

**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**

**ΚΥΡΙΑΚΙΔΟΥ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ**

**« Εξερεύνηση με γεωφυσικές μεθόδους στους αρχαιολογικούς χώρους της  
Νέας Απολλωνίας και της Μαρώνειας.»**

**ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

**ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ : ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2005**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Πρόλογος</b>                                                                                    | <b>I</b>  |
| <b>Εισαγωγή</b>                                                                                    | <b>IV</b> |
| <b>1. Γεωφυσικές Διασκοπήσεις</b>                                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1. Διαχωρισμός Γεωφυσικών Διασκοπήσεων                                                           | 1         |
| 1.2. Πρόσφατη εξέλιξη και προοπτική των Γεωφυσικών Μεθόδων<br>εντοπισμού Αρχαιοτήτων               | 2         |
| 1.3. Εφαρμογές των Αρχαιολογικών Διασκοπήσεων στην Ελλάδα                                          | 4         |
| 1.4. Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης                                                                | 5         |
| 1.5. Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης                                                                | 9         |
| 1.6. Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος και το Δυναμικό στην Επιφάνεια της Γης                                | 11        |
| 1.7. Αντίσταση και Φαινόμενη Ηλεκτρική Αντίσταση                                                   | 12        |
| 1.8. Διατάξεις Ηλεκτροδίων                                                                         | 15        |
| 1.9. Διάταξη Πόλου-Πόλου και Διδύμου Ηλεκτροδίου                                                   | 18        |
| <b>2. Βάθος Διείσδυσης</b>                                                                         | <b>25</b> |
| 2.1. Επίλυση του ευθέως προβλήματος                                                                | 25        |
| 2.2. Το βάθος της έρευνας                                                                          | 26        |
| 2.3. Διαδικασία που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία                                               | 27        |
| 2.4. Κατηγοριοποίηση των Μοντέλων που Πραγματοποιήθηκαν                                            | 31        |
| 2.4.1. Αντίθεση Αντίστασης                                                                         | 31        |
| 2.4.2. Διαστάσεις του μοντέλου                                                                     | 35        |
| 2.4.3. Θέση ηλεκτροδίων σε σχέση με το σώμα                                                        | 37        |
| 2.4.4. Βάθος Ταφής του Μοντέλου                                                                    | 41        |
| 2.4.4.1. Μοντέλα που αποτελούνται από δομές οι οποίες βρίσκονται<br>σε διαφορετικά βάθη ταφής      | 49        |
| 2.4.5. Απόκριση Διαφόρων άλλων Μοντέλων                                                            | 55        |
| 2.5. Συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των μοντέλων                                       | 60        |
| <b>3. Διαδικασία λήψης δεδομένων</b>                                                               | <b>62</b> |
| 3.1.1 Διαδικασία λήψης δεδομένων ηλεκτρικής χαρτογράφησης στον<br>αρχαιολογικό χώρο της Απολλωνίας | 62        |
| 3.1.2. Ηλεκτρική Διασκόπηση στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας                                         | 65        |
| 3.2. Μαγνητική Διασκόπηση στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας                                           | 68        |
| <b>4.Επεξεργασία Μετρήσεων</b>                                                                     | <b>74</b> |
| 4.1. Επεξεργασία των μετρήσεων με το λογισμικό Geoplot 3.0                                         | 74        |

|                                                                                           |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2. Επεξεργασία Ηλεκτρικών Μετρήσεων                                                     | 78         |
| 4.2.1. Επεξεργασία των δεδομένων της Νέας Απολλωνίας                                      | 79         |
| 4.2.2. Επεξεργασία δεδομένων στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας                               | 90         |
| <b>5. Αποτελέσματα</b>                                                                    | <b>98</b>  |
| 5.1. Αποτελέσματα της έρευνας ηλεκτρικών διασκοπήσεων από την περιοχή της Νέας Απολλωνίας | 98         |
| 5.2. Αποτελέσματα της έρευνας ηλεκτρικών διασκοπήσεων από την θέση Καμπάνα της Μαρώνειας  | 100        |
| 5.3. Αποτελέσματα μαγνητικών διασκοπήσεων από την θέση Καμπάνα της Μαρώνειας              | 101        |
| <b>6. Συμπεράσματα</b>                                                                    | <b>105</b> |
| 6.1. Συμπεράσματα Ηλεκτρικών προσομοιώσεων                                                | 105        |
| 6.2. Συμπεράσματα Ακολουθιών Επεξεργασίας των δεδομένων                                   | 105        |
| 6.3. Συμπεράσματα από την περιοχή της Νέας Απολλωνίας                                     | 107        |
| 6.4. Συμπεράσματα από την θέση Καμπάνα στη περιοχή της Μαρώνειας                          | 108        |
| 6.5. Συμπεράσματα ως προς την βέλτιστη ακολουθία διεργασιών στα δεδομένα                  | 109        |
| <b>Βιβλιογραφία</b>                                                                       | <b>111</b> |

## ***Πρόλογος***

Η παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του κλάδου της Γεωφυσικής, του τμήματος Γεωλογίας, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Αντικείμενό της είναι η συλλογή γεωφυσικών δεδομένων εξερευνώντας αρχαιολογικούς χώρους και η αναζήτηση της βέλτιστης ακολουθίας επεξεργασιών. Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των ηλεκτρικών και μαγνητικών μεθόδων διασκόπησης στους αρχαιολογικούς χώρους της Ν. Απολλωνίας και της Μαρώνειας. Τα δεδομένα αυτά υποβλήθηκαν σε διάφορες επεξεργασίες, πειραματιζόμενοι τόσο ως προς το είδος των επεξεργασιών που συνιστούσαν μια ακολουθία όσο και με τη σειρά που οι επεξεργασίες αυτές έπρεπε να εφαρμοστούν. Επίσης έγινε μια προσπάθεια μελέτης του βάθους διείσδυσης και της απόδοσης της διάταξης πόλου-πόλου με την βοήθεια διάφορων προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν για αυτό τον σκοπό.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη γενική αναφορά στις γεωφυσικές διασκοπήσεις και στην εξέλιξη αυτών με σκοπό τον εντοπισμό αρχαιοτήτων. Επίσης, γίνονται αναφορές σε εφαρμογές των διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους. Στη συνέχεια ακολουθεί εκτεταμένη παρουσίαση των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες προσομοιώσεις συνήθων καταστάσεων υπεδάφους και υπολογίζεται η απόκριση τους στην επιφάνεια αν πραγματοποιούσαμε ηλεκτρική διασκόπηση. Ο υπολογισμός αυτός, με αλλά λόγια η επίλυση του ευθέως προβλήματος γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μελέτη γίνεται για τη διάταξη πόλου-πόλου της οποίας ειδική περίπτωση θεωρείται η διάταξη του διδύμου ηλεκτροδίου τόσο στον τρόπο διεκπεραίωσης των μετρήσεων αλλά κυρίως ως προς την ευαισθησία και τις δυνατότητές της γενικότερα.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίνονται πληροφορίες σχετικά με την λήψη των δεδομένων, μια διαδικασία πρωταρχικής σημασίας η οποία πρέπει να γίνεται με



προσοχή και υπευθυνότητα. Αυτή θα αποτελέσει την βάση για τις περαιτέρω επεξεργασίες που θα οδηγήσουν σε σωστά αποτελέσματα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται οι ακολουθίες για την επεξεργασία των μετρήσεων τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών δεδομένων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων που περιγράφηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Αφορούν τις μετρήσεις των ηλεκτρικών διασκοπήσεων που έγιναν στην περιοχή της Νέας Απολλωνίας, στην θέση Καμπάνα της Μαρώνειας καθώς και τις μετρήσεις των μαγνητικών διασκοπήσεων από την ίδια περιοχή.

Τέλος εξάγονται συμπεράσματα από τις ηλεκτρικές προσομοιώσεις, από τις ακολουθίες επεξεργασίας των δεδομένων καθώς και συμπεράσματα για τους αρχαιολογικούς χώρους της Ν. Απολλωνίας και της Μαρώνειας.

Με την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο επιβλέποντα κ. Γ.Ν Τσόκα, Καθηγητή του Τομέα Γεωφυσικής του τμήματος Γεωλογίας του Α. Π. Θ. για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση, την υπομονή και τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και συμβουλές καθ' όλη τη διάρκεια της διατριβής αυτής.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τον κ. Π.Τσούρλο, Λέκτορα του Τομέα Γεωφυσικής για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή του σε επιστημονικά θέματα, τη συνεχή παρότρυνσή του και υπομονή του καθώς και για την ψυχολογική συμπαράσταση από το πρώτο έτος των μεταπτυχιακών μου σπουδών μέχρι και το τέλος της διατριβής αυτής.

Στο τρίτο μέλος της επιτροπής την διευθύντρια της ΚΖ' Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων κα. Πολυξένη Αδάμ-Βελένη θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την προσεκτική ανάγνωση και διόρθωση του κειμένου καθώς και για τις χρήσιμες αρχαιολογικές πληροφορίες για την περιοχή της Ν. Απολλωνίας.

Επίσης ευχαριστώ την αρχαιολόγο κα. Χ. Καραδήμα της ΙΘ' Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων για τις χρήσιμες αρχαιολογικές πληροφορίες για την περιοχή της Μαρώνειας και για την συμβολή της τόσο στο καθορισμό των παραμέτρων της διασκοπήσης όσο και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Τομέα Γεωφυσικής καθώς και τους μεταπτυχιακούς φοιτητές για τη βοήθεια που μου προσέφεραν, ο κάθε ένας με τον τρόπο του σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Ευχαριστίες οφείλω στους συναδέλφους μου, Ε. Αθανασίου, Χ. Βεντούζη, Ν. Ζήση, Ε. Καραβασίλη Ι. Μερτζανίδη, Α. Πάνου, Α. Σταμπολίδη καθώς και στον Λέκτορα του Τομέα Γεωφυσικής Γ. Βαργεμέζη για την βοήθεια τους στη διαδικασία λήψεως των μετρήσεων. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον τελευταίο για τις συμβουλές και την βοήθεια που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής.

Ευχαριστώ επίσης τους φίλους μου Βογιατζή Δ., Κουτλιάνη Α. Βεντούζη Χ. και Κεμεντζετζίδου Δ. για την συνεχή παρότρυνση, τη συμπαράσταση, την υπομονή και την ψυχολογική υποστήριξη που μου έδειξαν αυτά τα χρόνια.

Τέλος, εκφράζω απεριόριστη ευγνωμοσύνη και ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, που με στήριξε ηθικά και οικονομικά γι' αυτό και η Διατριβή Ειδίκευσης αφιερώνεται στην οικογένεια μου.

*Κυριακίδου Αλεξάνδρα*  
*Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2005*

## Εισαγωγή

### Αρχαιολογικά στοιχεία για την περιοχή της Ν. Απολλωνίας.

Η Νέα Απολλωνία κτισμένη δυτικά από τα ερείπια της αρχαίας Απολλωνίας αποτελεί την έδρα του Δήμου Απολλωνίας (Χάρτης 1). Αρχαιολογικές ανασκαφές στην περιοχή (Αδάμ-Βελένη 2000) έχουν αποκαλύψει ίχνη συνεχούς κατοίκησης από τη νεότερη και ύστερη νεολιθική εποχή, την πρώιμη εποχή του σιδήρου και κατά τους ιστορικούς χρόνους. Πλήθος ευρημάτων, επιτύμβιες στήλες, αγάλματα, πήλινοι αγωγοί μαρτυρούν το παρελθόν της περιοχής. Εξάλλου σύγχρονες αρχαιολογικές και μεταλλευτικές έρευνες καθώς και η ύπαρξη σκουριών και υπολειμμάτων επιβεβαιώνουν τις πληροφορίες που μας δίνουν τα αρχαία κείμενα για την εκμετάλλευση χρυσού στην περιοχή.



Χάρτης 1 Η θέση του χώρου που φιλοξενεί τα ερείπια της αρχαίας Απολλωνίας, κοντά στη σύγχρονη Νέα Απολλωνία. (Τμήμα από τον Χάρτη Εφαρμογής του Προγράμματος Leader+ στον Νόμο Θεσσαλονίκης :[http://www.aneth.gr/1212\\_popXartis2.asp](http://www.aneth.gr/1212_popXartis2.asp)).

Κατά την διάρκεια της βασιλικής δυναστείας των Τημενιδών και ιδιαίτερα την εποχή του Φιλίππου Β και Μεγάλου Αλεξάνδρου δημιουργούνται συνθήκες πολιτιστικής ανάπτυξης και οικονομικής άνθησης σημαντικών

πόλεων, ενώ στους ρωμαϊκούς χρόνους το πέρασμα της Εγνατίας Οδού διαμορφώνει εμπορικά κέντρα και αυξάνει τον πλούτο (*Αδάμ-Βελένη 2000*). Σύμφωνα με την αρχαιολόγο Π. Αδάμ-Βελένη, συνεχώς προστίθενται νέα στοιχεία για την Απολλωνία, όπως οι τυχαίες ανακαλύψεις στα χωράφια της Νέας Απολλωνίας το 2000. Τότε βρέθηκαν ένας μαρμάρινος κορμός αγάλματος ελληνιστικών χρόνων και ένα χρυσό στεφάνι από την ίδια περιοχή. Ο κορμός που έχει ύψος 0,50 εκατοστά και παριστάνει Νίκη, χρονολογείται στο 2ο π.χ. αιώνα. Εκτιμάται ότι ήταν ακρωτήριο ναού, οικοδομημένο μέσα στην πόλη και η θέση στην οποία βρέθηκε παραπέμπει στην ύπαρξη αγοράς. Το χρυσό στεφάνι είναι σε σχήμα κορμού κισσού, με διάμετρο 18,5 εκατοστά από όπου φύονται τριάντα κισσόφυλα και δύο καρποί. Το πολύτιμο αυτό εύρημα αποτελεί έργο μεγάλης καλλιτεχνικής αξίας και χρονολογείται στο 330-325 π.χ. Σύμφωνα με την κα. Αδάμ-Βελένη είναι παρόμοιο με προηγούμενο στεφάνι που προέρχεται από τις ανασκαφές σε τάφους στη Σεβαστή Πιερίας στη θέση τούμπα παπά και βρίσκεται σήμερα στο αρχαιολογικό μουσείο Θεσσαλονίκης ενώ ένα τρίτο ίδιας τεχνικής ανήκει σε ιδιώτη.

Πιθανολογείται ότι το εύρημα προέρχεται από την αρχαία Απολλωνία πόλη της Μυγδονίας την οποία θεωρείται ότι ίδρυσε ο Περδίκας Β τον 5ο π.χ. αιώνα με την εγκατάσταση αποίκων Χαλκιδέων για να αποφύγουν τις συνέπειες της αποστασίας τους από τους Αθηναίους κατά την έναρξη του τριακονταετούς πολέμου 431-410 π.χ. Η πόλη εξελίσσεται σε σημαντικό οικονομικό και πολιτιστικό κέντρο και το 360 π.χ. αναφέρεται ως αυτόνομη πόλη. Τμήμα του Μακεδονικού Βασιλείου την εποχή του Φιλίππου Β' και του Μεγάλου Αλεξάνδρου, αποτελεί στρατιωτική και διοικητική έδρα, ενώ το 187 π.χ. επι Φιλίππου του Β αποκτά δικαίωμα κοπής χάλκινων νομισμάτων.

Δοκιμαστική ανασκαφή που διενεργήθηκε το 1991 από την αρχαιολόγο και Πολυξένη Αδάμ-Βελένη (*Αδάμ-Βελένη 2000*) εντόπισε τείχη, θεμέλια κατοικιών και τμήμα ψηφιδωτού πόλης η οποία ήκμασε τον 4ο έως 3ο π.χ. αιώνα και παρουσίαζε διάρκεια ζωής κατά την Ελληνιστική και Ρωμαϊκή περίοδο, όπως απεδείκνυναν αγάλματα και τάφοι (*Αδάμ-Βελένη 2000*). Η εύρεση του χρυσού στεφανιού οδήγησε στη συστηματική ανασκαφή της ευρύτερης περιοχής και σύμφωνα με τα μέχρι σήμερα ευρήματα ο χώρος ο

οποίος ορίζεται από τους δύο ποταμούς της αρχαιότητας οι οποίοι είναι σήμερα χείμαρροι, το χρυσοφόρο Αμμίτη και τον Ολυνθιακό αποκαλύπτει ίχνη κατοίκησης από την εποχή του χαλκού έως τους βυζαντινούς χρόνους.

Η πόλη που έρχεται στο φως, όπως εκτιμά η υπεύθυνη των ανασκαφών κα Βελένη, σήμερα αρχαιολόγος της ΚΖ Εφορείας Κλασσικών και Προϊστορικών Αρχαιοτήτων, πρέπει να ήταν εξαιρετικής σημασίας. Τα τείχη της έχουν αποκαλυφθεί σε μήκος 150 μέτρων μέχρι στιγμής είναι πλάτους 3,20 μέτρων και ύψους 1,20 μέτρου ενώ θα πρέπει να φθάνουν τα 5 μέτρα σύμφωνα με τις εκτιμήσεις. Κάθε 30 μέτρα σχηματίζουν ημικυκλικούς πύργους. Το αιγυπτιαζόν σύστημα, όπως ονομάζεται αυτός ο τρόπος οικοδόμησης των τειχών, χρησιμοποιείτο στους κλασικούς χρόνους για σημαντικές οχυρώσεις.

Επιπλέον οι εργασίες έχουν αποκαλύψει στο ανατολικό νεκροταφείο μακεδονικό οικογενειακό ταφο, μήκους 5,50 μέτρων, του 4ου –3ου αιώνα, με προθάλαμο στο οποίο υπήρχε σαρκοφάγος και θάλαμο με δυο κλίνες, υπολείμματα χρυσών στεφανιών, λυχνάρια και γυναικείο ειδώλιο, 3ου π.χ. αιώνα .

### ***Αρχαιολογικά στοιχεία για την περιοχή της Μαρώνειας.***

Τα στοιχεία βρέθηκαν από την εργασία «*Αρχαίο θέατρο Μαρώνειας 1981-2001:Τα αποτελέσματα της ανασκαφικής έρευνας την τελευταία εικοσαετία*» της αρχαιολόγου Χρύσας Καραδήμα. Η περιοχή φαίνεται στον Χάρτη 2.





Χάρτης 2 Χάρτης που δείχνει τη θέση της σύγχρονης Μαρώνειας κοντά στην οποία βρίσκονται τα ερείπια της αρχαίας.

Το θέατρο της Μαρώνειας, το οποίο ανασκάφτηκε συστηματικά στο διάστημα 1981-1988 και συμπληρωματικά το 1994 από τον Έφορο Αρχαιοτήτων Ε. Πεντάζο, χρονολογείται στην ελληνιστική περίοδο, γνώρισε όμως αρκετές επεμβάσεις στη ρωμαϊκή εποχή, όπως άλλωστε συνέβη στα περισσότερα ελληνικά θέατρα, για να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες των παραστάσεων που συνδέονταν με τα ήθη της εποχής. Οι επεμβάσεις αυτές αφορούσαν κατά κύριο λόγο στο σκηνικό οικοδόμημα και στο προσκήνιο, στις παρόδους και στην ορχήστρα και λιγότερο στο κοίλο. Από το καλοκαίρι του 2000 ξεκίνησαν νέες ανασκαφικές εργασίες, οι οποίες εντάσσονται στο πρόγραμμα της 10<sup>ης</sup> Εφορείας Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων που εκπονήθηκε σε συνεργασία με το Τμήμα Αρχιτεκτόνων του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την αποκατάσταση-αναστήλωση και ανάδειξη του θεάτρου, καθώς και τη συντήρηση-στερέωση του δομικού υλικού. Στο πλαίσιο του ίδιου προγράμματος εκπονήθηκαν δύο ακόμη μελέτες: υδραυλική μελέτη για την προστασία του θεάτρου από πιθανές μελλοντικές πλημμύρες του ρέματος βορειοανατολικά του θεάτρου, λόγω

βροχοπτώσεων και μελέτη του λίθινου υλικού και των συνδετικών κονιαμάτων για να ερευνηθούν οι μέθοδοι στερέωσης και συντήρησης τους.

Κατά τις δύο τελευταίες ανασκαφικές περιόδους (Καραδήμα 2002) η έρευνα επικεντρώθηκε στη διερεύνηση του χώρου των παρόδων του θεάτρου για τον εντοπισμό της θεμελίωσης των αναλημματικών τοίχων του κοίλου και τη μελέτη της στρωματογραφίας. Ερευνήθηκε επιπλέον ο χώρος του ρωμαϊκού προσκηνίου και της σκηνής, με στόχο την ανίχνευση δαπέδων και λειψάνων του ελληνιστικού προσκηνίου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη γενική αναφορά στις γεωφυσικές διασκοπήσεις και στην εξέλιξη αυτών με σκοπό τον εντοπισμό Αρχαιοτήτων. Επίσης, γίνονται αναφορές σε εφαρμογές των διασκοπήσεων σε Αρχαιολογικούς Χώρους. Στη συνέχεια ακολουθεί εκτεταμένη ανάλυση για τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις γεωφυσικής διασκόπησης.

### 1.1 Διαχωρισμός Γεωφυσικών Διασκοπήσεων

Ενεργητικές και Παθητικές Γεωφυσικές Διασκοπήσεις

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες οι οποίες είναι οι ενεργητικές και οι παθητικές.

Οι παθητικές γεωφυσικές διασκοπήσεις συμπεριλαμβάνουν μετρήσεις φυσικών πεδίων ή ιδιοτήτων της γης. Τέτοιες περιπτώσεις, αποτελούν τα φυσικά πεδία όπως το βαρυτικό και το μαγνητικό, δηλαδή, μετρούμε τις χωρικές μεταβολές αυτών των πεδίων στην προσπάθειά μας να βγάλουμε συμπεράσματα για την υπεδάφια γεωλογία. Τα πεδία και οι ιδιότητες που μετρούμε σε αυτή την κατηγορία πειραμάτων υπάρχουν στη Γη ανεξάρτητα από τη γεωφυσική μας διασκόπηση. Παραδείγματα άλλων ιδιοτήτων της Γης που μπορούν να μετρηθούν παθητικά περιλαμβάνουν προϊόντα ραδιομετρικής διάσπασης, ορισμένα ηλεκτρικά πεδία και ορισμένα ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Κατά την διεξαγωγή των ενεργών γεωφυσικών διασκοπήσεων, από την άλλη, ένα σήμα εισάγεται στη γη και εμείς μετρούμε πως η γη αποκρίνεται στο σήμα αυτό. Τα σήματα αυτά μπορούν να είναι διαφόρων κατηγοριών όπως για παράδειγμα μετατόπιση ή ηλεκτρικό ρεύμα ή ηλεκτρομαγνητική διαταραχή ή ενεργή ραδιομετρική πηγή. Η μέθοδος της ειδική αντίσταση και η σεισμική διάθλαση, είναι παραδείγματα ενεργών γεωφυσικών πειραμάτων.



## 1.2 Πρόσφατη εξέλιξη και προοπτική των Γεωφυσικών Μεθόδων εντοπισμού Αρχαιοτήτων.

Συμφώνα με τον Τσόκα (1988), το σύνολο των μεθόδων και τεχνικών των θετικών επιστημών οι οποίες βρίσκουν κάποια εφαρμογή στην Αρχαιολογία αποτέλεσε μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο μια αυτοτελή επιστημονική οντότητα. Αρχικά ονομάστηκε "Αρχαιοφυσική", αλλά σύντομα επικράτησε ο γενικότερος και σωστότερος όρος "Αρχαιομετρία". Η νέα αυτή οντότητα αποτελούσε ουσιαστικά ένα σύνολο τεχνικών και μεθόδων, οι οποίες ήταν περισσότερο ή λιγότερο γνωστές αλλά είχαν όμως χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στη λύση άλλων προβλημάτων και προφανώς συνέβαλαν επιτυχώς στη λύση αρχαιολογικών προβλημάτων. Με τον καιρό όμως φάνηκε ότι δεν ήταν αρκετή η επιτυχής προσαρμογή τους στην Αρχαιολογία, ότι έπρεπε οι ίδιες αυτές μέθοδοι να εξελιχθούν και επίσης να αναπτυχθούν νέες. Έτσι, από το στάδιο του υβριδισμού περάσαμε στο στάδιο της αυτοτελούς ανάπτυξης, γεγονός που έδωσε μεγάλη ώθηση στην Αρχαιομετρία. Ταυτόχρονα, η επιτυχής εμπλοκή της στην επίλυση ιστορικών, αρχαιολογικών, ανθρωπολογικών, εθνολογικών κ.λ.π. προβλημάτων της προσέδωσε κύρος και την κατέστησε ευρέως γνωστή. Δεν πρέπει όμως να παραγνωρίζεται και το αντίστροφο γεγονός, δηλαδή ότι αρκετές μέθοδοι έχουν την ζωτική ανάγκη της Αρχαιολογίας παρά την βοηθούν. Τέτοιο παράδειγμα είναι ο αρχαιομαγνητισμός όπου τα αρχαιολογικά δεδομένα είναι αναγκαία στην κατασκευή των καμπύλων μεταβολής των στοιχείων του γεωμαγνητικού πεδίου. Από την άλλη μεριά όμως, η ακρίβεια που παρέχει η μέθοδος στις χρονολογήσεις είναι πολύ μικρότερη απ' ότι άλλων μεθόδων και συνήθως πολύ μικρότερη απ' ότι η ακρίβεια των καθαρά αρχαιολογικών μεθόδων.

Οι γεωφυσικές διασκοπήσεις έχουν τιμητική θέση στην ιστορία της ανάπτυξης της Αρχαιομετρίας, γιατί ήταν αυτές που σηματοδότησαν την εκκίνηση της νέας επιστημονικής ενότητας (Aitken 1974). Η ηλεκτρική διασκόπηση εφαρμόσθηκε για πρώτη φορά το 1946 και η μαγνητική σε τοποθεσίες της Αγγλίας (Aitken 1974). Οι δύο αυτές μέθοδοι έτυχαν ευρείας εφαρμογής και μέχρι σήμερα είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην

αρχαιολογική εξερεύνηση (Τσόκας 1993). Εκτός από τις δύο αυτές μεθόδους και όλες οι άλλες μέθοδοι διασκόπησης έχουν τύχει κάποιας εφαρμογής στη λύση συγκεκριμένων αρχαιολογικών προβλημάτων. Η περιορισμένη χρήση των υπολοίπων αυτών μεθόδων οφείλεται στο μεγάλο χρόνο εκτέλεσης της διασκόπησης, στην οικονομική επιβάρυνση των έργων και στα δαπανηρά όργανα που απαιτούνται. Το κύριο όμως μειονέκτημα τους είναι ότι δε μπορούν να εφαρμοστούν σε συνηθισμένες αρχαιολογικές έρευνες ρουτίνας γιατί περιορίζονται από το σχετικά μεγάλο μήκος κύματος των χρησιμοποιημένων σημάτων ως προς τις διαστάσεις του στόχου.

Ο *Wynn* (1986) εισήγαγε τον όρο "γεωφυσικές διασκοπήσεις μεγάλης διακριτικής ικανότητας" ως γενική περιγραφή. Ο όρος αυτός είναι πράγματι δόκιμος, γιατί οι ανωμαλίες που καταγράφονται στην αρχαιολογική εξερεύνηση είναι κατά πολύ μικρότερου μήκους κύματος αυτών που συνήθως συναντώνται στις άλλες εξερευνήσεις (π. χ. μεταλλευτική έρευνα, τεχνική Γεωφυσική κ.α. ). Το γεγονός αυτό, δίνει, και την πραγματική διάσταση των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην αρχαιολογία. Τα σήματα που λαμβάνονται στους φωρατές των οργάνων είναι μικρού χωρικού μήκους κύματος και μικρού πλάτους. Δηλαδή, βρίσκονται λίγο ψηλότερα από τη στάθμη του θορύβου, επιπλέον απαιτούν πολύ μικρό βήμα δειγματοληψίας για να αποδοθούν χωρίς σφάλματα (Τσόκας 1988).

Σε αντιδιαστολή με οποιαδήποτε άλλη συμβατική επεξεργασία φυσικών δεδομένων, στις "αρχαιολογικές διασκοπήσεις" χρησιμοποιούνται περισσότερο οι τεχνικές οπτικής ενίσχυσης και επεξεργασίας εικόνων. Επομένως οι τεχνικές παρεμβολής, ενίσχυσης γραμμικών στοιχείων, τεχνικού φωτισμού και σύμπτυξης εικόνων εφαρμόζονται ευρέως με σκοπό την παρουσίαση των γεωφυσικών χαρτών μορφή τέτοια που να προσομοιάζουν το αποτέλεσμα της ανασκαφής (*Scollar et al. 1986*).

### 1.3 Εφαρμογές των Αρχαιολογικών Διασκοπήσεων στην Ελλάδα

Οι πρώτες εφαρμογές των γεωφυσικών μεθόδων στην εξερεύνηση Ελληνικών αρχαιολογικών χώρων έγιναν από ξένους επιστήμονες για λογαριασμό των ξένων αρχαιολογικών αποστολών που είναι μόνιμα εγκατεστημένες στη χώρα μας. Με την αρχή της δεκαετίας του 1980 άρχισε να γίνεται ευρεία χρήση των μεθόδων αυτών από Έλληνες επιστήμονες. Εκτεταμένη αναφορά των θέσεων που εξερευνήθηκαν αλλά και των μέχρι τότε γνωστών αποτελεσμάτων έχει δοθεί από τον Τσόκα (1988). Επίσης, οι Tsokas και Rocca (1986) επιχείρησαν να δώσουν μία σύνοψη των συμπερασμάτων της Ελληνικής εμπειρίας και επίσης παρουσίασαν πρόταση διαδικασίας εκτέλεσης γεωφυσικής διασκόπησης αρχαιολογικών χώρων.

Οι Sarris και Vassiliadis (1978) εξερεύνησαν τον αρχαιολογικό χώρο του Αμαθούντα στην Κύπρο. Οι Βλάχος και Λιβιεράτος (1981) αναφέρουν εφαρμογή της μαγνητικής μεθόδου σε τμήμα του χώρου της αρχαίας Πέλλας. Στη συνέχεια ο Paramarinopoulos et al. (1985, 1988) δημοσίευσαν τα αποτελέσματα διασκοπήσεων που έγιναν στο διάστημα 1983-1985 στην Μυτιλήνη και τη Στύμφαλο. Το ίδιο χρονικό διάστημα έγιναν οι εξερευνήσεις, της Βεργίνας (Tsokas and Saatsoglou-Paliadeli 1988) και της Πύδνας (Tsokas et al. 1989).

Οι πρώτες αυτές διασκοπήσεις σε αρκετά γνωστούς αρχαιολογικούς χώρους συνετέλεσαν στο να αποκτηθεί ένα επίπεδο εμπειρίας το οποίο ήταν αναγκαίο για την παραπέρα δουλειά. Ακολούθησε η εκτεταμένη εφαρμογή σε τοποθεσίες στην Κω, στη Νάξο, στη Βάρκιζα, στα Ισθμια και τους Λουσούς από τον τότε επίκουρο καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Σ. Παπαμαρινόπουλο. Οι Tsokas και Liritzis (1990) πραγματοποίησαν το 1986 ένα εκτεταμένο πρόγραμμα διασκοπήσεων σε αρχαιολογικούς χώρους στο κέντρο της Αθήνας. Την ίδια χρονιά οι Paramarinopoulos και Tsokas (1988) εξερεύνησαν τον Μινωικό οικισμό στην Ψείρα και τον πρωτογεωμετρικό οικισμό στο Καβούσι στην Κρήτη.

Οι Katsambalos και Tsiournis (1988) αναφέρουν εφαρμογές μεθόδων σε

τοποθεσίες της Ρόδου και της Βεργίνας και ο Katsarnbalos et al (1991) εφαρμογή στο κάστρο του Πλαταμών. Ο Vafidis et al. (1995) πραγματοποίησε σεισμική διασκόπηση σε Μακεδονικούς τάφους στην περιοχή της Πέλλας.

Σύμφωνα με το άρθρο των Sarris and Jones (2000), το Εργαστήριο γεωφυσικής του Α.Π.Θ έχει πραγματοποιήσει αρκετές έρευνες σε διάφορες περιοχές όπως στον προϊστορικό οικισμό του Μάνδαλου στο νομό Πέλλας και τον ευρύτερο χώρο γύρω από αυτόν, όπου πραγματοποιήθηκε μαγνητική και ηλεκτρική διασκόπηση (Tsokas et al. 1984). Γεωφυσικές διασκοπήσεις έχουν γίνει επίσης στον αρχαιολογικό χώρο του Δίου, του Νομού Πιερίας (Tsokas and Kyriakidis 1988, Rocca 1992) στον αρχαιολογικό χώρο της αρχαίας πόλης της Ευρωπού στο νόμο Κιλκίς (Tsokas et al. 1994, Tsourlos et al. 1996). Άλλη μια περιοχή όπου έγιναν γεωφυσικές διασκοπήσεις από το εργαστήριο Γεωφυσικής του Α.Π.Θ είναι στην περιοχή Λιμόρι της Επανωμής στο νόμο Θεσσαλονίκης (Tsokas et al. 1996), επίσης στην περιοχή του Μακρύγιαλου, του Νομού Πιερίας πραγματοποιήθηκαν μια σειρά από μαγνητικές, ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές διασκοπήσεις (Tsokas et al. 1997). Στο νησι της Λευκάδας (Savnaidis et al. 1999) και στη περιοχή Λουλουδιά, στο Κίτρος κοντά στην Πίδα του νομού Πιερίας (Aedona et al. 1998).

## 1.4 Ηλεκτρικές Μέθοδοι Διασκόπησης

Η υποδιαίρεση των γεωφυσικών τεχνικών σε παθητικές και ενεργητικές μεθόδους γεφυρώνεται από τις ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους. Στο σύνολό τους, οι ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι αντιπροσωπεύουν τη μεγαλύτερη τάξη γεωφυσικών μεθόδων, κάποιες από τις οποίες καταγράφουν παθητικά τα φυσικά σήματα ενώ άλλες χρησιμοποιούν ενεργές πηγές.

