

### **Ευχαριστίες**

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε όλους εκείνους που συνέβαλλαν να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη προσπάθεια. Ευχαριστούμε καταρχήν τον Δρ. Σαρρή Απόστολο για την συμμετοχή μας στο ερευνητικό πρόγραμμα γεωφυσικών διασκοπήσεων που διεξήχθησαν στον αρχαιολογικό χώρο του Ιστρου στον κόλπο Μιραμπέλλου, Ανατολικής Κρήτης, για την παραχώρηση των δεδομένων από τις διασκοπήσεις αυτές καθώς επίσης και για το πολύτιμο γραφικό υλικό το οποίο χρησιμοποιήσαμε στην εργασία μας. Επίσης θερμές ευχαριστίες οφείλουμε στις οικογένειές μας και στους φίλους μας για την υποστήριξη που μας προσέφεραν στην διάρκεια της προσπάθειας μας. Επιπλέον, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά την Δρ. Κόκκινου Ελένη για το φιλικό κλίμα συνεργασίας καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής 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 διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο του Ιστρου, που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Ωραιόκαστρου, στον κόλπο του Μιραμπέλλου στην ανατολική Κρήτη. Η περιοχή αυτή αποτελεί αντικείμενο μελέτης για τους αρχαιολόγους εδώ και αρκετές δεκαετίες, ενώ η γεωφυσική χαρτογράφησης της ξεκίνησε το 2002. Ταυτόχρονα με την παρουσίαση της επεξεργασίας εντοπίζονται και οι κύριες πηγές θορύβου για την χαρτογράφηση στην συγκεκριμένη περιοχή. Στο τέλος επιχειρείται μια συνολική παρουσίαση και ερμηνεία με χρήση GIS.

### **Abstract**

Aim of this particular work is the presentation of the processing and its results from the geophysical mapping in the archaeological site of Istron, located in the coastal zone of the central to western Gulf of Mirabello, Eastern Crete. This region is the subject of intensive study for the archaeologists for enough decades, while the geophysical mapping just began in 2002. The main sources of noise for the geophysical mapping in the particular region are also presented, as well as the attempt of data interpretation by using GIS.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>1</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΓΕΩΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΙΣΤΡΟΥ.....</b>	<b>4</b>
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
1.2	Η ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΛΕΙΑ ΤΟΥ ΩΡΑΙΟΚΑΣΤΡΟΥ ΣΤΟ ΜΙΡΑΜΠΕΛΛΟ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ .....	4
1.3	Η ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΙΣΤΡΟΥ.....	5
1.4	Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΙΣΤΡΟΥ (2002 – 2006) .....	6
<b>2</b>	<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ .....</b>	<b>12</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
2.2	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	12
2.2.1	ΠΕΡΙΓΡΦΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	12
2.2.2	ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ (ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ , 1996).....	13
2.2.3	ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ .....	14
2.2.4	ΓΕΩΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ .....	15
2.2.5	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	16
2.2.6	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΝΩΜΑΛΙΩΝ .....	18
2.3	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	18
2.3.1	ΠΕΡΙΓΡΦΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	18
2.3.2	ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ .....	19
2.4	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ .....	20
2.4.1	ΠΕΡΙΓΡΦΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ .....	20
2.4.2	ΘΕΜΕΛΙΩΔΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ .....	21
2.4.3	ΤΥΠΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΟΡΥΚΤΩΝ ---	22
2.4.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ .....	25
2.4.5	ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	280
2.4.6	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	29
<b>3</b>	<b>Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΙΣΤΡΟ ΚΑΙ Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>313</b>
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	31
3.2	ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	31
3.2.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΟΜΕΤΡΟΥ ΡΥΘΜΙΖΟΜΕΝΗΣ ΡΟΗΣ.....	32
3.2.2	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ .....	32
3.2.3	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ RM15 .....	33
3.3	Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	35
3.3.1	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ .....	37

<b>4</b>	<b>ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΙΣΤΡΟ.....</b>	<b>46</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	46
4.2	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	46
4.3	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ GIS.....	47
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>83</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	83
5.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	83
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>84</b>

## 1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΓΕΩΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΊΣΤΡΟΥ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν στοιχεία για τον αρχαιολογικό χώρο του Ίστρου, που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Ωραιόκαστρου, στον κόλπο του Μιραμπέλλου στην ανατολική Κρήτη καθώς και γενικά στοιχεία για την γεωμορφολογία της περιοχής και τις γεωφυσικές διασκοπήσεις τα προηγούμενα χρόνια.

### 1.2 Η ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΩΡΑΙΟΚΑΣΤΡΟΥ ΣΤΟ ΜΙΡΑΜΠΕΛΛΟ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

Από τις πρώτες αρχαιολογικές έρευνες στην ανατολική Κρήτη από τους H. Boyd, R. Sieger και E. Hall, οι οποίοι ανέσκαψαν στην περιοχή Γουρνιά (χρονολογείται στην εποχή του Χαλκού), έγινε φανερό ότι ο κόλπος του Μιραμπέλλου φιλοξένησε παράκτιες κοινότητες στην αρχαιότητα. Η περιοχή του Ωραιόκαστρου, δυτικά της περιοχής Γουρνιά, έδειξε εξαρχής να υπόσχεται πολλά από αρχαιολογικής πλευράς.

Την χρονική περίοδο 1910 – 1912, το Ωραιόκαστρο ανασκάφτηκε από το University Museum της Φιλαδέλφεια. Ακόμη και σήμερα ανήκει στις λίγες περιοχές που χρονολογούνται στην εποχή του Χαλκού έως και την πρώιμη περίοδο του Σιδήρου. Κατά την διάρκεια της τελευταίας ανασκαφής το 1912, η Edith Hall ξεκίνησε μια μικρή ανασκαφή στο Ρωμαϊκό και Μινωικό λιμάνι του Ωραιόκαστρου. Εντόπισε μεγάλο αριθμό χειροποίητων αντικειμένων εξαιρετικής ποιότητας, κυρίως κεραμικών, που δείχνουν τις σημαντικές εμπορικές συναλλαγές που είχε η περιοχή στην αρχαιότητα.

#### **Σχήμα 1.1 Η περιοχή του Ίστρου (Sarris, 2002) .**

Το Αρχαιολογικό Ερευνητικό Πρόγραμμα του Ωραιόκαστρου (1985 – 95) συνεχίστηκε υπό την καθοδήγηση των B. Hayden και J. Moody. Η εντατική και συστηματική έρευνα άρχισε προκειμένου να τεκμηριωθεί το αρχαιολογικό, ιστορικό και περιβαλλοντικό πλαίσιο του οικισμού στο Ωραιόκαστρο, καθώς και των υπόλοιπων αρχαιολογικών έως και μεσαιωνικών χώρων που εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή του Ωραιόκαστρου.

Το μικρό ακρωτήριο του Πρινιατικού Πύργου (σχ. 1.1) ανασκάφτηκε αρχικά από την Hall το 1912 (Hall, 1914), και σε αυτό εστιάστηκε η προσοχή κατά την διάρκεια του Γεωαρχαιολογικού Ερευνητικού Προγράμματος του Ίστρου (2002 – 2006), στην τελευταία φάση του οποίου έγινε η λήψη των γεωφυσικών δεδομένων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία. Η περιοχή του Ίστρου επιλέχθηκε για περαιτέρω έρευνα διότι:

- εκτείνεται χρονολογικά από την εποχή του Χαλκού έως και την ιστορική αρχαιότητα.
- της μεγάλης σημασίας και ποιότητας αντικείμενων που έχουν βρεθεί στο χώρο.

- της δραστηριότητας του ως πύλης ή πρωτεύοντος λιμανιού στον κόλπο του Μιραμπέλλου.

### **1.3 Η ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΪΣΤΡΟΥ**

Η Κρήτη εντοπίζεται στο νότιο άκρο της αποκαλούμενης μικροπλάκας του Αιγαίου με έντονη σεισμική δραστηριότητα στην ζώνη σύγκρουσης και βύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική. Η ευρύτερη περιοχή της Κρήτης αποτελεί επίσης το κεντρικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου. Η επωθητική διαδικασία που λαμβάνει χώρα τα τελευταία 30 εκ. χρόνια καθορίζει το νεοτεκτονικό καθεστώς στην περιοχή. Το δυτικό τμήμα της Κρήτης ανέρχεται με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, ενώ το ανατολικό κατέρχεται δεξιόστροφα.

Ακόμη και η παράκτια περιοχή του Ίστρου ακολουθεί τη γενική καθοδική τάση της Ανατολικής Κρήτης. Συγχρόνως, η απόθεση ιζημάτων από τον τοπικό ποταμό έχει συμβάλει στην εξέλιξη του τοπίου. Κατά συνέπεια, η περιοχή του Ίστρου μορφοποιήθηκε από τρία γεγονότα:

- τις ανοδικές και καθοδικές κινήσεις του θαλάσσιου επίπεδου
- την καθοδική κίνηση του τμήματος της ανατολικής Κρήτης
- την απόθεση ποτάμιων ιζημάτων στις γειτονικές λεκάνες.

Στα πλαίσια του προγράμματος, κατασκευάστηκε λεπτομερής γεωλογικός χάρτης βασισμένος στην επί τόπου γεωλογική και τεκτονική αναγνώριση. Μελέτη με πυρηνοληψίες πραγματοποιήθηκε στις ποτάμιες/δελταϊκές καταθέσεις, στοχεύοντας στην ανίχνευση του ρυθμού απόθεσης των ηπειρωτικών και θαλάσσιων/υπολιμναίων ιζημάτων κατά τη διάρκεια του Ολόκενου (τελευταία 10.000 έτη).

Οι υπαίθριες παρατηρήσεις σε συνδυασμό με τα αρχικά εργαστηριακά αποτελέσματα υποστηρίζουν μια σταθερή και αργή καθίζηση στην παράκτια ζώνη, κατά την διάρκεια της περιόδου του Ολόκενου. Συγκεκριμένα, οι παρατηρήσεις στις ποτάμιες καταθέσεις κάτω από την παρούσα κοίτη ποταμού, δείχνουν μια μετάβαση από τα χαλίκια στο κατώτατο σημείο των ακολουθιών σε πιο λεπτόκοκκο υλικό στα ανώτερα μέρη τους. Το χαλικώδες τμήμα αυτών των ιζημάτων δείχνει ένα αποθετικό περιβάλλον, που χαρακτηρίζεται από μια χαμηλότερη μέση στάθμη θάλασσας. Κάτω από εκείνες τις περιστάσεις, ο ποταμός ήταν σε θέση να μεταφέρει πιο χονδρόκοκκο υλικό προς τη θάλασσα. Αργότερα, η βαθμιαία επίκληση μετακίνησε το δέλτα του ποταμού προς το εσωτερικό της ηπειρωτικής χώρας. Αυτοί οι νέοι γεωμορφολογικοί όροι προκάλεσαν την απόθεση πιο χονδρόκοκκου υλικού στην ηπειρωτική χώρα, επιτρέποντας την μεταφορά του λεπτόκοκκου υλικού σε μεγάλες αποστάσεις. Κατά συνέπεια, οι στρωματογραφικές παρατηρήσεις συμφωνούν με το τοπικό καθεστώς καθίζησης.

