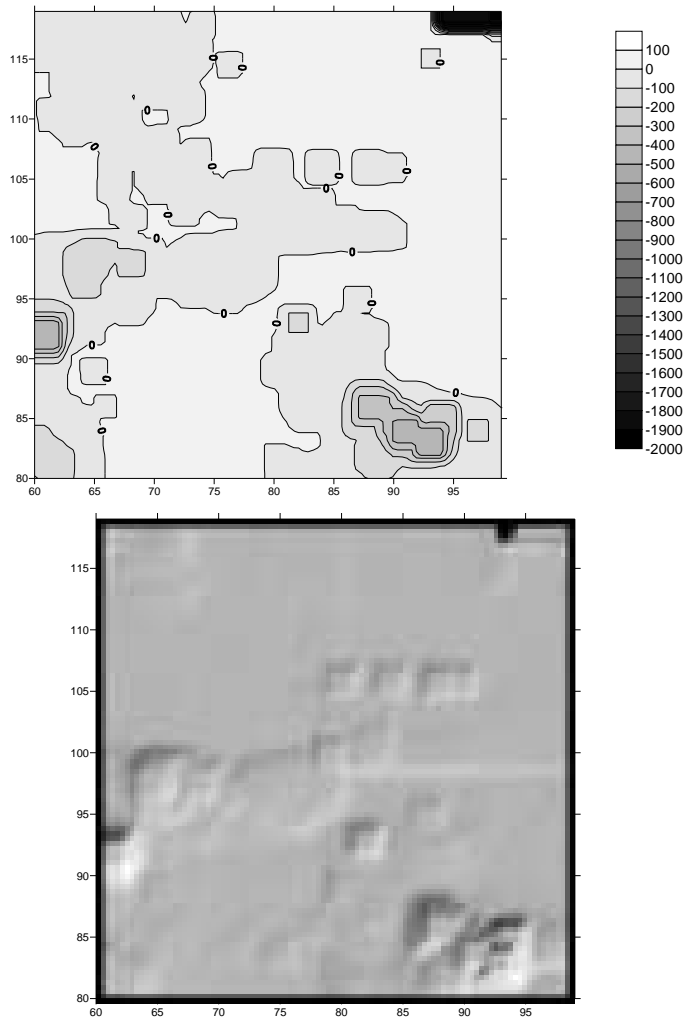
Σχ.16: Predefined Filters-Embossing Filters-Out South 3x3



Σχ.17:Predefined Filters-Embossing Filters-Out West 3x3

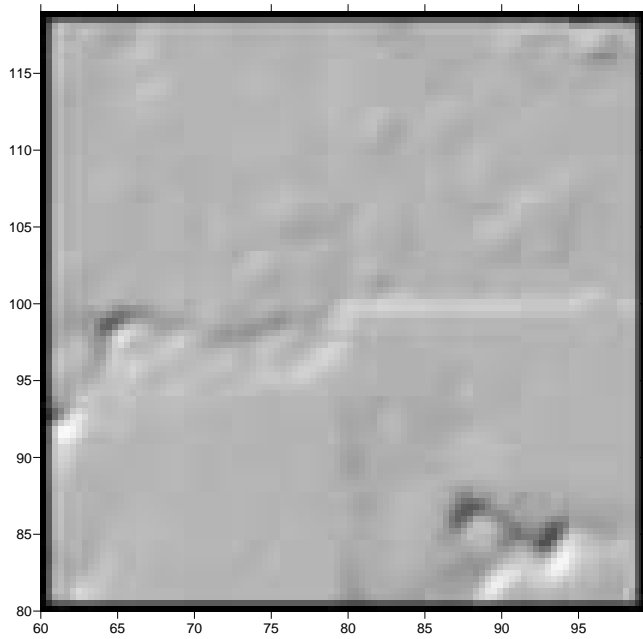
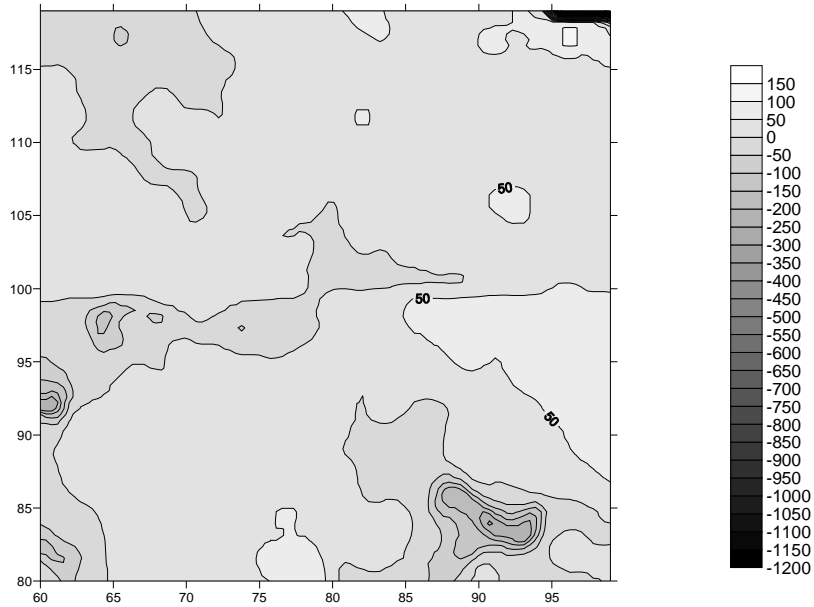