Επιπρόσθετα στην μεγάλη τους ποικιλία, αυτή η ομάδα γεωφυσικών τεχνικών αντιπροσωπεύει ορισμένα από τα παλαιότερα μέσα εξερεύνησης του

εσωτερικού της Γης. Για παράδειγμα, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού που περιγράφεται παρακάτω χρονολογείται από το 1830, οπότε χρησιμοποιήθηκε στην Κορνουάλη της Αγγλίας από τον Robert Fox για την εύρεση της προέκτασης γνωστών κοιτασμάτων χαλκού. Φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στη Γη, τα οποία καλούνται *τελλουρικά ρεύματα (telluric currents)*, αναγνωρίστηκαν για πρώτη φορά από τον Peter Barlow το 1847. Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος αναπτύχθηκε το 1920 για την έρευνα αποθεμάτων μεταλλοφόρων ορυκτών.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούν ποικίλες μετρήσεις των αποτελεσμάτων της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη Γη. Τα φαινόμενα που μπορούν να μετρηθούν περιλαμβάνουν τη ροή του ρεύματος, το ηλεκτρικό δυναμικό (τάση) και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Μια περίληψη των πιο γνωστών ηλεκτρικών μεθόδων δίνεται παρακάτω.

- *Μέθοδος Ειδικής Αντίστασης συνεχούς ρεύματος (DC Resistivity)* - πρόκειται για ενεργητική μέθοδο που χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δυναμικό που σχετίζεται με την υπόγεια ροή ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από πηγή συνεχούς, ή εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το μετρούμενο δυναμικό, και κατά συνεπεία χαρτογραφούνται από αυτή την μέθοδο, περιλαμβάνουν την παρουσία και την ποιότητα των υγρών των πόρων και των αργίλων.
- *Μέθοδος Επαγόμενης Πολικότητας (induced Polarization IP)* - πρόκειται για ενεργητική μέθοδο που πραγματοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Ειδικής Αντίστασης. Χρησιμοποιεί μετρήσεις των παροδικών (βραχύβιων) μεταβολών του δυναμικού καθώς ρεύμα αρχικά διαβιβάζεται ή παύει να διαβιβάζεται στο έδαφος. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν ρεύμα διαβιβάζεται στο έδαφος, το έδαφος συμπεριφέρεται ως πυκνωτής, αποθηκεύοντας μέρος του εφαρμοζόμενου ρεύματος ως φόρτιση η οποία διασκορπίζεται με την διακοπή του ρεύματος. Η τάση στα ηλεκτρόδια που διαβιβάζουν το ρεύμα δεν μηδενίζεται αμέσως, αλλά αφού υποστεί μια απότομη σημαντική μείωση, αρχίζει στη συνέχεια να ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο και περνούν αρκετά δευτερόλεπτα (ή και λεπτά) μέχρις ότου μηδενιστεί και αυτή. Υπεύθυνες για τη

διαδικασία αυτή είναι τόσο οι χωρητικές όσο και οι ηλεκτροχημικές επιδράσεις. Η επαγόμενη πολικότητα χρησιμοποιείται συχνά για τον εντοπισμό συγκεντρώσεων αργίλων και ηλεκτρικά αγωγίμων κόκκων μεταλλικών ορυκτών.

- *Φυσικό Δυναμικό (Self Potential)* - πρόκειται για παθητική μέθοδο που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις των φυσικών ηλεκτρικών δυναμικών που σχετίζονται με την αποσάθρωση κοιτασμάτων σουλφιδίων. Τα φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα παράγονται με ηλεκτροχημική δράση μεταξύ μεταλλευμάτων και διαλυμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Μετρήσιμα ηλεκτρικά δυναμικά έχουν επίσης παρατηρηθεί σε σχέση με την υπόγεια ροή υδάτων και ορισμένες βιολογικές διεργασίες. Το μόνο όργανο που απαιτείται για την διεξαγωγή μιας διασκόπησης φυσικού δυναμικού είναι ένα βολτόμετρο υψηλής εσωτερικής αντίστασης (impedance) και κάποιο μέσο ώστε να πετύχουμε καλή ηλεκτρική επαφή με το έδαφος. Η μέθοδος αυτή αποτελεί την παλαιότερη μέθοδο ηλεκτρικής διασκόπησης.
- *Ηλεκτρομαγνητισμός (Electromagnetic)* - πρόκειται για μία ενεργητική μέθοδο που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που παράγεται από επαγωγή λόγω της ροής ρεύματος μέσα στη γη. Στην τεχνική αυτή, ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται στην επιφάνεια της γης το οποίο παράγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στη γη μέσω επαγωγής. Ένας δέκτης συγκρίνει το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη ροή του ρεύματος στη γη με αυτό που παράγεται στην πηγή. Ο ηλεκτρομαγνητισμός χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό αγωγίμων δομών και μεταλλοφοριών στο υπέδαφος. Δηλαδή, οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι εφαρμόζονται στην ανίχνευση και τον εντοπισμό θαμμένων σωλήνων και καλωδίων, για την ανίχνευση πυρομαχικών που δεν έχουν εκραγεί, για την γεωφυσική χαρτογράφηση κοντά στην επιφάνεια και τον εντοπισμό μεταλλοφοριών.
- *Μαγνητοτελλουρική Μέθοδος (Magnetotelluric)* - πρόκειται για παθητική μέθοδο που χρησιμοποιεί μετρήσεις φυσικών ρευμάτων, ή τελλουρικών

ρευμάτων, που παράγονται από μαγνητική επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στην ιονόσφαιρα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διαφόρων υλικών σε σχετικά μεγάλα βάθη (μέχρι και τον μανδύα) μέσα στη Γη. Με την τεχνική αυτή, μετρίεται η χρονική μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού σε έναν σταθμό βάσης και στους σταθμούς διασκόπησης. Οι διαφορές στο σήμα που καταγράφεται χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της υπόγειας κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων 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. Ηλεκτρικό ρεύμα εισάγεται στο έδαφος και η ποσότητα που μετράμε είναι η ηλεκτρική τάση. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Η ηλεκτρική αντίσταση είναι η ποσότητα που παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον και της οποίας επιδιώκεται ο καθορισμός και η μελέτη της κατανομής των τιμών της μέσα στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της Γης.

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως, στην αναζήτηση μεταλλευμάτων και γεωθερμικών πεδίων, στην Υδρογεωλογία και στην Τεχνική Γεωλογία. Μία από τις σπουδαιότερες ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης, είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, της οποίας η χρήση στην αρχαιομετρία θα αναπτυχθεί σε αυτή την εργασία.

## 1.5 Σχέση Γεωλογίας και Αντίστασης

Αν και μερικά αμιγή μέταλλα καθώς και ο γραφίτης άγουν τον ηλεκτρισμό, τα περισσότερα πετρογενετικά ορυκτά είναι μονωτές. Η μετρούμενη ειδική αντίσταση των ορυκτών της Γης ελέγχεται κατά κύριο λόγο από την κίνηση των φορτισμένων ιόντων στα ρευστά των πόρων. Αν και το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού, το εδαφικό νερό περιέχει διαλυμένες ενώσεις οι οποίες αυξάνουν σημαντικά την ικανότητά του να άγει τον ηλεκτρισμό. Επομένως, το πορώδες και ο κορεσμός σε ρευστά παίζουν καθοριστικό ρόλο στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης. Εκτός από το πορώδες, και οι ρωγμές εντός του πετρώματος μπορεί να οδηγήσουν σε χαμηλές ειδικές αντιστάσεις αν γεμίσουν με ρευστά. Είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν κάποιες χαρακτηριστικές τιμές της για τα διάφορα είδη πετρωμάτων *πίνακας 1*.

*Πίνακας1 Αντιστάσεις διαφόρων πετρωμάτων και ορυκτών.*

| Υλικό                        | Ειδική Ηλ. αντίσταση (Ohmm)                             |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                              |                                                         |
| <b>Σιδηροπυρίτης</b>         | <b><math>2.9 \times 10^{-5} - 1.5</math></b>            |
| <b>Γαληνίτης</b>             | <b><math>3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2</math></b>    |
| <b>Σφαλερίτης</b>            | <b><math>1.5 - 1 \times 10^7</math></b>                 |
| <b>Χαλαζίας</b>              | <b><math>4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}</math></b> |
| <b>Ασβεστίτης</b>            | <b><math>2 \times 10^{12}</math></b>                    |
| <b>Ορυκτό άλας</b>           | <b><math>30 - 1 \times 10^{13}</math></b>               |
| <b>Μαρμαρυγίες</b>           | <b><math>9 \times 10^{12} - 1 \times 10^{14}</math></b> |
| <b>Υπόγειο νερό</b>          | <b><math>0.5 - 300</math></b>                           |
| <b>Θαλασσινό νερό</b>        | <b><math>0.2</math></b>                                 |
| <b>Διαβάσης</b>              | <b><math>20 - 5 \times 10^7</math></b>                  |
| <b>Ασβεστόλιθος</b>          | <b><math>50 - 1 \times 10^7</math></b>                  |
| <b>Ψαμμίτης</b>              | <b><math>1 - 6.4 \times 10^8</math></b>                 |
| <b>Αργιλικός Σχιστόλιθος</b> | <b><math>20 - 2 \times 10^3</math></b>                  |
| <b>Γάββρος</b>               | <b><math>1 \times 10^3 - 1 \times 10^6</math></b>       |
| <b>Βασάλτης</b>              | <b><math>10 - 1.3 \times 10^7</math></b>                |
| <b>Δολομίτης</b>             | <b><math>3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3</math></b>     |



Όπως και με την μαγνητική επιδεκτικότητα, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών ειδικής αντίστασης, όχι μόνο μεταξύ πετρωμάτων και ορυκτών αλλά και μεταξύ πετρωμάτων του ίδιου τύπου. Το εύρος αυτό εξαρτάται πρωταρχικά από το περιεχόμενο ρευστό. Συνεπώς, ένας συνήθης στόχος για μία ηλεκτρική διασκόπηση είναι η αναγνώριση των ζωνών κορεσμού σε ρευστά. Για παράδειγμα, οι μέθοδοι της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιούνται συχνά στις μηχανικές και περιβαλλοντικές μελέτες για τον προσδιορισμό του υδροφόρου ορίζοντα.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα. Το ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό το οποίο βρίσκεται στους πόρους και τις ρωγμές των γεωλογικών σχηματισμών. Η αντίσταση του εδάφους εξαρτάται και από πολλές παραμέτρους όπως είναι η ορυκτολογική σύσταση, το πορώδες, η θερμοκρασία καθώς και η γεωλογική ηλικία του πετρώματος.

Τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα έχουν υψηλές τιμές αντίστασης. Η αντίσταση αυτών των πετρωμάτων εξαρτάται από το βαθμό ρωγμάτωσής τους και από το ποσοστό του νερού που περιέχουν στους πόρους τους. Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι συνήθως περισσότερο πορώδη και περιέχουν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν χαμηλότερες αντιστάσεις. Η αντίσταση του νερού ποικίλει από 0,1 έως  $10^3 \text{ Ohm}$ , πράγμα που εξαρτάται από την περιεκτικότητά του σε διαλυμένα άλατα. Η εξίσωση η οποία περιγράφει τη σχέση μεταξύ της ειδικής αντίστασης,  $\rho$  ενός πετρώματος και του πορώδους,  $\phi$  αυτού, είναι

$$\rho = \alpha \cdot \rho_v \cdot \phi^{-m} \quad (1)$$

όπου,  $\rho_v$  είναι η ειδική αντίσταση του νερού που περιέχεται στους πόρους του πετρώματος,  $\phi$  είναι ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον ολικό όγκο του πετρώματος (πορώδες) και  $\alpha$  και  $m$  σταθερές (Keller and Frischknecht 1966). Για τα περισσότερα πετρώματα τα  $\alpha$  και  $m$  είναι περίπου 1 και 2 αντίστοιχα. Η σχέση

(1) είναι γνωστή ως νόμος του Archie και δείχνει ότι η ειδική αντίσταση αυξάνει όταν ελαττώνεται το πορώδες του πετρώματος.

Λόγω του ότι οι τιμές της ειδικής αντίστασης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες που μεταβάλλονται εύκολα, οι διακυμάνσεις των τιμών της έχουν μεγάλο εύρος ακόμη και για τους ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς. Είναι επίσης πιθανό δύο διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί να έχουν παρόμοιες τιμές ειδικής αντίστασης. Επομένως ασφαλής είναι μόνο η σχετική σύγκριση των ειδικών αντιστάσεων στην ίδια περιοχή. Για τους παραπάνω λόγους, είναι απαραίτητο, η ερμηνεία των μετρήσεων να γίνεται με προσοχή και για τη λήψη ασφαλών συμπερασμάτων για τη λιθολογία, θα πρέπει να συνυπολογίζονται όλες οι υπάρχουσες πληροφορίες για την κάθε περιοχή (γεωλογικοί χάρτες, γεωτρήσεις κ.α.).

## 1.6 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος και το Δυναμικό στην Επιφάνεια της Γης

Ο νόμος του Ohm είναι ο βασικός νόμος που χρησιμοποιείται για τη ροή του ρεύματος στο έδαφος. Αυτός εκφράζεται από τη σχέση

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2)$$

όπου,  $J$  είναι η πυκνότητα του ρεύματος,  $\sigma$  η αγωγιμότητα και  $E$  η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνήθως χρησιμοποιείται η ποσότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία είναι ισοδύναμη με το αντίστροφο της αγωγιμότητας. Η σχέση που συνδέει το δυναμικό με την ένταση του πεδίου είναι

$$\mathbf{E} = - \nabla V \quad (3)$$

Από τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι

$$\mathbf{J} = -\sigma \nabla V \quad (4)$$

Αν το έδαφος είναι ομογενές το ηλεκτρικό ρεύμα θα ρέει ομοιόμορφα μέσα σε αυτό ενώ θα διαδίδεται ακτινικά από το ηλεκτρόδιο. Αυτό θα

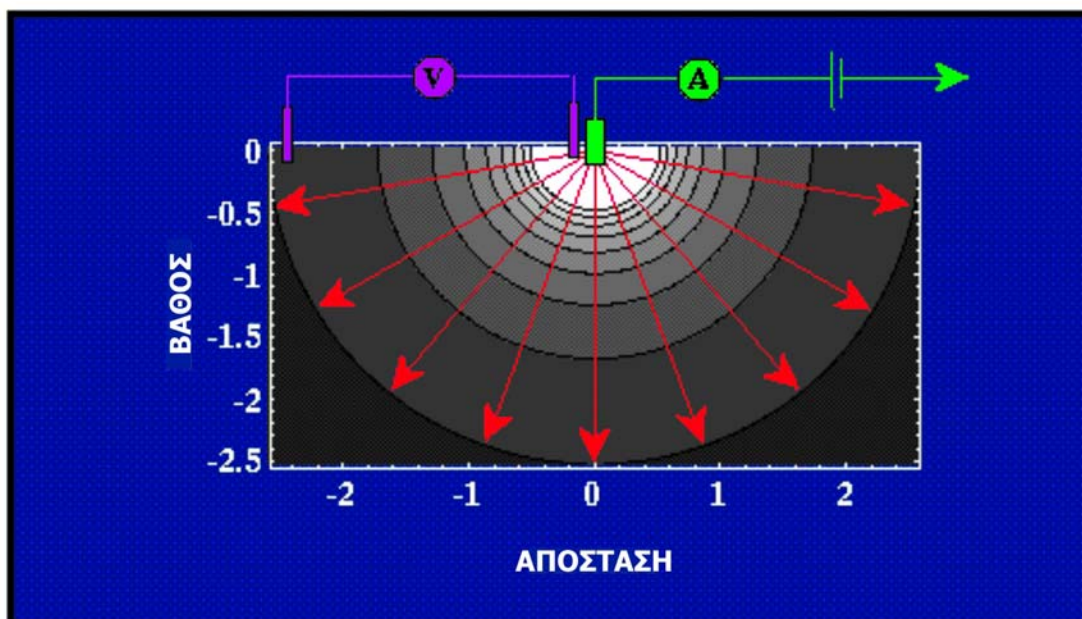
δημιουργήσει ένα απλό μοντέλο για το δυναμικό που μετριέται στη επιφάνεια του εδάφους.

Στο *σχήμα 1.1* φαίνεται πως το δυναμικό αυτό ελαττώνεται με την αύξηση της απόστασης από το ηλεκτρόδιο παρατηρώντας τις ισοδυναμικές γραμμές διαβαθμίσεις του γκρι.

Η εξίσωση που δείχνει πως το δυναμικό αλλάζει με την αύξηση της απόστασης ( $r$ ) δίνετε από τη σχέση

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (5)$$

Από την σχέση φαίνεται ότι το δυναμικό μπορεί να γίνει άπειρο στο ηλεκτρόδιο, δηλαδή όταν  $r=0$ . Επειδή η διάμετρος του ηλεκτρόδιου δεν μπορεί να είναι ένα σημείο, το δυναμικό είναι υψηλό στο ηλεκτρόδιο αλλά όχι άπειρο (το μήκος του ηλεκτρόδιου που εισχωρεί στο έδαφος εντείνει το φαινόμενο μέγεθος).



*Σχήμα 1.1 Το δυναμικό γύρω από ένα ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο έδαφος. Ενώ είναι υψηλό κοντά στο ηλεκτρόδιο, μειώνεται καθώς αυξάνει η απόσταση από το ηλεκτρόδιο όπως φαίνεται και από τις ισοδυναμικές γραμμές, διαβαθμίσεις του γκρι, ενώ οι κόκκινες γραμμές δείχνουν πως το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει ομοιόμορφα μέσα σε ομογενές έδαφος και διαδίδεται ακτινικά από το ηλεκτρόδιο.*

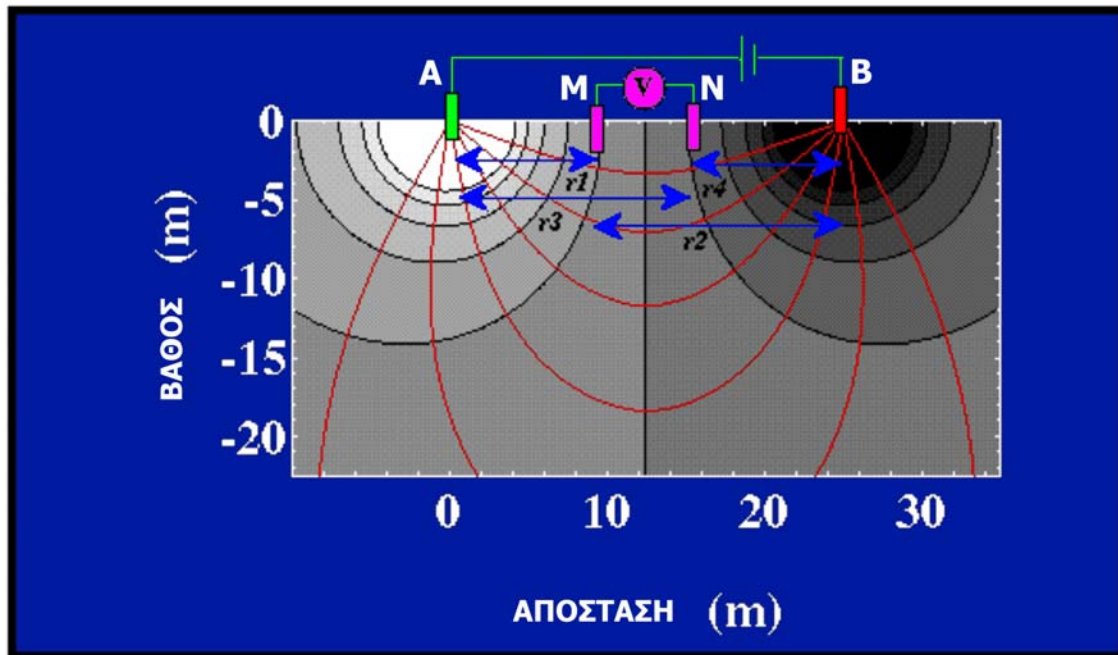
## 1.7 Αντίσταση και Φαινόμενη Ηλεκτρική Αντίσταση

Τα τέσσερα ηλεκτρόδια που έχουν τα όργανα μετρούν την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους στην περιοχή που καλύπτουν. Η αντίσταση έχει μονάδες μετρήσεις Ohm και συμβολίζεται με το ελληνικό γράμμα «Ω».

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι διαφορετική από την αντίσταση και οι μονάδες της στη Γεωφυσική είναι τα Ohmmeter. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης περιγράφουν και καθορίζουν διαφορετικούς τύπους εδάφους. Για παράδειγμα ένα αμμώδες έδαφος μπορεί να έχει ειδική ηλεκτρική αντίσταση 1000 Ohmm ενώ ένα αργιλώδες έδαφος μπορεί να έχει ειδική ηλεκτρική αντίσταση 20 Ohmm. Η ταξινόμηση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για διαφορετικά εδάφη υπάρχουν σε διάφορους καταλόγους όπως αυτός του McNeill (1980).

Αν η μέτρηση δείχνει 50 Ohm αντίσταση αυτό δεν υποδηλώνει τίποτα για τον τύπο του εδάφους. Η μέτρηση της αντίστασης επηρεάζεται από την πραγματική ειδική ηλεκτρική αντίσταση και από τις θέσεις των τεσσάρων ηλεκτροδίων. Γνωρίζοντας την θέση των ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να υπολογίσουμε μια τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτή ονομάζεται πιο σωστά φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση γιατί είναι ένας μέσος όρος των πολλών αντιστάσεων των φακών και στρωμάτων του εδάφους που υπάρχουν κοντά στα ηλεκτρόδια.

Στην πράξη χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια για να γίνει μέτρηση της φαινόμενη ειδικής αντίστασης ενός μη ομογενούς εδάφους. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν στην εισαγωγή και κυκλοφορία του ρεύματος και τα ονομάζουμε A και B, ενώ με τη βοήθεια των δύο άλλων μετράμε τη διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία και τα ονομάζουμε M και N. Έστω  $r_1$  η απόσταση του M από το θετικό ηλεκτρόδιο A,  $r_2$  από το αρνητικό B και  $r_3$  και  $r_4$  οι αντίστοιχες αποστάσεις του N από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 Αποστάσεις μεταξύ των τεσσάρων ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε μη ομογενές έδαφος.

Επομένως, η φαινόμενη ειδική αντίσταση του ημιχώρου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{i} \left[ \frac{1}{\left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)} \right]$$

(6)

Ο παράγοντας μέσα στην αγκύλη της σχέσης (6), λέγεται γεωμετρικός παράγοντας  $k$  και εξαρτάται από την διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων. Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση δεν είναι η πραγματική αντίσταση κανενός στρώματος του υπεδάφους, αλλά μια φαινόμενη τιμή η οποία είναι η αντίσταση που θα είχε το έδαφος εάν ήταν γεωηλεκτρικά ομογενές. Η τιμή αυτή ταυτίζεται με την πραγματική αντίσταση όταν πρόκειται για ομογενή γη. Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου εδάφους και για οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων, όταν ο γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιάζεται με την μετρούμενη αντίσταση, το αποτέλεσμα είναι η πραγματική αντίσταση του εδάφους.

Στην πράξη η φαινόμενη αντίσταση  $\rho_a$  αποτελεί ένα είδος μέσου όρου των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια "παραμορφωμένη" εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Για αυτόν τον λόγο η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ο καθορισμός της πραγματικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η λύση του αντίστροφου προβλήματος.

### 1.8 Διατάξεις Ηλεκτροδίων

Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια του ρεύματος και του δυναμικού κατά την χρήση της μεθόδου της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Σε αυτό το σημείο θα περιγραφούν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατάξεις.

**Διάταξη Wenner.** Σε αυτή τη διάταξη τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, τοποθετούνται ανάμεσα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος A, B. Οι αποστάσεις των τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ίσες  $a$  (σχήμα 1.3I), επομένως από τη σχέση (6) προκύπτει ότι

$$\rho_a = 2\pi \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (7).$$

**Διάταξη Schlumberger.** Τα M και N ηλεκτρόδια βρίσκονται πάλι ανάμεσα στα A, B με τη διαφορά ότι τοποθετούνται συμμετρικά ως προς ένα κέντρο O (σχήμα 1.3 II). Η απόσταση μεταξύ των A, B είναι  $L$  και η απόσταση μεταξύ των M, N είναι  $l$ . Ισχύει ότι  $L \gg l$ . Σε αυτή την περίπτωση η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{L^2}{l} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (8).$$

**Διάταξη Διπόλου-Διπόλου.** Στη διάταξη αυτή, το δίπολο του ρεύματος

(ηλεκτρόδια A, B) βρίσκεται σε απόσταση  $na$  από το δίπολο του δυναμικού (ηλεκτρόδια M, N), ενώ η απόσταση των A, B και M, N είναι ίση με  $a$ , όπως φαίνεται στο *σχήμα 1.3III*. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_a = -\pi \cdot n \cdot a \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (9).$$

**Διάταξη Πόλου-Διπόλου.** Τα ηλεκτρόδια του δυναμικού M και N, βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του ρεύματος, A, B, ένα από τα οποία τοποθετείται στο άπειρο (*σχήμα 1.3IV*). Εάν  $b$  είναι η απόσταση του ηλεκτροδίου M από το A, η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot \frac{a \cdot b}{b-a} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (10).$$

Εάν η απόσταση  $b$  είναι πολλαπλάσια της απόστασης  $a$  ( $b = na$ ), τότε η σχέση (10) γίνεται:

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot (n+1) \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (11).$$

**Διάταξη Πόλου-Πόλου.** Η απλούστερη διάταξη είναι αυτή όπου ένα από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος, B, και ένα από τα ηλεκτρόδια του δυναμικού, N, είναι τοποθετημένα σε πολύ μεγάλη απόσταση από τα άλλα δύο (A, M), έτσι ώστε να μπορέσει να θεωρηθεί ότι βρίσκονται στο άπειρο (*σχήμα 1.3V*). Επομένως από τη σχέση (6), η φαινόμενη ειδική αντίσταση θα είναι

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (12)$$

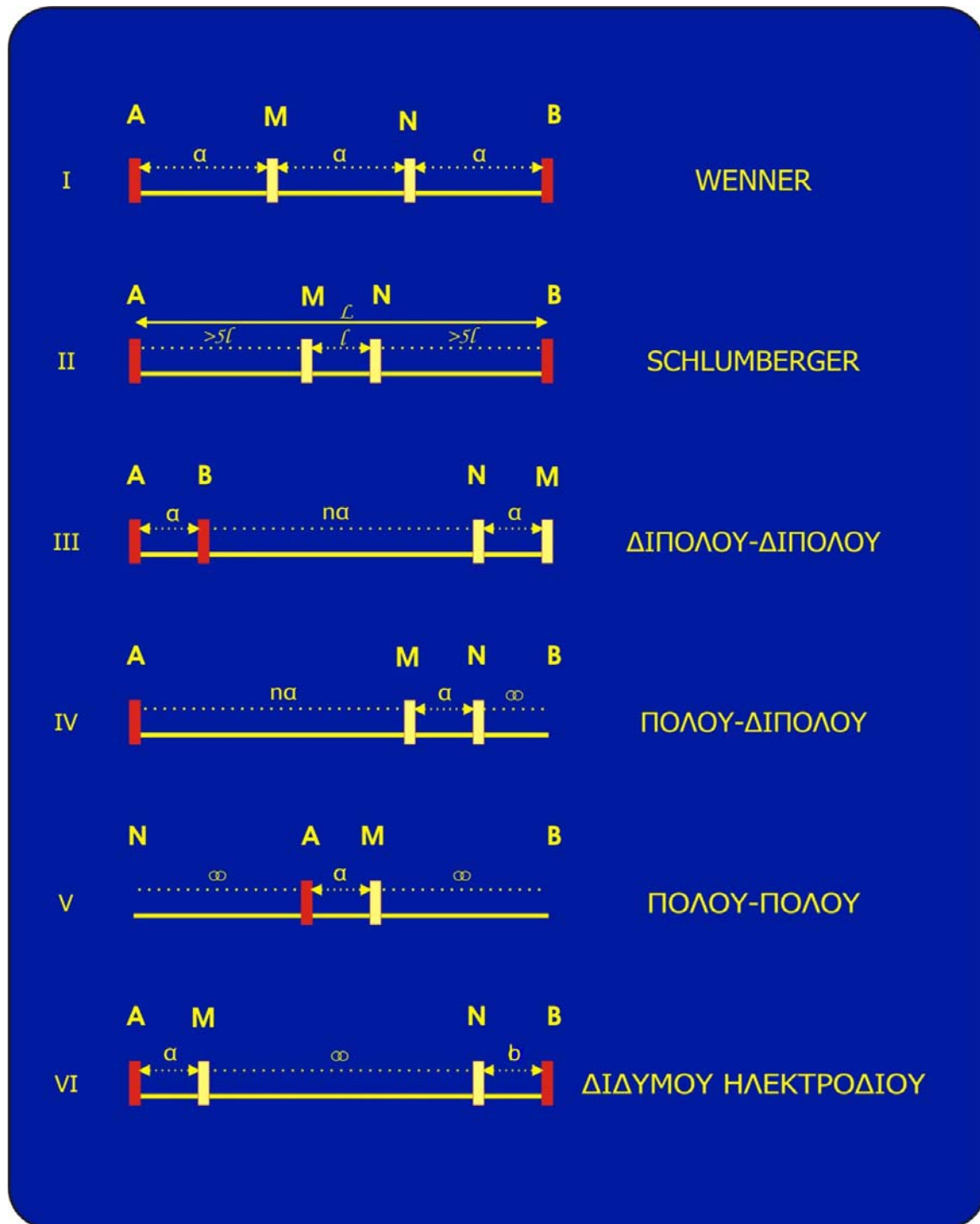
Όπου  $a$  η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων A και M. Εάν τα δύο απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τα τοποθετήσουμε κοντά μεταξύ τους, τότε προκύπτει η **διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου (*twin probe*)** (*σχήμα 1.3VI*), και η φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι

$$\rho_a = 2 \cdot \pi \cdot \frac{a \cdot b}{a+b} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (13)$$



όπου,  $a$  και  $b$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ των A, M και B, N ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου  $AM = BN = a$ , η σχέση (13) γίνεται

$$\rho_a = \pi \cdot a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (14).$$



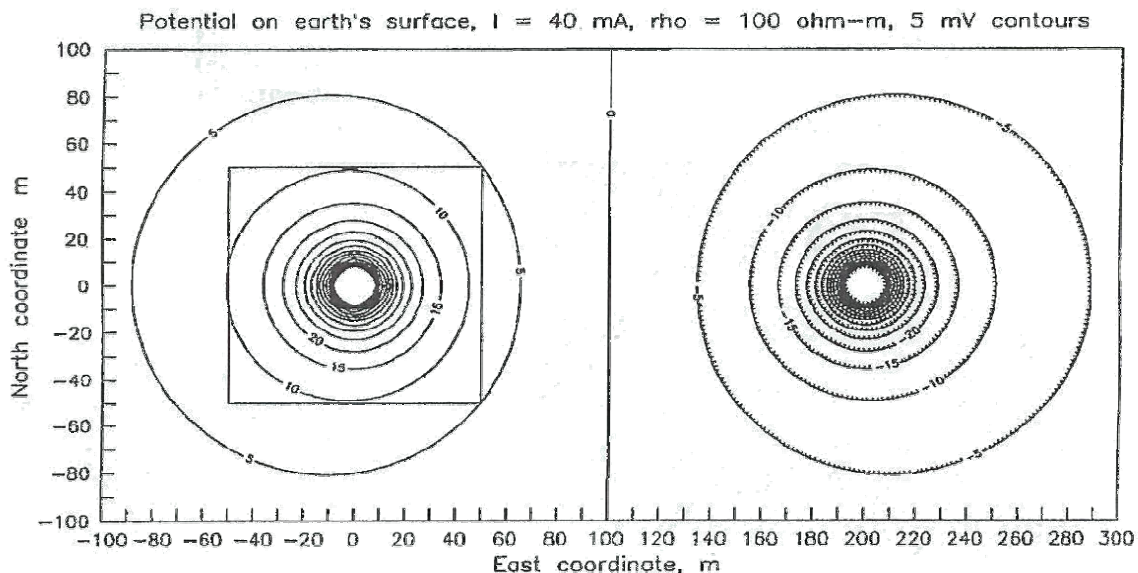
Σχήμα 1.3 Διατάξεις Ηλεκτροδίων



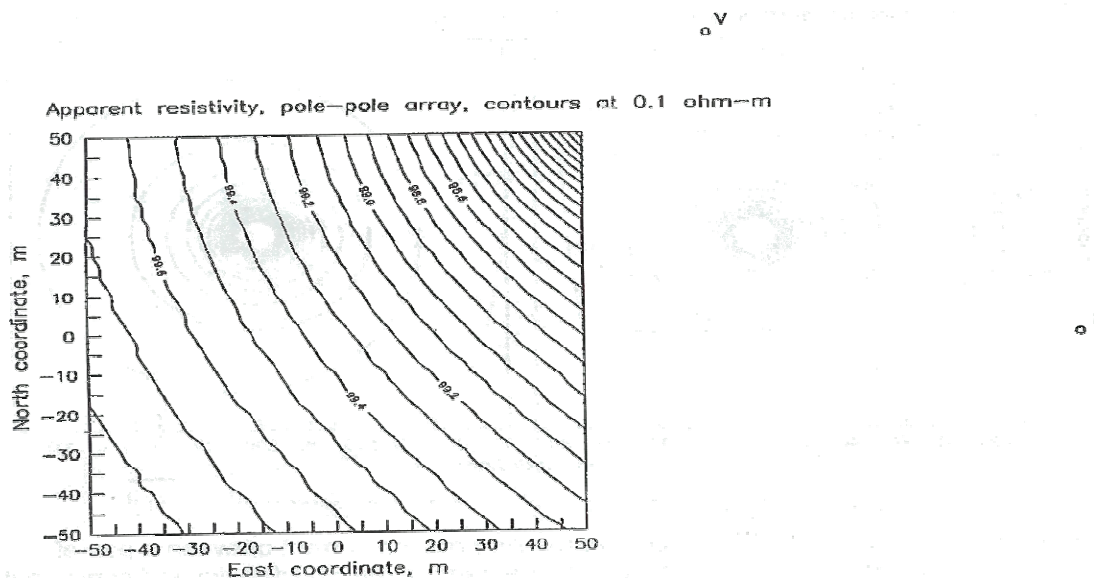
## 1.9 Διάταξη Πόλου-Πόλου και Διδύμου Ηλεκτροδίου

Το σχήμα 1.4 είναι σημαντικό για να καταλάβουμε την διάταξη πόλου-πόλου. Τα δυο ηλεκτρόδια είναι αρκετά απομακρυσμένα μεταξύ τους. Στην πράξη αυτό απαιτεί μεγάλο μήκος καλωδίου απλωμένο στο πεδίο. Στόχος είναι να τοποθετηθεί το ηλεκτρόδιο αναφοράς τόσο μακριά ώστε οι ισοδυναμικές γραμμές του δυναμικού που φαίνονται στο αριστερό τμήμα του σχήματος 1.4 να είναι κυκλικές και ομόκεντρες με κέντρο το ηλεκτρόδιο στο σημείο (E0,N0). Όσο το ηλεκτρόδιο αναφοράς πλησιάζει, οι ισοδυναμικές γραμμές θα γίνονται πιο ελλειπτικές.