#### **1.4 Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΊΣΤΡΟΥ (2002 – 2006)**

Η περιοχή του Πρινιατικού Πύργου (Hayden 2003, 2004) αρχικά χαρτογραφήθηκε με τεχνικές EDM και GPS. Η χαρτογράφηση εστίασε το ενδιαφέρον της στην αποτύπωση των αρχαιολογικών χώρων καθώς και των γεωλογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης.

Κατά την γεωφυσική διασκόπηση χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, της ηλεκτρικής αντίστασης, ηλεκτρομαγνητικές μετρήσεις καθώς και μαγνητικής επιδεκτικότητας των υλικών. Επίσης συλλέχθηκαν οι διαθέσιμες για την περιοχή αεροφωτογραφίες και δορυφορικές εικόνες. Για την απεικόνιση όλων των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε GIS. Η γεωφυσική έρευνα το 2002 περιορίστηκε στο ακρωτήριο του Πρινιατικού Πύργου και γύρω από αυτό, ενώ το 2003 η έρευνα επεκτάθηκε ανατολικά, δυτικά και νότια του ακρωτηρίου (σχ.1.2).

Τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας (Sarris, 2003; Sarris et al., 2005) πρότειναν μια πιθανή περίφραξη του ακρωτηρίου στα βόρεια από τοίχους, καθώς την ύπαρξη κλιβάνων και φούρνων στην κεντρική περιοχή του ακρωτηρίου. Τα μεταλλικά τεμάχια, που βρέθηκαν, υποστήριζαν την υπόθεση ότι μερικοί από αυτούς τους κλιβάνους χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία μετάλλων. Περισσότεροι κλίβανοι, που χρησιμοποιήθηκαν πιθανώς για την παραγωγή κεραμικών, προτάθηκαν επίσης στη δυτική πλευρά του ακρωτηρίου. Η ίδια περιοχή έδωσε στοιχεία παρουσίας αρχιτεκτονικών λειψάνων, η ευθυγράμμιση των οποίων δείχνει ότι τα περισσότερα ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο επάγγελμα, αν και υπάρχουν στοιχεία για την ύπαρξη τουλάχιστον μιας φάσης οικοδόμησης.

Οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας, που πραγματοποιήθηκε σε εδαφολογικά δείγματα κατά μήκος 3 διαφορετικών τομών, πρότειναν ότι το κέντρο των δραστηριοτήτων βρίσκεται στην κορυφή του ακρωτηρίου, αν και ο οικισμός ίσως εκτεινόταν στο νότο. Μερικά ίχνη αρχιτεκτονικών λειψάνων έχουν προταθεί από την ερμηνεία των γεωφυσικών χαρτών στο νότιο άκρο του ακρωτηρίου, εκεί που αρχίζει η κλίση του λόφου. Υψηλότερη πυκνότητα των αρχιτεκτονικών λειψάνων εμφανίζεται νότια και ανατολικά, όπου βρίσκονται το σημερινό χωριό του Ίστρου και το ποδοσφαιρικό γήπεδο. Λαμβάνοντας υπόψη την κατεύθυνση (προς τη θάλασσα) μερικών υψηλών ανωμαλιών αντίστασης (που συσχετίζονται πιθανώς με το επιφανειακό διαταραγμένο εδαφικό στρώμα, την ρίψη μπαζών και την απόθεση αλλουβιακού υλικού από του κλάδους του ποταμού του Ίστρου), μπορεί επίσης να προταθεί ότι οι παλαιότεροι κλάδοι του ποταμού του Ίστρου κατευθύνονταν προς τη θάλασσα και από τις δύο πλευρές του Πρινιατικού Πύργου, αφήνοντας ένα μικρό πέρασμα με διεύθυνση ΝΔ στην ηπειρωτική χώρα.

Τα παραπάνω υποδεικνύουν ότι η παράκτια περιοχή του Πρινιατικού Πύργου χρησιμοποιήθηκε ως εργαστήριο – πιθανώς ως εργαστήριο αγγειοπλαστικής στην προϊστορική περίοδο και για την επεξεργασία μετάλλων κατά τη διάρκεια των πιο πρόσφατων φάσεων (ρωμαϊκή περίοδος). Τοποθετημένη σε έναν παράκτιο λόφο στη μέση της κοίτης του ποταμού του Ίστρου, η περιοχή πρόσφερε τους ιδανικούς όρους για τη λειτουργία των κεραμικών κλιβάνων και των φούρνων μετάλλων, δεδομένου ότι οι ΒΔ διεύθυνσης άνεμοι, που πνέουν στην περιοχή, βοηθούσαν στο άναμμα των φούρνων. Στους χάρτες που ακολουθούν (1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7) παρουσιάζεται τμήμα των γεωφυσικών εργασιών που διεξάχθηκαν στην περιοχή του Ίστρου τα προηγούμενα χρόνια.

**Σχήμα 1.2 Περιοχή γεωφυσικής διασκόπησης κατά την περίοδο 2002 – 2003  
(Sarris et al., 2005).**

**Σχήμα 1.3 Σύγκριση ηλεκτρικής αντίστασης και μαγνητικών (Sarris et al., 2005).**

**Σχήμα 1.4 Μαγνητικά, ηλεκτρική αντίσταση και μαγνητική επιδεκτικότητα για άλλη περιοχή  
του Ίστρου (Sarris et al., 2005).**



**Σχήμα 1.5** Ερμηνεία μαγνητικών ανωμαλιών (Sarris et al., 2005).

**Σχήμα 1.6 Μαγνητικά και μαγνητική επιδεκτικότητα (Sarris et al., 2005).**

**Σχήμα 1.7 Μαγνητικά και μαγνητική επιδεκτικότητα (Sarris et al., 2005).**

## **2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο των γεωφυσικών μεθόδων που εφαρμόστηκαν στην διασκόπηση του Ίστρου. Για την ακρίβεια, θα παρουσιαστούν τα θεωρητικά στοιχεία για την μαγνητική, ηλεκτρομαγνητική και ηλεκτρική μέθοδο.

### **2.2 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ**

#### **2.2.1 Περιγραφή της μαγνητικής μεθόδου**

Οι μαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης (σχ. 2.1) 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.

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.

#### **Σχήμα 2.1 Διασκόπηση με μαγνητόμετρο**

Η μαγνητική μέθοδος διασκόπησης βασίζεται στη μέτρηση και την ανάλυση των τοπικών ανωμαλιών του γεωμαγνητικού πεδίου, που οφείλονται σε διαφορές της έντασης μαγνήτισης των πετρωμάτων (Αράμπελος, 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.

### 2.2.2 Θεμελιώδη μαγνητικά μεγέθη (Παπαζάχος , 1996)

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 :  
$$H = F/P \text{ (2.1)}$$
 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 δίπολου 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 :  
$$M^* = P I \text{ (2.2)}$$
3. Μαγνήτιση: του σώματος είναι ένα διανυσματικό μέγεθος  $J$  που έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη μαγνητική ροπή και μέτρο, το οποίο δίνεται από τον εξής τύπο :  $J = M^* / V \text{ (2.3)}$  όπου  $V$  είναι ο όγκος του σώματος.
4. Μαγνητική επιδεκτικότητα: είναι ένα αδιάστατο μέγεθος  $k$  το οποίο δείχνει το μέτρο ευκολίας της μαγνήτισης ενός υλικού και ορίζεται από τις σχέσεις:  $k = J / H$  ή  $J = k H \text{ (2.4)}$ .

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

5. Μαγνητική διαπερατότητα : είναι μια σταθερά  $\mu$  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.
6. Μια άλλη σταθερά, η  $\mu_0$  εξαρτάται από το σύστημα μονάδων και έχει τιμή ίση με τη μονάδα στο ηλεκτρομαγνητικό σύστημα μονάδων.
7. Μαγνητική επαγωγή: είναι η ένταση  $B$  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 :

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

### 2.2.3 Μαγνητική επιδεκτικότητα των πετρωμάτων

Η μαγνητική επιδεκτικότητα  $\kappa$  (Αράμπελος ,1991) είναι μια σημαντική παράμετρος για τη μαγνητική μέθοδο. Η επιδεκτικότητα είναι ένα μέγεθος που γενικά δεν είναι δυνατό να μετρηθεί απευθείας στο πεδίο. Από την καμπύλη υστέρησης είναι φανερό ότι το  $\kappa$  δεν είναι σταθερό για ένα υλικό. Καθώς το  $H$  αυξάνει, το  $\kappa$  αυξάνει στην αρχή γρήγορα, φθάνει μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια ελαττώνεται στο μηδέν. Ακόμη, παρά το γεγονός ότι οι καμπύλες μαγνήτισης των διαφόρων υλικών έχουν γενικά το ίδιο σχήμα, η τιμή κόρου μεταβάλλεται σε ευρύτατα όρια για τους διάφορους τύπους των ορυκτών. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό όταν προσδιορίζουμε την επιδεκτικότητα να χρησιμοποιούμε μια τιμή του  $H$  περίπου ίδια με αυτή του γεωμαγνητικού πεδίου.

Ορισμένα ορυκτά, όπως ο μαγνητίτης, έχουν μεγάλη μαγνητική επιδεκτικότητα. Τα πετρώματα (πιν. 2.1) στα οποία συναντώνται τα ορυκτά αυτά, (όπως π.χ. τα εκρηξιγενή, οι γνεύσιοι κ.λ.π.) αποκτούν μαγνητικές ιδιότητες.