Σχ.18:Predefined Filters-Embossing Filters-Out North 3x3

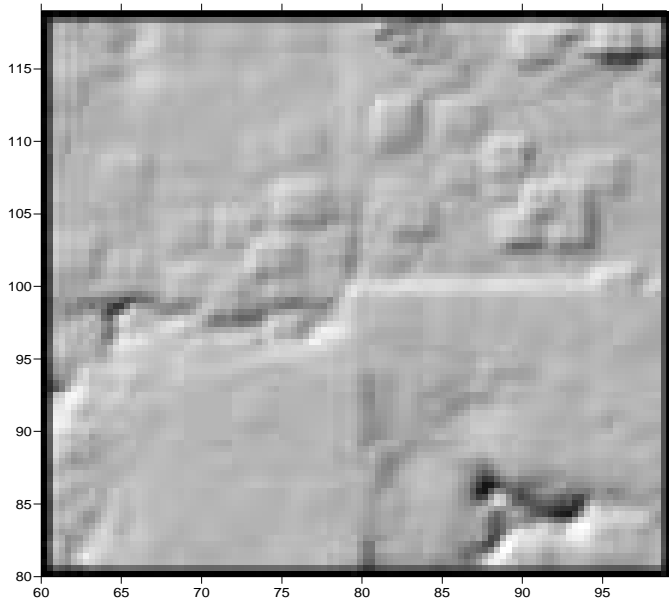
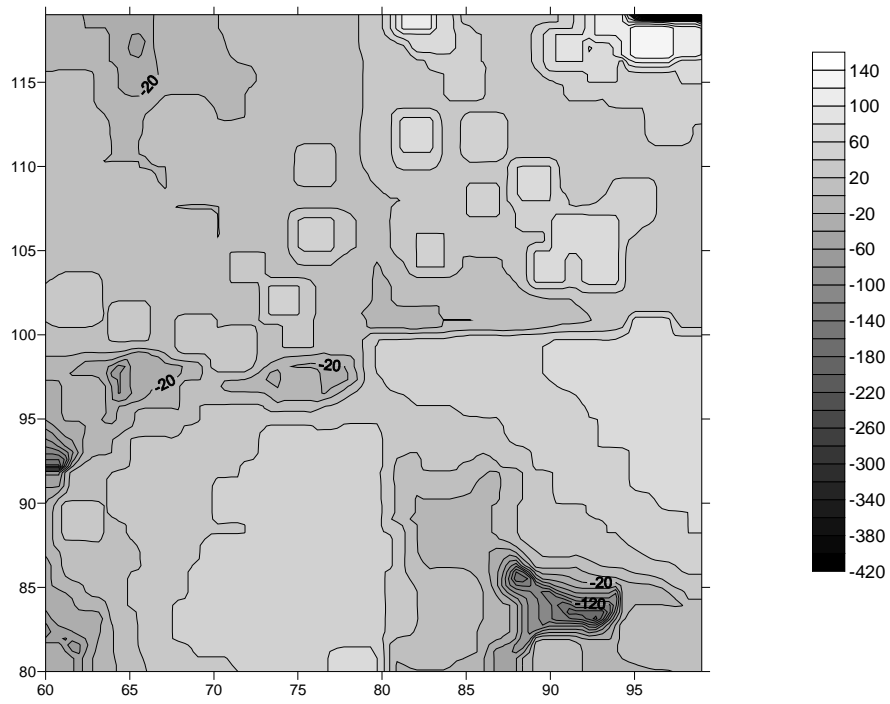