Το γράφημα στο σχήμα 1.4 προτείνει την τοποθέτηση του ηλεκτροδίου αναφοράς σε απόσταση 200 m από το κινούμενο όταν πρόκειται να γίνει η ερευνά σε ένα τετράγωνο με πλευρά 100 m (Bevan 2000). Οι μετρήσεις θα είναι επίσης πολύ καλές εάν αυτό το ηλεκτρόδιο βρεθεί σε απόσταση 150 m από την μέση της περιοχής έρευνας.



Σχήμα 1.4 Το δυναμικό στην επιφάνεια που είναι αποτέλεσμα από το ρεύμα ανάμεσα από ένα ζεύγος ηλεκτροδίων που βρίσκονται στο έδαφος. Το ρεύμα εισέρχεται στο έδαφος από το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο (E0 N0) εξέρχεται από το έδαφος από το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στο E200 N0. Να σημειωθεί ότι το δυναμικό είναι μηδέν κατά μήκος της γραμμής E100 στη μέση απόσταση μεταξύ των δυο ηλεκτροδίων (Bevan 2000).



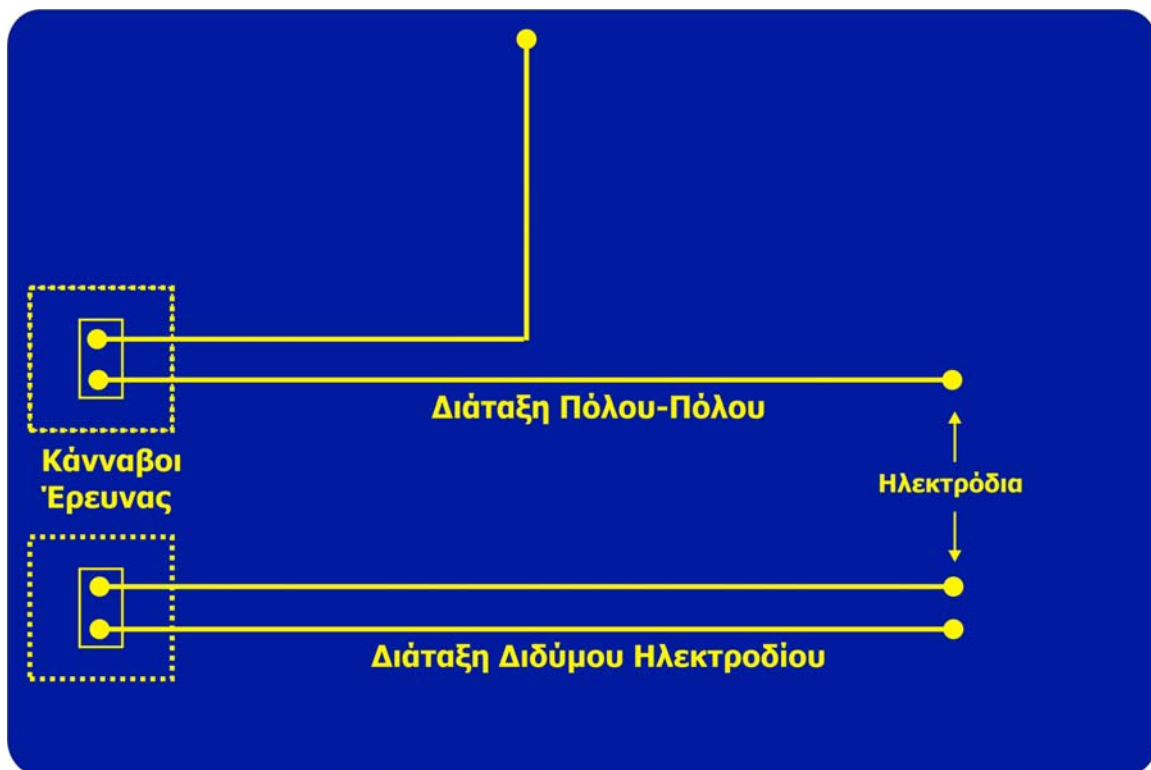
Σχήμα 1.5 Το σφάλμα στην αντίσταση που μετριέται με την διάταξη πόλου-πόλου. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους είναι 100 Ωm αλλά οι ισομετρικές καμπύλες δείχνουν ότι οι μετρούμενες τιμές θα είναι μικρότερες από την σωστή τιμή κοντά στο ηλεκτρόδιο αναφοράς. Οι θέσεις των ηλεκτροδίων αναφοράς του ρεύματος ( $I$ ) και του δυναμικού ( $V$ ) φαίνονται στο σχήμα με μικρούς ανοιχτούς κύκλους (Bevan 2000).

Στο *σχήμα 1.5* φαίνετε ένας χάρτης με φαινόμενες αντιστάσεις που υπολογίσθηκε με το ηλεκτρόδιο αναφοράς του ρεύματος στο σημείο E150 m. Η ακριβής αντίσταση της γης ήταν περίπου στα 100 Ohmm ενώ με την διάταξη πόλου-πόλου θα μετρούσαμε ελαφρώς μικρότερες τιμές φαινόμενης αντίστασης. Η μικρότερη τιμή θα είναι 97.2 ohmm, στη γωνία πιο κοντά και στα δύο ηλεκτρόδια αναφοράς. Όμως σφάλμα της τάξης 3% είναι αποδεκτό σε έρευνα αντιστάσεων.

Από τα παραπάνω είναι κατανοητό ότι η κατάλληλη απόσταση για τα ηλεκτρόδια αναφοράς είναι να απέχουν από την πλευρά του καννάβου έρευνας όσο μήκος έχει η πλευρά του, για ένα κάνναβο 20m×20m το ηλεκτρόδιο αναφοράς του ρεύματος μπορεί να τοποθετηθεί 20 m έξω από τον κάνναβο.

Το ηλεκτρόδιο αναφοράς του δυναμικού καλό θα ήταν να τοποθετηθεί αρκετά μακριά από το αντίστοιχο του ρεύματος και όσο πιο μακριά γίνετε από την περιοχή έρευνας. Θα πρέπει να είναι σε μια περιοχή όπου το δυναμικό θα έχει την τιμή 0 και θα παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια έρευνας του καννάβου.

Όπως φαίνεται από το *σχήμα 1.4* το πλησιέστερο σημείο όπου το δυναμικό είναι 0 βρίσκεται περίπου στη μέση απόσταση του κινούμενου και το ηλεκτρόδιου αναφοράς του ρεύματος. Όμως επειδή η θέση της μέτρησης αλλάζει κατά την διάρκεια της έρευνας είναι καλό να τοποθετήσουμε το ηλεκτρόδιο αναφοράς του δυναμικού κατά μήκος αυτής της ευθείας είτε προς βορρά είτε προς νότο. Αυτό θα διατηρήσει το δυναμικό σε αυτό το σημείο κοντά στο μηδέν καθ' όλη την διάρκεια της ερευνάς (*σχήμα 1.6*).



*Σχήμα 1.6* Δυο διαφορετικές διατάξεις για την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους. Ο ίδιος εξοπλισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις δυο, καθεμία έχει τέσσερα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται στο έδαφος, δύο από αυτά μετακινούνται στην περιοχή έρευνας και δυο παραμένουν σε κάποιες θέσεις, ηλεκτρόδια αναφοράς. Στη διάταξη του Διδύμου Ηλεκτροδίου, τα ηλεκτρόδια αναφοράς είναι κοντά το ένα στο άλλο, ενώ στη διάταξη πόλου-πόλου τα δυο ηλεκτρόδια αναφοράς είναι απομακρυσμένα ( τροποποιημένο σχήμα Bevan 2000).

Όταν η έρευνα συνεχίζεται για μέρες τα δυο ηλεκτρόδια αναφοράς μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικές θέσεις έτσι ώστε οι μετρήσεις της αντίστασης να είναι ίδιες. Καλό θα ήταν πριν ξεκινήσει η έρευνα να μετρήσουμε

την αντίσταση των ηλεκτροδίων αναφοράς με ένα πολύμετρο, αν αυτή είναι αρκετά μεγάλη μπορεί να σημαίνει ότι το καλώδιο είναι κομμένο ή ότι το ένα ηλεκτρόδιο δεν έχει τοποθετηθεί σωστά, αν πάλι είναι πολύ μικρή μπορεί η μόνωση του ηλεκτροδίου αναφοράς να είναι κακή.

Οι μετρήσεις της αντίστασης που γίνονται με την διάταξη πόλου-πόλου μπορούν να μετατραπούν σε μετρήσεις φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης πολλαπλασιάζοντας τις αρχικές με το άνοιγμα  $\alpha$  των κινούμενων ηλεκτροδίων και μετά με 2π σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση,

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot \alpha R .$$

Το όνομα πόλου-πόλου είναι το πιο σύνηθες για τέτοια διάταξη. Η λέξη πόλος προέρχεται από την φυσική και από τις τεχνικές επιστήμες και σημαίνει ότι το ένα συσχετιζόμενο σημείο από το ζεύγος των σημείων είναι αρκετά μακριά, ουσιαστικά στο άπειρο. Αυτό περιγράφει το γεγονός ότι τα ηλεκτρόδια αναφοράς είναι σε μεγάλη απόσταση από τα κινούμενα τα οποία όμως είναι κοντά μεταξύ τους.

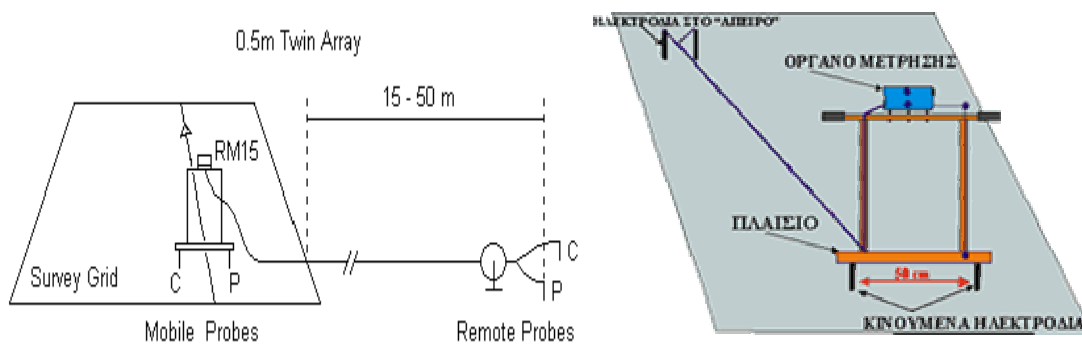
Υπάρχουν πολλά είδη διατάξεων, όπως είδαμε προηγουμένως (σχήμα 1.3), που εφαρμόζονται στις ηλεκτρικές διασκοπήσεις. Μια από αυτές είναι και η διπόλου-διπόλου η οποία είναι ακριβώς το αντίθετο της πόλου-πόλου δηλαδή τα δυο ηλεκτρόδια δυναμικού είναι κοντά όπως επίσης και τα ηλεκτρόδια του ρεύματος αλλά τα δυο αυτά ζεύγη βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση γεγονός που βοηθάει την διασκόπηση σε μεγάλα βάθη.

Η διάταξη που θα περιγραφεί παρακάτω μπορεί να θεωρηθεί υποπερίπτωση της διάταξης πόλου-πόλου αφού έχει και αυτή ηλεκτρόδια αναφοράς τα οποία όμως είναι κοντά μεταξύ τους. Αυτή είναι και η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για τις ηλεκτρικές διασκοπήσεις.

Ειδικότερα στην αρχαιομετρία χρησιμοποιείται η διάταξη του Διδύμου Ηλεκτροδίου (Twin Probe Array) λόγω της εύκολης ερμηνείας των δεδομένων, της ταχύτητας κάλυψης του χώρου και της σχετικά καλής χωρικής διακριτικότητας της μεθόδου. Η μέθοδος της διπλής διάταξης χρησιμοποιεί δύο

ακίνητα απομακρυσμένα ηλεκτρόδια (ένα για το ρεύμα και ένα για το δυναμικό), που βρίσκονται σε απόσταση ίση με το 30% της απόστασης των κινητών ηλεκτροδίων, από την εκάστοτε περιοχή έρευνας (π.χ. σε απόσταση 15 μέτρων για απόσταση κινητών ηλεκτροδίων ίση με 0.5 μέτρο). Τα κινητά ηλεκτρόδια (ένα για το ρεύμα και ένα για το δυναμικό) κινούνται ταυτόχρονα και με σταθερό βήμα δειγματοληψίας εντός της υπό εξέτασης περιοχής. Η χωρική διακριτική ικανότητα της διάταξης είναι της τάξης του 1.0α, ενώ το βάθος ανίχνευσης δύναται να φθάσει το 1.0-2.0 α, όπου α είναι το άνοιγμα των κινητών ηλεκτροδίων. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των 1 - 0.1 Ω.

Η διάταξη αυτή χρησιμοποιείτε για μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης με όργανα κυρίως της εταιρίας Geoscan Research. Μια σχηματική άποψη της διάταξης φαίνεται στο *σχήμα 1.7*.



Σχήμα 1.7 Διάταξη του διδυμού ηλεκτροδίου (Geoscan Research, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών).

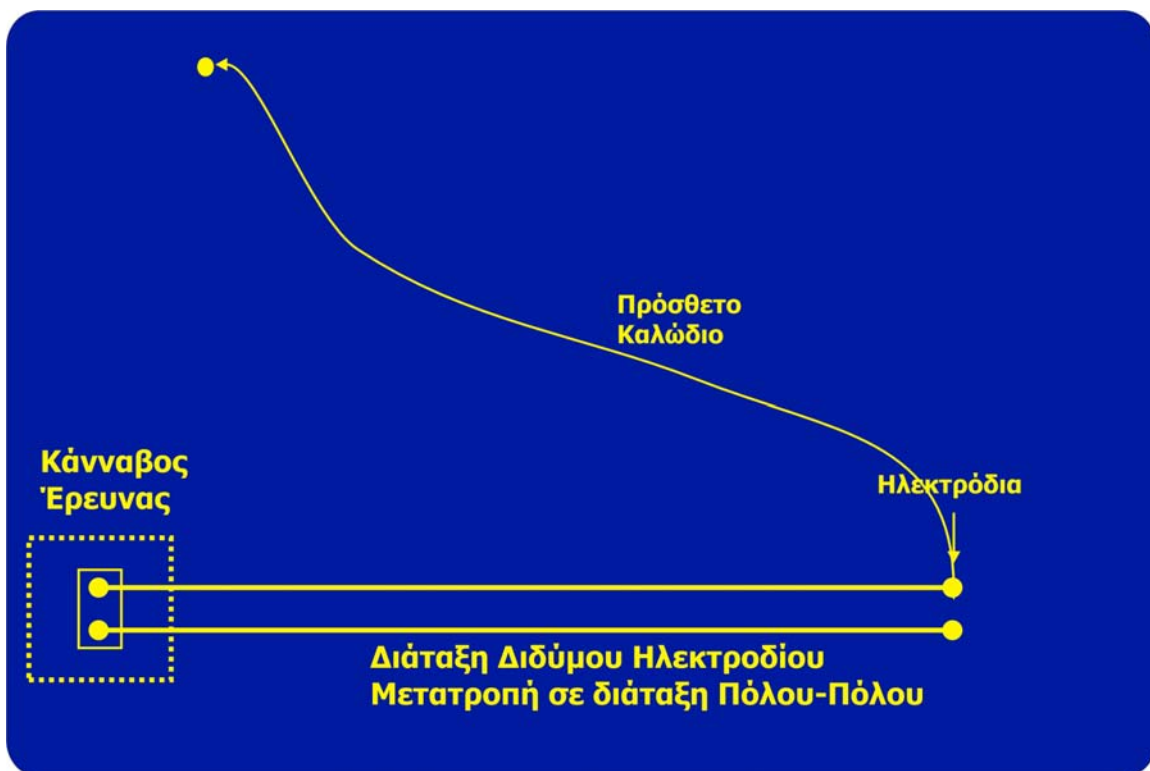
Η πολύ μικρή απόσταση των ηλεκτροδίων αναφοράς δεν προκαλεί καμία δυσκολία στη χαρτογράφηση της αντίστασης αλλά κάνει πολύπλοκο τον καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους. Αυτό γιατί η αντίσταση που μετράται καθορίζεται από την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους κάτω από τα κινούμενα αλλά και τα ηλεκτρόδια αναφοράς.

Πρέπει πάντα να έχουμε υπόψη μας ότι το έδαφος κάτω από τα ηλεκτρόδια αναφοράς είναι διαφορετικό από αυτό της περιοχής έρευνας στον

κανναβο που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Αν οι ειδικές ηλεκτρικές αντιστάσεις υποθέσουμε ότι είναι ίδιες, τότε δεν θα υπήρχε λόγος να χαρτογραφήσουμε τις αλλαγές της.

Όταν η έρευνα με την διάταξη του διδύμου ηλεκτροδίου τελειώσει τα ηλεκτρόδια αφαιρούνται. Αν οι μετρήσεις πραγματοποιηθούν σε μετέπειτα χρόνο είναι απίθανο αυτά τα ηλεκτρόδια να τοποθετηθούν στις ίδιες θέσεις με πριν και έτσι οι μετρήσεις μας δεν θα είναι οι ίδιες. Επειδή συνήθως οι μετρήσεις σε διαφορετικούς καννάβους διαρκούν μέρες ερχόμαστε συχνά αντιμέτωποι με αυτό το πρόβλημα.

Η διάταξη του διδύμου ηλεκτροδίου μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε διάταξη πόλου-πόλου όπως φαίνεται στο *σχήμα 1.8*



Σχήμα 1.8 Μια απλή μετατροπή της διάταξης διδύμου ηλεκτροδίου σε διάταξη πόλου-πόλου με την προσθήκη ενός καλωδίου.

Το ηλεκτρικό καλώδιο που προστίθεται πρέπει να είναι μονωμένο. Το καλώδιο συνδέεται με ένα από τα καλώδια που εξέρχονται από το όργανο. Έτσι το ηλεκτρόδιο αναφοράς μπορεί να τοποθετηθεί πιο μακριά.

Η διάταξη του διδύμου ηλεκτροδίου όπως αναφέρθηκε και παραπάνω εφαρμόζεται κυρίως σε αρχαιολογικές έρευνες και για αυτό δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία στη γεωφυσική βιβλιογραφία (Sheriff 1991). Τη διάταξη πόλου-πόλου μπορεί να την βρει κανείς και με το όνομα μισή Wenner.

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι με την διάταξη πόλου-πόλου έχουμε εύκολο καθορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους και αυτό μας διευκολύνει γιατί μπορούμε να κάνουμε σύγκριση των μετρήσεων και από άλλα σημεία. Επίσης μας επιτρέπει να εντοπίσουμε την προσωρινή αλλαγή των μετρήσεων εξαιτίας των καιρικών συνθηκών. Οι εποχιακές αλλαγές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πρέπει πάντα να εξετάζονται για επιπλέον πληροφορίες που μπορεί να βοηθήσουν στην αρχαιολογική έρευνα

Αντίθετα με την διάταξη διδύμου ηλεκτροδίου δεν είναι δυνατό να κάνουμε συγκρίσεις από διάφορα μέρη και διαφορετικές εποχές. Αυτό γίνεται γιατί η άγνωστη τιμή της ειδική ηλεκτρική αντίσταση στα ηλεκτρόδια αναφοράς προσθέτει ένα άγνωστο ποσό σε κάθε μέτρηση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα τα οποία στηρίζονται στη θεωρία του ευθέως προβλήματος η επίλυση του οποίου ακολουθεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μελέτη γίνεται για τη διάταξη πόλου-πόλου της οποίας υποπερίπτωση θεωρείται η διάταξη του διδύμου ηλεκτροδίου τόσο στον τρόπο διεκπεραίωσης των μετρήσεων αλλά κυρίως ως προς την ευαισθησία και τις δυνατότητές της γενικότερα.

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη διάταξη είναι γιατί χρησιμοποιείται στην Αρχαιομετρία σε αντικατάσταση της διάταξης του διδύμου ηλεκτροδίου και είναι πολύ εύκολη η προσομοίωσή της σε τρισδιάστατα μοντέλα επίλυσης του ευθέως προβλήματος.

Στις επόμενες σελίδες θα παρουσιαστεί η απόκριση διαφορών μοντέλων χρησιμοποιώντας τη διάταξη πόλου-πόλου. Η απόκριση αυτή νοείται ως η κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην επιφάνεια του εδάφους.

### 2.1 Επίλυση του ευθέως προβλήματος

Η επίλυση του ευθέως προβλήματος είναι η διαδικασία κατά την οποία υπολογίζουμε το δυναμικό της απόκρισης από ένα μοντέλο με γνωστή κατανομή της αντίστασης, το οποίο διαρρέετε από συγκεκριμένο ρεύμα.

Η μέθοδος αυτή αναζητεί τη λύση της διαφορικής εξίσωσης που διέπει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος, δηλαδή της εξίσωσης *Poisson*

$$\nabla \cdot (-\sigma \cdot \nabla V) = \nabla \cdot \mathbf{J} \quad (2.1)$$

Όπου  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα,  $\mathbf{V}$  το δυναμικό και  $\mathbf{J}$  η πυκνότητα του ρεύματος. Το δεξιό μέρος της εξίσωσης (2.1) περιγράφει την ηλεκτρική πηγή και μπορεί να αντικατασταθεί από την συνάρτηση  $\delta$  του Dirac και ένα σημειακό ρεύμα  $I$ . Έτσι η εξίσωση γίνεται

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla V) = I \cdot \delta_{(x)} \cdot \delta_{(y)} \cdot \delta_{(z)} \quad (2.2)$$



Η βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την λύση αυτού του προβλήματος είναι αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method - FEM*). Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο χώρος υποδιαιρείται σε στοιχεία, δηλαδή σε υποπεριοχές όπου το άγνωστο δυναμικό προσεγγίζεται με κατάλληλες συναρτήσεις παρεμβολής οι οποίες αποδίδονται σε συγκεκριμένα σημεία των υποπεριοχών τα οποία ονομάζονται κόμβοι του κάθε στοιχείου.

Υπό την μελέτη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όπου το έδαφος σε κάθε τέτοιο στοιχείο θεωρείται ομογενές και ισότροπο, η παραπάνω εξίσωση (2.2) για κάθε ξεχωριστό στοιχείο μετατρέπεται σε

$$-\sigma \cdot \nabla^2 \cdot = f_{(x,y,z)} \quad (2.3)$$

όπου  $f_{(x,y,z)}$  είναι  $I \cdot \delta_{(x)} \cdot \delta_{(y)} \cdot \delta_{(z)}$  ή μηδέν ανάλογα εάν το ρεύμα εισέρχεται ή όχι από το στοιχείο (*Tsourlos and Ogilvy 1998*).

## 2.2 Το βάθος της έρευνας.

Ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της διάταξης είναι το βάθος διείσδυσης αυτής δηλαδή περίπου το μέγιστο βάθος ενός σώματος που θα εντοπισθεί από την διάταξη. Οι γεωφυσικοί σε έρευνες πεδίου χρησιμοποιούν το εμπειρικό βάθος μια διάταξης. Ο υπολογισμός ενός τέτοιου βάθους βασίζεται κυρίως στην πρακτική εμπειρία που αποκτήθηκε συγκρίνοντας τις μετρούμενες τιμές με τα αποτελέσματα των γεωτρήσεων ή των ανασκαφών. Είναι δύσκολο να δοθεί το βάθος της έρευνας για δυο λόγους:

- Το μετρούμενο σήμα, στην ηλεκτρική χαρτογράφηση, οφείλεται στην επίδραση αντιστάσεων από διάφορα βάθη και έτσι δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο βάθος που να αποδίδεται σε αυτό το μετρούμενο σήμα.
- Ενώ οι θεωρητικές τιμές για το βάθος μιας έρευνας υπολογίζονται για ομογενή γη, το πραγματικό βάθος εξαρτάται από τα άγνωστα χαρακτηριστικά που υπάρχουν στο υπέδαφος (ανομοιογένειες).

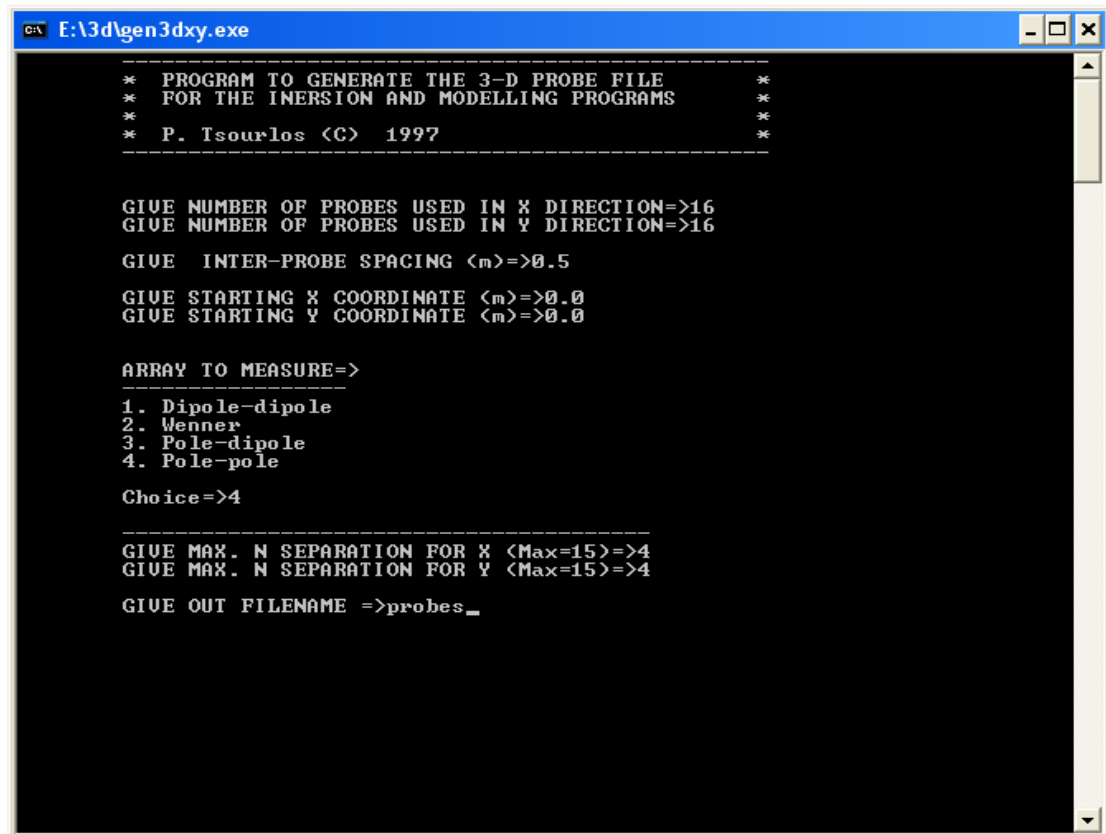
Συνήθως οι διατάξεις που έχουν απομακρυσμένα ηλεκτρόδια όπως του διδύμου ηλεκτροδίου, πόλου-διπόλου, έχουν και το μεγαλύτερο βάθος έρευνας. Αυτό το πλεονέκτημα όμως δεν σημαίνει ότι είναι ανώτερες από τις

άλλες διατάξεις εφόσον αυτό το χαρακτηριστικό μετριάζεται από την έλλειψη ανάλυσης με το βάθος. Γενικά αυτά τα χαρακτηριστικά τις καθιστούν ιδανικές για έρευνες αναγνώρισης αλλά απαγορευτική την χρήση τους για υψηλής ανάλυσης έρευνες βάθους (*Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data*).

Στη παρούσα εργασία ακολουθήθηκε μια διαδικασία επίλυσης του ευθέως προβλήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να μελετηθεί το βάθος διείσδυσης και η διακριτική ικανότητα της διάταξης του δίδυμου ηλεκτροδίου. Η διαδικασία αυτή θα περιγράψει παρακάτω.

### **2.3 Διαδικασία που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία.**

Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα *gen3dxy* (Tsourlos 1997) το οποίο δημιουργεί ένα αρχείο όπου εμπεριέχονται όλες οι πληροφορίες για τα ηλεκτρόδια και το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα από άλλα προγράμματα αντιστροφής και δημιουργίας μοντέλων. Δηλαδή περιέχει τον αριθμό των ηλεκτροδίων που υπάρχουν τόσο κατά την διεύθυνση  $x$  όσο και κατά την διεύθυνση  $y$ , το άνοιγμα μεταξύ των ηλεκτροδίων και τις συντεταγμένες της αρχής αυτών. Να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα αυτό μπορεί να εφαρμοστεί για τις διατάξεις: διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου και πόλου-πόλου. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η διάταξη του δίδυμου ηλεκτροδίου είναι μια υποπερίπτωση της διάταξης πόλου-πόλου και έτσι σε αυτό το πρόγραμμα επιλέγουμε την διάταξη πόλου-πόλου. Τέλος μια δυνατότητα του προγράμματος είναι να επιλέγει ο χρήστης την μέγιστη απόσταση που μπορούν να έχουν τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος εκφρασμένη με έναν αριθμό  $N$ .



```

E:\3d\gen3dxy.exe

* PROGRAM TO GENERATE THE 3-D PROBE FILE *
* FOR THE INERSION AND MODELLING PROGRAMS *
* P. Tsourlos <C> 1997 *

-----

GIVE NUMBER OF PROBES USED IN X DIRECTION=>16
GIVE NUMBER OF PROBES USED IN Y DIRECTION=>16

GIVE INTER-PROBE SPACING <m>=>0.5

GIVE STARTING X COORDINATE <m>=>0.0
GIVE STARTING Y COORDINATE <m>=>0.0

ARRAY TO MEASURE=>
-----
1. Dipole-dipole
2. Wenner
3. Pole-dipole
4. Pole-pole
Choice=>4

-----
GIVE MAX. N SEPARATION FOR X <Max=15>=>4
GIVE MAX. N SEPARATION FOR Y <Max=15>=>4

GIVE OUT FILENAME =>probes_

```

Σχήμα 2.1 Εικόνα οθόνης που εμφανίζεται κατά τη χρήση του προγράμματος *gen3dxy* (Tsourlos 1997).

Στη συνέχεια διαμορφώνεται το αρχείο που περιέχει της πληροφορίες του μοντέλου (*Mod.in*). Στο αρχείο αυτό αρχικά δηλώνουμε πόσα ηλεκτρόδια υπάρχουν κατά τους άξονες  $x$  και  $y$ , το μέγιστο αριθμό μετρήσεων που μπορούμε να έχουμε, τον τύπο του μοντέλου, δηλαδή αν πρόκειται για μετρήσεις αντίστασης ή και επαγόμενης πόλωσης, την διάταξη που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και τα ονόματα των αρχείων κατά την εισαγωγή και έξοδο των δεδομένων από το πρόγραμμα. Τέλος σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι πληροφορίες για την αντίσταση του χώρου που φιλοξενεί τα σώματα, ο αριθμός αυτών των σωμάτων, καθώς και οι συντεταγμένες στο χώρο που έχει το κάθε σώμα  $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$  και η αντίστασή του (*res*). Όλα αυτά μαζί απαρτίζουν το μοντέλο.

Το αρχείο αυτό αποτελεί την βάση πληροφοριών για τις παραμέτρους που είναι απαραίτητες κατά την αντίστροφη την οποία θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα *3d\_meas* (Tsourlos 1998). Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει την απόκριση της αντίστασης του μοντέλου που ο χρήστης καθόρισε. Το αρχείο

που προκύπτει, περιέχει, εκτός από τις παραμέτρους που έλαβε υπόψη του το πρόγραμμα κατά την αντιστροφή, τις τιμές για την ψευδοτομή της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Επίσης περιέχει και τιμές οι οποίες αποτελούν το αρχείο για την αντιστροφή των δεδομένων της αντίστασης. Από αυτό λοιπόν το αρχείο που προκύπτει μετά την εφαρμογή του προγράμματος *3d\_meas*, επιλέγονται μόνο οι τιμές για την ψευδοτομή οι οποίες είναι διατεταγμένες σε τέσσερις στήλες, των συντεταγμένων x και y, του κέντρου της διασκόπησης z, και της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης *res*.

Να σημειωθεί ότι ο αριθμός των ηλεκτροδίων που δώσαμε στο πρόγραμμα είναι μικρός σε σχέση με όσα χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό έγινε γιατί τα λειτουργικά στοιχεία του υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν ικανά ώστε να εκτελέσουν την διαδικασία του υπολογισμού με περισσότερα ηλεκτρόδια.

Στο παρακάτω σχήμα (2.2) φαίνεται το πρόγραμμα *3d\_meas* κατά την εκτέλεση των υπολογισμών.

```

E:\3d\3d_meas.exe
*****
*                               3D_MEAS b.1.00                               *
*****
*                               3-D FEM PROGRAM TO CALCULATE                 *
* THE RESISTIVITY AND IP RESPONSE OF MODELS*                               *
* Author: P. Tsourlos <C> April 98                                         *
*****

GIVE INVERSION PARAMETER INPUT FILENAME>mod.in
DYNAMIC MEMORY ALLOCATION OK !!
READ INPUT DATA..
CALCULATE ARRAY FACTORS..
GENERATE 3-D MESH..

-----
PROBLEM CONSTANTS:
MEASUREMENTS=> 750 MAX=> 800
HALF-BAND=> 442 MAX=> 472
ELEMENTS=> 15876 MAX=> 18225
NODES=> 18490 MAX=> 21160
EBC=> 3361 MAX=> 3956

-----
PROBES=> 225
PROBE SPACING X=> 0.500
PROBE SPACING Y=> 0.500
INIT. RESIST.=> 10.000 Ohm-m
=====

*          3-D MODELLING BODIES          *
*
Number of bodies: 3
Background Res.= 30.000
***** x1 x2 y1 y2 z1 z2 res
BD1= 2.00,3.50,4.50,5.00,0.25,0.50,100.00
***** x1 x2 y1 y2 z1 z2 res
BD2= 2.00,3.50,3.00,3.50,0.25,0.50,100.00
***** x1 x2 y1 y2 z1 z2 res
BD3= 3.50,4.00,3.00,5.00,0.25,0.50,100.00
***** FEM CALCULATION STARTS *****

NORMALIZING PROCEDURE:
Solving for 225 electrodes:.. 1.. 2.. 3.. 4.. 5.. 6.. 7.. 8.. 9.. 10..
.. 11.. 12.. 13.. 14.. 15.. 16.. 17.. 18.. 19.. 20..
.. 21.. 22.. 23.. 24.. 25.. 26.. 27.. 28.. 29.. 30..
.. 31.. 32.. 33.. 34.. 35.. 36.. 37.. 38.. 39.. 40..
.. 41.. 42.. 43.. 44.. 45..
  