**Πίνακας 2.1** : Τιμές της μαγνητικής επιδεκτικότητας  $\kappa$  διαφόρων πετρωμάτων (Αράμπελος ,1991)

ΤΥΠΟΣ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ( κ x 10 <sup>6</sup> emu )	ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ
Ιζηματογενή		
Δολομίτης	0 - 75	10
Ασβεστόλιθος	2 - 280	25
Ψαμμίτης	0 - 1.660	30
Αργιλικός σχιστόλιθος	5 - 1.480	75
Διακύμανση Ιζηματογενών	0 - 4.000	75
Μεταμορφωμένα		
Αμφιβολίτης		60
Κρυσταλλικός σχιστόλιθος	25 - 240	120
Φυλλίτης		130
Γνεύσιος	10 - 2.000	
Χαλαζίτης		350
Σερπεντίνης	250 - 1400	
Σχιστόλιθος	0 - 3.000	500
Διακύμανση μεταμορφωμένων	0 - 5.800	350
Εκρηξιγενή		
Γρανίτης	0 - 4.000	200
Ρυόλιθος	20 - 3.000	
Δολερίτης	100 - 3.000	1.400
Αυγιτικός συηνίτης	2.700 - 3.600	
Ολιβινικός διαβάσης		2.000
Διαβάσης	80 - 13.000	4.500
Πορφυρίτης	20 - 16.700	5.000
Γάββρος	80 - 7.200	6.000
Βασάλτης	20 - 14.500	6.000
Διορίτης	50 - 10.000	7.000
Πυροξενίτης		10.500
Περιδοτίτης	7.600 - 15.600	13.000
Ανδεσίτης		13.500
Διακύμανση οξίνων εκρηξιγενών	3 - 6.530	650
Διακύμανση βασικών εκρηξιγενών	44 - 9.170	2.600

#### 2.2.4 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 (Αράμπελος ,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 διασκόπησης.

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.

### **2.2.5 Οργάνωση επίγειων μετρήσεων**

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

Οι επίγειες μετρήσεις είναι κυρίως 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 κ.λ.π.) του μαγνητικού πεδίου της γης. Όμοια, ο παρατηρητής δεν πρέπει να φέρει επάνω του μεταλλικά αντικείμενα (όπως π.χ. κλειδιά κ.λ.π.).

Οι μετρήσεις γίνονται σε τομές, κατά το δυνατό σε κανονικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις **εξαρτώνται** από το σκοπό της έρευνας (Αράμπελος ,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 διασκόπησης (Αράμπελος, 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 :

$$Z(x, y, 0) = Z(x, y, h) - h \frac{\partial Z}{\partial z} \quad \mathbf{2.6}$$

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  $Z$ .

## **2.2.6 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 (Αράμπελος, 1991). Η μέθοδος της αναγωγής του πεδίου σε ορισμένο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως και η μέθοδος της δεύτερης παραγώγου 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 παραγώγου, 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.

## **2.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ**

### **2.3.1 Περιγραφή της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου**

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι (Αράμπελος, 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 διασκόπησης 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.  $500 \text{ c S}^{-1}$ ) 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 (σχ. 2.2) 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, κ.λ.π.) 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 διασκόπηση 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 διασκόπηση των μεταλλευμάτων και όχι στη διασκόπηση πετρελαίου.

## **Σχήμα 2.2 Ηλεκτρομαγνητική διασκόπηση για χαρτογράφηση αρχαιολογικού χώρου**

### **2.3.2 Θεμελιώδεις ηλεκτρομαγνητικές αρχές**

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι βασίζονται σε ορισμένες αρχές της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας τις οποίες θα περιγράψουμε παρακάτω :

- 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 ηλεκτρεργετική 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  $D = \epsilon * H$  για ομογενές και ισότροπο μέσο και  $\epsilon$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του μέσου.

## 2.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

### 2.4.1 Περιγραφή της ηλεκτρικής μεθόδου

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπησης (Αράμπελος ,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.

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 (σχ. 2.3) κλπ. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται πολύ λιγότερο στη διασκόπηση 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.

### **Σχήμα 2.3 Χαρτογράφηση αρχαιολογικού χώρου με την μέθοδο της ηλεκτρικής αντίστασης.**

#### **2.4.2 Θεμελιώδη 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  $\rho$  του υλικού του κυλίνδρου είναι

$$\rho = \frac{RS}{l} \quad (2.9)$$

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

Η ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  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  $I = \frac{V}{R}$  (2.10)

## 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.

## 3. Η διηλεκτρική αγωγιμότητα - Διηλεκτρική σταθερά

Με τον όρο διηλεκτρική αγωγιμότητα (Αράμπελος, 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  $\mu$  έχουμε τις ποσότητες: ηλεκτρική πόλωση  $P$  (ηλεκτρική διπολική ροπή ανα μονάδα όγκου), ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E$ , ηλεκτρική επιδεκτικότητα  $\eta$ , ηλεκτρική μετατόπιση  $D$  (ροή ανά μονάδα επιφάνειας), και διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon$ . Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων αυτών σε ηλεκτροστατικές μονάδες είναι

$$P = \eta E, \quad D = E + 4\pi P = E (1 + 4\pi \eta) = \epsilon E \quad (2.11)$$

Σε ηλεκτροστατικές μονάδες τα μεγέθη  $P$ ,  $E$  και  $D$  εκφράζονται σε Volts  $\text{cm}^{-1}$  και τα  $\eta$  και  $\epsilon$  είναι αδιάστατα μεγέθη.

### 2.4.3 Τυπικές τιμές ηλεκτρικών σταθερών διαφόρων πετρωμάτων και ορυκτών

Από όλες τις φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων και των ορυκτών, η ειδική αντίσταση παρουσιάζει τις μεγαλύτερες μεταβολές. Τα μέγιστα όρια των μεταβολών αυτών είναι

$1.6 \times 10^{-8}$  έως  $10^{16}$  Ωm. Ένα υλικό με ειδική αντίσταση μικρότερη από  $10^{-5}$  Ωm χαρακτηρίζεται σαν **αγωγός**, ενώ ένα υλικό με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη από  $10^7$  Ωm χαρακτηρίζεται σαν **μονωτής**. Μεταξύ των ορίων αυτών βρίσκονται οι λεγόμενοι ημιαγωγοί. Τα πετρώματα και τα ορυκτά θεωρούνται (α) καλοί, (β) μέτριοι και (γ) κακοί αγωγοί σύμφωνα με την κλίμακα:

- (α) ορυκτά με ειδική αντίσταση  $10^{-8} \dots 1$  Ωm.
- (β) ορυκτά και πετρώματα με ειδική αντίσταση  $1 \dots 10^7$  Ωm.
- (γ) ορυκτά και πετρώματα με ειδική αντίσταση μεγαλύτερη από  $10^7$  Ωm.

Η αγωγιμότητα των πετρωμάτων (πιν. 2.2, 2.3) οφείλεται κυρίως στο νερό που περιέχεται σε αυτά και για το λόγο αυτό η ειδική αντίσταση εξαρτάται από την ειδική αντίσταση και την ποσότητα του περιεχόμενου νερού καθώς και από τον τρόπο που κατανέμεται αυτή η ποσότητα του νερού μέσα στο πέτρωμα. Για το λόγο αυτό η ειδική αντίσταση των πετρωμάτων είναι μια παράμετρος, της οποίας η τιμή διαφέρει όχι μόνο για τα διάφορα πετρώματα αλλά και για το ίδιο πέτρωμα κυμαίνεται μέσα σε μεγάλα όρια. Κατά συνέπεια για κάθε είδος πετρώματος δεν μπορεί να δοθεί μια χαρακτηριστική τιμή ειδικής αντίστασης αλλά περιοχές τιμών.

**Πίνακας 2.2** : Ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων (Αράμπελος, 1991).

ΤΥΠΟΣ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (Ωm)
Γρανίτης	$3 \times 10^2 - 10^6$
Συηνίτης	$10^2 - 10^6$
Διορίτης	$10^4 - 10^5$
Διοριτικός πορφύρης	$1.9 \times 10^3$ (Υ) - $2.8 \times 10^4$ (Ξ)
Πορφυρίτης	$10 - 5 \times 10^4$ (Υ) - $3.3 \times 10^3$ (Ξ)
Ανθρακικός πορφύρης	$2.5 \times 10^3$ (Υ) - $6 \times 10^4$ (Ξ)
Χαλαζιακός πορφύρης	$3 \times 10^2 - 9 \times 10^5$
Χαλαζιακός διορίτης	$2 \times 10^4 - 2 \times 10^6$ (Υ) - $1.8 \times 10^5$ (Ξ)
Πορφύρης	$6 - 10^4$
Δακίτης	$2 \times 10^4$ (Υ)
Ανδεσίτης	$4.5 \times 10^4$ (Υ) - $6 \times 10^4$ (Ξ)
Διαβάσης	$20 - 5 \times 10^7$
Λάβες	$10^2 - 5 \times 10^4$
Γάββρος	$10^3 - 10^6$

Βασάλτης	$10 - 1.3 \times 10^7$
Περιδοτίτης	$3 \times 10^3$ (Υ) - $6.5 \times 10^3$ (Ξ)
Γνεύσιος	$6.8 \times 10^4$ (Υ) - $3 \times 10^6$ (Ξ)
Μάρμαρα	$10^2 - 2.5 \times 10^8$ (Ξ)

Από τον πίνακα 2.2 φαίνεται πόσο μπορεί να μεταβάλλεται η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός πετρώματος από την υγρή κατάσταση (Υ) στην ξηρή κατάσταση (Ξ) .

**Πίνακας 2.3 :** Ειδική ηλεκτρική αντίσταση διαφόρων ιζηματογενών πετρωμάτων (Αράμπελος ,1991).

ΤΥΠΟΣ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ( $\Omega\text{m}$ )
Συνεκτικοί σχιστόλιθοι	$20 - 2 \times 10^3$
Αργιλίτης	$10 - 8 \times 10^2$
Ψαμμίτης	$1 - 6.4 \times 10^2$
Ασβεστόλιθος	$50 - 10^7$
Δολομίτης	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Μη συνεκτική υγρή άργιλος	20
Μάργες	3 - 70
Άργιλος	1 - 100
Αλλούβια και άμμοι	10 - 800

Σε γενικές γραμμές, τα εκρηξιγενή πετρώματα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ειδική αντίσταση, τα ιζηματογενή (πιν. 2.3) τη μικρότερη και τα μεταμορφωμένα ενδιάμεσα. Τις μικρότερες τιμές ειδικής αντίστασης εμφανίζουν οι άργιλοι και οι μάργες, επειδή από την αρχή του σχηματισμού τους, συγκρατούν στους πόρους τους νερό με μεγάλη περιεκτικότητα σε ηλεκτρολύτη. Οι μεγαλύτερες τιμές ειδικής αντίστασης συναντώνται στα συνεκτικά, μη πορώδη ιζηματογενή πετρώματα, όπως ο δολομίτης, οι συνεκτικοί ασβεστόλιθοι, τα κρυσταλλικά και εκρηξιγενή πετρώματα. Τα πορώδη ιζήματα όπως άμμοι, ψαμμίτες κ.λ.π. όταν είναι σε ξηρή κατάσταση και δεν περιέχουν αργλικές προσμίξεις παρουσιάζουν μεγάλες τιμές ειδικής αντίστασης, οι οποίες ελαττώνονται καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα τους σε νερό ή άργιλο.