Σχ.19: Nonlinear Filters- Order Statistics Filters- Out minimum mxn

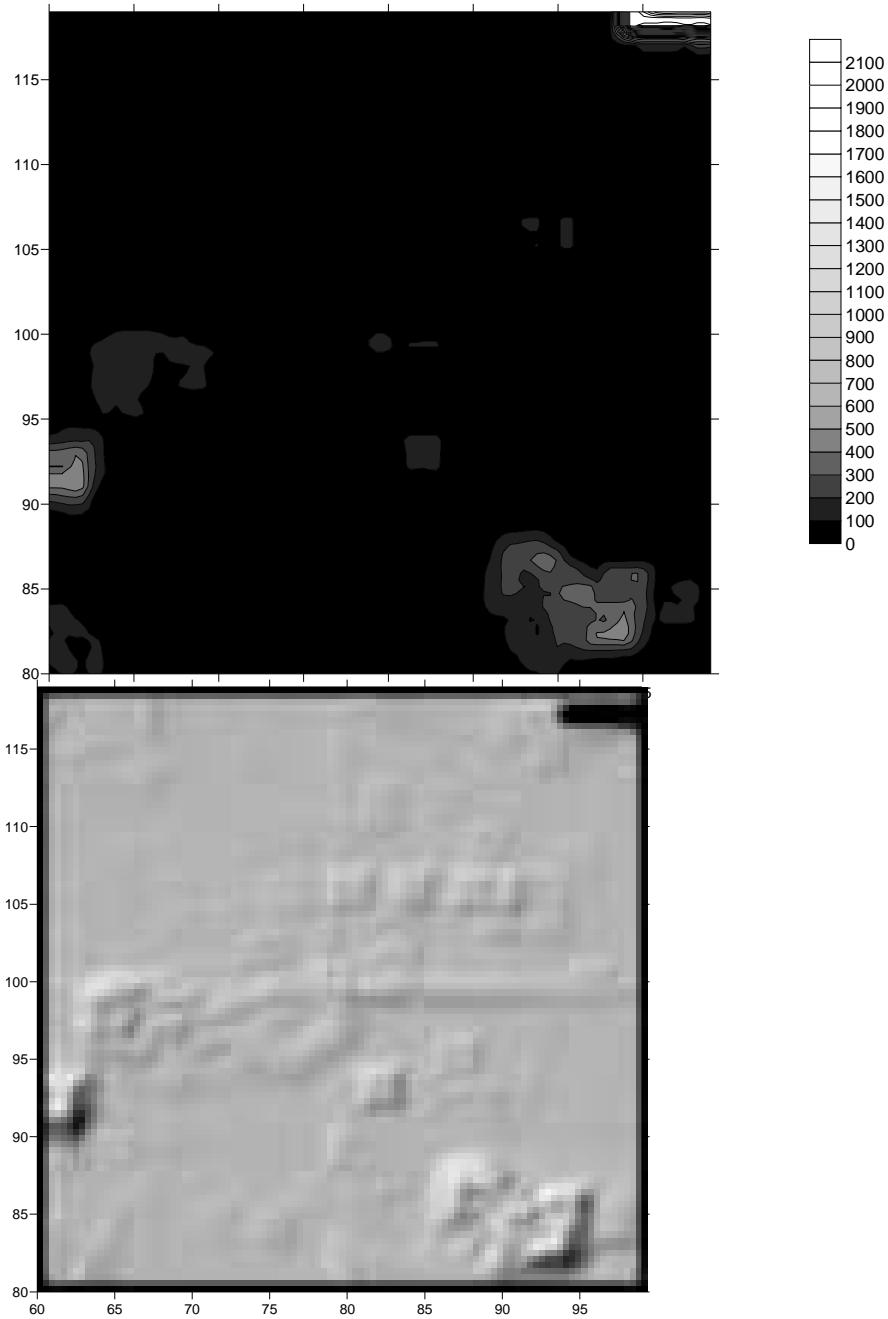
Στο σχήμα 19 μπορούμε να δούμε κάτι λόγω του ότι βλέπουμε ομοιόμορφη αλλαγή στα χρώματα τις κλίμακας μας.