```

Σχήμα 2.2 Εικόνα του προγράμματος *3d\_meas* (Tsourlos 1998).

Στη συνέχεια έχουμε την δυνατότητα αυτό το αρχείο που προέκυψε από τους υπολογισμούς να το τροποποιήσουμε εισάγοντας θόρυβο 3-5% με γκαουσιανή κατανομή με την βοήθεια ενός προγράμματος. Με αυτόν τον τρόπο εισάγουμε θόρυβο στα τεχνητά δεδομένα έτσι ώστε να προσομοιάζουν περισσότερο στα πραγματικά. Τέλος με τη χρήση του προγράμματος *split\_xy*, (Tsourlos 2004) είναι δυνατόν από αρχεία *x,y,z*, τα οποία περιέχουν θόρυβο να πάρουμε κατανομές της φαινόμενης αντίστασης στην επιφάνεια για τα διάφορα βάθη ταφής των σωμάτων (0,25, 0,5 και 0,75m). Τα επίπεδα αυτά *del1*, *del2*, *del3* είναι αποτέλεσμα αύξησης της απόστασης μεταξύ των κινούμενων ηλεκτροδίων με μέγιστο αριθμό επιπέδων ίσο με τον αριθμό *N* που ορίστηκε από τον χρήστη, στις παραμέτρους του προγράμματος *gen3dxy* (Tsourlos 1997). Με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων είναι εφικτό να προσεγγίσουμε μεγαλύτερα βάθη. Στο ίδιο αρχείο υπάρχει ακόμη η τιμή της αντίστασης και ο λογάριθμος αυτής.

Στην συνέχεια θα δοθούν κάποια μοντέλα που έγιναν με σκοπό να ελεγχθεί το βάθος διείσδυσης και η διακριτική ικανότητα της διάταξης του διδύμου ηλεκτροδίου. Η διαδικασία με τη χρήση των προγραμμάτων που ακολουθήθηκε, είναι κοινή για όλα τα μοντέλα. Αλλάζει ανά περίπτωση ο αριθμός των σωμάτων, οι διαστάσεις, οι αντιστάσεις, η θέση των σωμάτων σε σχέση με τα ηλεκτρόδια και το βάθος ταφής τους. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε ήταν αυτή της μετάβασης από το απλούστερο δυνατό μοντέλο σε πιο πολύπλοκα.

## 2.4 Κατηγοριοποίηση των Μοντέλων που Πραγματοποιήθηκαν.

Παρακάτω έγινε μια προσπάθεια να χωρισθούν σε κατηγορίες τα μοντέλα ανάλογα με το χαρακτηριστικό που θέλουμε να εξετάσουμε.

### 2.4.1 Αντίθεση Αντίστασης

Το αρχικό μοντέλο, *mod1*, το οποίο χρησιμοποιήθηκε και το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω *σχήμα 2.4.1*, προσομοιάζει μια δομή που βρίσκεται σε βάθος 0,25m, αποτελείται από τρία σώματα το καθένα εκ των οποίων έχει πλάτος 0,5m μήκος 2m και η αντίσταση του είναι 100 Ohmm. Η σε βάθος έκταση του μοντέλου (πάχος) είναι 0,25m Η αντίσταση του περιβάλλοντος χώρου που φιλοξενεί τα σώματα είναι 30 Ohmm. Στα δεδομένα υπάρχει θόρυβος 3%.

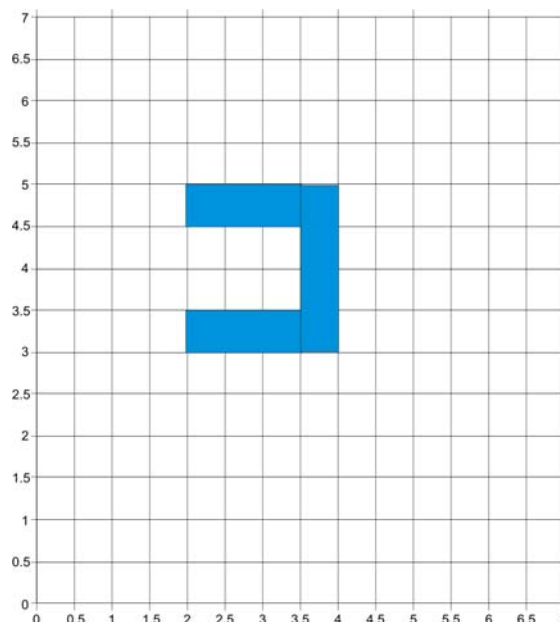
Στο ίδιο μοντέλο κρατήθηκαν σταθερές όλες οι παράμετροί του, εκτός από την αντίσταση των σωμάτων που έγινε διαδοχικά, από 100 Ohmm που ήταν αρχικά, σε 500, 600, 1000 Ohmm. Τα αποτελέσματα από την αλλαγή της αντίστασης φαίνονται στο *σχήμα 2.4.2*. Τα τρία επίπεδα που παρουσιάζονται στο σχήμα είναι αποτέλεσμα του προγράμματος, *split\_xy (Tsourlos 2004)*, που αναφέρθηκε παραπάνω και βοηθούν στην καλύτερη εποπτική εικόνα της απόκρισης του μοντέλου αφού μας δίνουν τη δυνατότητα να δούμε την απόκριση αυτή όταν η απόσταση μεταξύ των κινουμένων ηλεκτροδίων γίνει διαδοχικά  $AM=0.5m$   $AM=1m$  και  $AM=1.5m$ .

Από το *σχήμα 2.4.2* μπορούμε να δούμε ότι με την αύξηση της αντίστασης τα σώματα εμφανίζονται πιο έντονα δηλαδή μπορούν να καθορισθούν τα όρια τους καλύτερα. Υπάρχει έντονη αντίθεση αντιστάσεων από 30 Ohmm, στο γύρω περιβάλλον, με τα 100 Ohmm που έχουν τα σώματα και ακόμη μεγαλύτερη αντίθεση με τα 500 Ohmm. Στο αποτέλεσμα του σχήματος διατηρήθηκαν όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης που ονομάσαμε *mod1* εκτός της ειδικής αντίστασης των σωμάτων. Αυτή μεταβλήθηκε σε 1000 Ohmm. Έτσι, για λόγους σύγκρισης, το ακραίο αριστερά τμήμα του σχήματος (Α) παρουσιάζει την απόκριση όταν η αντίσταση των σωμάτων είναι 100 Ohmm, ενώ το μεσαίο τμήμα του σχήματος παρουσιάζει

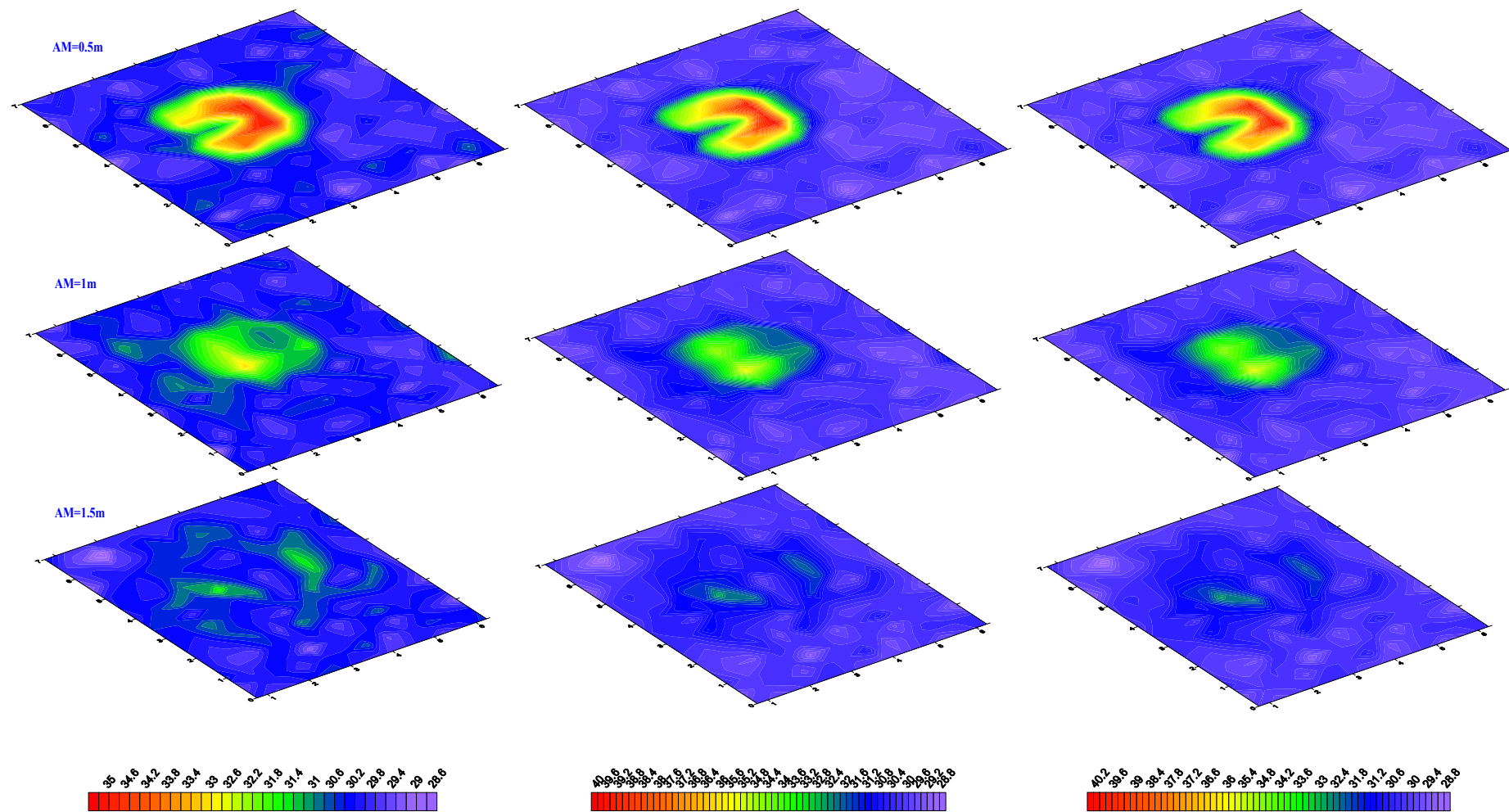
την απόκριση όταν η αντίσταση είναι 1000 Ohmm. Δεν φαίνεται να υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στην εικόνα που θα καταγράφαμε στην επιφάνεια του εδάφους εάν η ειδική αντίσταση του μοντέλου άλλαζε από 100 σε 1000 Ohmm.

Στη τελευταία εικόνα (Γ) του σχήματος 2.4.3 το ίδιο μοντέλο *mod1* βρίσκεται σε βάθος 0,25m, έχει αντίσταση περιβάλλοντος 40 Ohmm και η αντίσταση των σωμάτων είναι 60 Ohmm. Αυτή η δόκιμη έγινε έτσι ώστε η αντίθεση των αντιστάσεων να είναι μικρή για να δούμε πως θα φαίνεται η δομή σε ένα τέτοιο περιβάλλον.

Είναι αναμενόμενο ότι με την μικρή αυτή διαφορά που υπάρχει στις αντιστάσεις το σώμα διακρίνεται ελάχιστα παρόλο που βρίσκεται σε μικρό βάθος μόλις 0,25m. Το ίδιο μοντέλο, με τα ίδια χαρακτηριστικά, σε μεγαλύτερα βάθη δεν ξεχωρίζει από το περιβάλλον που φιλοξενείται γεγονός που θα παρουσιασθεί σε λεπτομέρεια παρακάτω, δηλαδή στη μελέτη της διακριτικής ικανότητας σε σχέση με το βάθος ταφής του σώματος.

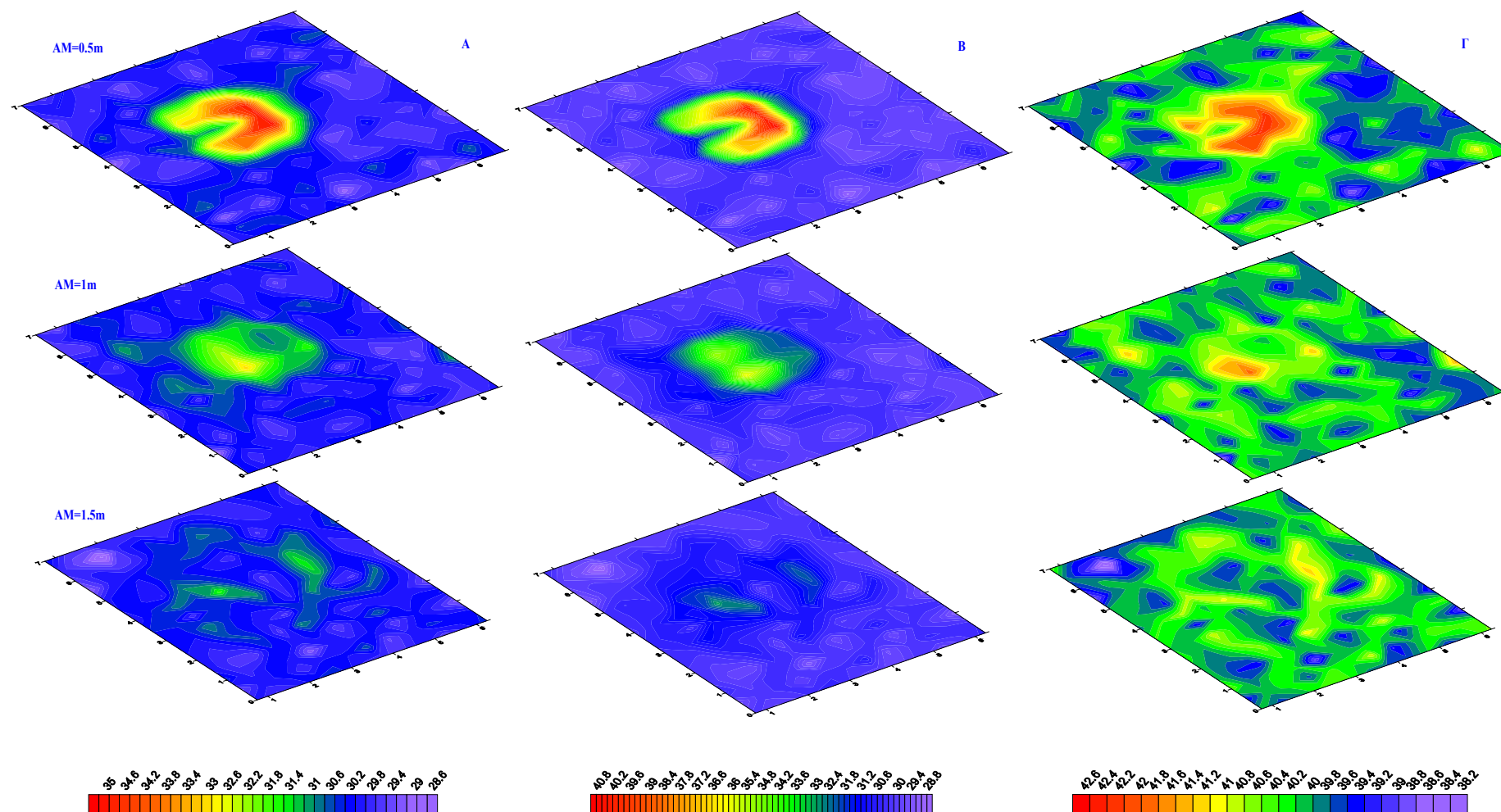


Σχήμα 2.4.1 Κάτοψη της προσομοίωσης που ονομάστηκε *mod1*. Τα τρία σώματα που τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να δίνουν ψευδαίσθηση θαμμένων ερειπίων τοίχων έχουν ειδική ηλεκτρική αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε περιβάλλον με αντίσταση 30 Ohmm. Η άνω επιφάνεια των σωμάτων είναι σε βάθος 0,25-0,5m και το πάχος τους είναι 0,25m.



Σχήμα 2.4.2 Απόκριση της προσομοίωσης του σχήματος 2.4.1 (Mod1) βρίσκεται σε βάθος 0,25m με αντίσταση περιβάλλοντος 30 Ohm και αντίσταση σώματος 100,500,600 Ohm, διαδοχικά από τα αριστερά προς τα δεξιά. Η απόκριση του μοντέλου υπολογίστηκε για απόσταση AM=0,5,1,και 1,5m.. Με αλλά λόγια κάθε οριζόντια σειρά σχημάτων αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση AM και κάθε κάθετη σειρά σε διαφορετική αντίσταση μοντέλου.

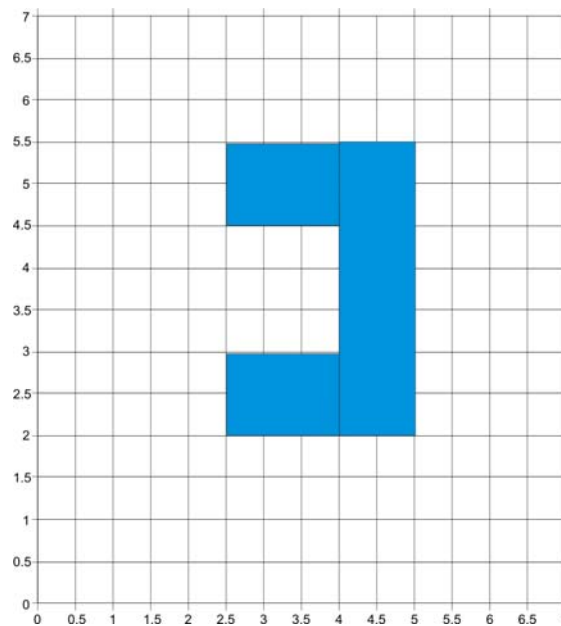




Σχήμα 2.4.3 Στο Α έχουμε την απόκριση του βασικού μοντέλου όταν αυτό έχει ειδική αντίσταση 100 Ohm ενώ στο Β η αντίσταση του είναι 1000 Ohm. Στις δυο αυτές περιπτώσεις η αντίσταση του περιβάλλοντος θεωρήθηκε 30 Ohm. Στο Γ η αντίσταση του σώματος είναι 60 Ohm και του περιβάλλοντος 40 Ohm. Η απόσταση AM είναι 0,5, 1 και 1,5m για κάθε σειρά σχημάτων διαδοχικά από επάνω προς τα κάτω. Το βάθος ταφής είναι ίδιο και ίσο με 0,25m.

### 2.4.2 Διαστάσεις του μοντέλου

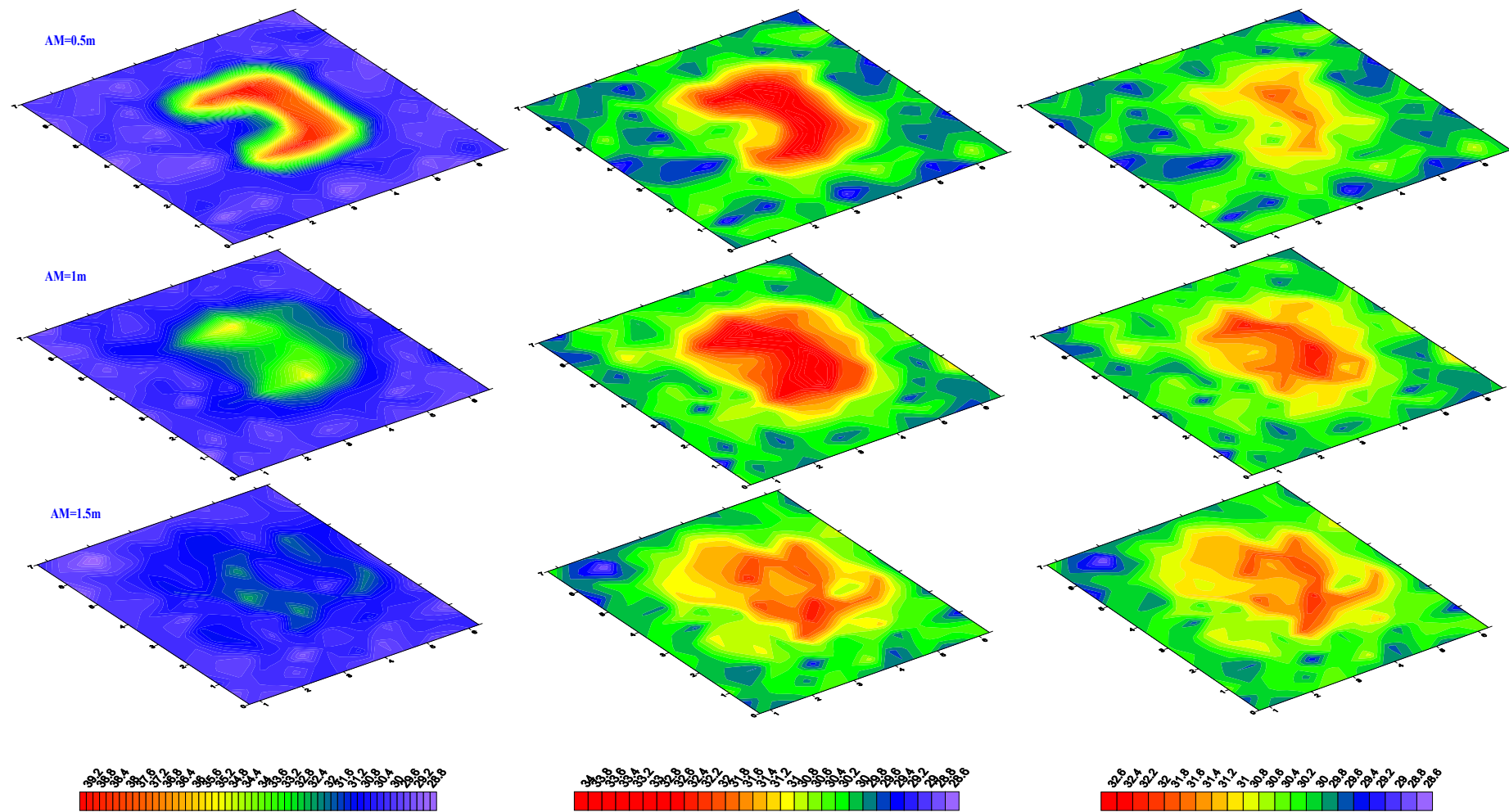
Η προσομοίωση που ονομάσαμε *mod2*, φαίνεται στο *σχήμα 2.4.4* και είναι παρόμοια με το αρχικό μοντέλο *mod1* μόνο που έχει διαφορετικές οριζόντιες διαστάσεις. Το κάθε σώμα έχει πλάτος 1m μήκος 2,5m, αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκεται σε περιβάλλον με αντίσταση 30 Ohmm όπως στο αρχικό μοντέλο. Το πάχος του μοντέλου διατηρήθηκε ίσο με 0,25m.



*Σχήμα 2.4.4 Η προσομοίωση mod2 βρίσκεται σε περιβάλλον με αντίσταση 30 Ohmm και αποτελείται από τρία σώματα πάχους 0,25m, πλάτος 1m και μήκος 2,5m. Η αντίσταση των σωμάτων είναι 100 Ohmm και αυτή του περιβάλλοντος 30 Ohmm.*

Το σώμα τοποθετήθηκε διαδοχικά σε βάθη 0,25m, 0,5m και 0,75m και τα αποτελέσματα φαίνονται στο *σχήμα 2.4.5*. Παρατηρώντας αυτό το σχήμα βλέπουμε ότι το σώμα είναι διακριτό αρκετά ακόμα και σε βάθος 0,5m ενώ σε μεγαλύτερο βάθος 0,75m είναι ελάχιστα διακριτό το σχήμα των σωμάτων παρόλο που υπάρχει ανωμαλία σε εκείνη την περιοχή.

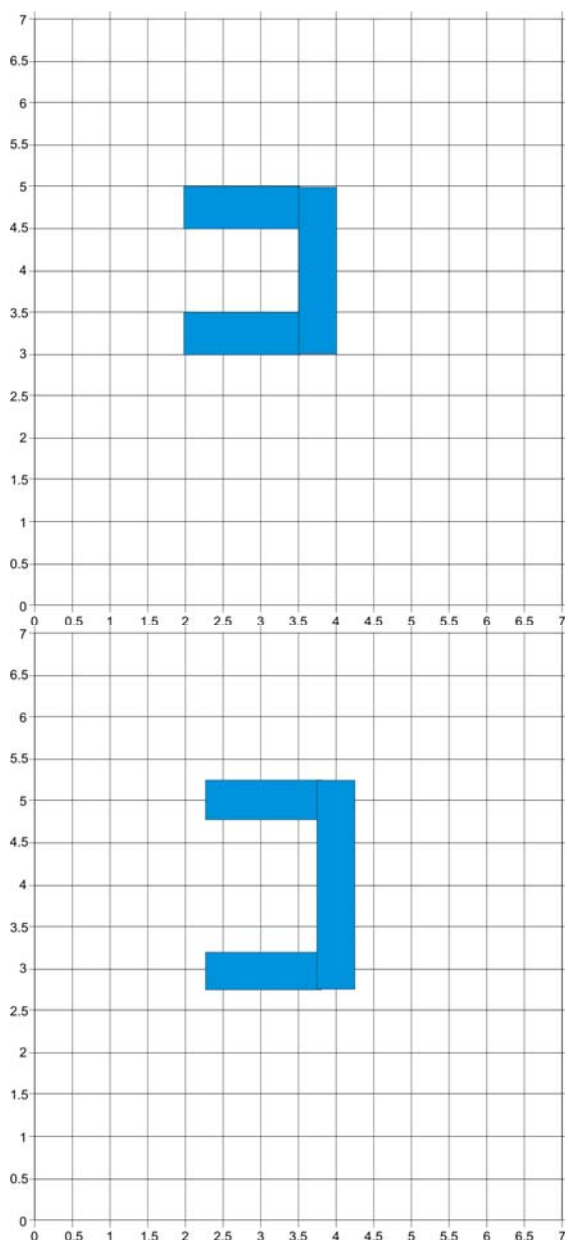
Αυτό σημαίνει ότι ένα σώμα που έχει μεγάλες διαστάσεις ή μεγαλύτερες από το άνοιγμα των ηλεκτροδίων μπορεί να εντοπισθεί πιο εύκολα σε σχέση με ένα άλλο σώμα, όπως για παράδειγμα αυτό του αρχικού μοντέλου *mod1*, που έχει παρόμοιες διαστάσεις με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων. Είναι λογικό ότι όσο πιο μικρό είναι το σώμα που ψάχνουμε, σε σχέση με το άνοιγμα των ηλεκτροδίων να είναι και πιο δύσκολος ο εντοπισμός του.



Σχήμα 2.4.5 Αποτέλεσμα μεγέθυνσης ως προς τις οριζόντιες διαστάσεις του αρχικού μοντέλου mod1. Το πλάτος του έγινε 1m, το μήκος του 2,5m ενώ το πάχος του είναι 0,25m. Από αριστερά προς τα δεξιά το βάθος ταφής του σώματος μεταβάλλεται από 0,25m σε 0,5m και 0,75m. Κάθε σειρά σχημάτων, από επάνω προς τα κάτω, αντιστοιχεί σε απόσταση κινουμένων ηλεκτροδίων AM=0,5, 1 και 1,5m.

### 2.4.3 Θέση ηλεκτροδίων σε σχέση με το σώμα.

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται η επίδραση που έχει η θέση των ηλεκτροδίων σε σχέση με το σώμα. Το αρχικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε *gen3dxy* (Tsourlos 1997), δημιουργεί ένα αρχείο το οποίο περιέχει τις θέσεις των ηλεκτροδίων τόσο κατά την διεύθυνση  $x$  όσο και κατά την διεύθυνση  $y$ . Σε όλα τα μοντέλα που προηγήθηκαν και σε αυτά τα οποία έπονται διατηρήθηκε η διεύθυνση κίνησης των ηλεκτροδίων η οποία θεωρήθηκε ότι έγινε κατά την διεύθυνση  $x$ . Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται και το ενδεχόμενο διαφορετικής κίνησης των ηλεκτροδίων, δηλαδή θεωρούμε ότι αυτά κινήθηκαν και σε οδεύσεις παράλληλες του άξονα  $y$ . Επίσης εξετάζεται και η περίπτωση όπου υπάρχουν πολυπληθέστερα δεδομένα πραγματοποιώντας οδεύσεις παράλληλες και προς τους δύο άξονες  $xy$ . Επίσης το μοντέλο μετακινείτε κατά 0,25m έτσι ώστε να μην συμπίπτουν τα όρια του με θέσεις ηλεκτροδίων αλλά αντίθετα η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων να είναι στο κέντρο της κάτοψής του (σχήμα 2.4.6). Το μοντέλο έχει αντίσταση σώματος 100 Ohmm και αντίσταση περιβάλλοντος 30 Ohmm ενώ βρίσκεται σε βάθος 0,25m, έχει πλάτος σωμάτων 0,5m και μήκος 2m.

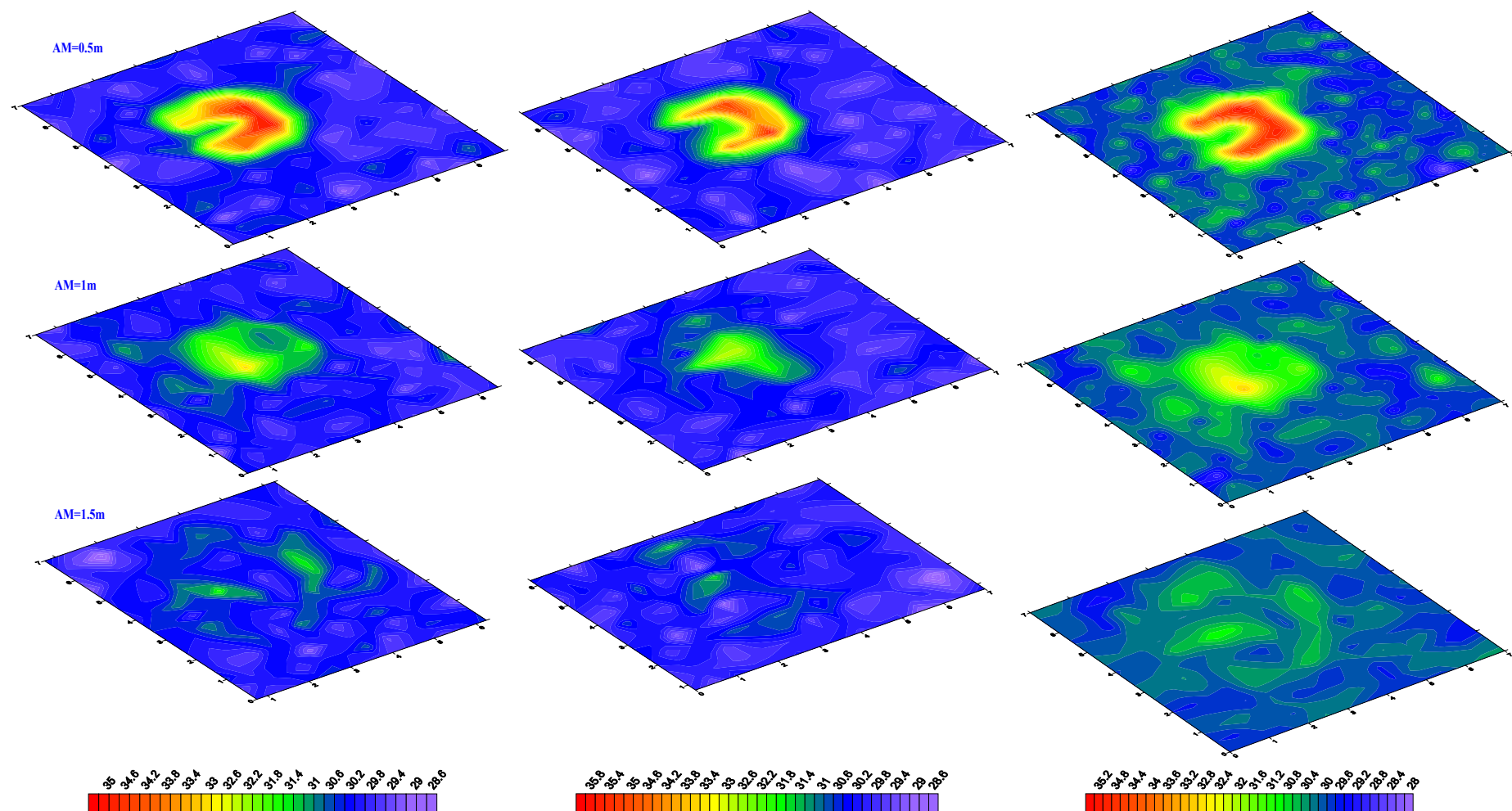


Σχήμα 2.4.6. Αριστερά το αρχικό μοντέλο *mod1* και δεξιά το ίδιο μοντέλο μετατοπισμένο κατά 0,25m. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν ίδιες με αυτές του βασικού μοντέλου.

Στο σχήμα 2.4.7 απεικονίζεται η απόκριση του μοντέλου όταν οι οδεύσεις γίνονται παράλληλες στον άξονα x, κατόπιν παράλληλα στον άξονα y και τέλος όταν η όδευση πραγματοποιείται παράλληλα τόσο στον άξονα x όσο και προς τον άξονα y. Παρατηρώντας το πρώτο τμήμα του σχήματος είναι εμφανές ότι οι τα σώματα που βρίσκονται στην διεύθυνση του άξονα x εμφανίζονται εντονότερα, πεπλατυσμένα, σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στον άξονα y. Δηλαδή ευνοούνται τα σώματα που βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση με αυτή της κίνησης των ηλεκτροδίων.