Τα πετρογενετικά ορυκτά, όπως π.χ. ο χαλαζίας, ο ασβεστίτης, ο μαρμαρυγίας κ.λ.π. είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Εξαιρέση αποτελούν τα θειούχα ορυκτά, όπως π.χ. ο σιδηροπυρίτης, ο γαληνίτης κ.α., ορισμένα οξείδια, όπως ο μαγνητίτης και ο γραφίτης, που έχουν ηλεκτρονική αγωγιμότητα.



#### 2.4.4 Μέθοδος της ηλεκτρικής αντίστασης

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Αράμπελος ,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 κ.λ.π.

#### 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 διασκόπηση. 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 ισοτρόπου μέσου, που οφείλεται σε σημειακή ηλεκτρική πηγή, είναι ανάλογο του ρεύματος  $I$ , της ειδικής αντίστασης  $\rho$  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  $\frac{1}{2\pi}$ ,

$$\text{δηλαδή } V = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (2.12)$$

### Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στην πράξη χρησιμοποιούνται διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού (Αράμπελος, 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 διασκόπηση με τη μέθοδο Wenner, τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (πράσινο) και τα δυο 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 απόσταση. Η μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού απόσταση είναι επίσης  $a$ . Όλα τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 2.4.

#### **Σχήμα 2.4 Διάταξη Wenner**

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

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (2.13)$$

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. 2.5) διατάσσονται στο έδαφος κατά μήκος ευθείας γραμμής σε συγκεκριμένες μμεταξύ 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  $\Delta V$  στα άκρα M, N και η μέτρηση του  $\Delta V$  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 2.5 Διάταξη Schlumberger

Για κάθε θέση των ηλεκτροδίων η φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho_a$  υπολογίζεται από

$$\text{την σχέση } \rho_a = \frac{\pi s^2}{a} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2.14)$$

Οι τιμές της  $\rho_a$  προβάλλονται ως συνάρτηση του ημιαναπτύγματος 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**

Στη διάταξη δίπολου (σχ. 2.6) 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 2.6 Διάταξη 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  $\Delta V$  μεταξύ των M, N και η φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho_a$  υπολογίζεται από την σχέση όπου η ποσότητα K είναι ο γεωμετρικός παράγοντας για την διάταξη του δίπολου. Εφόσον επιθυμούμε να διερευνήσουμε πλευρικές μεταβολές της  $\rho$  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.

#### **2.4.5 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 βυθοσκοπηση** (electric drilling - vertical electric sounding) (Αράμπελος, 1991).

A) Με τη **γεωηλεκτρική χαρτογράφηση** (σχ. 2.7) 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  $\rho_a$  για σταθερή τιμή του  $k$  προσδιορίζεται σε σημεία που ανήκουν σε τομές κατά το δυνατό κάθετες στην παράταξη των σχηματισμών. Οι τιμές αυτές της  $\rho_a$  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  $\rho_a$ .

B) Με τη **γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση** προσδιορίζεται η φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho_a$  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  $\rho_a$  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  $\rho_a$ . Τις τιμές της  $\rho_a$  παριστάνουμε γραφικά σε συνάρτηση με την απόσταση σε λογαριθμική κλίμακα.

Αν το υπέδαφος είναι ομογενές, τότε η γραφική αυτή παράσταση της συνάρτησης  $\rho_a = f \left( \frac{AB}{2} \right)$  (2.15) ή καμπύλη γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης θα είναι ευθεία γραμμή, παράλληλη προς τον άξονα των αποστάσεων. Στην περίπτωση δηλ. αυτή η  $\rho_a$  παραμένει σταθερή και ίση με την τιμή  $\rho$  της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

**Σχήμα 2.7** Χαρτογράφηση αρχαιολογικού χώρου με την μέθοδο της ειδικής αντίστασης.

#### 2.4.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η πλέον συνηθισμένη διαδικασία για την ερμηνεία των μετρήσεων, δηλ. τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης και του πάχους των αντιστοιχών στρωμάτων είναι

(όπως και στη βαρυτομετρική ή τη μαγνητική μέθοδο) η **σύγκριση** της καμπύλης **γεωηλεκτρικής βυθοσκόπησης** με θεωρητικές καμπύλες που έχουν υπολογισθεί με βάση γνωστά εκ των προτέρων πρότυπα. Το πρότυπο εκείνο του οποίου η θεωρητική καμπύλη προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη που βασίζεται στις μετρήσεις πεδίου, θεωρείται η σωστή λύση του προβλήματος.

Για το απλό πρότυπο που αναφέρθηκε προηγουμένως, σύμφωνα με το οποίο το υπέδαφος αποτελείται από ένα μικρό αριθμό οριζόντιων στρωμάτων, έχουν υπολογισθεί θεωρητικές καμπύλες για τις διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων. Η γραφική παράσταση γίνεται σε λογαριθμική κλίμακα και για τους δύο άξονες. Οι θεωρητικές καμπύλες σχεδιάζονται συνήθως σε διαφανές χαρτί.

Για την ερμηνεία τοποθετούμε το διαφανές αυτό χαρτί πάνω από την καμπύλη που βασίζεται στις μετρήσεις πεδίου και το μετακινούμε έτσι ώστε οι άξονες των δυο σχεδίων να παραμένουν παράλληλοι, επιδιώκοντας να φέρουμε σε σύμπτωση την πραγματική καμπύλη σε μια από τις θεωρητικές καμπύλες. Όταν αυτό επιτευχθεί, οι συντεταγμένες της αρχής των αξόνων της καμπύλης που βασίζεται στις μετρήσεις του πεδίου σε σχέση με τους άξονες των θεωρητικών καμπυλών μας δίνουν την ειδική αντίσταση και το πάχος. Από το λόγο  $\rho_2 / \rho_1$  της θεωρητικής καμπύλης με την οποία ταυτίστηκε η πραγματική καμπύλη και την τιμή της  $\rho_1$  υπολογίζουμε την τιμή της  $\rho_2$ .

### **3 Η ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΪΣΤΡΟ ΚΑΙ Η ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

#### **3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν λεπτομέρειες για την γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο του Ίστρου στον κόλπο του Μιραμπέλλου ανατολικής Κρήτης, η οποία πραγματοποιήθηκε το πρώτο δεκαήμερο του Οκτωβρίου 2005. Επίσης θα περιγραφούν 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 ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ ΤΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ**

Στη γεωφυσική διασκόπηση, που έγινε στη περιοχή του Ίστρου τον Οκτώβριο 2005, χρησιμοποιήθηκαν το μαγνητόμετρο **FM 36** fluxgate gradiometer (σχ. 3.1), το Geonics **EM31** (σχ. 3.2), και το Geoscan **RM 15** (σχ. 3.3) με διάταξη twin probes.

**Σχήμα 3.1 το μαγνητόμετρο FM 36 fluxgate radiometer.**

**Σχήμα 3.2 Το Geonics EM 31.**

**Σχήμα 3.3 Geoscan RM 15 με διάταξη του twin probes.**

### **3.2.1 Αρχή λειτουργίας του μαγνητόμετρου ρυθμιζόμενης ροής**

Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο κατά το οποίο, κάθε μαγνητικό υλικό μεγάλης μαγνητικής επιδεκτικότητας αποκτά κάτω από την επίδραση ισχυρού μαγνητικού πεδίου, μια μέγιστη τιμή μαγνήτισης, που λέγεται “μαγνήτιση κόρου”.

Αποτελείται από δύο παράλληλες ράβδους κατασκευασμένες από φερρομαγνητικό υλικό ή κάποιο άλλο υλικό μεγάλης μαγνητικής επιδεκτικότητας. Η ευαισθησία των δύο ράβδων είναι αρκετή, έτσι ώστε ακόμα και το αδύνατο μαγνητικό πεδίο της γης να προκαλεί σ’ αυτές μαγνητικό κορεσμό. Κάθε ράβδος περιβάλλεται από ένα πηνίο(πρωτεύον), τα οποία όμως έχουν περιτυλιχτεί με αντίθετη κατεύθυνση. Όταν διαρρέει ρεύμα τα πρωτεύοντα πηνία προκαλείται ένα μαγνητικό πεδίο από επαγωγή, το οποίο δημιουργεί με την σειρά του επαγόμενα μαγνητικά πεδία στους πυρήνες, τα οποία είναι το ίδιο ισχυρά αλλά με αντίθετη κατεύθυνση. Η τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του πρωτεύοντος είναι τέτοιας συχνότητας και πλάτους, έτσι ώστε κατά τους χρόνους των μέγιστων και ελάχιστων της τάσης, το παραγόμενο μέσα σε κάθε σωληνοειδές πεδίο να είναι ισχυρότερο από το πεδίο που χρειάζεται για να αποκτήσουν οι πυρήνες μαγνήτιση κόρου. Συνεπώς η χρονική μεταβολή της έντασης, μέσα σε κάθε σωληνοειδές είναι παρόμοια με την χρονική μεταβολή τάσης, που εφαρμόζεται, με την διαφορά ότι τα μέγιστα και ελάχιστα της έντασης δεν είναι στιγμιαία, αλλά διαρκούν ορισμένο χρόνο, κατά την διάρκεια του οποίου οι πυρήνες έχουν την μαγνήτιση κόρου. Ένα δευτερεύον πηνίο περιβάλλει τα δύο πρωτεύοντα. Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται στους πυρήνες των πρωτευόντων πηνίων δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού στο δευτερεύον. Όταν δεν υπάρχει εξωτερικό πεδίο, η διαφορά δυναμικού στο δευτερεύον είναι μηδέν, επειδή τα μαγνητικά πεδία στους δύο πυρήνες έχουν αντίθετη φορά και αλληλοεξουδετερώνονται.

Εάν ένας από τους δύο πυρήνες είναι παράλληλος με μια συνιστώσα εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, παράγει ένα λίγο ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο από τον άλλο πυρήνα, το οποίο δίνει την διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος πηνίου.

Το μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής είναι ικανό να μετρήσει οποιαδήποτε συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου της γης, αλλά με κατάλληλο προσανατολισμό των πυρήνων έτσι ώστε να είναι παράλληλοι με την συνιστώσα που μετρείται.