$\Sigma\chi_{.20}$: Nonlinear Filters- Order Statistics Filters-Out Upper Quartile mxn

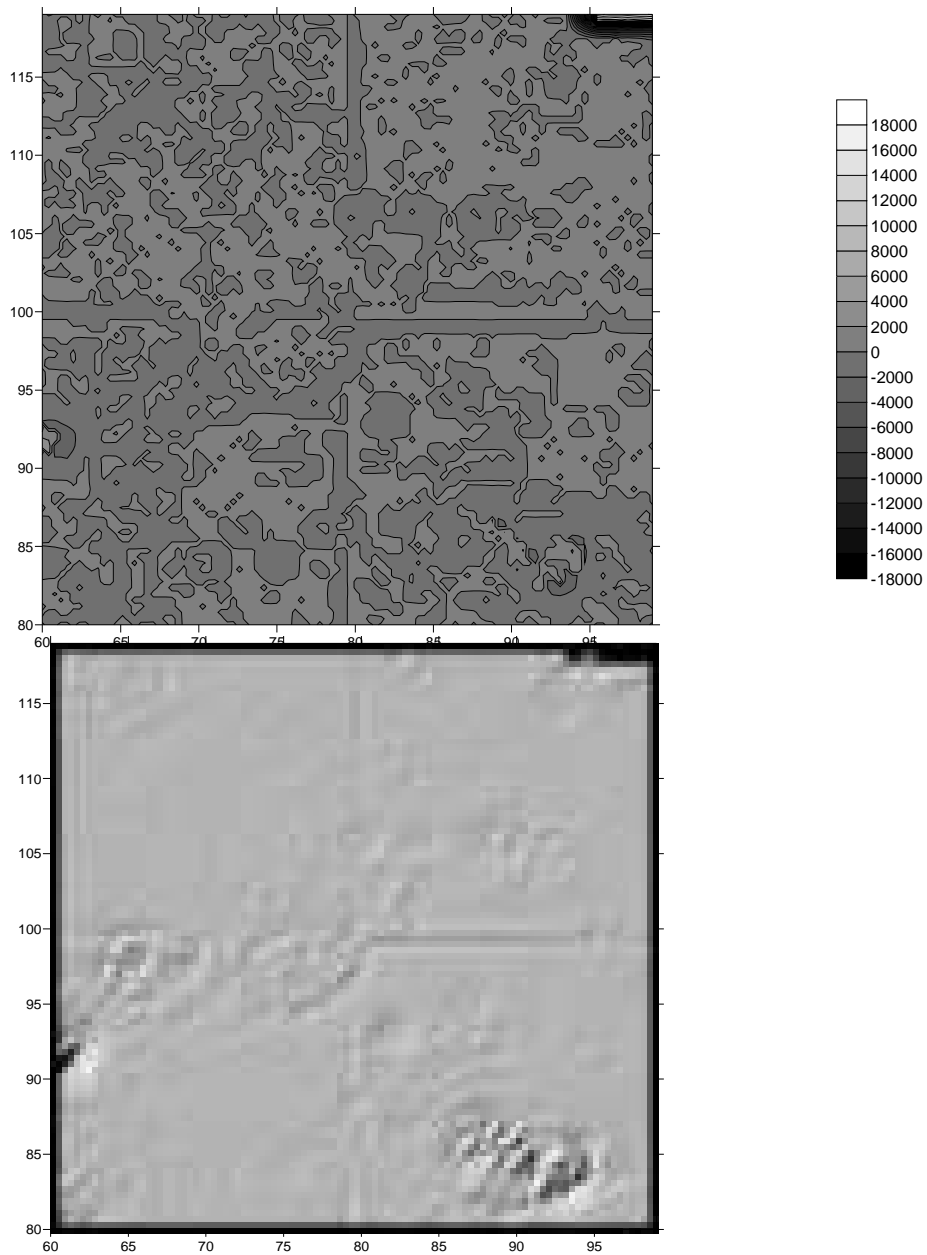


$\Sigma\chi$.21: Nonlinear Filters- Order Statistics Filters-Out Maximum mxn



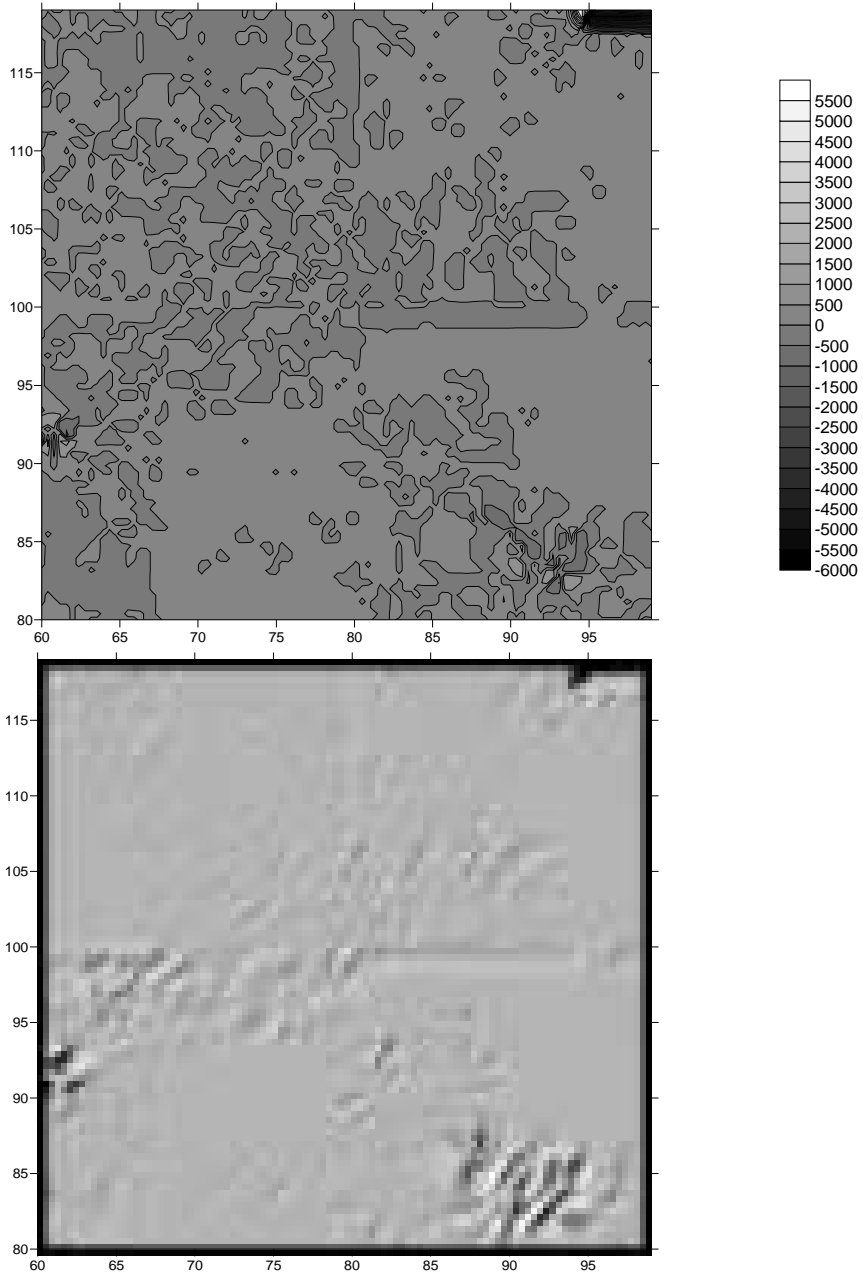
Σχ.22: Nonlinear Filters- Order Statistics Filters- Out range mxn

Στο σχήμα 22 δεν μπορούμε να δούμε κάτι λόγω του ότι δεν βλέπουμε κάποια ουσιαστική αλλαγή στις τιμές και τα χρώματα στην κλίμακα έχουν μεγάλες αλλαγές στο χρώμα.



Σχ.23: Nonlinear Filters- Compass Gradient Filters-Out Kirsch 3x3

Στο σχήμα 23 δεν μπορούμε να δούμε κάτι λόγω του ότι δεν βλέπουμε κάποια ουσιαστική αλλαγή στις τιμές.



$\Sigma\chi_{.24}$: Nonlinear Filters- Compass Gradient Filters-Out Robinson 5-level 3x3