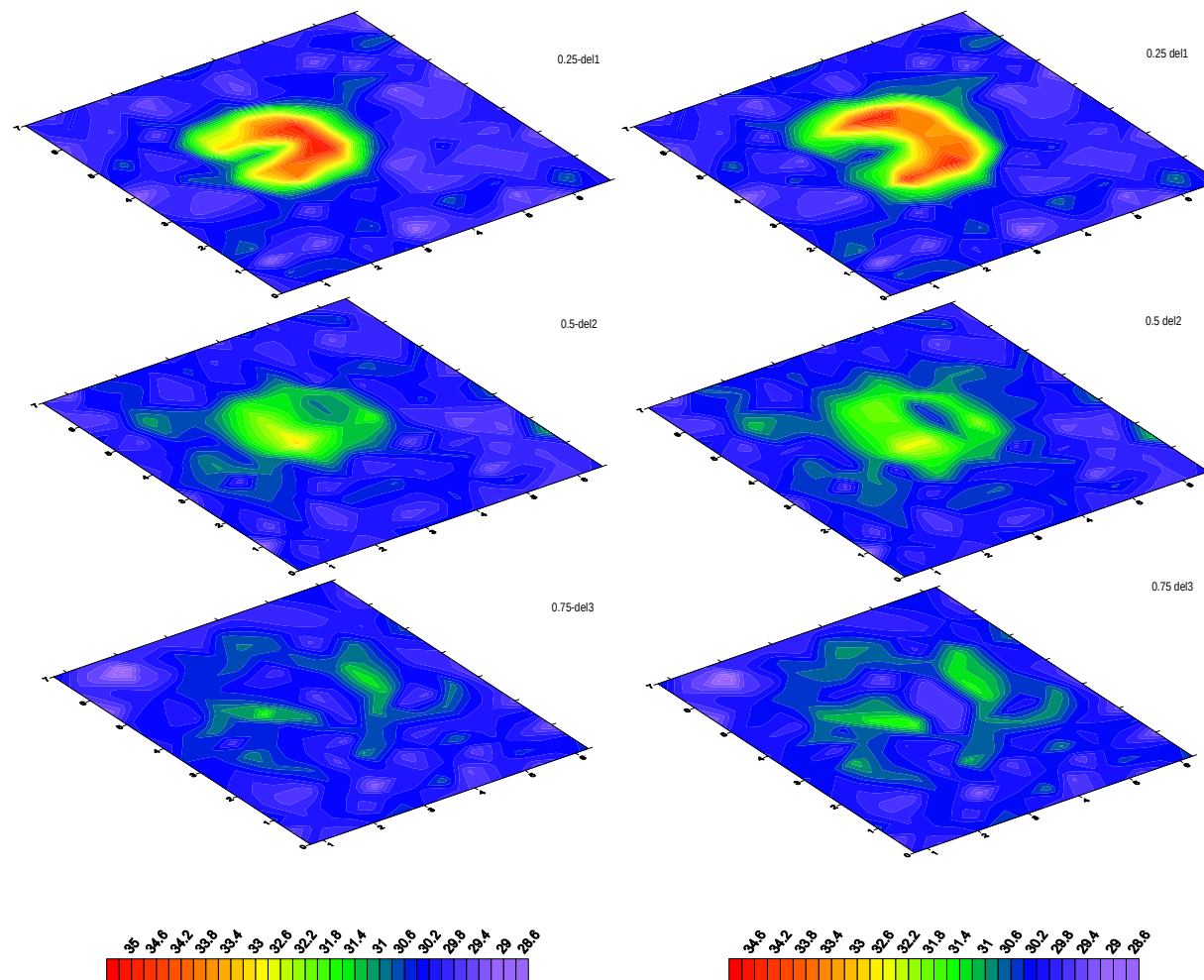
Αντίστοιχα στο δεύτερο τμήμα του σχήματος όπου τα ηλεκτρόδια κινήθηκαν παράλληλα προς τον άξονα  $y$ , είναι εντονότερα τα σώματα που βρίσκονται κατά μήκος αυτού του άξονα. Δηλαδή εμφανίζονται επιμηκυσμένα. Αυτό διαπιστώνεται εύκολα όταν η απόσταση των κινουμένων ηλεκτροδίων είναι  $AM=1m$ . Στο τρίτο τμήμα του *σχήματος 2.4.7*, όπου οι οδεύσεις έγιναν και προς τις δύο διευθύνσεις, το μοντέλο εμφανίζεται σαφώς καλύτερα και είναι ανεπτυγμένο τόσο προς άξονα  $x$  όσο και προς τον άξονα  $y$ .

Στο *σχήμα 2.4.8*, απεικονίζεται η απόκριση του αρχικού μοντέλου στο πρώτο τμήμα του σχήματος, καθώς και του ίδιου μοντέλου μετατοπισμένο κατά  $0,25m$  από την αρχική του θέση έτσι ώστε να μην συμπίπτουν τα όρια του με θέσεις ηλεκτροδίων. Η διαφορά που παρατηρείται, είναι ότι στο τμήμα που το μοντέλο έχει μετατοπισθεί υπάρχει μια διασπορά των τιμών μεγαλύτερη από ότι στο αρχικό μοντέλο *mod1* αφού τα ηλεκτρόδια που βρίσκονταν αρχικά στα άκρο των σωμάτων δεν έχουν πλέον την ίδια θέση.



Σχήμα 2.4.7 Απόκριση του μοντέλου Mod1 σε διαφορετικές διευθύνσεις οδεύσεων. Στην αριστερή στήλη έχουμε κίνηση των ηλεκτροδίων (όδευση) κατά τον άξονα  $x$ , στην κεντρική κατά τον άξονα  $y$  ενώ στη δεξιά έχουμε το συνδυασμένο αποτέλεσμα πραγματοποιώντας οδεύσεις τόσο κατά  $x$  όσο και κατά  $y$ . Το βάθος ταφής των σωμάτων είναι 0,25m.





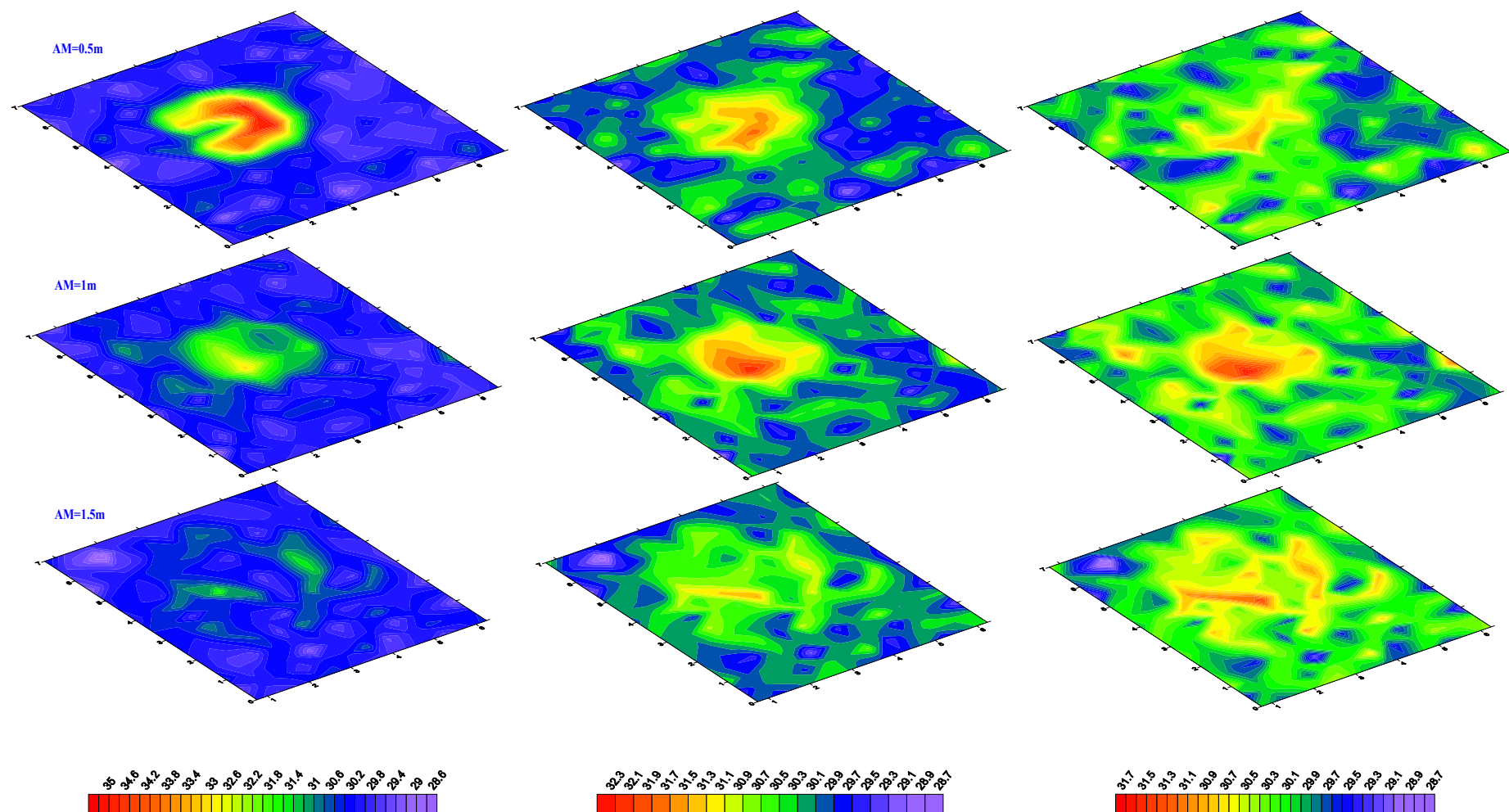
Σχήμα 2.4.8 Το αρχικό μοντέλο Mod1 (αριστερά) και το Mod1 μετατοπισμένο κατά 0,25m ανάμεσα στις θέσεις των ηλεκτροδίων (δεξιά). Όλες οι παράμετροι είναι ίσες με αυτές του βασικού μοντέλο (Mod1).



#### 2.4.4 Βάθος Ταφής του Μοντέλου.

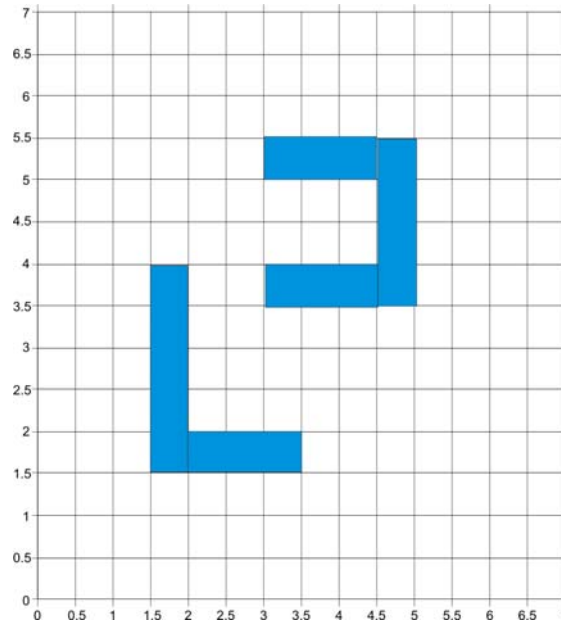
Στη συνέχεια θα δοθούν μια σειρά αποκρίσεων από μοντέλα τα οποία διαδοχικά τοποθετούνται σε βάθη των 0,25m, 0,5m και 0,75m. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται το βάθος διείσδυσης της διάταξης πόλου-πόλου η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ανάλογη της διάταξης του δίδυμου ηλεκτροδίου.

Ξεκινώντας από το πιο απλό μοντέλο που είναι το αρχικό, *mod1* όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.4.9* διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνει το βάθος ταφής των σωμάτων τόσο πιο δυσδιάκριτα γίνονται. Σε βάθος 0,25m το μοντέλο είναι ευδιάκριτο. Σε βάθος 0,5m το μοντέλο είναι πιο δύσκολο να εντοπισθεί ωστόσο παρατηρούνται ανωμαλίες, σε μεγαλύτερη όμως έκταση από το μοντέλο. Τέλος όταν το μοντέλο βρεθεί σε βάθος 0,75m δεν είναι διακριτό και παρατηρείται μια συγκεχυμένη μορφή. Στη περιοχή όπου υπάρχουν οι υψηλότερες τιμές, η κατανομή τους δεν αντιστοιχεί με αυτή του μοντέλου.



Σχήμα 2.4.9 Το βασικό μοντέλο (Mod1), αποτελούμενο από τρία σώματα πλάτους 0,5m, μήκος 2m και πάχους 0,25m, τοποθετείτε σε τρία διαφορετικά βάθη ταφής. Η αντίσταση περιβάλλοντος 30 Ohm και αντίσταση σώματος 100 Ohm. Από την αριστερή προς την δεξιά στήλη, το βάθος ταφής γίνεται αντίστοιχα 0,25, 0,5 και 0,75m.

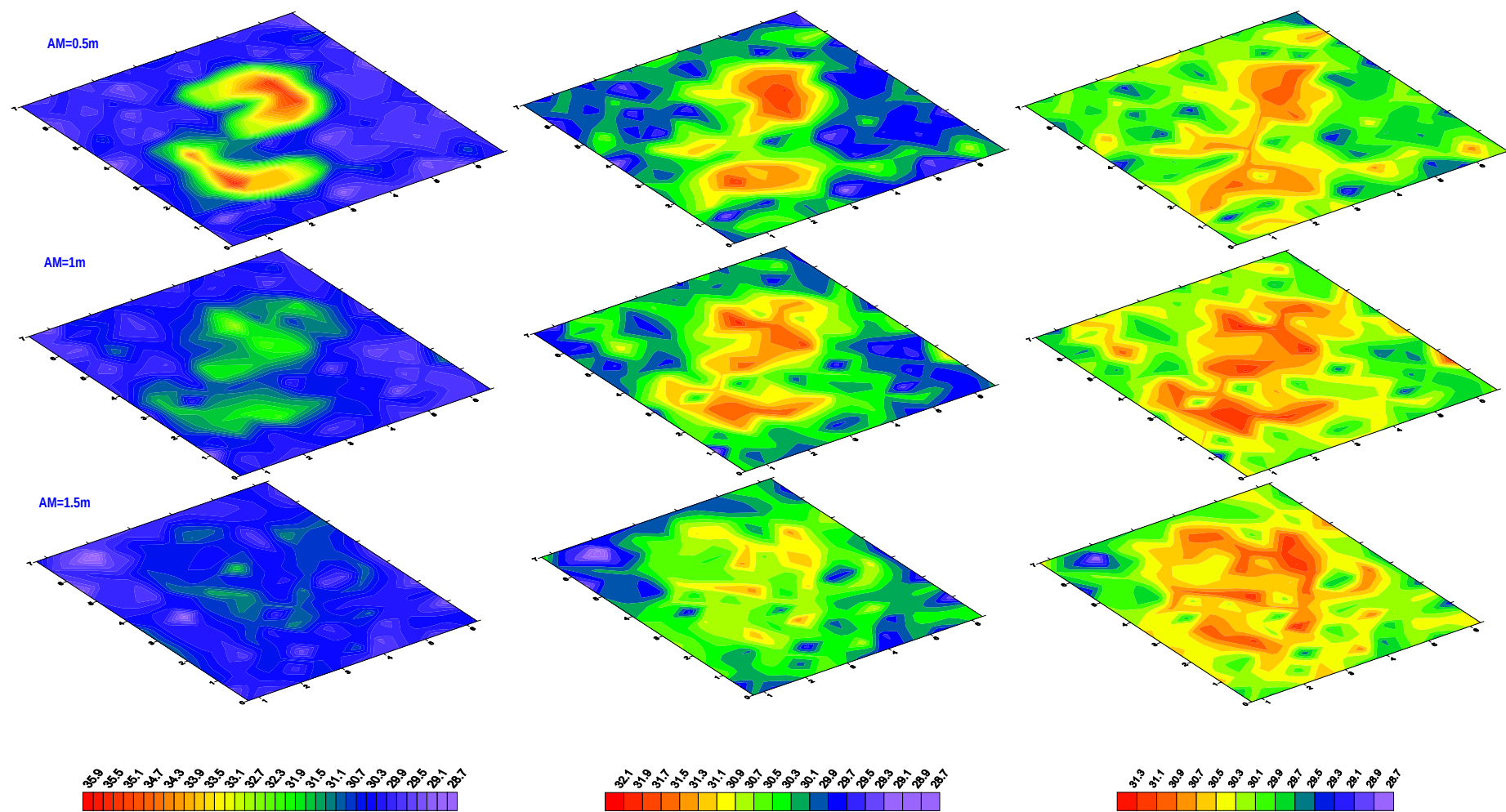
Το επόμενο μοντέλο *mod3* είναι πιο πολύπλοκο και αποτελείται από 2 δομές, η μια είναι ίδια με το αρχικό μοντέλο *mod1* και άλλη αποτελείται από δύο σώματα κάθετα μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο *σχήμα 2.4.10*.



*Σχήμα 2.4.10 Η προσομοίωση που ονομάστηκε Mod3, αποτελείται από δομές που συγκροτούνται από σώματα πλάτους 0,5m, αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε περιβάλλον με αντίσταση 30 Ohmm. Τα μήκη των σωμάτων ποικίλουν.*

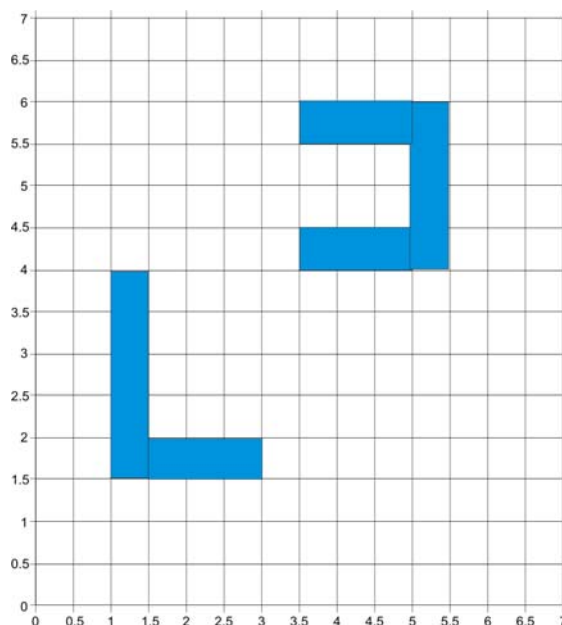
Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα που εξάγονται από το *σχήμα 2.4.11*. Σε μικρό βάθος ταφής το σώμα είναι ευδιάκριτο με σαφή όρια γύρω από αυτό να διαγράφονται, ενώ όσο αυξάνει το βάθος γίνεται πιο δυσδιάκριτο.

Η διακριτική ικανότητα της διάταξης με ανάπτυγμα ηλεκτροδίων  $AM=0,5m$ , είναι καλύτερη για βάθος 0,25m ενώ αυτή μειώνεται με την αύξηση του βάθους. Με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων είναι εφικτό να προσεγγίσουμε μεγαλύτερα βάθη. Οι αποκρίσεις υπολογίσθηκαν με την βοήθεια του προγράμματος *split\_xy* (Tsourlos 2004).



Σχήμα 2.4.11 Διερεύνηση της απόκρισης του μοντέλου Mod3, για βάθη ταφής 0,25m, 0,5m και 0,75m, από την αριστερή στήλη προς την δεξιά αντίστοιχα.

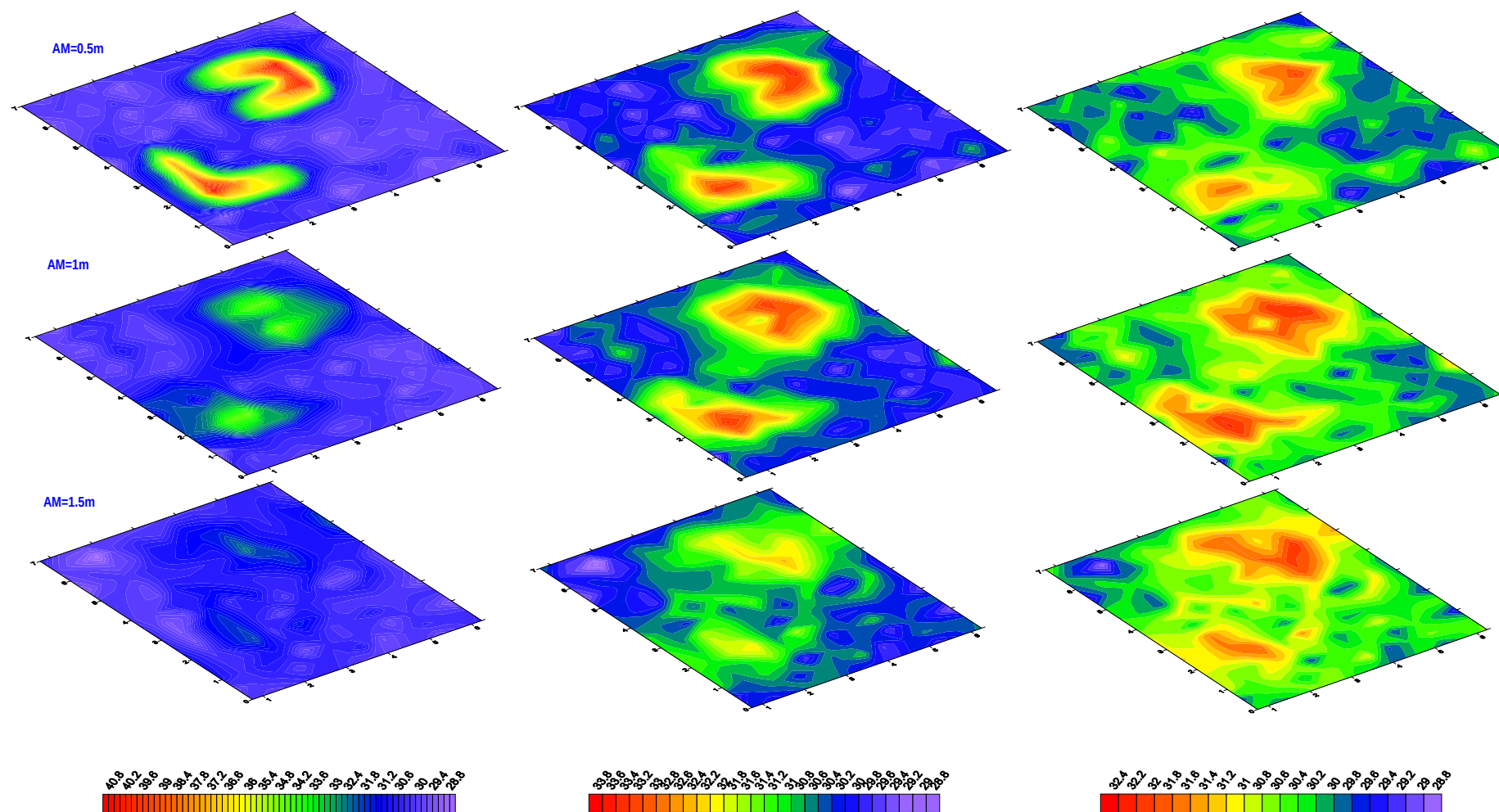
Στη συνέχεια το ίδιο μοντέλο *mod3* αφού μεταβλήθηκε η αντίσταση των σωμάτων, από 100 Ohm σε 500 Ohm και η απόσταση μεταξύ των δομών (σχήμα 2.4.12), τοποθετήθηκε σε διαδοχικά βάθη 0,25, 0,5m και 0,75m και τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.4.13.



Σχήμα 2.4.12 Μικρή τροποποίηση της προσομοίωσης που ονομάστηκε *Mod3*. Οι δομές είναι λίγο απομακρυσμένες και οι αντιστάσεις τους είναι 500 Ohm. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι είναι ίδιες με αυτές του μοντέλου *Mod3* (σχήμα 2.4.10).

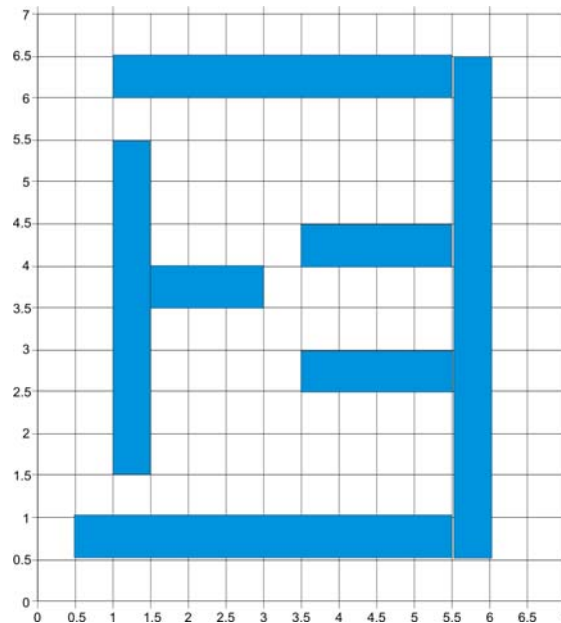
Από το σχήμα 2.4.13 διακρίνονται οι δομές αρκετά καθαρά σε βάθος 0,25m όπως επίσης και σε βάθος 0,5m γιατί έχει αυξηθεί η αντίσταση των σωμάτων από 100 Ohm που ήταν σε 500 Ohm. Στην τομή που αντιστοιχεί σε βάθος 0,75m είναι επίσης εμφανής η μια από τις δύο δομές, αυτή του αρχικού μοντέλου *mod1*, με ιδιαίτερη προσπάθεια.

Αυτό το μοντέλο έχει καλύτερη διακριτική ικανότητα για το ανάπτυγμα  $AM=0,5m$  σε σχέση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα του σχήματος 2.4.11.



Σχήμα 2.4.13 Η απόκριση του μοντέλου του σχήματος 2.4.12 για διαφορετικά βάθη ταφής. Από την αριστερή στήλη προς τη δεξιά το βάθος ταφής γίνεται αντίστοιχα 0,25, 0,5 και 0,75m.

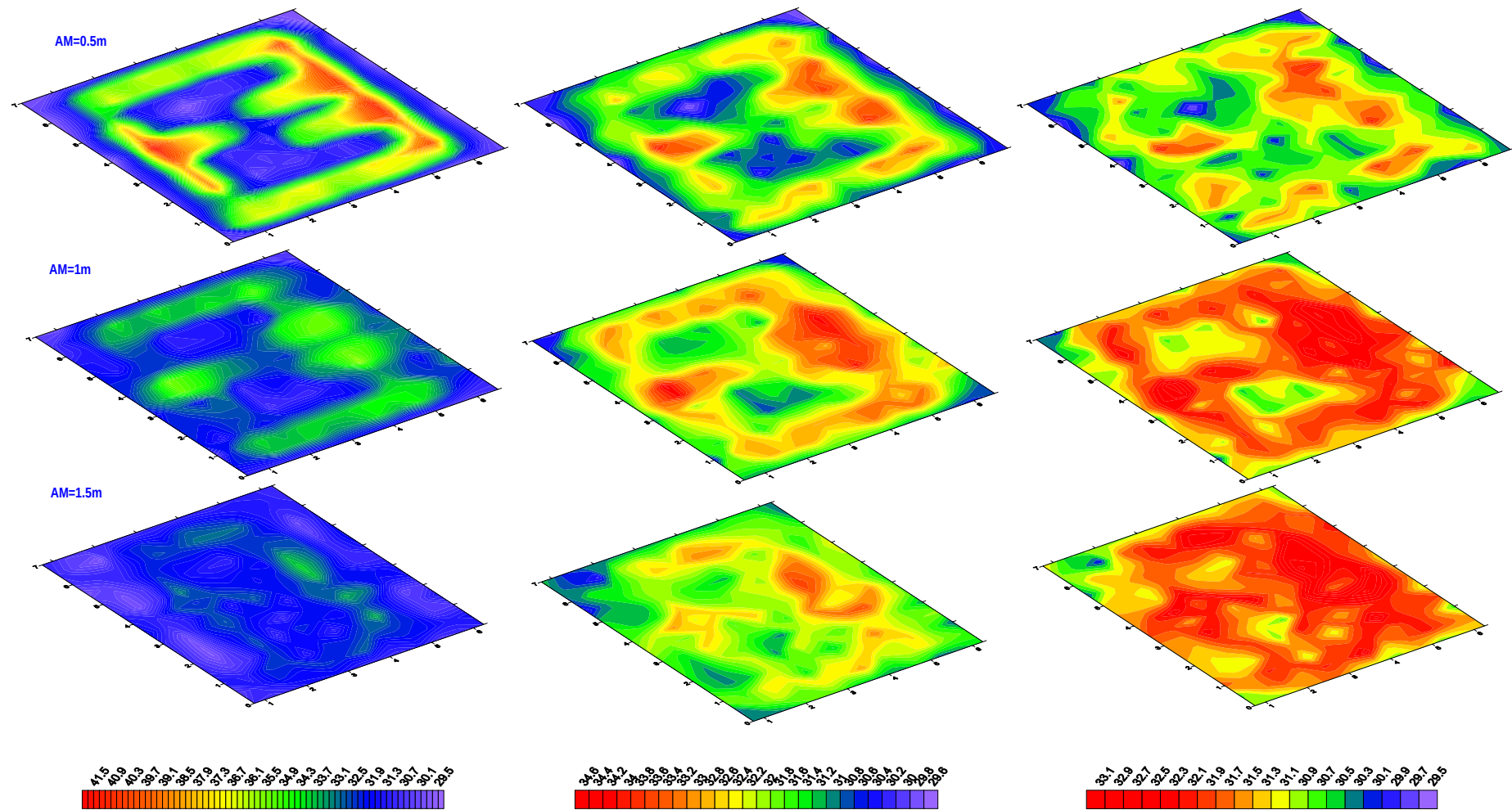
Η πιο σύνθετη δομή μοντέλου που κατασκευάστηκε είναι αυτή που απεικονίζεται στο *σχήμα 2.4.14*. Όλα τα σώματα έχουν αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε περιβάλλον 30 Ohmm. Η δομή αυτή έγινε με σκεπτικό την προσομοίωση των ερείπιων ενός οικοδομικού συγκροτήματος.



*Σχήμα 2.4.14* Σύνθετο μοντέλο: όλα τα σώματα , έχουν αντίσταση 100 Ohmm, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και σε χώρο που έχει αντίσταση 30 Ohmm. Οι οριζόντιες διαστάσεις φαίνονται στο σχήμα και το πάχος των σωμάτων είναι 0,25m.

Το σύνθετο αυτό μοντέλο τοποθετείται σε διαδοχικά βάθη 0,25m, 0,5m και 0,75m. Από το *σχήμα 2.4.15* είναι φανερό ότι η δομή απεικονίζεται αρκετά καλά όταν βρίσκεται σε βάθος 0,25m, λιγότερο όταν βρίσκεται σε βάθος 0,5m και ελάχιστα σε κάποια σημεία στο σχήμα που αντιστοιχεί σε βάθος 0,75m. Η διακριτική ικανότητα σε βάθος 0,5 όπως απεικονίζεται, για ανάπτυγμα AM=1m, ελαττώνεται όσο αυξάνει το βάθος ταφής των σωμάτων. Οι αντίσταση του περιβάλλοντα χώρου που φιλοξενεί τα σώματα, όπως είναι φανερό, αυξάνει σε σχέση με το βάθος ταφής τους και αυτό εξαιτίας της εκτεταμένης κατανομής των αντιστάσεων των σωμάτων. Αναγνωρίζεται ότι υπάρχει κάποιο αντικείμενο με μεγαλύτερη αντίσταση από το περιβάλλον που το φιλοξενεί, ωστόσο όμως δεν μπορεί να καθορισθεί η δομή του.





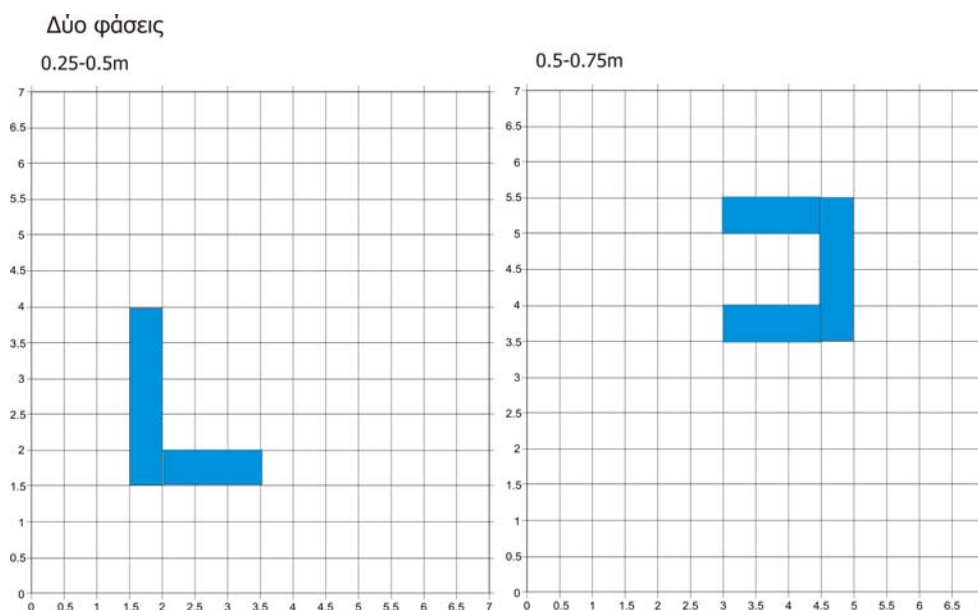
Σχήμα 2.4.15 Απόκριση του μοντέλου του σχήματος 2.4.14 για διαφορετικά βάθη ταφής. Από αριστερά προς τα δεξιά το βάθος αυξάνει ανά  $0,25m$  αρχίζοντας από τα  $0,25m$ .