### **3.2.2 Αρχή λειτουργίας του οργάνου ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης**

Είναι γνωστό ότι τα χαμηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται με φυσικό ή τεχνητό τρόπο κοντά στην επιφάνεια της γης επάγουν μέσα στο φλοιό της γης εναλλασσόμενα ηλεκτρικά ρεύματα τα οποία παράγουν δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα δευτερογενή αυτά κύματα έχουν την ίδια συχνότητα με τα αρχικά κύματα αλλά οι



άλλες ιδιότητές τους (διεύθυνση, πλάτος, φάση) είναι διαφορετικές, γιατί οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται και από την γεωηλεκτρική δομή (κατανομή της ειδικής αγωγιμότητας) των πάνω, κυρίως, στρωμάτων του φλοιού. Έτσι, τα δευτερογενή αυτά κύματα συμβάλλουν με τα αρχικά κύματα για να δώσουν ένα συνιστάμενο κύμα το οποίο καταγράφεται και για αυτό γνωρίζουμε τις ιδιότητές του (σχ. 3.4).

Κατά την διασκόπηση με το EM31 λαμβάνονται οι μετρήσεις δύο μεγεθών, της αγωγιμότητας (mSiemens/m) των υπεδάφινων σχηματισμών και της μαγνητικής επιδεκτικότητας τους. Η μέτρηση της αγωγιμότητας αντιστοιχεί στο ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται στο έδαφος με επαγωγή ενώ η μαγνητική επιδεκτικότητα στο μαγνητικό πεδίο.

### **Σχήμα 3.4 Αρχή λειτουργίας του EM31.**

#### **3.2.3 Αρχή λειτουργίας του RM15**

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής διασκόπησης βασίζονται στη μελέτη του τρόπου διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος με μετρήσεις που γίνονται στην επιφάνεια και χρησιμοποιούνται με σκοπό το διαχωρισμό στόχων με διαφορετική ηλεκτρική αντίσταση (Nishimura 2001: 544). Στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις, οι «ανωμαλίες» ορίζονται ως οι μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου ή της πυκνότητας του ρεύματος, οι οποίες οφείλονται σε διαταραχές εξ' αιτίας στόχων με διαφορετική αντίσταση (ή αγωγιμότητα) από το περιβάλλον έδαφος (Sarris 1992: 17). Συνεπώς, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι για τις γεωηλεκτρικές αρχαιολογικές διασκοπήσεις πιθανοί στόχοι αποτελούν τόσο οι αρχιτεκτονικές δομές (π.χ. τοίχοι, θεμέλια οικιών, κ.α.), όσο και τάφροι πληρωμένοι με εδαφικό υλικό, τα οποία παρουσιάζουν ισχυρό σήμα και εγγράφονται ως ισχυρές αντιστάσεις. Τάφροι, επίσης με συσσωρεύσεις οργανικού υλικού και αγωγή εδάφη, παρουσιάζουν συχνά ασθενές σήμα και εγγράφονται ως ασθενείς αντιστάσεις (Clark 1990: 37). Επιπλέον, δάπεδα οικιών ή άλλες συμπιεσμένες δομές είναι ανιχνεύσιμες εξ αιτίας είτε του μειωμένου πορώδους είτε της υγρασίας, που έχει συσσωρευτεί στην επιφάνειά τους.

Οι γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις χρησιμοποιούν δύο ηλεκτρόδια ρεύματος για τη διοχέτευση ρεύματος στο έδαφος και δύο ηλεκτρόδια για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις των ηλεκτροδίων που εφαρμόζονται στις εργασίες υπαίθρου, ανάλογα με την περιοχή και το είδος των ερευνών (Clark 1990: 38-48, Α.Αράμπελος 1991: 198-200, Sarris 1992: 34-8, Sarris and Jones 2000: 13, Nishimura 2001: 544-5). Στο σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι πιο συνήθεις διατάξεις. Οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι οι πιο διαδεδομένες και οι πιο αποτελεσματικές. Στις αρχαιολογικές διασκοπήσεις χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος της Διπλής Διάταξης (Twin-Probe Array), λόγω της εύκολης ερμηνείας των δεδομένων, της ταχύτητας κάλυψης του χώρου και της σχετικά καλής χωρικής διακριτικότητας της μεθόδου (Sarris and Jones 2000: 13, Nishimura 2001: 545).

### Σχήμα 3.5α Τυπικές διατάξεις των ηλεκτροδίων στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις

Στη μέθοδο της Διπλής Διάταξης των ηλεκτροδίων ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων ρεύματος – δυναμικού παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και ένα δεύτερο ζευγάρι ηλεκτροδίων ρεύματος – δυναμικού μετακινείται σε σταθερή απόσταση 1 ή 0.5m κατά μήκος των γραμμών μελέτης (σχήματα 3.5α & 3.5β). Αυτές οι γραμμές μελέτης, στις οποίες γίνεται η δειγματοληψία, είναι παράλληλες και ισαπέχουν μεταξύ τους (συνήθως 1 ή 0.5m) και περιλαμβάνουν σταθερό κάθε φορά αριθμό σταθμών μέτρησης. Η δε δειγματοληψία γίνεται είτε με σταθερό προσανατολισμό από Νότο προς Βορρά είτε βουστροφηδόν (από Νότο προς Βορρά και εν συνεχεία από Βορρά προς Νότο). Το ζεύγος των κινητών ηλεκτροδίων με τη βοήθεια μεταλλικού πλαισίου τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το κέντρο τους να συμπίπτει με την ακριβή θέση του σταθμού μέτρησης. Η απόσταση μεταξύ σταθερών και κινητών ηλεκτροδίων εξαρτάται από την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, που είναι ενσωματωμένα στο μεταλλικό πλαίσιο και μετακινούνται κατά μήκος των γραμμών μελέτης. Έτσι, για άνοιγμα 0.5m των κινητών ηλεκτροδίων, η απόσταση μεταξύ κινητών και σταθερών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 15m.

### Σχήμα 3.5β Μέθοδος της Διπλής - Διάταξης των ηλεκτροδίων (Twin-Probe Array).

Η χωρική διακριτικότητα της Διπλής Διάταξης των ηλεκτροδίων (Twin-Probe Array) είναι της τάξεως του  $1.0a$ , ενώ το βάθος ανίχνευσης δύναται να φθάσει το  $1.0 - 2.0a$ , όπου  $a$  είναι το άνοιγμα των κινητών ηλεκτροδίων (στην περίπτωση της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκε άνοιγμα ηλεκτροδίων  $a=0.5m$ ). Τέλος, στις γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις με τη μέθοδο της Διπλής Διάταξης χρησιμοποιείται συνήθως ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $1mA$  σε συχνότητα  $137,5Hz$ , προκειμένου να αποφευχθούν παρεμβολές από διάφορες αρμονικές συχνότητες, οι οποίες προέρχονται από γραμμές ηλεκτροδότησης. Η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν της τάξεως του  $0.1 \text{ Ohm}$ .

### Ηλεκτρικές Διασκοπήσεις με την χρήση Πολυπλέκτη (MPX15)

Ο πολυπλέκτης MPX15 έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με το όργανο Geoscan RM15, το οποίο μετράει την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Χρησιμοποιώντας το ειδικά διαμορφωμένο πλαίσιο PA5, στο οποίο μπορούν να τοποθετηθούν από δύο έως έξι ηλεκτρόδια και συνδέοντας τον πολυπλέκτη MPX15 στο όργανο RM15, είναι δυνατό να υλοποιηθούν και να διερευνηθεί μία περιοχή με μία ή περισσότερες από τις γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων (Διπόλου-Διπόλου, Wenner, Πόλου-Πόλου, Διπλή Διάταξη, Gradient).

Επίσης το όργανο RM15 σε συνδυασμό με τον πολυπλέκτη MPX15 και το πλαίσιο PA5, μπορεί να προγραμματιστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε χρησιμοποιώντας μία συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων να ληφθούν μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους που αντιστοιχούν σε

αυξανόμενα βάθη. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται πληροφορίες για την κατανομή της αντίστασης του εδάφους σε διαφορετικά βάθη. Η αύξηση του βάθους διασκόπησης οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων τότε αυξάνεται και το βάθος στο οποίο διοχετεύεται το ρεύμα, με αποτέλεσμα η μέθοδος να “βλέπει” πιο βαθιά.

**Σχήμα 3.5γ:** Τρόπος σύνδεσης του οργάνου μέτρησης της αντίστασης RM15 με τον πολυπλέκτη MPX15 και διάταξη των ηλεκτροδίων στο πλαίσιο, για να υλοποιηθούν οι μετρήσεις με την μέθοδο Twin Probe. Τα ηλεκτρόδια A1, A2, A3 είναι ρεύματος και τα M1, M2, M3 δυναμικού. Οι αποστάσεις A1-M1, A2-M2 και A3-M3 είναι 1, 1.5, και 2 μέτρα αντίστοιχα. Το όργανο αυτόματα σε κάθε θέση λαμβάνει τρεις μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό ζεύγος ηλεκτροδίων A-M.

Το όργανο μέτρησης της αντίστασης του εδάφους (RM15) σε συνδυασμό με τον πολυπλέκτη MPX15 και το κατάλληλα διαμορφωμένο πλαίσιο, προγραμματίστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις της αντίστασης με την Διπλή Διάταξη (Twin Probe). Με τον τρόπο αυτό προσδιορίστηκε η τρισδιάστατη κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους σε επιλεγμένα τμήματα της περιοχής έρευνας.

Στο πλαίσιο τοποθετήθηκαν έξι ηλεκτρόδια, τρία ρεύματος (A1, A2, A3) και τρία δυναμικού (M1, M2, M3) (σχ. 3.5γ). Οι αποστάσεις κάθε ηλεκτροδίου ρεύματος με το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο δυναμικού ήταν 1m, 1.5m και 2m αντίστοιχα. Τα ηλεκτρόδια αυτά μετακινούνταν μαζί με το πλαίσιο και σε κάθε θέση του καννάβου ελήφθησαν τρεις διαδοχικές μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους, που αντιστοιχούσαν σε τρία διαφορετικά βάθη (περίπου 1m, 1.5m, 2m), ανάλογα με την απόσταση που υπήρχε μεταξύ ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Σε θεωρητικά άπειρη απόσταση από τα κινητά ηλεκτρόδια βρίσκονταν δύο σταθερά ηλεκτρόδια, ένα ρεύματος (B) και ένα δυναμικού (N). Έτσι σε κάθε κάνναβο ελήφθησαν 1200 μετρήσεις της αντίστασης, από τις οποίες οι πρώτες 400 αντιστοιχούν σε βάθος 1 m, οι επόμενες 400 σε βάθος 1.5 m και οι τελευταίες 400 σε βάθος 2 m.

### **3.3 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 υπεδάφειες δομές. Οι κύριες πηγές θορύβου κατά την γεωφυσική διασκόπηση στο Ιστρο τον Οκτώβριο του 2005 ήταν:

- Το επιφανειακό διαταραγμένο στρώμα λόγω άρωσης και καλλιέργειας
- Τα επιφανειακά διεσπαρμένα μεταλλικά αντικείμενα αλλά και τα θαμμένα
- Η παρουσία μεταλλικών περιφράξεων και απομακρυσμένων πυλώνων της ΔΕΗ
- Η παρουσία σωρών απορριμμάτων

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 ΚΑΤΙΣ 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 διασκόπησης. Το βήμα της παρεμβολής στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε ίσο με 0.1 m.

### **3.3.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων της επεξεργασία των γεωφυσικών**

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  $y$ .

**Μαγνητικά 0.5m στην περιοχή F:** Παρατηρώντας τους χάρτες των μαγνητικών με βήμα δειγματοληψίας 0.5m (σχ. 3.6), από το πρώτο στάδιο επεξεργασίας έως το τελικό (line equalization  $y$ ) εντοπίζεται μεγάλη ανομοιογένεια στις τιμές του τοπικού μαγνητικού πεδίου λόγω συγκέντρωσης μεγάλου όγκου μετακινημένων ιζημάτων (μπάζα) σε νότια διεύθυνση, καθώς επίσης και στα βόρεια του χάρτη στην κοντά στην περίφραξη του χώρου.

Λόγω των ακραίων τιμών που εμφανίζονται στην περιοχή αυτή συμπεραίνεται ότι υπάρχουν πολλά μεταλλικά αντικείμενα, τα οποία δημιουργούν στους χάρτες μεγάλη ανομοιογένεια.

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει η πιθανότητα παρουσίας κάποιων γραμμικών δομών, υπό γωνία από τα 40m έως τα 50m και από τα 70m ως τα 90m.

**Σχήμα 3.6 Μαγνητικά 0.5m στην περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε nT/m.**

*Μαγνητικά (1m) στην περιοχή F:* Οι συγκεκριμένοι χάρτες των μαγνητικών (σχήμα 3.7) με βήμα δειγματοληψίας 1m προέκυψαν ύστερα από επαναδειγματοληψία (Resampling) των δεδομένων των μαγνητικών με βήμα 0.5 m στο 1 m . Ο λόγος που έγινε επαναδειγματοληψία των μαγνητικών δεδομένων ήταν ο περιορισμένος χρόνος της διασκόπησης στην περιοχή. Δηλαδή αρχικά η διασκόπηση ξεκίνησε με βήμα 0.5 m αλλά στην συνέχεια προκειμένου να καλυφθεί η περιοχή στο σύνολο της, αποφασίστηκε να προχωρήσει με βήμα 1 m.

Παρατηρώντας τα επίπεδα επεξεργασίας του συγκεκριμένου χάρτη, γενικά εντοπίζεται σταδιακή βελτίωση της εικόνας μετά από κάθε φάση επεξεργασίας. Παρ' όλα αυτά μετά την τελευταία διόρθωση προκύπτει μια ζώνη, η οποία εντοπίζεται από τα 90 έως τα 110 m στην διεύθυνση X, όπου σαφέστατα παρατηρείται μια διαφοροποίηση στο επίπεδο των τιμών. Αυτό συμβαίνει διότι στην συγκεκριμένη περιοχή υπήρχαν τεράστιοι σωροί από μάζα αφενός και αφετέρου εντοπίστηκε σπασμένος υδρευτικός σωλήνας.

Επίσης μέχρι και την φάση της γραμμικής διόρθωσης ως προς τον άξονα X, εντοπίζονται κατά τόπους γραμμικές δομές με διεύθυνση A-Δ, που χαρακτηρίζονται από υψηλές θετικές ανωμαλίες. Οι ανωμαλίες αυτές συνδέονται με την παρουσία αναβαθμίδων του εδάφους. Πρέπει ακόμη να προστεθεί ότι η περιοχή F, περιφράσσεται με συρματοπλέγμα σε όλη την βόρεια και ανατολική διεύθυνσή της. Στην παρουσία συρματοπλέγματος οφείλονται οι έντονες ανωμαλίες κατά τις διευθύνσεις αυτές, οι οποίες σχεδόν απαλείφονται στην τελευταία φάση επεξεργασίας. Είναι έντονη η εμφάνιση γραμμικών στοιχείων μεταξύ της ένωσης των καννάβων. Αυτές (οι διατάξεις) δεν μαρτυρούν αρχιτεκτονικές δομές.

Όσον αφορά την ύπαρξη γραμμικών διατάξεων οι οποίες μαρτυρούν πολύ πιθανές αρχιτεκτονικές δομές παρατηρούμε ότι εμφανίζονται στο ανατολικό και βόρειο τμήμα του χάρτη. Πολλές απ' αυτές έχουν τετραγωνική δομή γεγονός που ενισχύει τις υπόνοιες μας περί αρχαιολογικών ευρημάτων – αρχιτεκτονικών δομών.

**Σχήμα 3.7 Μαγνητικά 1m στην περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε nT/m.**

*Μαγνητικά (0.5m) στην περιοχή G:* Στην περιοχή αυτή, προβλήματα θορύβου δημιουργήθηκαν από την παρουσία διαφόρων μετάλλων στο υπέδαφος καθώς και την περίφραξη της περιοχής στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της. Επίσης αρκετοί κάρναβοι στο νότιο τμήμα της περιοχής G έχουν υποστεί άρωση και σε έναν ή δύο από αυτούς έχει τοποθετηθεί υπόγειο υδρευτικό σύστημα. Παρά τα προβλήματα αυτά, η περιοχή G στο σύνολο της αποδεικνύεται ελπιδοφόρα για την ανέρευση αρχαιολογικών δομών. Γεγονός είναι ότι η δειγματοληψία με την μαγνητική μέθοδο και βήμα 0.5 m εισάγει αρκετό θόρυβο στα δεδομένα. Για το λόγο αυτό έγινε επαναδειγματοληψία των δεδομένων στο 1 m, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

**Σχήμα 3.8 Μαγνητικά 0.5m στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε nT/m.**

*Μαγνητικά (1m) στην περιοχή G:* Οι συγκεκριμένοι χάρτες των μαγνητικών με βήμα 1m (σχ. 3.9) προέκυψαν από επαναδειγματοληψία (Resampling) των δεδομένων των μαγνητικών με βήμα 0.5 m . Εντοπίζονται γραμμικές δομές με μια γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ.

Επίσης σε βορειοδυτική διεύθυνση η περιοχή που παρεμβάλλεται μεταξύ των σημείων με συντεταγμένες (10, 50) και (20, 50) αποτελεί αναβαθμίδα. Η διαφορά στο επίπεδο των τιμών, που εντοπίζεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής, οφείλεται στην παρουσία συρματοπλέγματος.



**Σχήμα 3.9 Μαγνητικά 1m στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε nT/m.**

**EM- Μαγνητική επιδεκτικότητα (Susceptibility) περιοχή F:** Στους χάρτες των ηλεκτρομαγνητικών (σχ. 3.10), όπου παρουσιάζεται η μαγνητική επιδεκτικότητα παρατηρείται μεγάλη διαφορά μεταξύ των αρχικών και των τελικών επιπέδων επεξεργασίας.

Στα πρώτα στάδια επεξεργασίας είναι αδύνατο να αναγνωριστεί οτιδήποτε. Μετά την επεξεργασία του line equalization κατά y διακρίνονται γραμμικές διατάξεις τετραγωνικής μορφής μόνο στα ανατολικά του χάρτη μας, καθώς επίσης πιθανότατα και ένα αρκετά μεγάλο ευθύγραμμο τμήμα στα βορειοανατολικά του χάρτη.

**Σχήμα 3.10 EM Μαγνητική επιδεκτικότητα στην περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε ppt.**

**EM (Susceptibility) περιοχή G:** Στην συγκεκριμένη περιοχή η απεικόνιση της μαγνητικής επιδεκτικότητας (σχ. 3.11) δεν βοηθά ιδιαίτερα στην εξαγωγή συμπερασμάτων. Η περιοχή είναι αρκετά θορυβώδης. Γενικά εμφανίζεται στα βορειοδυτικά μια τοξοειδής διάταξη, που πιθανότατα δεν σχετίζεται με την παρουσία ευρημάτων. Το βορειοανατολικό τμήμα του χάρτη μας παρουσιάζει κάποιο ενδιαφέρον ως προς τις αρχιτεκτονικές διατάξεις. Συγκεκριμένα εμφανίζεται ένα ευθύγραμμο τμήμα καθώς επίσης και ένα άλλο τμήμα το οποίο αποτελείται από τέσσερα ευθύγραμμο τμήματα κάθετα μεταξύ τους.

**Σχήμα 3.11 EM Μαγνητική επιδεκτικότητα στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε ppt.**

**EM (Quadrature) περιοχή F:** Στους χάρτες των ηλεκτρομαγνητικών, όπου απεικονίζεται η αγωγιμότητα (σχ. 3.12) παρατηρούμε έντονες διαφορές μεταξύ των επιπέδων επεξεργασίας. Εμφανίζονται έντονα οριζόντιες και κάθετες διατάξεις ειδικά στα πρώτα στάδια επεξεργασίας, οι οποίες οφείλονται στην ένωση των καννάβων.

Ολοκληρώνοντας όλα τα επίπεδα επεξεργασίας βλέπουμε ότι στον τελευταίο χάρτη, οι δομές είναι πιο ξεκάθαρες όπως είναι αναμενόμενο. Παρ' όλα αυτά η ύπαρξη όμως στη συγκεκριμένη περιοχή, ιζημάτων τα οποία είναι σε μεγάλο βαθμό αναμοχλευμένα, δεν μας δίνουν μια ξεκάθαρη εικόνα της κατάστασης.

Προκύπτει έτσι, ότι η μια διάταξη τετραγωνικής μορφής βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του χάρτη μας καθώς επίσης άλλη μια στα δυτικά. Στο κέντρο του χάρτη μας και λίγο προς τα ανατολικά προκύπτουν δυο διατάξεις τετραγωνικής μορφής μεγαλύτερης κλίμακας, για τις οποίες όμως έχουμε πολύ μικρότερη πιθανότητα βεβαιότητας για την ύπαρξη τους.