#### 2.4.4.1 Μοντέλα που αποτελούνται από δομές οι οποίες βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη ταφής.

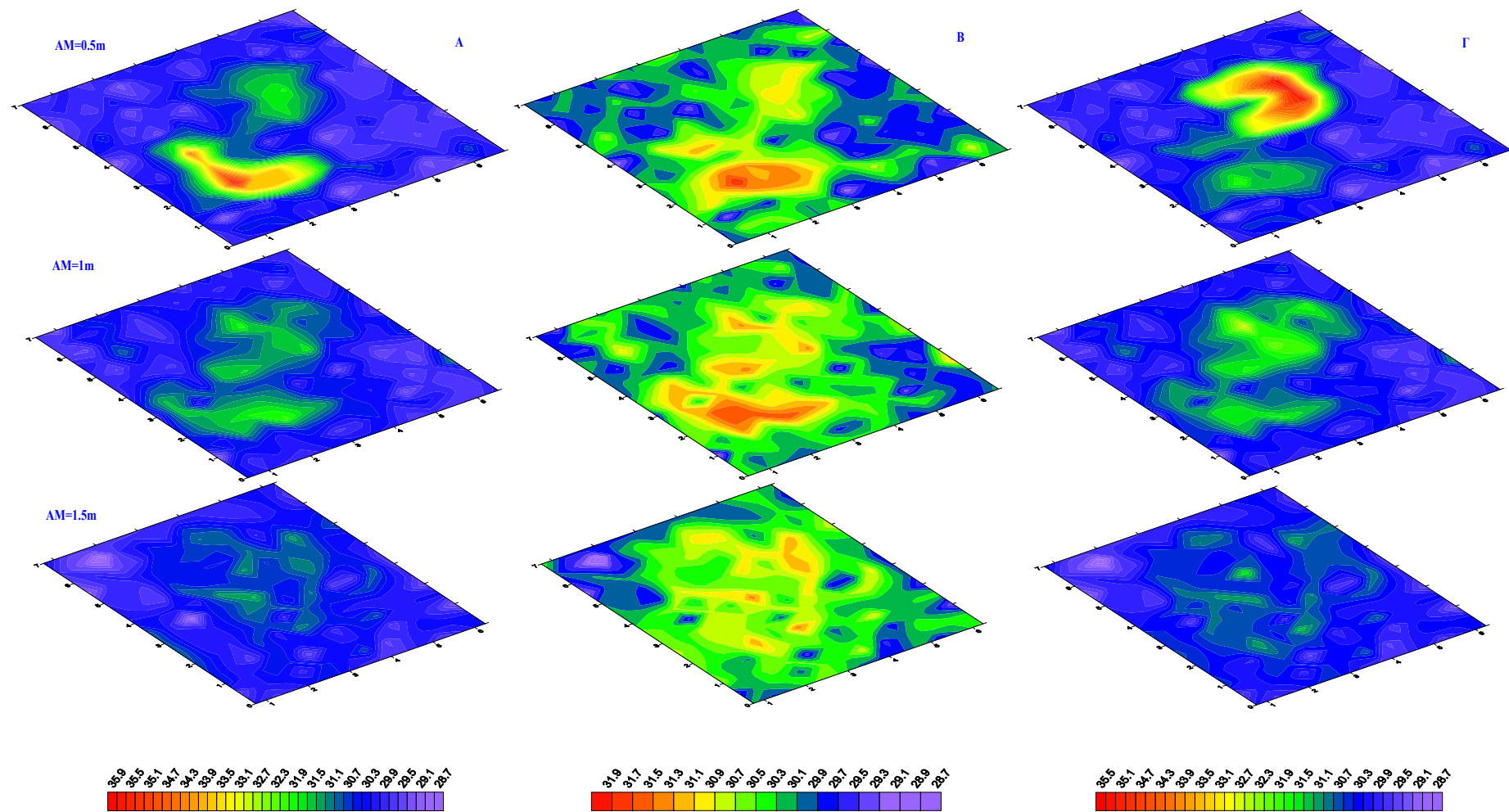
Μέχρι τώρα όλα τα μοντέλα που εξετάσθηκαν, από το πιο απλό μέχρι το πιο σύνθετο, αποτελούνταν από σώματα τα οποία βρισκόντουσαν στο ίδιο βάθος ταφής. Επειδή στην αρχαιομετρία υπάρχουν και περιπτώσεις όπου τα λείψανα είναι δυνατόν να μην βρίσκονται όλα στο ίδιο βάθος δημιουργήθηκε η ανάγκη να εξετασθεί και αυτή η περίπτωση. Έτσι δημιουργήθηκαν τα παρακάτω μοντέλα τα οποία θα ελεγχθούν σε σχέση πάντα με το βάθος ταφής τους.

Το μοντέλο *mod4* που φαίνεται στο *σχήμα 2.4.16* είναι παρόμοιο με το μοντέλο *mod3* που είδαμε προηγουμένως. Τα σώματα όλα έχουν αντιστάσεις 100 Ohmm και η αντίσταση του γύρω χώρου είναι 30 Ohmm. Η διαφορά εντοπίζεται στο ότι η μια δομή, αυτή που αποτελείται από δυο σώματα κάθετα μεταξύ του είναι σε βάθος 0,25m, ενώ η δεύτερη δομή αυτή του αρχικού μοντέλου βρίσκεται σε βάθος 0,5m.



Σχήμα 2.4.16 Προσομοίωση Mod4 η οποία είναι παρόμοια με την Mod3. Αποτελείται από σώματα που έχουν αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε χώρο με αντίσταση 30 Ohmm. Η μια δομή (αριστερά) βρίσκεται σε βάθος 0,25m και η άλλη σε βάθος 0,5m.

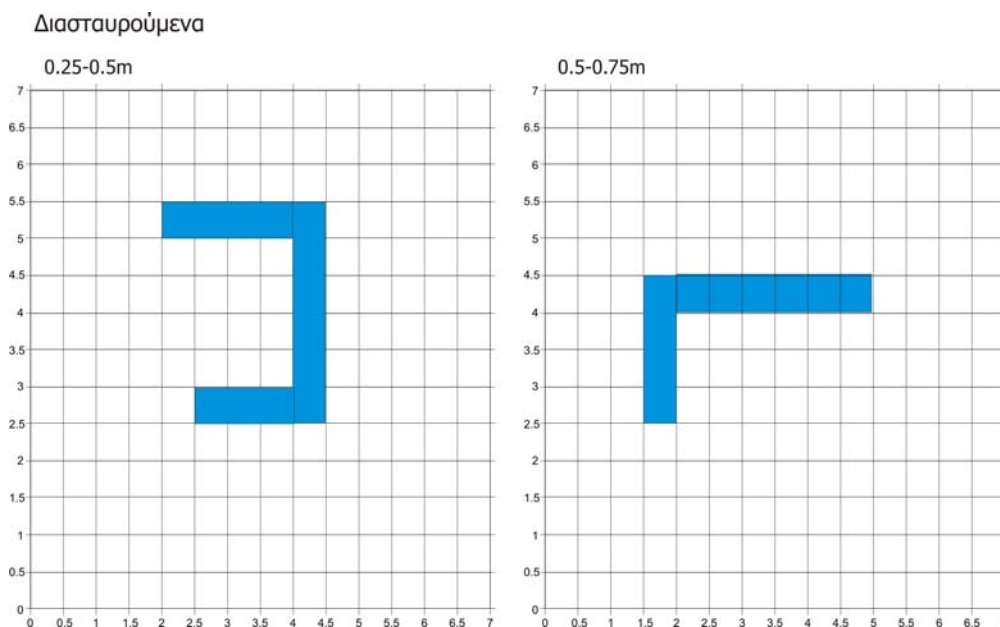
Στο *σχήμα 2.4.17* απεικονίζεται η απόκριση του μοντέλου *mod4* σε διαδοχικά βάθη (Α και Β). Στο τμήμα (Γ) του ίδιου σχήματος η δομή των δυο σωμάτων είναι σε βάθος 0,5m ενώ η δομή του βασικού μοντέλου *mod1* είναι σε βάθος 0,25m.



Σχήμα 2.4.17 **A:** Απόκριση της προσομοίωσης του σχήματος 2.4.16 για βάθος ταφής της δομής των δύο σωμάτων ίσο με 0,25m και της δομής των τριών σωμάτων σε βάθος ίσο με 0,5m. **B:** Απόκριση όταν οι δομές μετατοπίζονται σε βάθος, κατά 0,25m. **Γ:** Απόκριση της προσομοίωσης του σχήματος 2.4.16 αλλά με την δομή των δυο σωμάτων σε βάθος 0,5m και αυτή των τριών σε βάθος 0,25m. Δηλαδή έγινε αντίστροφη της θέσης των δομών σε σχέση με το βάθος.

Από το *σχήμα 2.4.17* προκύπτει πάλι το αναμενόμενο αποτέλεσμα, ότι το σώμα που βρίσκεται σε μικρότερο βάθος μπορεί να ανιχνευθεί πιο εύκολα από αυτό που βρίσκεται βαθύτερα. Στο τελευταίο σχήμα έγινε αντιστροφή του βάθους των δομών. Αυτή που ήταν σε βάθος 0,5m τοποθετήθηκε σε βάθος 0,25m και η άλλη δομή, η οποία είναι ίδια με την αρχική, βρέθηκε σε βάθος 0,25m. Τα αποτελέσματα είναι και εδώ τα ίδια, ωστόσο αν απομονωθεί το ανάπτυγμα  $AM=1m$  και συγκριθεί με το αντίστοιχο του πρώτου τμήματος, όπου οι δομές έχουν αντιστροφή σειρά. Τότε μπορούμε να πούμε ότι στο πρώτο τμήμα αυτό που λαμβάνουμε ως εικόνα μοιάζει περισσότερο με την δομή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε.

Στη συνέχεια δυο παρόμοιες δομές τοποθετούνται έτσι ώστε να διασταυρώνονται αλλά να βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο βάθους. Αυτό αποτελεί ξεχωριστό μοντέλο *mod5* και η διάταξή του φαίνεται στο *σχήμα 2.4.18*. Το μοντέλο αποτελείται από σώματα που έχουν αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε χώρο με αντίσταση 30 Ohmm. Η μια δομή αυτή των τριών σωμάτων βρίσκεται σε βάθος 0,25m και η άλλη που αποτελείται από δυο σώματα βρίσκεται σε βάθος 0,5m.



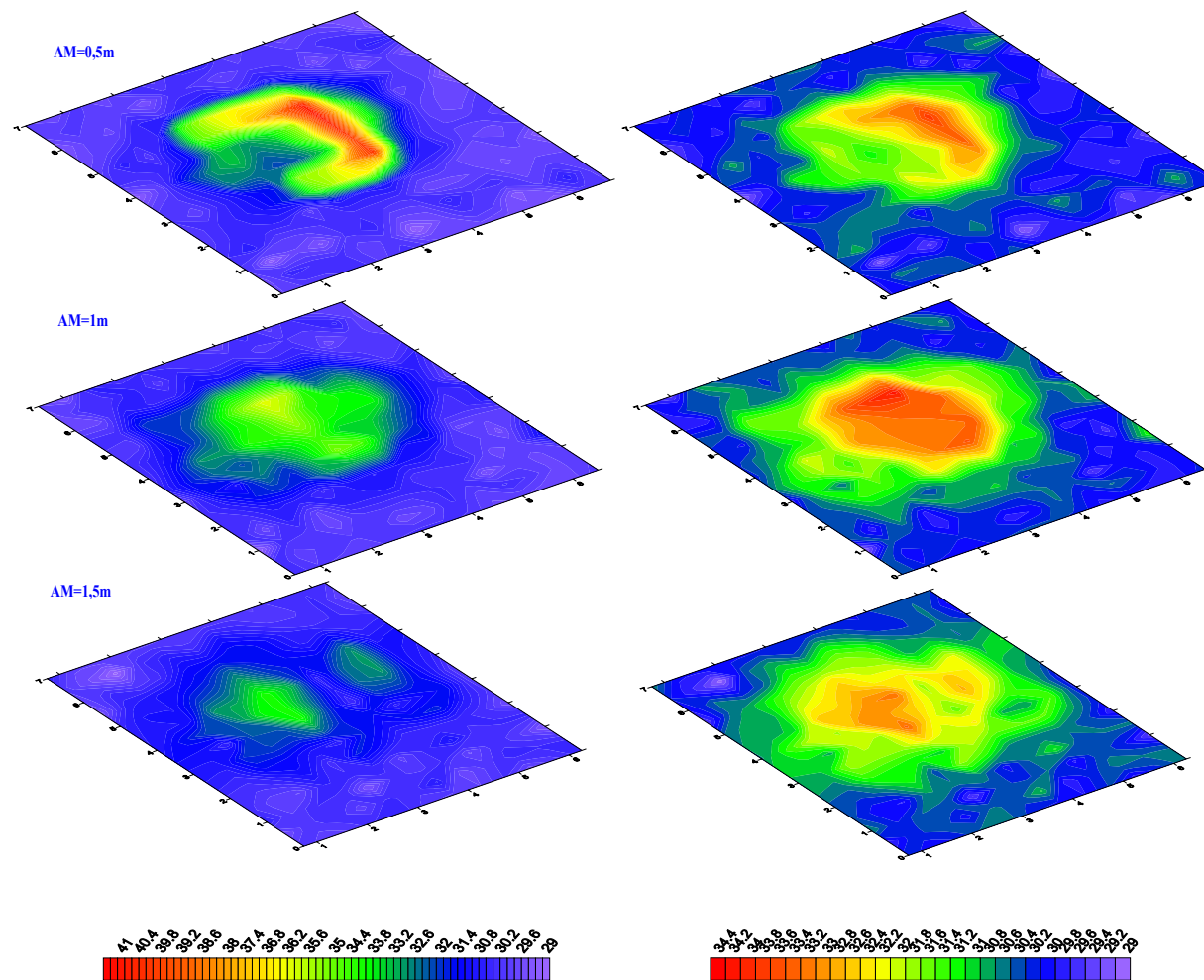
*Σχήμα 2.4.18 Προσομοίωση η οποία ονομάστηκε Mod5 αποτελείται από σώματα που έχουν αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε χώρο με αντίσταση 30 Ohmm. Η μια δομή βρίσκεται σε βάθος 0,25m και η άλλη σε διασταύρωση με την πρώτη αλλά σε βάθος 0,5m.*

Οι δομές αυτές αρχικά βρίσκονται στην αρχική τους θέση ενώ στη συνέχεια μετατοπίζονται βαθύτερα δηλαδή σε βάθος 0,5m ή μια και 0,75m ή άλλη.

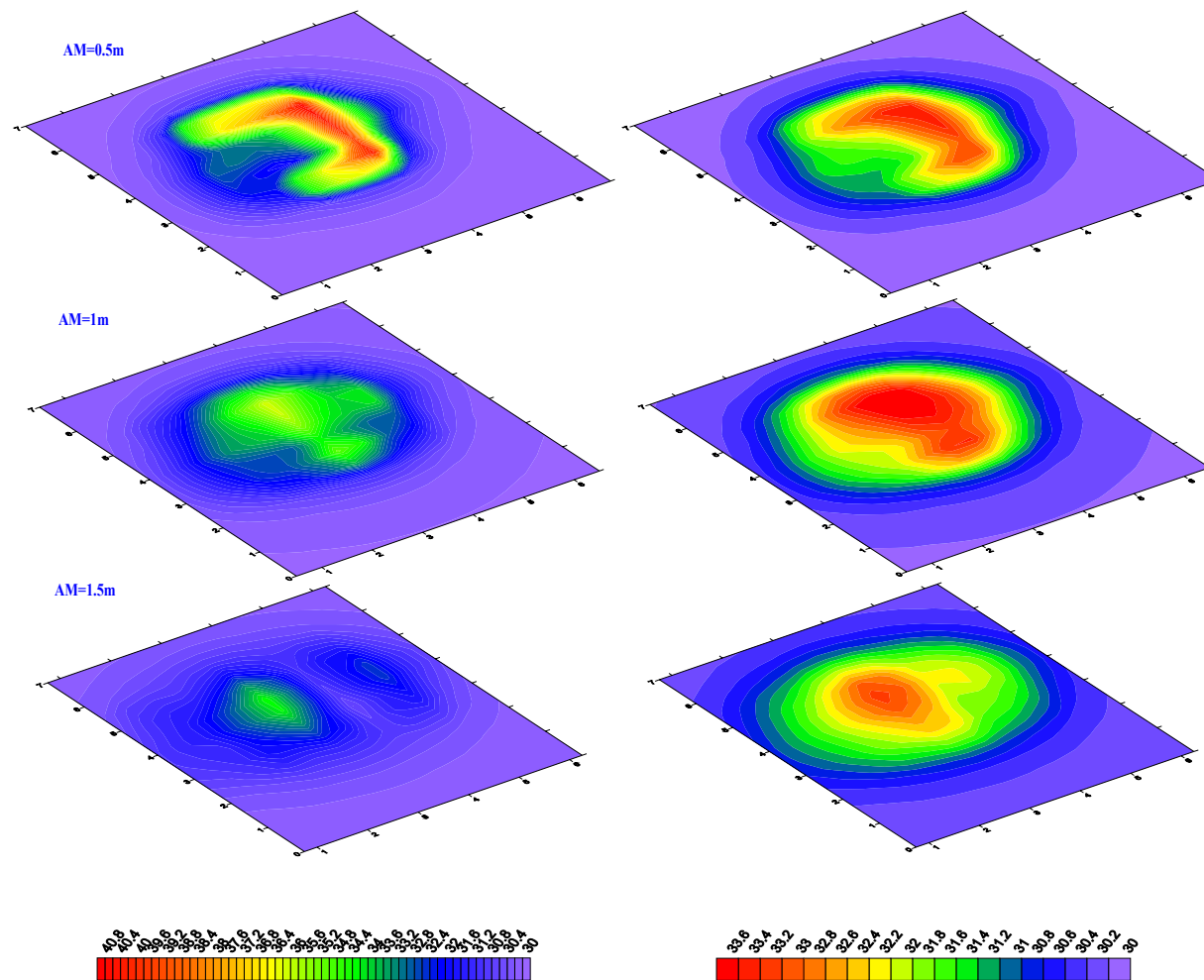
Από το *σχήμα 2.4.19* προκύπτει ότι στην πρώτη περίπτωση (αριστερά) και για ανάπτυγμα  $AM=0,5m$ , διακρίνεται η ρηχή δομή ελαφρώς αλλοιωμένη ενώ δε ξεχωρίζει καθόλου η βαθύτερη. Με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων, δηλαδή για ανάπτυγμα  $AM=1m$ , παρατηρεί κανείς ότι η εικόνα μοιάζει να προέρχεται από κάποια κυκλική δομή. Στο δεξιό τμήμα του *σχήματος 2.4.19* όπου οι δομές έχουν τοποθετηθεί βαθύτερα η εικόνα που παίρνουμε για το ανάπτυγμα  $AM=0,5m$  φαίνεται να προέρχεται από κάποια ημικυκλική, αν όχι κυκλική δομή. Ενώ στην εικόνα για ανάπτυγμα  $AM=1m$  του ίδιου σχήματος απεικονίζεται μια κυκλική δομή που όπως είναι γνωστό δεν έχει κανένα κοινό γνώρισμα με το μοντέλο *mod5* που χρησιμοποιήθηκε.

Σε όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν μέχρι στιγμής από το πιο απλό μέχρι το πιο σύνθετο και πολύπλοκο, υπάρχει ενσωματωμένος θόρυβος 3% και αυτό έγινε για να μοιάζει όσο το δυνατό περισσότερο το θεωρητικό μοντέλο στα πραγματικά δεδομένα. Οι δυνατότητες του προγράμματος επιτρέπουν στον χρήστη να εισάγει θόρυβο 3-5% με γκαουσιανή κατανομή. Μετά από δοκιμές σε διάφορα μοντέλα αποφασίστηκε η χρήση του θορύβου σε ένα επίπεδο 3% και το οποίο υπάρχει σε όλα τα μοντέλα.

Στο *σχήμα 2.4.20* απεικονίζεται η απόκριση του μοντέλου *mod5* χωρίς εισαγωγή θορύβου. Παρατηρούμε ότι η εικόνα είναι ευκρινέστερη.



Σχήμα 2.4.19 Απόκριση του μοντέλου του σχήματος 2.4.18 όπου υπάρχουν δυο δομές η μια κάτω από την άλλη. Στην αριστερή στήλη είναι η απόκριση όταν η μια δομή αυτή των τριών σωμάτων είναι σε βάθος 0,25m και η άλλη των δυο σωμάτων σε βάθος 0,5m. Στη δεξιά στήλη το όλο σύμπλεγμα της προσομοίωσης μετακινήθηκε βαθύτερα κατά 0,25m.

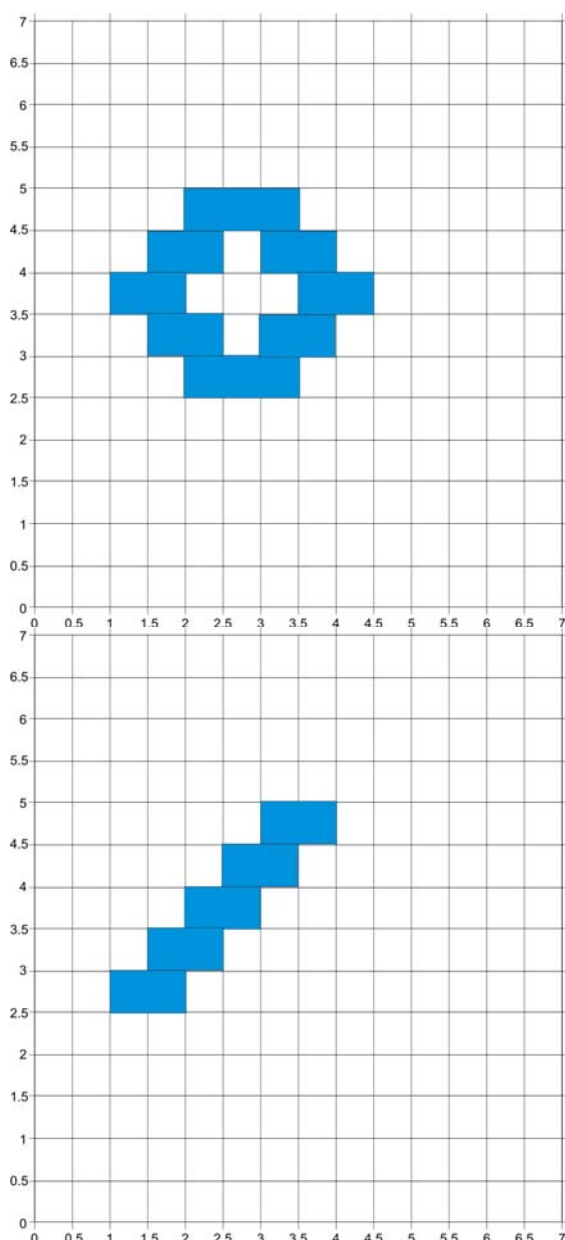


Σχήμα 2.4.20 Η προσομοίωση του Mod5 έχει δυο φάσεις στο σχήμα αριστερά η μια δομή βρίσκεται σε βάθος 0,25-0,5m και η άλλη στα 0,5-0,75m. Στη συνέχεια οι δομές έχουν μετατοπισθεί βαθύτερα, δηλαδή σε βάθος 0,5-0,75m και 0,75-1m αντίστοιχα. Τα σώματα έχουν αντίσταση 100 Ohm και ο χώρος που τα φιλοξενεί έχει αντίσταση 30 Ohm. Η διάφορα με το αποτέλεσμα του σχήματος 2.4.19, είναι ότι δεν υπάρχει καθόλου θόρυβος στα δεδομένα.

### **2.4.5 Απόκριση Διαφόρων άλλων Μοντέλων**

Τα δυο τελευταία μοντέλα που πραγματοποιήθηκαν αφορούν το ένα μία κυκλική δομή και το άλλο μία διαγώνια. Όπως προέκυψε από το προηγούμενο σχήμα ακόμα και μια δομή που δεν είναι κυκλική μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες, αν βρεθεί σε συμβολή με μία άλλη, να δώσει μία εικόνα η οποία να φαίνεται ότι προέρχεται από κάποια κυκλική δομή. Η δομή των μοντέλων αυτών φαίνεται στα παρακάτω *σχήμα 2.4.21*. Τα σώματα και στις δυο περιπτώσεις, έχουν αντίσταση 100 Ohmm και βρίσκονται σε χώρο με αντίσταση 30 ohmm.





Σχήμα 2.4.21 Κυκλική και Διαγώνια δομή. Τα σώματα και στις δυο περιπτώσεις, έχουν αντίσταση 100 Ohm και βρίσκονται σε χώρο με αντίσταση 30 ohm.

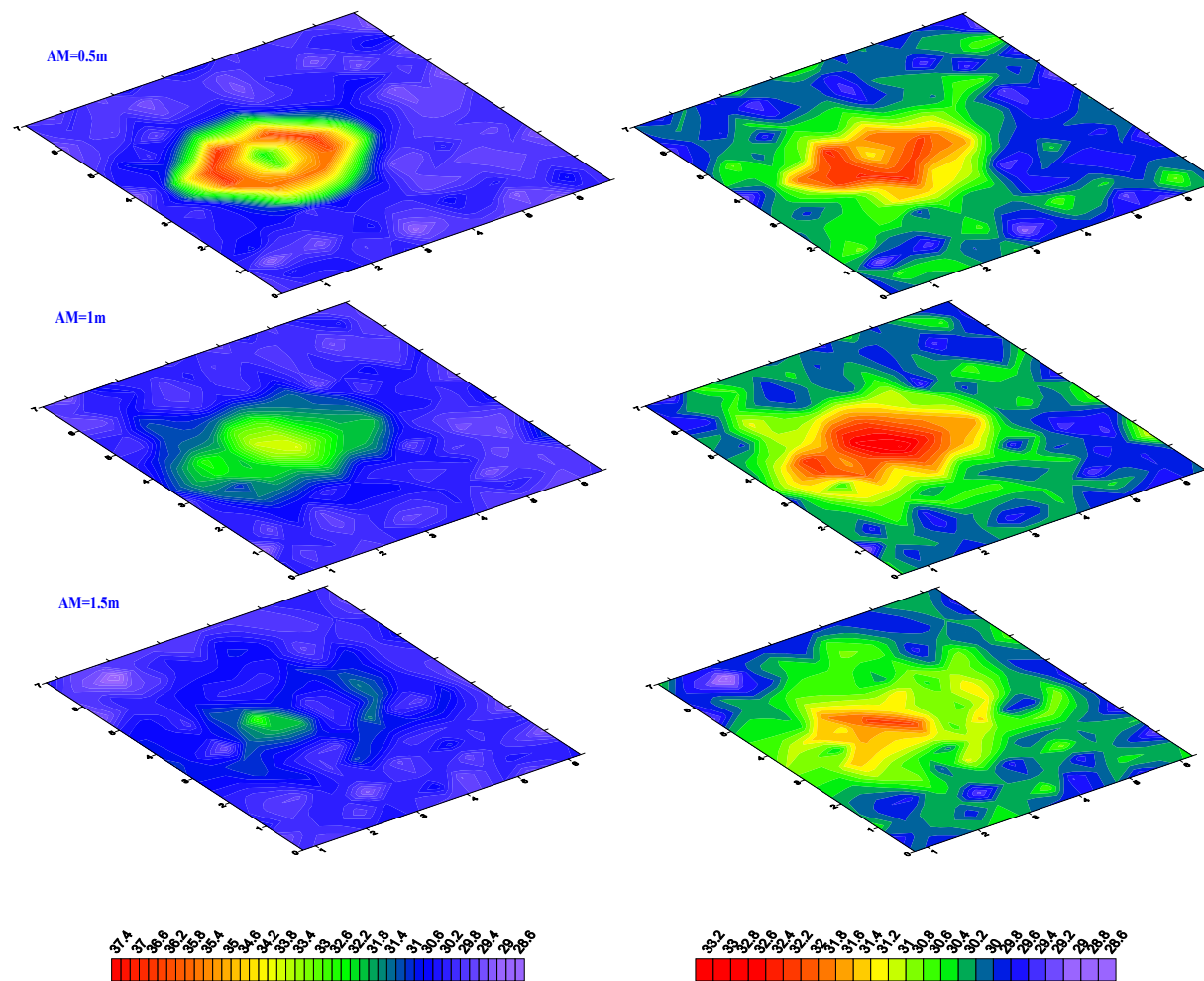
Τα μοντέλα αυτά κατασκευάστηκαν μόνο για βάθη 0,25m και 0,5m. Παρατηρώντας το σχήμα 2.4.22 είναι εμφανές ότι η κυκλική δομή απεικονίζεται με καλή ακρίβεια για το βάθος των 0,25m ενώ με λιγότερη για βάθος που αντιστοιχεί στα 0,5m και επίσης μοιάζει πολύ με την εικόνα που έδωσε το μοντέλο των διασταυρούμενων δομών. Όσον αφορά τέλος την διαγώνια δομή, από το σχήμα 2.4.23 φαίνεται ότι δεν έχει αρκετή ευκρίνεια ακόμα και σε μικρό βάθος 0,25m. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε, είναι

δυνατόν να αποδοθεί σε δυο σώματα μικρών διαστάσεων που βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο.

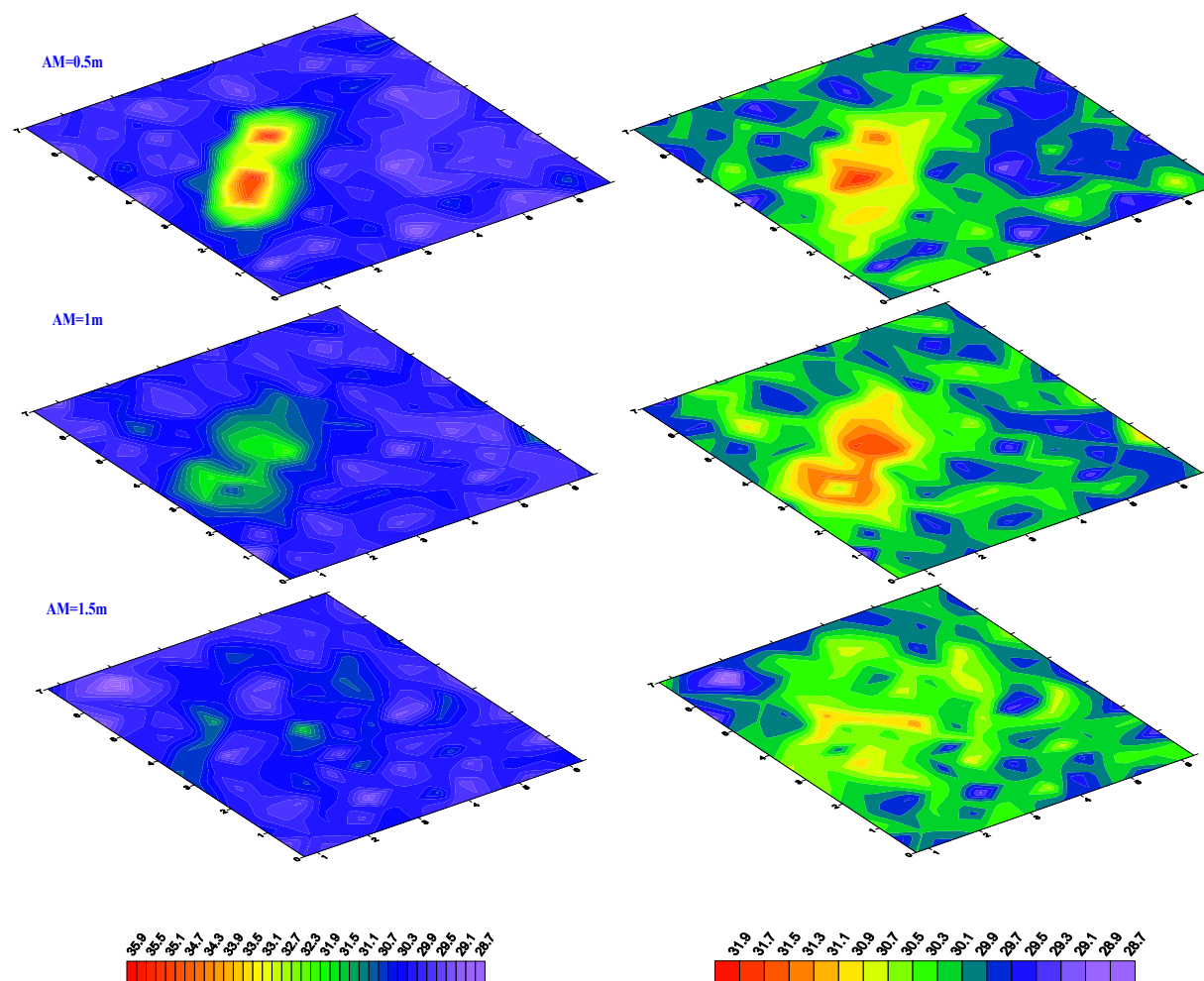
Τέλος έγινε μια δόκιμη στο αρχικό μοντέλο, *mod1* και σε ένα πιο σύνθετο, όπως στο μοντέλο, *mod3* να δοθεί η εικόνα τους με βήμα δειγματοληψίας και απόσταση οδεύσεως ίσες με 1m και όχι 0.5m που ήταν σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα. Όπως είναι αναμενόμενο η εικόνα ακόμη και αν τα σώματα βρίσκονται σε μικρό βάθος 0,25-0,5m, αλλοιώνεται σε σχέση με αυτή που πήραμε αρχικά, επειδή μειώνεται ο αριθμός των μετρήσεων, δηλαδή μειώνεται ο αριθμός των πληροφοριών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο *σχήμα 2.4.24* που ακολουθεί στις παρακάτω σελίδες. Τα γενικά χαρακτηριστικά των μοντέλων δεν έχουν αλλάξει, όλα τα σώματα έχουν αντίσταση είναι 100 Ohmm και βρίσκονται σε περιβάλλον με αντίσταση 30 Ohmm.