**Σχήμα 3.12 EM Αγωγιμότητα στην περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε mSiemens/m.**

**EM (Quadrature) περιοχή G:** Στο βορειοδυτικό τμήμα του χάρτη (σχ. 3.13) εμφανίζεται μια τοξωτή διάταξη η οποία οφείλεται στην ύπαρξη περιφραξής. Συγκεκριμένα στο βόρειο τμήμα εμφανίζεται μια περιοχή με πολύ υψηλές τιμές αγωγιμότητας λόγω της ύπαρξης ιζημάτων.

Τα σημεία, τα οποία είναι κυκλικής μορφής, στοιχισμένα οριζόντια και κάθετα μεταξύ τους και τα οποία βρίσκονται σε ένα μεγάλο μέρος του χάρτη εμφανίζονται κυρίως στα πρώτα επίπεδα επεξεργασίας είναι φυτώρια (κλίματα) τα οποία υπάρχουν στην περιοχή.

Στα δυο τελευταία επίπεδα επεξεργασίας οι διατάξεις αυτές δεν εμφανίζονται λόγω του ότι έχουν γίνει οι απαραίτητες διορθώσεις.

Όσον αφορά αρχιτεκτονικές διατάξεις βλέπουμε ότι εμφανίζονται στα βόρεια και βορειοανατολικά του χάρτη. Αυτό στο βόρειο τμήμα αποτελείται από δυο ευθύγραμμα τμήματα κάθετα μεταξύ τους ενώ στα βορειοανατολικά έχει τετραγωνική αρχιτεκτονική δομή.

**Σχήμα 3.13 EM Αγωγιμότητα στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε mSiemens/m.**

**Multiplexer (A = 0.5m) περιοχή F:** Όσον αφορά τους χάρτες ηλεκτρικών σε βάθος 0.5m (σχ. 3.14), τα πρώτα στάδια είναι πολύ δύσκολο να μας δείξουν κάτι, λόγω του ότι δεν έχουμε κάνει ακόμα επεξεργασία των ακραίων τιμών οι οποίες προέρχονται από την ανομοιογένεια του εδάφους λόγω των ιζημάτων.

Στο τελικό στάδιο επεξεργασίας (line equalization y) εμφανίζονται κάποιες διατάξεις στο βόρειο, ανατολικό και δυτικό τμήμα του χάρτη καθώς επίσης δυο ευθύγραμμα τμήματα, το ένα τετραγωνικής διάταξης στα ανατολικά του χάρτη μας.

Τα σημεία αυτά, τα οποία δημιουργούν ευθύγραμμα τμήματα και τετραγωνικές διατάξεις είναι σημεία με υψηλή αντίσταση εφόσον αναφερόμαστε στα ηλεκτρικά.

**Σχήμα 3.14 Ηλεκτρικά (A = 0.5m) περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε Ohm – m.**

**Multiplexer (B = 1m) περιοχή F:** Εδώ αναφερόμαστε στους χάρτες των ηλεκτρικών για βάθος 1m (σχ. 3.15). Οι διαφορές μεταξύ αρχικού και τελικού επιπέδου επεξεργασίας είναι και εδώ εμφανείς με μόνη διαφορά ότι στο συγκεκριμένο βάθος οι διατάξεις τις οποίες παρατηρούσαμε στο 0.5 m φαίνονται πολύ καλύτερα, πράγμα το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο κύριος όγκος αυτών των ευθύγραμμων και τετραγωνικής διάταξης τμημάτων βρίσκεται στο βάθος του 1m. Στα νοτιοανατολικά εμφανίζονται σε σχέση με τους χάρτες των 0.5m δύο επιπλέον ευθύγραμμο τμήματα.

**Σχήμα 3.15 Ηλεκτρικά (B = 1m) στην περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε Ohm – m.**

**Multiplexer (C= 2m) περιοχή F:** Στους χάρτες των ηλεκτρικών σε βάθος 2m (σχ. 3.16) έχουμε και εδώ μεγάλες διαφορές μεταξύ των επιπέδων επεξεργασίας. Σε σχέση όμως με τους άλλους χάρτες των ηλεκτρικών σε βάθος 0.5 και 1m, έχουμε αισθητές διαφορές οι οποίες προφανώς οφείλονται στο γεγονός ότι σε αυτό το βάθος οι πιθανοί αυτοί αρχιτεκτονικοί σχηματισμοί παύουν να υπάρχουν.

**Σχήμα 3.16 Ηλεκτρικά (C= 2m ) στην περιοχή F. Οι μονάδες της κλίμακας σε Ohm – m.**

**Multiplexer (A = 0.5m) περιοχή G:** Παρατηρώντας τους χάρτες των ηλεκτρικών σε βάθος 0.5m (σχ. 3.17) ειδικά στα πρώτα επίπεδα επεξεργασίας φαίνονται έντονα διάφορες ανωμαλίες όπως οι οριζόντιες και κάθετες διατάξεις λόγω της ένωσης των καννάβων, οι συστοιχίες των δέντρων, κλιμάτων κ.τ.λ. Ειδικά στο βόρειο τμήμα των χαρτών εμφανίζονται ανωμαλίες λόγω της εγγύτητας σε συρματοπλέγματα, αλλά και της ύπαρξης μετάλλων αναμοχλευμένα στα ιζήματα.

Διατάξεις αρχιτεκτονικής δομής (ευθύγραμμο τμήματα) εντοπίζονται στο βορειοανατολικό τμήμα του χάρτη καθώς και ένα σχεδόν ευθύγραμμο τμήμα στο κέντρο προς ανατολικά του χάρτη.

**Σχήμα 3.17 Ηλεκτρικά (A = 0.5m) στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε Ohm – m.**

**Multiplexer (B = 1m) περιοχή G:** Στο συγκεκριμένο βάθος (σχ. 3.18) στα ηλεκτρικά οι ανωμαλίες οι οποίες φαίνονται στο χάρτη λόγω της ένωσης των καννάβων, της συστοιχίας δένδρων, της εγγύτητας στα συρματοπλέγματα και την ύπαρξη μετάλλων αναμοχλευμένα στα ιζήματα όσον αφορά το βόρειο τμήμα του χάρτη παραμένει ως έχει.

Εκείνο το οποίο είναι εμφανές διαφορετικό είναι η ύπαρξη αρχιτεκτονικών διατάξεων, μερικές εκ των οποίων εμφανίζουν τετραγωνική δομή, ειδικά στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα του χάρτη μας καθώς και στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα του.

**Σχήμα 3.18 Ηλεκτρικά (B = 1m) στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε Ohm – m.**

*Multiplexer (C= 2m) περιοχή G:* Στο βάθος αυτό των ηλεκτρικών (σχ. 3.19) εμφανίζονται οι ίδιες ανωμαλίες με βάθος του 1m. Με μόνη διαφορά ότι δεν είναι τόσο εμφανείς οι αρχιτεκτονικές διατάξεις, προφανώς λόγω του ότι στο βάθος των 2m παύουν προοδευτικά να υφίστανται.

**Σχήμα 3.19 Ηλεκτρικά (C= 2m) στην περιοχή G. Οι μονάδες της κλίμακας σε Ohm – m.**

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θεωρείται απαραίτητο να γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων από το τελευταίο επίπεδο επεξεργασίας. Στο σχήμα 3.20 παρουσιάζεται η διασκόπηση στην περιοχή F ενώ στο σχήμα 3.21 η διασκόπηση στην περιοχή G. Γενικά η περιοχή G παρουσιάζει πιο μεγάλο αρχαιολογικό ενδιαφέρον. Η περιοχή F γενικά είναι πιο δύσκολη στην ερμηνεία της, διότι το έδαφος είναι καλλιεργημένο. Στους παρακάτω χάρτες βλέπουμε μόνο το τελευταίο επίπεδο επεξεργασίας ώστε να μπορέσουμε να βγάλουμε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων κάποια συμπεράσματα για το τι μπορεί να υπάρχει στην περιοχή.

**Σχήμα 3.20 Η γεωφυσική χαρτογράφηση στην περιοχή F.**

**Σχήμα 3.21 Η γεωφυσική χαρτογράφηση στην περιοχή G.**

## **4 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΙΣΤΡΟ**

### **4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων από την γεωφυσική διασκόπηση στον αρχαιολογικό χώρο του Ίστρου στον κόλπο του Μιραμπέλλου ανατολικής Κρήτης, η οποία πραγματοποιήθηκε το πρώτο δεκαήμερο του Οκτωβρίου 2005. Σημειώνεται ότι η φάση αυτή υλοποιήθηκε με την βοήθεια του GIS.

### **4.2 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Στα σχήματα 4.1 και 4.2 (αντίστοιχα για τις περιοχές F και G) εμφανίζονται οι χάρτες μόνο του τελευταίου επιπέδου επεξεργασίας (line equalization y) πάνω στους οποίους έχουν χαραχτεί οι γραμμικές ανωμαλίες, που πιθανότατα να συνδέονται με την παρουσία αρχαιολογικών ευρημάτων.

Γενικά στην περιοχή F οι γραμμικές ανωμαλίες παρουσιάζουν προσανατολισμό ΒΑ – ΝΔ. Αρκετά ενθαρρυντικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας στην περιοχή F, όπου παρουσιάζονται γραμμικές ανωμαλίες μεγάλων διαστάσεων. Πιθανότατα οι ανωμαλίες αυτές να εντοπίζονται σε βάθος μεγαλύτερο του 1.5 m, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η μαγνητική διασκόπηση δεν εντοπίζει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος δομές στην συγκεκριμένη περιοχή. Το βόρειο τμήμα της ίδιας περιοχής παρουσιάζει ενδιαφέρον και πάλι σε βάθος μεγαλύτερου του 1 m, όπως διαπιστώνεται από την εικόνα που δίνει η χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αντίστασης.

Στην περιοχή G ο γενικός προσανατολισμός των γραμμικών ανωμαλιών είναι και πάλι ΒΑ – ΝΔ. Η μαγνητική διασκόπηση με βήμα δειγματοληψίας 0.5 m δεν δίνει αξιόλογα αποτελέσματα, ενώ η επαναδειγματοληψία στο 1 m δίνει γραμμικές ανωμαλίες οι οποίες συμπίπτουν με την χαρτογράφηση της αγωγιμότητας και εν μέρει της ηλεκτρικής αντίστασης σε βάθος μεγαλύτερο του 1 m.

**Σχήμα 4.1 Ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων για την περιοχή F.**

**Σχήμα 4.2 Ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων για την περιοχή G.**

### **4.3 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ GIS**

Οι χάρτες που ακολουθούν έχουν προκύψει από επεξεργασία των παραπάνω χαρτών με την βοήθεια του προγράμματος GIS (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών). Καταρχήν χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες του τελευταίου επιπέδου επεξεργασίας (line equalization y), αφαιρέθηκαν οι χρωματικές κλίμακες και οι άξονες , και ο κάθε χάρτης αποθηκεύτηκε σαν εικόνα. Στην συνέχεια με την βοήθεια του arc map ενός πολύ χρήσιμου εργαλείου του GIS και χρησιμοποιώντας σαν βάση τον τοπογραφικό χάρτη του Ίστρου έγινε γεωαναφορά καθενός από τους χάρτες δηλαδή όλοι οι χάρτες τοποθετήθηκαν ο καθένας ξεχωριστά πάνω στον αρχικό και εντοπίστηκαν πάνω σ' αυτούς όλες οι ανωμαλίες που προέκυψαν από την εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων (μαγνητικών , ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρικών ).

Στους χάρτες που ακολουθούν (με αρίθμηση από 1 – 28) παρουσιάζεται η εφαρμογή της κάθε μεθόδου χωριστά σε έγχρωμη και ασπρόμαυρη κλίμακα . Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι παραπάνω χάρτες (με αρίθμηση από 29 – 34), όπου υπερτίθενται α) οι χάρτες της μαγνητικής διασκόπησης με βήμα δειγματοληψίας 0.5 και 1 m, β) οι χάρτες της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας και γ) οι χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης και στα τρία βάθη (0.5, 1 και 2 m).

Τέλος στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται ο τοπογραφικός χάρτης της εξεταζόμενης περιοχής, όπου απεικονίζονται οι γεωφυσικές ανωμαλίες που εντοπίστηκαν με τις διάφορες μεθόδους. Με πορτοκαλί χρώμα εμφανίζονται οι μαγνητικές ανωμαλίες, με ροζ και γαλάζιο εμφανίζονται οι ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες δηλαδή η αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα. Με πράσινο, κόκκινο, κίτρινο εμφανίζονται οι ηλεκτρικές ανωμαλίες για βάθος 0.5, 1 και 2 m.





**AREA F**

*Χάρτης 1 EM SUSCEPTIBILITY COLOUR SCALE*

*Χάρτης 2 EM SUSCEPTIBILITY BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 3 EM QUADRATURE COLOUR SCALE*

*Χάρτης 4 EM QUADRATURE BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 5 MAGNETICS 0.5m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 6 MAGNETICS 0.5m BLACK AND WHITE*

*Χάρτης 7 MAGNETICS 1m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 8 MAGNETICS 1m BLACK AND WHITE*

*Χάρτης 9 MULTIPLEXER depth = 0.5 m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 10 MULTIPLEXER depth = 0.5m BLACK AND WHITE*

*Χάρτης 11 MULTIPLEXER depth = 1m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 12 MULTIPLEXER depth = 1m BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 13 MULTIPLEXER depth =2m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 14 MULTIPLEXER depth = 2m BLACK AND WHITE*

**AREA G**

*Χάρτης 15 EM SUSCEPTIBILITY COLOUR SCALE*

*Χάρτης 16 EM SUSCEPTIBILITY BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 17 EM QUADRATURE COLOUR SCALE*

*Χάρτης 18 EM QUADRATURE BLACK AND WHITE*

*Χάρτης 19 MAGNETICS 0.5m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 20 MAGNETICS 0.5m BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 21 MAGNETICS 1m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 22 MAGNETICS 1m BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 23 MULTIPLEXER depth =0.5m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 24 MULTIPLEXER depth =0.5m BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 25 MULTIPLEXER depth =1m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 26 MULTIPLEXER depth =1m BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 27 MULTIPLEXER depth =2m COLOUR SCALE*

*Χάρτης 28 MULTIPLEXER depth =2m BLACK AND WHITE SCALE*

**AREA F**

*Χάρτης 29 MAGNETICS 0.5m και 1m COLOUR και BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 30 EM QUADRATURE και SUSCEPTIBILITY COLOUR K BLACK AND WHITE*

*Χάρτης 31 MULTIPLEXER depth = 0.5m , 1m , 2m COLOUR K BLACK AND WHITE*

**AREA G**

*Χάρτης 32 MAGNETICS 0.5m και 1m COLOUR και BLACK AND WHITE SCALE*

*Χάρτης 33 EM QUADRATURE και SUSCEPTIBILITY COLOUR K BLACK AND WHITE*

*Χάρτης 34 MULTIPLEXER depth = 0.5m , 1m , 2m COLOUR K BLACK AND WHITE*

4.3 Τοπογραφικός χάρτης της εξεταζόμενης περιοχής, όπου απεικονίζονται οι γεωφυσικές ανωμαλίες που εντοπίστηκαν με τις διάφορες μεθόδους. Με πορτοκαλί χρώμα εμφανίζονται οι μαγνητικές ανωμαλίες, με ροζ και γαλάζιο εμφανίζονται οι ηλεκτρομαγνητικές ανωμαλίες δηλαδή η αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα με τα αντίστοιχα χρώματα. Με πράσινο, κόκκινο, κίτρινο εμφανίζονται οι ηλεκτρικές ανωμαλίες για βάθος 0.5, 1 και 2m.

## **5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την γεωφυσική χαρτογράφηση του έτους 2005 στον αρχαιολογικό χώρο του Ίστρου στον κόλπο του Μιραμπέλλου Ανατολικής Κρήτης.

### **5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

- Σε γενικές γραμμές η γεωφυσική χαρτογράφηση (με την μαγνητική, ηλεκτρομαγνητική και ηλεκτρική μέθοδο) στον αρχαιολογικό χώρο του Ίστρου παρουσιάζει δυσκολίες λόγω της παρουσίας πολλών πηγών θορύβου (συρματοπλέγματα, μπάζα, διάσπαρτα μεταλλικά αντικείμενα και καλλιεργημένο έδαφος).
- Η μαγνητική μέθοδος αποδίδει στην συγκεκριμένη περιοχή με επαναδειγματοληψία από τα 0.5 στα 1 m. Αυτό συμβαίνει διότι η περιοχή είναι μαγνητικά εξαιρετικά θορυβώδης. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που αφορά την συνιστώσα της αγωγιμότητας δίνει περιοχές με ζώνες υψηλής και χαμηλής αγωγιμότητας σε μεγάλες διαστάσεις, που πιθανότατα να συνδέονται με την παρουσία δρόμων ή περιφράξεων. Δεν αποδίδει όμως γενικά τις δομές μικρότερων διαστάσεων. Η συνιστώσα της μαγνητικής επιδεκτικότητας παρουσιάζει κατά την χαρτογράφησή της παρόμοια προβλήματα με την μαγνητική διασκόπηση. Παρά το γεγονός αυτό εντοπίζονται γραμμικές δομές μικρότερων διαστάσεων και με μεγαλύτερη ευκρίνεια. Επίσης η χαρτογράφηση της ηλεκτρικής αντίστασης δίνει την ίδια περίπου εικόνα με αυτή της αγωγιμότητας.
- Από την μελέτη των χαρτών στο σύνολο τους προκύπτει η παρουσία αρχαιολογικών ευρημάτων σε βάθος μεγαλύτερο του 1 m.
- Η περιοχή G παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερο ενδιαφέρον διότι αποδίδονται οι αρχαιολογικές δομές με μεγαλύτερη ευκρίνεια και σε μικρότερες διαστάσεις. Η περιοχή F παρουσιάζει μεγαλύτερη ασάφεια με εξαίρεση το βόρειο και ανατολικό τμήμα της.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aitken, M., 1974, *Physics and Archaeology*, 2<sup>nd</sup> ed., Oxford: Clarendon Press.
- Clark, A. J., 1990, *Seeing Beneath the Soil. Prospecting Methods in Archaeology*, London: B.T. Batsford Ltd.
- Hayden, B. J. and T. Strasser, 2003, "Final Neolithic-Early Minoan I/IIA Settlement in the Vrokastro Area, Mirabello, Eastern Crete," *AJA* 107:363-412.
- Hall, E., *Excavations in Eastern Crete, 1914, Vrokastro*. University of Pennsylvania. The University Museum, *Anthropological Publications* 3:3, 17-185.
- Hayden, B. J., H. Dierckx, G. W. M. Harrison, J. Moody, G. Postma, O. Rackham, A. B. Stallsmith, 2004, *Reports on the Vrokastro Area, Eastern Crete. Volume 2: The Settlement History of the Vrokastro Area and Related Studies*, University Museum Monograph 119, Philadelphia: University of Pennsylvania
- Nishimura, Y., 2001. Geophysical prospection in Archaeology in D. R. Brothwell and A. M. Pollard (eds.), *Handbook of Archaeological Sciences*, pp.543-553, New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Sarris, A.. 1992, "Shallow Depth Geophysical Investigation Through the Application of Magnetic and Electric Resistance Techniques". A Ph.D. Dissertation, U. of Nebraska-Lincoln, Dept. of Physics and Astronomy, Lincoln, U.S.A. (U.M.I. Dissertation Services, A Bell & Howell Company).
- Sarris, A. and Jones, R. E, 2000. Geophysical and Related Techniques Applied to Archaeological Survey in the Mediterranean: A Review, *Journal of Mediterranean Archaeology (JMA)*, v.13, no.1, pp.3-75
- Sarris, A., Geophysical Prospection Survey at Priniatikos Pyrgos – Istron (E. Crete), 2002, unpublished Technical Report, Laboratory of Geophysical-Satellite Remote Sensing & Archaeoenvironment, Institute for Mediterranean Studies - Foundation of Research & Technology (F.O.R.T.H.), Rethymno, Crete, October 2003.
- Sarris A., Kokkinou E., Kouriati K., Aedona E., Karagianni L., Vargemezis G., Stamatis G., Elvanidou M., Katifori E., Kaskanioti † M., Soetens S., Kalpaxis Th., Bassiakos Y., Athanassas C., Hayden B., Brennan T., 2005, Geophysical and Geomorphological Studies at the wider Istron Area, E. Crete, 6<sup>th</sup> Archaeological Prospection, September 14-17, Rome (Italy).



- Αράμπελος, Δ., 1991, Στοιχεία Γεωφυσικών Διασκοπήσεων, εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος, Βασίλης Κ., 1996, Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Παπαζάχος, Β. (1999), Εισαγωγή στη Γεωφυσική, εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Σαρρής, Α., 1995. Μαγνητική Επιδεκτικότητα, Σημειώσεις στο μάθημα: ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΡΙΑ – Μαγνητική Διασκόπηση Εδαφών & Εφαρμογές της Μαγνητικής Επιδεκτικότητας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.