Για υπενθύμιση δίνεται η κάτοψη των μοντέλων *mod1* και *mod3*

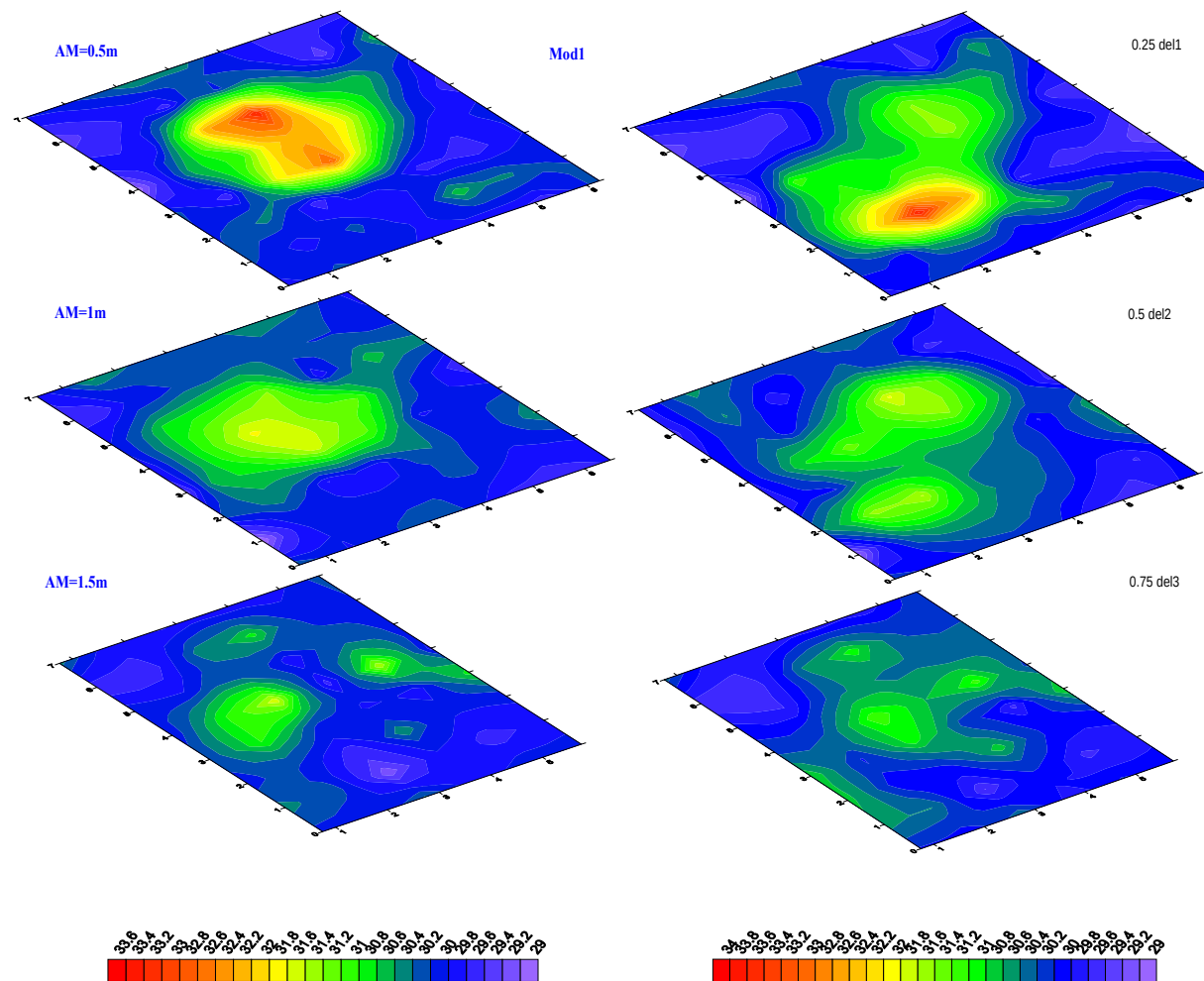




Σχήμα 2.4.22 Απόκριση κυκλικής δομής η οποία είναι θαμμένη σε βάθος 0,25m (αριστερά) και 0,5 (δεξιά). Αντίσταση περιβάλλοντος 30 Ohm και στόχου 100 Ohm.



Σχήμα 2.4.23 Αποτέλεσμα στην επιφάνεια από διαγώνια δομή στο υπέδαφος η οποία είναι θαμμένη σε βάθος 0,25m (αριστερά) και 0,5m (δεξιά). Αντίσταση περιβάλλοντος 30 Ohm και στόχου 100 Ohm.



Σχήμα 2.4.24 Απόκριση των προσομοιώσεων που ονομάστηκαν mod1 και mod3 για μετρήσεις με βήμα δειγματοληψίας 1m.

## **2.5 Συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη των μοντέλων.**

Συνοψίζοντας όλα τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από την μελέτη κάθε μοντέλου καταλήγουμε σε συμπεράσματα που αφορούν αρχικά την διάταξη πόλου-πόλου και την ανάλογή της, την διάταξη δίδυμου ηλεκτροδίου.

Το βασικό χαρακτηριστικό που μελετήθηκε ήταν το βάθος διείσδυσης της διάταξης αφού, όλα τα μοντέλα ανεξάρτητα από την δομή που έχουν τοποθετήθηκαν σε βάθη 0,25m, 0,5m και 0,75m. Ελέγχοντας λοιπόν τα αποτελέσματα παρατηρεί κανείς ότι τα διάφορα σώματα έχουν ευδιάκριτα όρια με το περιβάλλον όπου φιλοξενούνται δηλαδή είναι εύκολο να εντοπισθούν όταν βρίσκονται σε βάθος 0,25m αλλά επίσης εντοπίζονται με λίγη προσοχή και σε βάθη 0,5m. Σε μεγαλύτερο βάθος, για παράδειγμα, 0,75m η διάταξη φαίνεται ότι χάνει την ευαισθησία και τα σώματα γίνονται δυσδιάκριτα.

Για να εντοπισθεί με αυτή την διάταξη κάποιο σώμα το οποίο είναι θαμμένο σε βάθος 0,75m ή μεγαλύτερο, χρειάζεται να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των κινουμένων ηλεκτροδίων. Έτσι αυξάνει το βάθος διείσδυσης το οποίο μπορεί να έχει μια διάταξη. Με αυτόν τον τρόπο όμως δεν αυξάνει και η διακριτική ικανότητα της διάταξης. Με την αύξηση της απόστασης των κινούμενων ηλεκτροδίων είναι δυνατόν να εντοπισθεί το σώμα περισσότερες φορές κατά την μετακίνηση των ηλεκτροδίων παίρνουμε μια εικόνα παραμορφωμένη. Το γεγονός αυτό εντείνεται όσο πιο πολύπλοκη και σύνθετη γίνεται η δομή του μοντέλου.

Αν τώρα το σώμα έχει μεγαλύτερο πλάτος από το άνοιγμα των κινουμένων ηλεκτροδίων τότε θα είναι πιο εύκολο στον εντοπισμό του. Από τα διάφορα αναπτύγματα (AM) που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις προσομοιώσεις συμπεραίνεται ότι υπάρχει υψηλή ευκρίνεια στο μικρότερο ανάπτυγμα και λιγότερο στο δεύτερο 1m, ενώ στο τρίτο 1.5m έχουμε μια εντελώς παραμορφωμένη εικόνα.

Από την μελέτη των μοντέλων προκύπτει ότι η αντίσταση που έχουν τα σώματα αλλά και ο χώρος μέσα στο οποίο βρίσκονται, αποτελούν καθοριστικό



παράγοντα για τον εντοπισμό τους. Όταν τα σώματα που έχουν παραπλήσια αντίσταση με αυτή του περιβάλλοντος που τα φιλοξενεί, είναι δύσκολο να εντοπισθούν ακόμα και αν βρίσκονται σε μικρό βάθος. Ενώ όσο η αντίθεση των αντιστάσεων γίνεται μεγαλύτερη διακρίνονται τα όρια των σωμάτων πιο εύκολα.

Επίσης από τα μοντέλα που προηγήθηκαν είναι φανερό ότι όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα της δομής αυτών τόσο πιο παραμορφωμένη εικόνα παίρνουμε πολύ δε περισσότερο, υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούν δυο διαφορετικά μοντέλα με διαφορετική διάταξη να δώσουν την ίδια εικόνα όπως έγινε το μοντέλο με τις διασταυρούμενες φάσεις και το μοντέλο με την κυκλική δομή.

Τέλος είναι φανερό ότι όσο πυκνώνει το βήμα δειγματοληψίας τόσο καλύτερη εικόνα θα έχουμε γεγονός που φαίνεται στο τελευταίο μοντέλο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η λήψη των δεδομένων αποτελεί πρωταρχικής σημασίας διαδικασία η οποία πρέπει να γίνεται με προσοχή και υπευθυνότητα. Αυτή θα αποτελέσει την βάση για τις περαιτέρω επεξεργασίες που θα οδηγήσουν σε σωστά αποτελέσματα.

### ***3.1.1 Διαδικασία λήψης δεδομένων ηλεκτρικής χαρτογράφησης στον αρχαιολογικό χώρο της Απολλωνίας.***

Οι μετρήσεις με την μέθοδο της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης, πραγματοποιήθηκαν στην αγροτική περιοχή της Νέας Απολλωνίας, κατά το χρονικό διάστημα 12/8 έως 25/9/2003. Η συγκεκριμένη περιοχή φιλοξενεί τα ερείπια της αρχαίας Απολλωνίας. Η συλλογή πραγματοποιήθηκε εκ περιτροπής μέσα στο εν λόγω χρονικό διάστημα. Αυτό οφειλόταν στη παρεμβολή ξηρών περιόδων, κατά τη διάρκεια των οποίων δεν ήταν δυνατή η λήψη των μετρήσεων. Στην περιοχή είναι εμφανή τα λείψανα των εξωτερικών τοίχων της αρχαίας πόλης καθώς και απομεινάρια κάποιων πύργων που αποτελούν μέρος αυτών.

Η έρευνα είχε αναγνωριστικό χαρακτήρα. Σκοπός της ήταν ο εντοπισμός θαμμένων οικοδομικών λειψάνων στο υπέδαφος και η κατά το δυνατόν χαρτογράφηση τους. Συνολικά καλύφθηκαν 19200m<sup>2</sup>, τα οποία ευρίσκονται μέσα στο οχυρωμένο τμήμα της αρχαίας πόλης. Η έκταση που εξερευνήθηκε κατατμήθηκε σε κελιά (τετράγωνα) διαστάσεων 20m x 20m. Τα κελιά αυτά υλοποιήθηκαν στο έδαφος από την τοπογράφο κα. Ελένη Παπαδημητρίου της ΙΣΤ' Εφορείας Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων. Σε κάθε κελί υλοποιήθηκε ξεχωριστά κάρβανος μετρήσεων με κόμβους ανά 1m. Σε κάθε κόμβο πραγματοποιήθηκε ηλεκτρική μέτρηση.

Η γεωμετρική εξάρτηση των γεωφυσικών κελιών στον τοπογραφικό χάρτη της περιοχής έγινε σε προβολή ΕΓΣΑ 1987. Οι συντεταγμένες, από την

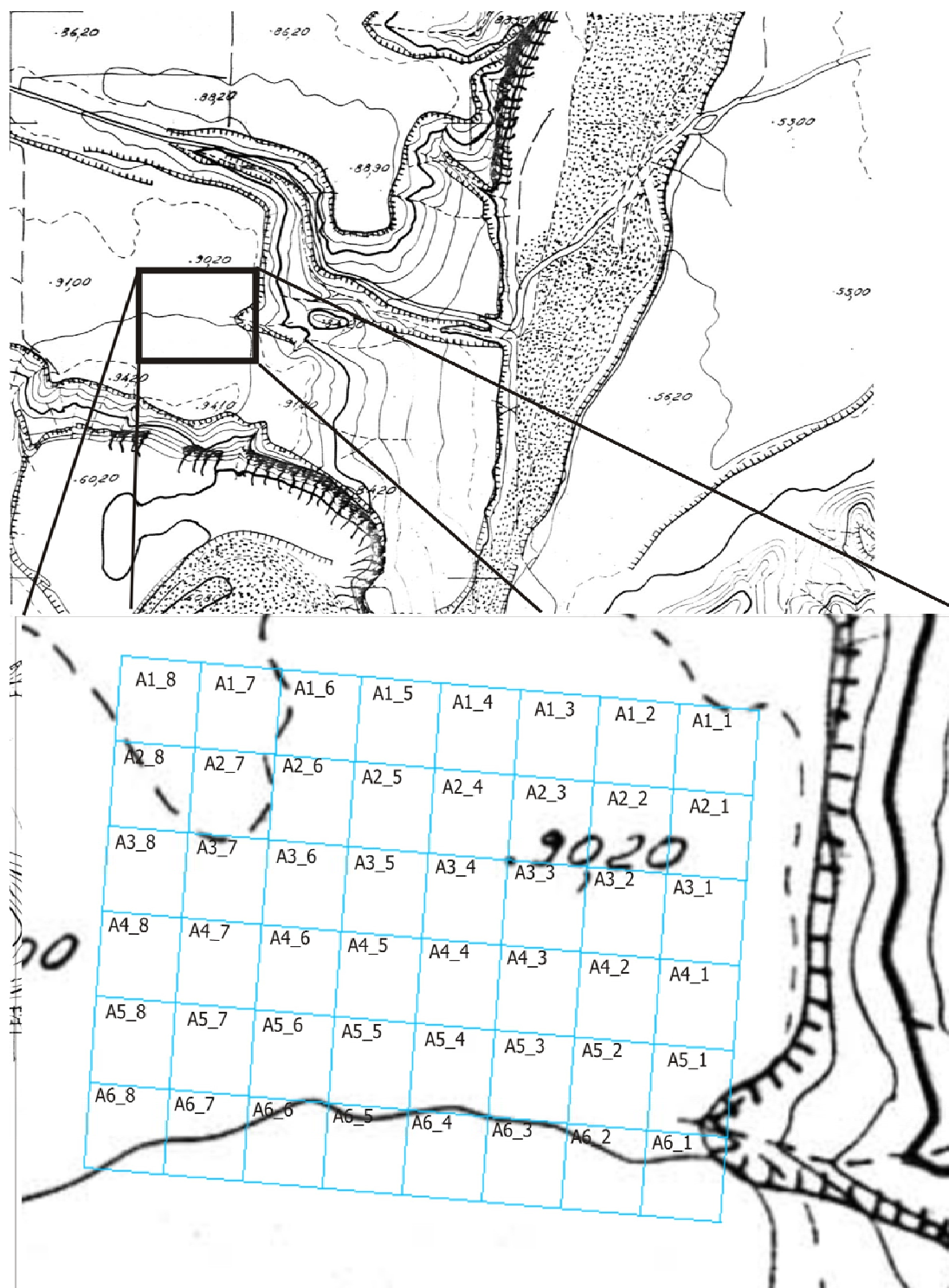
ορθή γωνία που ξεκίνησε η λήψη των μετρήσεων στην περιοχή μελέτης στη Ν Απολλωνίας δίνονται παρακάτω

| Latitude    | Longitude   | Altitude(m) |
|-------------|-------------|-------------|
| N40°37.414' | E23°28.276' | 103         |
| N40°37.417' | E23°28.221' | 104         |
| N40°37.372' | E23°28.274' | 106         |

Στη φωτογραφία του σχήματος 3.1 φαίνεται το συνεργείο κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου. Στις φωτογραφίες διακρίνεται το συμπαγές σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για την μετακίνηση των ηλεκτροδίων σε κάθε νέα θέση μέτρησης. Το όργανο Rm15 της εταιρείας *Geoscan Research* που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, είναι στέρεα συνδεδεμένο στο σύστημα έτσι ώστε να αποτελεί μαζί με αυτό ενιαίο σύνολο. Είναι φανερό ότι το σύνολο είναι ελαφρύ, ανθεκτικό και ευέλικτο στη χρήση. Τα συγκεκριμένα κελία διαστάσεων 20X20m<sup>2</sup> που υλοποιήθηκαν στο έδαφος, και τα συμβατικά ονόματα που δώσαμε, φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 3.2.



Σχήμα 3.1 Το όργανο μέτρησης Rm15 της εταιρείας *Geoscan Research* και το συνεργείο κατά την πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων στη περιοχή της Απολλωνίας



Σχήμα 3.2 Τα κελιά του αρχαιολογικού χώρου στην αγροτική περιοχή διαστάσεων 20x20m που πραγματοποιήθηκαν στη περιοχή της Νέας Απολλωνίας. Η ονομασία τους περιλαμβάνει με το πρόθεμα A και έναν αριθμό που αντιστοιχεί στη γραμμή και την στήλη που βρίσκεται κάθε κελί, ξεκινώντας από την πάνω δεξιά γωνία όπου έχουν καθοριστεί οι συντεταγμένες της.

### **3.1.2 Ηλεκτρική Διασκόπηση στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας.**

Η Γεωφυσική Διασκόπηση με τη μέθοδο της γεωηλεκτρικής χαρτογράφησης, πραγματοποιήθηκε στη θέση Καμπάνα κοντά στο αρχαίο θέατρο της Μαρώνειας κατά την περίοδο 15-18/9/2004. Στην ίδια θέση είχε προηγηθεί γεωμαγνητική χαρτογράφηση. Η θέση φιλοξενεί αρχαία οικοδομικά λείψανα πράγμα το οποίο τεκμαίρεται από την κεραμική που ευρίσκεται επιφανειακά, αλλά και από τα αποτελέσματα της μαγνητικής χαρτογράφησης που προηγήθηκε. Η ηλεκτρική έρευνα έγινε με σκοπό την ανίχνευση θαμμένων δομών και την πιστοποίηση των ανιχνεύσεων της μαγνητικής μεθόδου στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση

Η Ηλεκτρική Διασκόπηση πραγματοποιήθηκε σε έκταση περίπου 5500 m<sup>2</sup> και η περιοχή αυτή χωρίστηκε σε καννάβους 20x20m όπου έγιναν μετρήσεις με βήμα δειγματοληψίας και απόσταση μεταξύ των οδεύσεων ίσες με 1m.

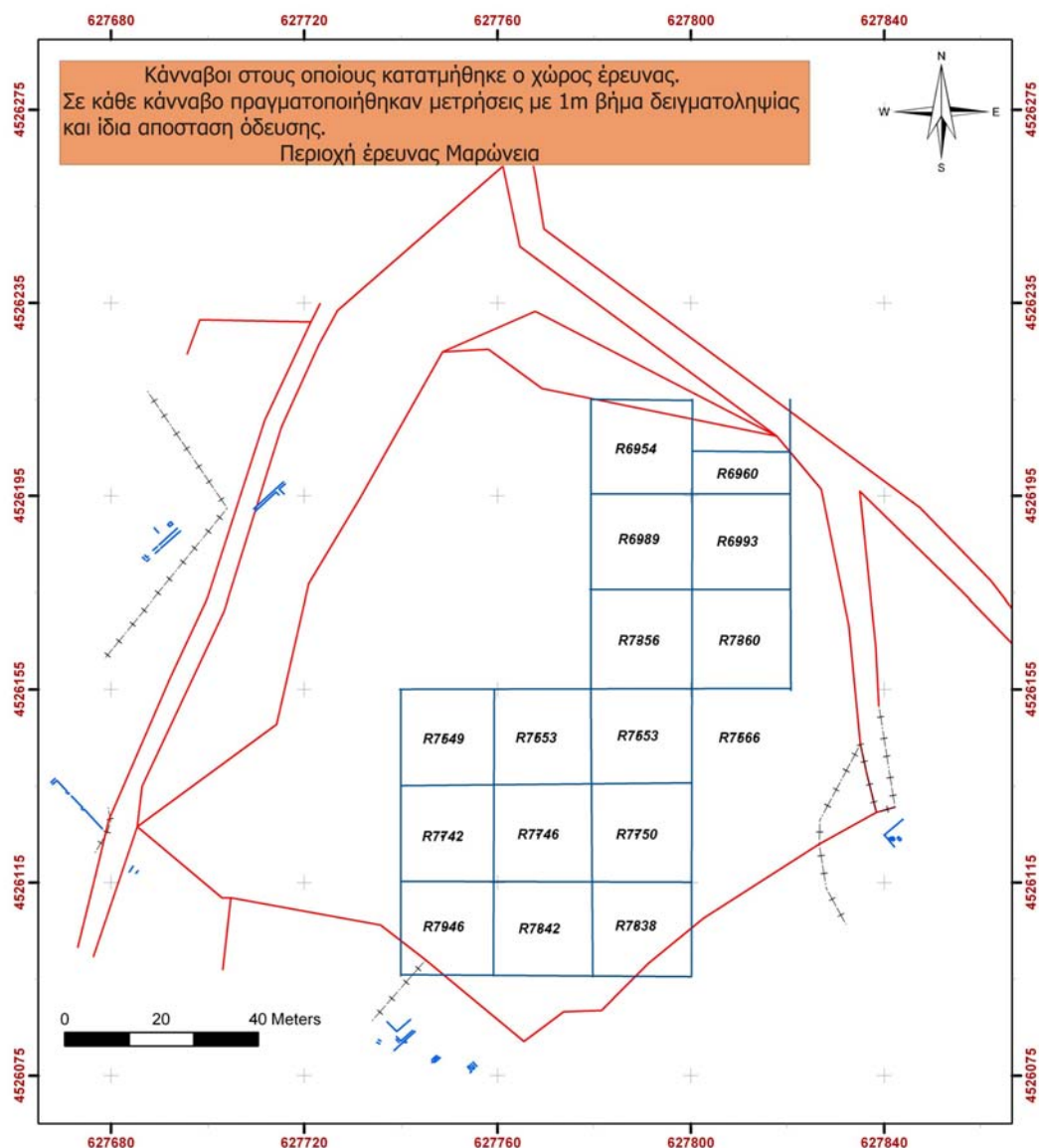
Η έρευνα αυτή συνιστούσε ερευνητικό έργο του Αριστοτέλειου Πανεπιστήμιου Θεσσαλονίκης (αρ. 80021, Επιτροπή Ερευνών Α.Π.Θ) με τίτλο "Γεωφυσική διασκόπηση στην ευρύτερη περιοχή του αρχαίου θεάτρου στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας". Η χρηματοδότηση του έργου έγινε από την ΙΘ' - Εφορεία Προϊστορικών και Κλασικών Αρχαιοτήτων (ΙΘ' - ΕΠΚΑ), με ευθύνη της αρχαιολόγου κα. Χρύσας Καραδήμα.

Στη φωτογραφία του σχήματος 3.3 φαίνεται το συνεργείο κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου. Τα συγκεκριμένα κελιά διαστάσεων 20X20m<sup>2</sup> που υλοποιήθηκαν στο έδαφος, και τα συμβατικά ονόματα που δώσαμε, φαίνονται στο χάρτη του σχήματος 3.4.





Σχήμα 3.3 Το συνεργείο κατά την πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας.



Σχήμα 3.4 Κελιά διαστάσεων 20m x 20m που πραγματοποιήθηκαν στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας. Η ονομασία τους έγινε με το πρόθεμα R και έναν αριθμό που αντιστοιχεί στη σήμανση της βορειοδυτικής γωνίας κάθε καννάβου όπως αυτή αναφέρεται στο τοπογραφικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε.

### **3.2 Μαγνητική Διασκόπηση στη θέση Καμπάνα της Μαρώνας.**

Στην περίπτωση εξερεύνησης αρχαιολογικών χώρων, οι δομές στόχοι που βρίσκονται στο υπέδαφος και πρέπει να ανιχνευθούν, είναι γενικά μικρών διαστάσεων. Το γεγονός αυτό καθιστά τις μαγνητικές ανωμαλίες που αυτές παράγουν, μικρού πλάτους και μικρού μήκους κύματος σε σύγκριση με τα σήματα που καταγράφονται σε άλλες εφαρμογές της μαγνητικής μεθόδου (π.χ. μεταλλευτική έρευνα).

Επομένως, οι ανωμαλίες που καταγράφονται κατά την μαγνητική διασκόπηση αρχαιολογικών χώρων είναι γενικά ασθενείς. Τα όργανα όμως που τις μετρούν έχουν υψηλή ακρίβεια η οποία είναι συνήθως της τάξης του 0,1-1nT. Επίσης απαιτείται μεγάλη ευαισθησία και αξιοπιστία. Επιπλέον, οι ανωμαλίες αυτές έχουν εξαιρετικά περιορισμένη έκταση στο χώρο. Δηλαδή, θεωρούμενες ως σήματα που προέρχονται από το υπέδαφος παρουσιάζουν μικρό μήκος κύματος. Συνεπώς για να καταγραφούν πλήρως και χωρίς φαινόμενα δίπλωσης (aliasing) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί λεπτομερής κάνναβος μετρήσεων (Τσόκας 1990). Είναι φανερό, ότι η λεπτομέρεια του καννάβου μετρήσεων αντισταθμίζεται από τα διαθέσιμα μέσα και τον απαιτούμενο χρόνο. Έτσι, η τελική απόφαση για τη λεπτομέρεια του καννάβου λαμβάνεται συνεκτιμώντας τα μέσα με το επιθυμητό επιστημονικό αποτέλεσμα.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να πούμε ότι υπεδάφια λείψανα της ανθρώπινης δραστηριότητας, με μαγνητικές ιδιότητες διαφορετικές από αυτές του περιβάλλοντος που φιλοξενούνται, αλλάζουν σε μικρό γενικά βαθμό το τοπικό μαγνητικό πεδίο. Αυτή η μικρή παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου παρατηρείται σαν μία "ανωμαλία" στις μετρήσεις.

Περιοχές με αυξημένη μαγνήτιση (εξ' επαγωγής ή παραμένουσα) σε σύγκριση με αυτή του περιβάλλοντος εδάφους παρουσιάζονται ως θετικές ανωμαλίες, ενώ περιοχές με μειωμένη μαγνήτιση παρουσιάζονται ως αρνητικές ανωμαλίες. Και τα δύο είδη μαγνητικών ανωμαλιών είναι ενδιαφέροντα στην διαδικασία ερμηνείας των μαγνητικών δεδομένων. Τάφροι, εστίες καύσης,



αρχιτεκτονικές δομές ή συγκεντρώσεις οργανικού υλικού μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρές (θετικές ή αρνητικές) μαγνητικές ανωμαλίες.

Η εφαρμοσιμότητα της μεθόδου ελέγχθηκε πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετίας του 1950. (Aitken 1974) και έκτοτε αποτελεί βασική και κλασική μέθοδο εξερεύνησης αρχαιολογικών χώρων.

Στη περίπτωση του αρχαιολογικού χώρου της Μαρώνειας στη θέση Καμπάνα επιλέχθηκε η μαγνητική χαρτογράφηση κυρίως λόγω του ξηρού της περιόδου όπου έπρεπε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις πεδίου. Στην απόφαση αυτή συνηγόρησε η επιτόπια κατόπτευση του χώρου που πραγματοποιήθηκε από τον καθηγητή Γρ. Τσόκα το καλοκαίρι του 2004 και η ταυτόχρονη εκτίμηση των γεωφυσικών παραμέτρων. Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της μεθόδου και των παραμέτρων έπαιξε και η συζήτηση με την Δρ. Χρύσα Καραδήμα σχετικά με τις αναμενόμενες υπεδάφειες δομές.

Η αρχή της μεθόδου της μαγνητικής διασκόπησης βασίζεται στον εντοπισμό μεταβολών της μαγνήτισης του υπεδάφους, ανιχνεύοντας ανωμαλίες του γήινου μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης. Δηλαδή, ανιχνεύονται τοπικές μεταβολές της έντασης του γεωμαγνητικού πεδίου τις οποίες αποδίδουμε στην ύπαρξη διαφοράς μαγνήτισης στα υλικά του φλοιού της Γης. Η καταγραφή των ανωμαλιών αυτών πραγματοποιείται με μεγάλης ακρίβειας μετρήσεις σε κατά το δυνατόν λεπτομερή κάρναβο.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε την ύπαρξη δομής στο υπέδαφος η οποία έχει μαγνητική επιδεκτικότητα της τάξης των  $10^{-3}$  και βρίσκεται θαμμένη σε περιβάλλον με επιδεκτικότητα  $10^{-5}$ . Τότε, το γήινο μαγνητικό πεδίο, που συμβολίζεται με το γράμμα **H**, δημιουργεί εξ' επαγωγής μαγνήτιση

$$\mathbf{M} = \Delta\mathbf{k} \times \mathbf{H}$$

στη δομή, όπου  $\Delta\mathbf{k} = 10^{-2}$ . Επομένως δημιουργείται ένα νέο πεδίο **H'** το οποίο συντίθεται με το επάγον αίτιο, **H**, και δίνει συνισταμένη, τη μαγνητική επαγωγή, **B**. Το μέτρο του διανύσματος **B** είναι αυτό που μετράται κατά την πραγματοποίηση μαγνητικής διασκόπησης. Επειδή οι περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζονται παραμαγνητικοί, η ένταση της μαγνήτισης είναι

σχετικά ασθενής. Αυτό εύκολα συνάγεται από έναν απλό πολλαπλασιασμό των τιμών του  $\Delta k$  με τη μέση ένταση του γήινου μαγνητικού πεδίου που είναι της τάξης των 0.5 Oe.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι μέτρησης των μαγνητικών πεδίων. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε διαφορικό μαγνητόμετρο ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής. Το όργανο αυτό έχει δύο φωρατές που απέχουν συγκεκριμένη κατακόρυφη απόσταση μεταξύ τους, οι φωρατές μετρούν ταυτόχρονα το γήινο πεδίο και στη συνέχεια γίνεται αφαίρεσή των μετρήσεων, με αυτόν τον τρόπο εξαλείφεται η επίδραση λόγω χρονικής μεταβολής του γήινου μαγνητικού πεδίου, εφ' όσον η μέτρηση είναι ταυτόχρονη.

Στην παρούσα έρευνα έγινε χρήση του μαγνητομέτρου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής (*Geoscan FM256 - Fluxgate Gradiometer*) το οποίο μετρούσε την διαφορά της έντασης της κατακόρυφης συνιστώσας του γήινου μαγνητικού πεδίου ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικά επίπεδα (ύψη) από την επιφάνεια του εδάφους. Με την μέθοδο αυτή έγινε εφικτή η εξομάλυνση των γεωλογικών τάσεων, η άμβλυνση των εξωτερικών παρεμβολών λόγω της εγγύτητας της περιοχής σε συρματοπλέγματα και άλλους εξωγενείς παράγοντες θορύβου και η αποφυγή διορθώσεων λόγω της ημερήσιας μεταβολής της έντασης του ολικού μαγνητικού πεδίου.

Το FM256 διαφορικό μαγνητόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα (σχήμα 3.5), έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι ταχύτατο, εύχρηστο, αδιάβροχο, σχετικά εύρωστο και εξαιρετικά αξιόπιστο έτσι ώστε να χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα στόχων (αρχαιολογικών, περιβαλλοντικών, γεωλογικών και στρατιωτικών). Οι αρχαιολογικοί στόχοι περιέχουν πυρίμαχες δομές όπως φούρνους και εστίες φωτιάς καθώς επίσης και υλικά μεγάλης μαγνητικής επιδεκτικότητας όπως ορύγματα, κεραμικά κλπ. Οι δομές αυτές παράγουν μετρήσιμες ανωμαλίες και η πυκνή λήψη μετρήσεων επιτρέπει την χαρτογράφηση και πολλές φορές την αναγνώρισή τους.



Σχήμα 3.5 Αποψη του διαφορικού μαγνητομέτρου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής ροής (Geoscan FM256 - Fluxgate Gradiometer).

Οι μαγνητικές διασκοπήσεις πραγματοποιήθηκαν στη θέση Καμπάνα κοντά στο αρχαίο θέατρο της Μαρώνειας και έλαβαν χώρα από την 15<sup>η</sup>/9 έως την 18<sup>η</sup> /9/2004. Η θέση φιλοξενεί αρχαία οικοδομικά λείψανα όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στόχος της έρευνας αυτής ήταν η ανίχνευση θαμμένων δομών στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, οι οποίες είναι υπολείμματα χρήσης του χώρου κατά το παρελθόν, και η κατά το δυνατόν χαρτογράφησή τους.

Η έρευνα αυτή εντάσσεται στο ίδιο πλαίσιο ερευνητικού έργου του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης το οποίο αναφέρθηκε προηγούμενα.

Πιο συγκεκριμένα χαρτογραφήθηκε η κατακόρυφη συνιστώσα του διαφορικού ολικού μαγνητικού πεδίου, σε έκταση περίπου 11200m<sup>2</sup>, αναμένοντας να εμφανιστούν διαταραχές που αντανακλούν την ύπαρξη υπεδάφινων λειψάνων της παρελθούσας ανθρώπινης παρέμβασης στο χώρο. Στόχος ήταν η καταγραφή και αναγνώριση κατά το δυνατόν μικρότερων λεπτομερειών και γι αυτό ο χώρος χωρίστηκε σε καννάβους (*grids*) διαστάσεων 20x20m<sup>2</sup>. Οι μετρήσεις με τη μέθοδο της μαγνητικής χαρτογράφησης στην περιοχή, πραγματοποιήθηκαν με βήμα δειγματοληψίας και απόσταση οδεύσεων 0.5 m. Η διαδικασία αυτή διευκόλυνε τα μέγιστα στην αντιμετώπιση των τοπογραφικών ανωμαλιών αλλά και της βλάστησης γιατί παρείχε σχετική ευελιξία κινήσεων.

Στη φωτογραφία του σχήματος 3.6 φαίνεται το συνεργείο κατά τη διάρκεια των εργασιών πεδίου. Οι συγκεκριμένοι κάνναβοι διαστάσεων  $20 \times 20 \text{m}^2$  που υλοποιήθηκαν στο έδαφος, και τα συμβατικά ονόματα που δώσαμε, δίνονται στο χάρτη του σχήματος 3.7.

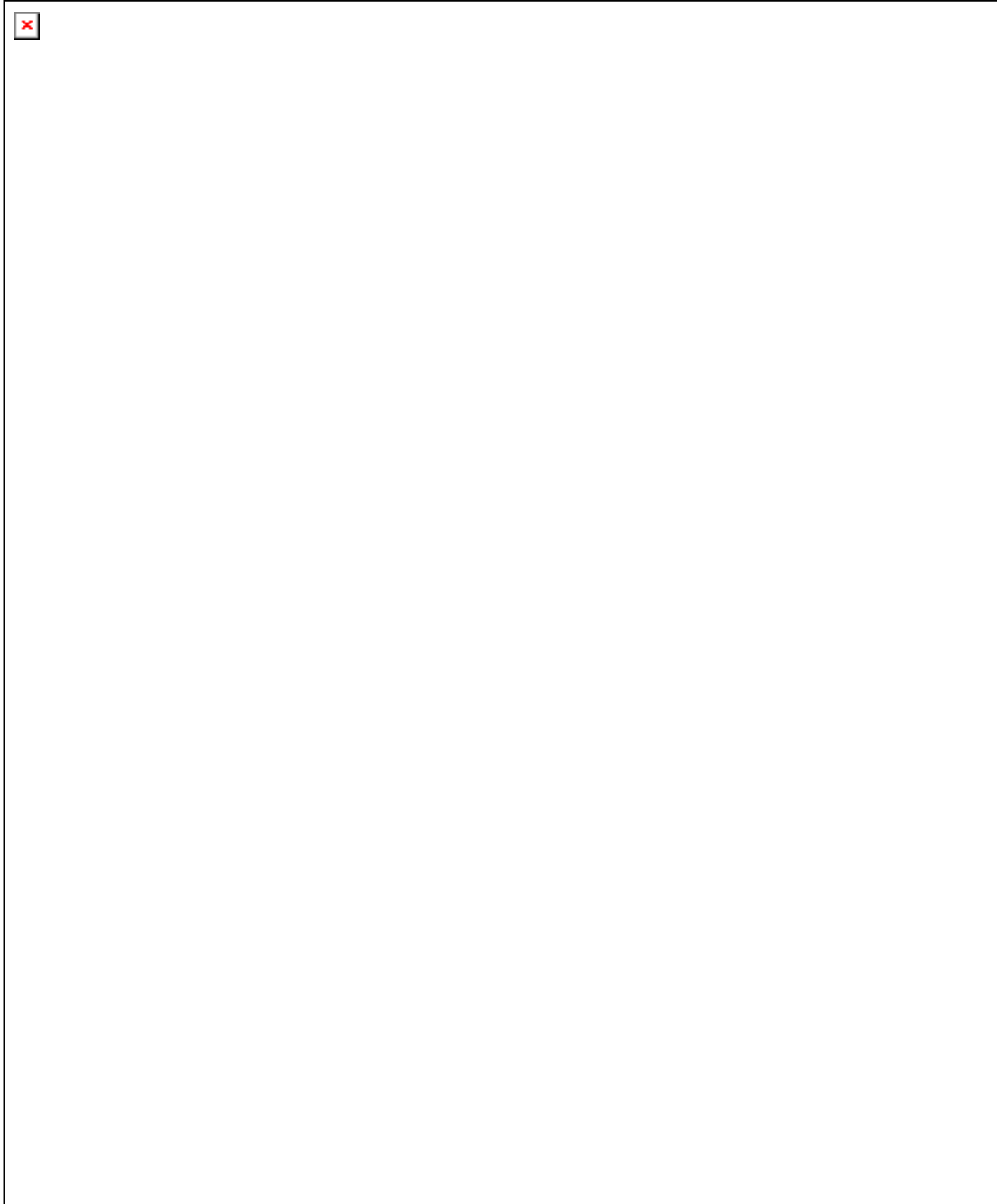
Ο φωρατής του οργάνου καταγραφής (κατώτερος) τοποθετήθηκε σε ύψος 0.4m από το έδαφος με σκοπό την κατά το δυνατόν απομάκρυνση των ανωμαλιών (σημάτων) που θα δημιουργούσαν οι αρόσεις και διάφορες άλλες μικρές ανομοιογένειες του αναγλύφου.

Όπως αναφέρθηκε, η χρήση διαφορικού μαγνητομέτρου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής, αναιρεί την ανάγκη αφαίρεσης της ημερήσιας μεταβολής του γήινου μαγνητικού πεδίου.

Κάθε διαφορετική ημέρα μετρήσεων, γινόταν μηδενισμός της ένδειξης του οργάνου και έλεγχος επαναληψιμότητας της μέτρησης σε όλες τις διευθύνσεις. Η διαδικασία αυτή λάμβανε χώρα σε συγκεκριμένο σημείο.



*Σχήμα 3.6 Μετρήσεις της βαθμίδας του ολικού μαγνητικού πεδίου στη θέση Καμπάνα κοντά στο αρχαίο θέατρο της Μαρώνας.*



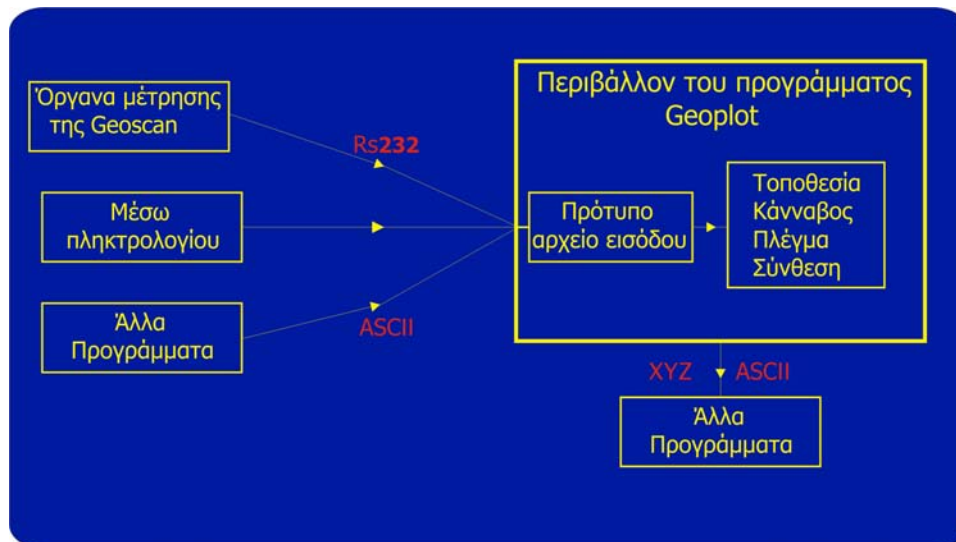
Σχήμα 3.7 Κελιά διαστάσεων  $20 \times 20 m^2$  που πραγματοποιήθηκαν στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας. Η ονομασία τους έγινε με το πρόθεμα Μ και έναν αριθμό που αντιστοιχεί στη σήμανση της βορειοδυτικής γωνίας κάθε καννάβου όπως αυτή αναφέρεται στο τοπογραφικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η επεξεργασία των μετρήσεων τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών έγινε με την βοήθεια του προγράμματος *Geoplot 3.0* και παρακάτω περιγράφονται τα βήματα της επεξεργασίας.

### 4.1 Επεξεργασία των μετρήσεων με το λογισμικό *Geoplot 3.0*

Τα δεδομένα που συλλέγονται στο πεδίο έρευνας μπορούν να μεταφερθούν στο πρόγραμμα *Geoplot 3.0*, με διάφορες μεθόδους. Αυτό γίνεται συνήθως απευθείας από τη μνήμη του οργάνου τα όργανα Rm15 και FM256, διαμέσου καλωδίου RS232. μπορεί επίσης να γίνει εισαγωγή εξωτερικά από το πληκτρολόγιο, είτε να τα διαβάσει το πρόγραμμα από κάποιο αρχείο σε κώδικα *ASCII*. Το *Geoplot 3.0* χρησιμοποιεί ένα αρχείο πρότυπο εισόδου των μετρήσεων (*Input template*) το οποίο βοηθά στην μεταφορά των μετρήσεων υπαίθρου και στην μετέπειτα αποθήκευση τους καθώς και στην οργάνωση αυτών εσωτερικά σε δικά του αρχεία με μορφές που ονομάζονται *site*, *grid*, *mesh* και *composite*. Εφόσον δημιουργηθούν μια φορά τα αρχεία αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι δυνατότητες του προγράμματος για την επεξεργασία και την παρουσίαση των δεδομένων. Τα αρχικά και τα επεξεργασμένα στοιχεία μπορούν μετέπειτα να χρησιμοποιηθούν από άλλα προγράμματα με την μορφή αρχείων που είναι είτε ο πίνακας τιμών ή μονόστηλο αρχείο με το ζεύγος των συντεταγμένων κάθε σημείου και την τιμή του πεδίου. Στο *σχήμα 4.1* φαίνονται οι πέντε τρόποι τους οποίους χρησιμοποιεί το *Geoplot 3.0* για να εισάγει και να οργανώσει τα δεδομένα στο δικό του περιβάλλον.



Σχήμα 4.1. Μεταφορά δεδομένων από και προς το πρόγραμμα Geoplot 3.0, τροποποιημένο σχήμα από Instruction Manual 1.01, 1994

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη εισαγωγή αυτών των όρων για την κατανόηση της χρήσης τους.

**Site** (τοποθεσία): είναι το όνομα που δίνεται στη συγκεκριμένη έρευνα και χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί ένας κατάλογος όπου τοποθετούνται οι κάνναβοι (*grid*) τα πλέγματα (*mesh*) και η σύνθεση αυτών (*composite*). Το *site* μπορεί να αποτελείται από πολλούς καννάβους.

**Grid** (κάνναβος): είναι ένα αρχείο που σχεδιάστηκε για να περιέχει τα αρχικά δεδομένα της έρευνας. Μια περιοχή *site* συνήθως διαχωρίζεται σε ένα αριθμό μικρότερων μονάδων που ονομάζονται κάνναβοι και ο καθένας αντιστοιχεί στα κελιά που πραγματοποιήθηκαν στο έδαφος. Ο καθένας από αυτούς μετρίεται και περιέχει τα αρχικά δεδομένα. Στο παρακάτω σχήμα 4.2 απεικονίζεται μια υποθετική έρευνα και φαίνονται μερικοί κάνναβοι με ονόματα από το 1 μέχρι το 12. Ένας τυπικός κάνναβος έχει διαστάσεις 20x20 m και βήμα δειγματοληψίας 1m όπως έγινε στη παρούσα εργασία, αν και αυτό μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την έρευνα που γίνεται.

**Mesh template** (πλέγμα): είναι ένα αρχείο όπου δηλώνεται, με πια διάταξη είναι τοποθετημένοι στο χώρο οι κάνναβοι. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι κάνναβοι είναι ανεξάρτητοι και ακόμα είναι αποθηκευμένη σε επιμέρους αρχεία καθώς και ότι το αρχείο του πλέγματος δεν περιέχει μετρήσεις. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται πως μπορεί μια τοποθεσία να χωριστεί σε

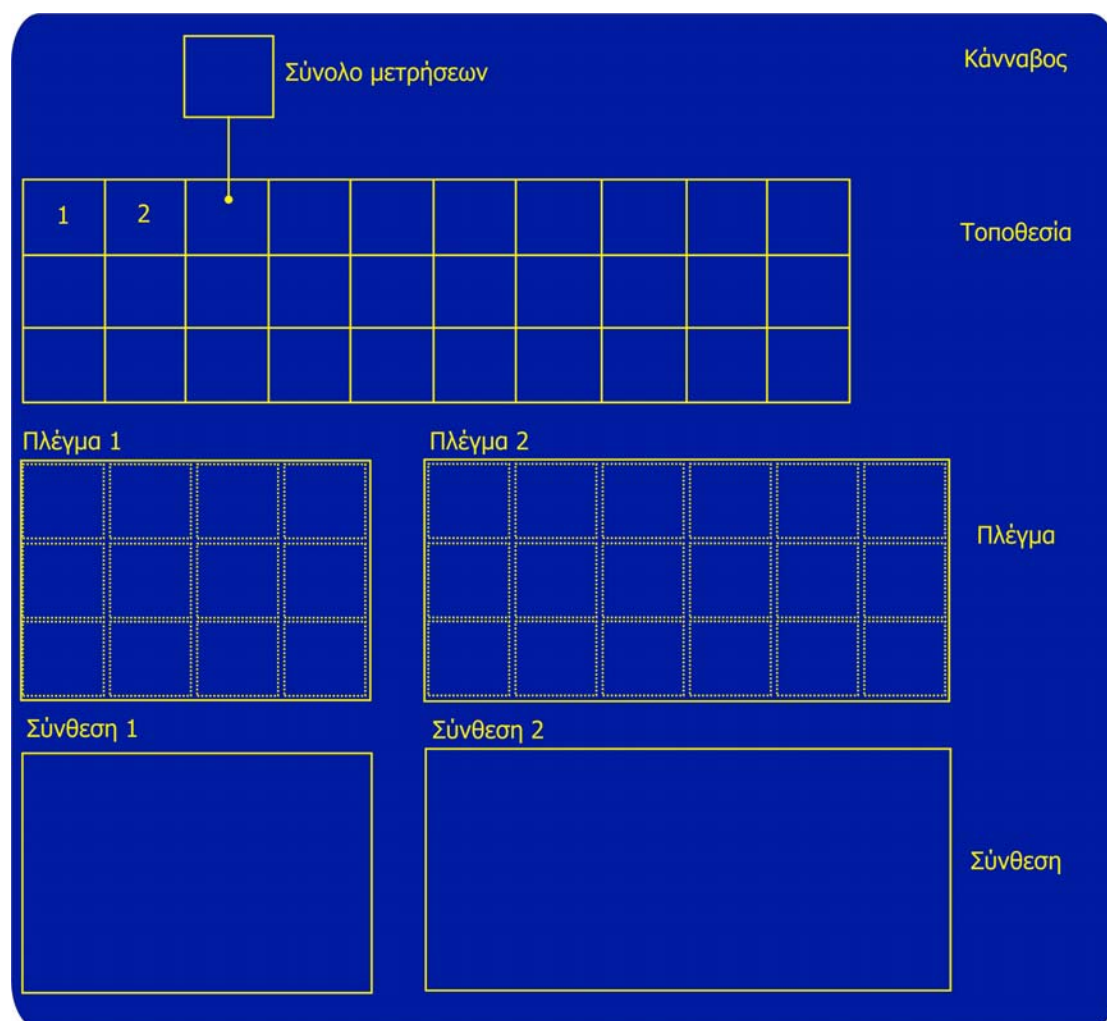


δύο ή περισσότερα πλέγματα ανάλογα με το μέγεθος τους και τις επιθυμίες μας. Το αρχείο του καννάβου περιέχει ακριβώς τις μετρήσεις που συλλέχθηκαν καθ' όλη την διάρκεια της έρευνάς του, για παράδειγμα 400 μετρήσεις /κάνναβο. Το αρχείο του πλέγματος δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένα αρχείο που περιέχει τα ονόματα των καννάβων με τέτοιο τρόπο που να είναι εμφανής η διάταξη την οποία έχουν στο χώρο.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί το αρχείο του πρότυπου πλέγματος ως οδηγό για να επεξεργάζεται και να παρουσιάζει τους καννάβους που βρίσκονται σε αυτό. Το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται επίσης για να δημιουργηθεί το αρχείο της σύνθεσης, που θα δούμε παρακάτω, το οποίο αποτελείται από πολλούς καννάβους που ενώνονται όλοι μαζί με σωστή διάταξη σε ένα μεγάλο αρχείο. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι όλοι οι κάνναβοι έχουν τις ίδιες διαστάσεις, τον ίδιο αριθμό μετρήσεων και τον ίδιο προσανατολισμό για να οργανωθεί η έρευνα.

**Composite** (σύνθεση): αποτελείται από πολλούς καννάβους που ενώνονται σε ένα μεγάλο αρχείο δεδομένων και το οποίο είναι πρωταρχικής σημασίας για την μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων. Αντίθετα με το πλέγμα, η σύνθεση περιέχει δεδομένα. Στο *σχήμα 4.2* φαίνεται μια τοποθεσία να χωρίζεται σε δύο συνθέσεις. Το αρχείο αυτό παράγεται χρησιμοποιώντας το προηγούμενο αρχείο του πλέγματος όπου καθορίζονται οι θέσεις των καννάβων. Επιπλέον το αρχείο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσαρμόσει το μέγεθος των αρχείων που μεταφέρθηκαν στο *Geoplot 3.0* από άλλα προγράμματα.

**Input template** (πρότυπο αρχείο εισόδου): είναι ένα αρχείο στο οποίο υπάρχουν οι λεπτομέρειες της έρευνας όπως ο αριθμός των μετρήσεων και η οργάνωση της. Λειτουργεί ως βοηθητικό αρχείο στην εισαγωγή και την μεταφορά των μετρήσεων. Χρησιμοποιείται για να προκαθορίσει ένα πρότυπο εισόδου έτσι ώστε κάθε φορά που εισάγουμε δεδομένα να είμαστε βέβαιοι ότι χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες πληροφορίες για την έρευνα. Οι πληροφορίες αυτές καθώς και άλλες αποθηκεύονται μαζί με κάθε πλέγμα και την αντίστοιχη σύνθεση για την μετέπειτα χρήση από το πρόγραμμα.



Σχήμα 4.2. Απεικόνιση των *site*, *grid*, *mesh* και *composite*, *Geoplot 3.0* τροποποιημένο σχήμα από *Instruction Manual 1.01*, 1994

Πολύ σημαντικό είναι πριν την επεξεργασία των μετρήσεων να αναφερθούμε στις πλαστές μετρήσεις (*dummy*). Το *Geoplot 3.0* χρησιμοποιεί καννάβους, πλέγματα, και συνθέσεις που είναι όλα τετράγωνα ή παραλληλόγραμμα στο σχήμα. Επιπλέον υποθέτει ότι σε κάθε κόμβο της σύνθεσης αντιστοιχεί και μία μέτρηση, συχνά όμως αυτό δεν είναι εφικτό. Δεν μπορούμε να έχουμε δηλαδή όλες τις μετρήσεις σε όλα τα σημεία εφόσον η τοποθεσία δεν έχει ένα από αυτά τα σχήματα και αυτό γιατί μπορεί να υπάρχουν εμπόδια τα οποία να δημιουργούν ακαθόριστο σχήμα σε κάποιο κελί. Επιπλέον, είναι πολύ πιθανό να μη μπορούμε να πάρουμε κάποιες από τις μετρήσεις κάποιων οδεύσεων για διάφορους λόγους. Αυτή μάλιστα η κατάσταση είναι και η πιο συχνά εμφανιζόμενη στην πράξη. Λιθοσρωροί, βλάστηση, ελώδη σημεία και άλλα εμπόδια είναι πιθανόν να παρεμβάλλονται

στην όδευση μας. Το πρόγραμμα λοιπόν μας δίνει την δυνατότητα να καθορίσουμε μια πλαστή (*dummy*) μέτρηση σε αυτές τις περιπτώσεις, τις οποίες και αγνοεί όταν πραγματοποιείται επεξεργασία ή απεικόνιση των μετρήσεων. Η τιμή της πλασματικής μέτρησης έχει οριστεί αρχικά για το πρόγραμμα 2047,5 αλλά μπορεί να αλλάχθει ανάλογα με τις επιθυμίες του χρήστη.

Είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται αυστηρά και μόνο αυτή η τιμή για τις πλαστές μετρήσεις γιατί αλλιώς τα στατιστικά στοιχεία που υπολογίζει το πρόγραμμα καθώς και όλες οι λειτουργίες που ανιχνεύουν αυτές τις μετρήσεις θα περιέχουν σφάλμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μηδέν«0» θεωρείται αποδεκτή τιμή εκτός και αν καθορισθεί ως πλαστή τιμή στις επιλογές του προγράμματος.

Επίσης δίνεται η δυνατότητα ακόμα και ένας ή περισσότεροι κάνναβοι να χαρακτηρισθούν ως πλαστοί όταν δηλώνονται στο αρχείο του πλέγματος. Αυτό γίνεται γιατί τα αρχεία αυτά πρέπει να έχουν ορθογώνιο σχήμα και αυτό επιτυγχάνεται με την παραπάνω διαδικασία. Κατά την σύνθεση αυτοί οι κάνναβοι περιλαμβάνουν μόνο πλαστές τιμές.

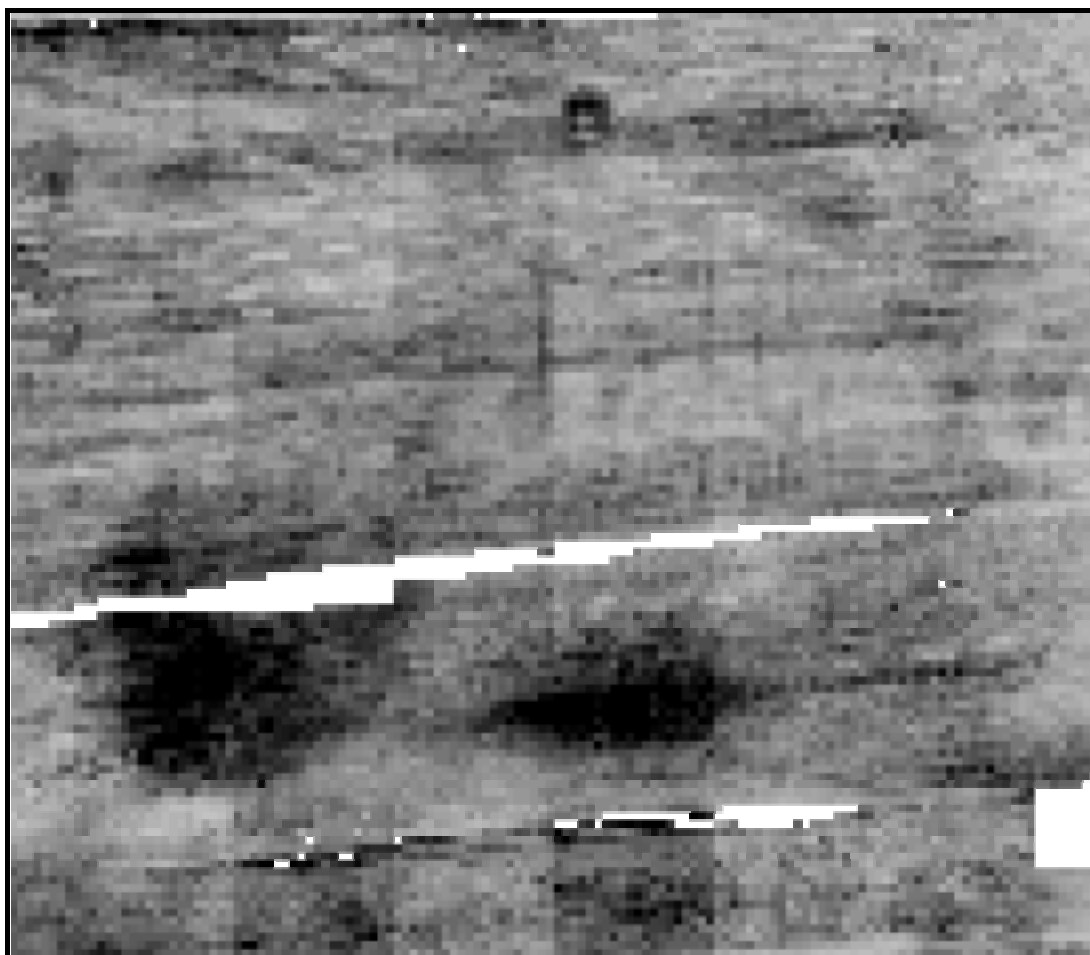
Οι δυνατότητες του προγράμματος *Geoplot Version 3.00* της *Geoscan Research* δίνει στον χρήστη πολλές δυνατότητες για την επεξεργασία και την απεικόνιση τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών δεδομένων.

## 4.2 Επεξεργασία Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Μια τυπική επεξεργασία για δεδομένα μιας μεγάλης περιοχής που πραγματοποιούνται με την διάταξη του δίδυμου ηλεκτροδίου θα περιγραφεί παρακάτω. Αρχικά με απεικόνιση των μετρήσεων και εξέταση τους, γίνεται αφαίρεση των προβληματικών τιμών που οφείλονται στον τρόπο λήψης των μετρήσεων, μείωση του θορύβου ο οποίος οφείλεται στα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τέλος την ενίσχυση και απεικόνιση του σήματος που λαμβάνεται από τις θαμμένες αρχαιότητες.

#### 4.2.1 Επεξεργασία των δεδομένων της Νέας Απολλωνίας.

Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε επεξεργασία καλό είναι να παρατηρούμε τα αρχικά δεδομένα για να εντοπίσουμε τις πρώτες ενδείξεις για αρχαιολογικά ευρήματα, γεωλογικές δομές και λάθη που προέκυψαν κατά την συλλογή των μετρήσεων. Στη περίπτωση μας η απεικόνιση αυτή φαίνεται στο *σχήμα (4.3)*.



*Σχήμα 4.3 Πρωταρχικά δεδομένα χωρίς επεξεργασία από την περιοχή της Ν. Απολλωνίας η οποία κάποτε φιλοξενούσε την αρχαία πόλη. Είναι φανερό ότι υπάρχουν ακραίες τιμές σε τυχαίες θέσεις. Επίσης παρουσιάζονται έντονα φαινόμενα στα όρια των κελιών, απόρροια της μη σωστής σύνδεσής τους .*

Η αρχαιολογική απόκριση βρίσκεται μαζί με το σήμα που προέρχεται από την τοπική γεωλογία. Τα αρχαιολογικά ευρήματα μπορεί να απεικονίζονται έντονα ή μη, πράγμα που εξαρτάται από το βάθος ταφής, το μέγεθος τους και την αντίθεση των αντιστάσεων με το περιβάλλον στο οποίο είναι θαμμένα.

Γενικά τείνουν να έχουν πιο αδύναμο σήμα από το περιβάλλον που τα φιλοξενεί και που είναι κυρίαρχο στα σχήματα.

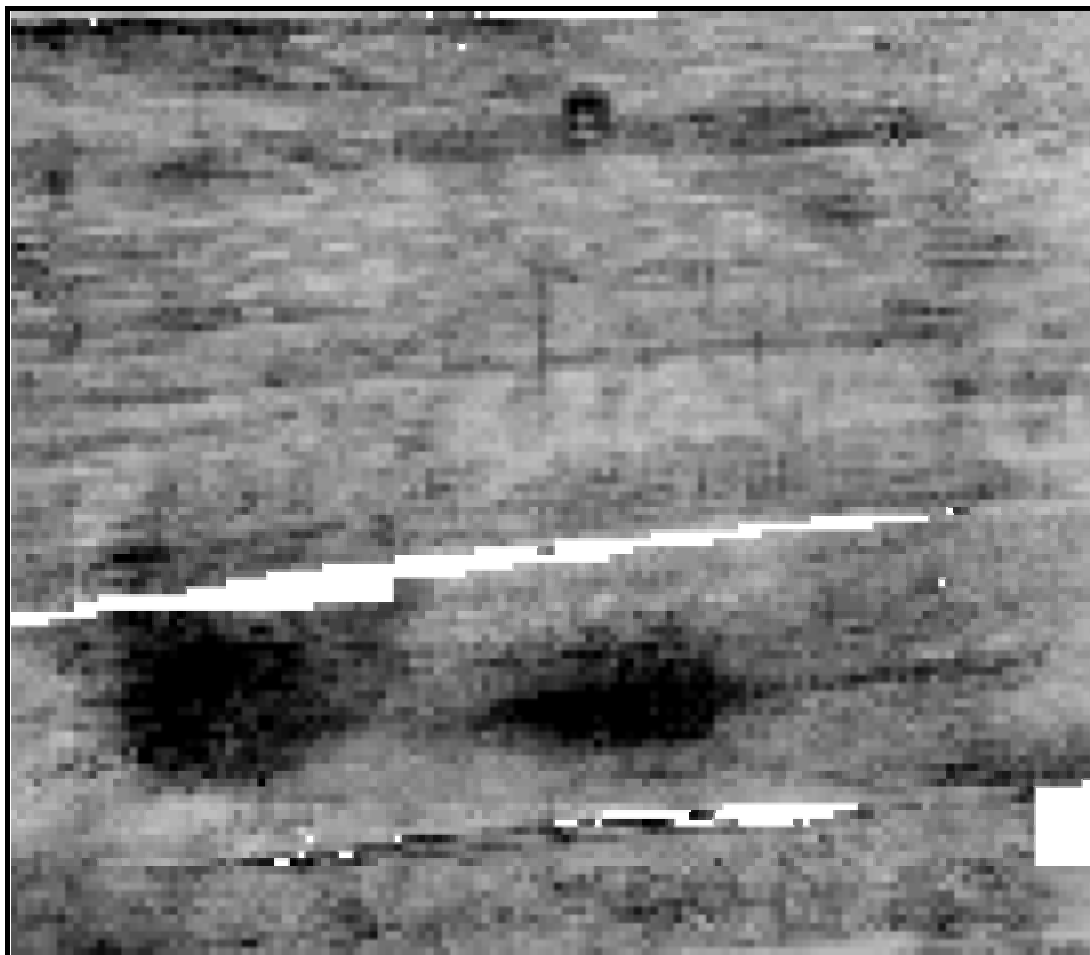
Τα γεωλογικά χαρακτηριστικά είναι σχετικά ισχυρά με μικρές αλλαγές στην απεικόνιση. Συχνά η αντίσταση του εδάφους διαφέρει από την μια άκρη στην άλλη ειδικά όταν πρόκειται για μεγάλες περιοχές. Μικρότερου μεγέθους διαφορές μπορεί να υπάρξουν εξαιτίας τοπικών αλλαγών στο πάχος του επιφανειακού εδάφους, από φυσικές καθιζήσεις του υποβάθρου, που μερικές φορές παράγουν ανωμαλίες όμοιες με αυτές που προκαλούν κάποιες αρχαιολογικές δομές.

Δυο βασικά ελαττώματα που υπάρχουν στις μετρήσεις που συλλέγονται με την μέθοδο του διδύμου ηλεκτροδίου είναι οι πολύ μεγάλες τιμές εξαιτίας του θορύβου (*noise spikes*) και οι ασυνέχειες στα άκρα των καννάβων. Οι υψηλές τιμές που προκύπτουν με δυο τρόπους, πολύ πιθανό να δημιουργήσουν πρόβλημα σε έρευνες που πραγματοποιούνται σε πολύ ξηρές συνθήκες. Πρώτον μπορούν να παρατηρηθούν μεγάλες τιμές θορύβου επειδή υπάρχουν ισχυρές αντιστάσεις επαφής. Δεύτερον μπορεί περιστασιακά να παρατηρηθούν μεγάλες τιμές που να διαφέρουν πολύ από τον μέσο όρο και αυτό γιατί μπορεί να υπάρχει ανοιχτό κύκλωμα στο ηλεκτρόδιο του δυναμικού τη στιγμή που γίνεται η μέτρηση.

Οι ασυνέχειες στα άκρα ορισμένων καννάβων οφείλονται στη μη σωστή τοποθέτηση των απομακρυσμένων ηλεκτροδίων κατά την αλλαγή θέσης τους μεταξύ μέτρησης των καννάβων. Επίσης προκύπτουν αν παρακείμενοι κάνναβοι μετριοούνται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και η αντίθεση των αντιστάσεων έχει αλλάξει. Μπορούν ακόμα να προκύψουν με την αλλαγή των καιρικών συνθηκών, δηλαδή από ξηρασία σε πολύ βροχερή ημέρα.

Μια πρώτη επεξεργασία λοιπόν είναι η εφαρμογή του φίλτρου απομάκρυνσης ακραίων μετρήσεων (*Despike*) το οποίο εντοπίζει αυτόματα και απομακρύνει τυχαιές, ακραίες μετρήσεις που συχνά παρατηρούνται σε δεδομένα ηλεκτρικών διασκοπήσεων ή εντοπίζει και απομακρύνει τυχαία υψίσυχνα σήματα (*iron spike*-μορφή καρφίου) που συχνά εμφανίζονται σε μαγνητικά δεδομένα. Ακολουθεί η εφαρμογή του φίλτρου συρραφής των κελιών (καννάβων) (*Edge Match*). Το φίλτρο αυτό αφαιρεί τις ασυνέχειες

μεταξύ των πλευρών των καννάβων, κυρίως όταν οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις γίνονται με την διάταξη του Διδύμου Ηλεκτροδίου (*Twin Probe*) και είναι αποτέλεσμα της μη σωστής τοποθέτησης των σταθερών ηλεκτροδίων. Το αποτέλεσμα εφαρμογής των παραπάνω φίλτρων στις αρχικές μετρήσεις φαίνονται στο *σχήμα (4.4)*



*Σχήμα 4.4 Η εικόνα των γεωφυσικών μετρήσεων στη Ν. Απολλωνία, μετά την εφαρμογή φίλτρου απομάκρυνσης ακραίων τιμών και διαδικασίες συρραφής των κελιών.*

Η γεωλογική απόκριση η οποία ορίζεται ως η περιβάλλουσα αντίσταση είναι συχνά πιο ισχυρή από τις αντιστάσεις που παρουσιάζουν τα αρχαιολογικά ευρήματα και όπως αναφέρθηκε μπορεί να αλλάζει από το ένα άκρο της περιοχής στο άλλο. Έτσι η ασθενής απόκριση ενός αρχαιολογικού σχηματισμού μπορεί δύσκολα να παρατηρηθεί αν οι παράμετροι του γραφήματος έχουν οριστεί έτσι ώστε να δίνουν μια εποπτική εικόνα των δεδομένων. Αυτό συμβαίνει σε περίπτωση όπου έχουμε κάποιο κεκλιμένο στρώμα στο υπέδαφος στην περιοχή μελέτης. Οι αντιστάσεις του εδάφους

αλλάζουν αργά κατά την διάρκεια της ερευνάς, όμως, όπου υπάρχουν κοιλάματα, τάφροι, θαμμένες αρχαιότητες αλλάζουν πιο γρήγορα. Γενικά, οι αρχαιολογικές δομές έχουν μία διάσταση της τάξης των 0,5-2m ενώ τα γεωλογικά χαρακτηριστικά πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις. Μεγάλη βελτίωση στη διάκριση ανωμαλιών μικρών δομών μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση του φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (*Hi Pass*). Το φίλτρο αυτό αφαιρεί τις χαμηλές συχνότητες, δηλαδή τις μεγάλης κλίμακας χωρικές πληροφορίες. Με αυτόν τον τρόπο απομακρύνεται η απόκριση του αργά μεταβαλλόμενου γεωλογικού υποβάθρου που συχνά παρατηρείται σε ηλεκτρικές έρευνες. Είναι πολύ σημαντικό οι μετρήσεις να έχουν αναχθεί στο ίδιο επίπεδο έτσι ώστε να μην υπάρχουν ασυνέχειες στα άκρα των καννάβων όπου με την εφαρμογή αυτού του φίλτρου να γίνουν εντονότερες.

Σε μερικές περιπτώσεις είναι επιθυμητό να ομαλοποιηθούν τα δεδομένα. Αυτό πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός φίλτρου το οποίο τείνει να αφαιρέσει την τοπική αστάθεια. Αφαιρεί τις υψηλές συχνότητες, δηλαδή τις μικρής κλίμακας χωρικές πληροφορίες, για να ομαλοποιήσει έτσι τις μετρήσεις ή για να ενισχυθούν οι μεγάλες αλλά αδύναμες σε σήμα δομές. Το φίλτρο αυτό ονομάζεται φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (*Low Pass*). Μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσει την εμφάνιση της εδαφικής ανωμαλίας ειδικά όταν οι μετρήσεις έχουν γίνει με άνοιγμα ηλεκτροδίων 0,5m ή μικρότερο.

Η παρεμβολή (*Interpolation*, επέκταση, αύξηση) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να εξομαλύνει την απεικόνιση των μετρήσεων και μπορεί να βελτιώσει την ορατότητα των μεγαλύτερων, αδύναμων αρχαιολογικών σχηματισμών. Με αυτήν την εφαρμογή αυξάνεται ο αριθμός των μετρήσεων και δημιουργούνται τεχνητά δεδομένα. Όταν πρόκειται για μια μεγάλη σύνθεση (*composite*) μπορεί να μην υπάρχει αρκετή μνήμη στον ηλεκτρονικό υπολογιστή που χρησιμοποιούμε για να επιτευχθεί αυτή τη λειτουργία. Σε αυτήν την περίπτωση το μόνο που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι το προηγούμενο φίλτρο. Φυσικά μπορούμε να διασπάσουμε το αρχείο της σύνθεσης (*composite*) σε μικρότερα και να εφαρμόσουμε την διαδικασία τμηματικά.



Στο *σχήμα (4.5)* φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής μιας ακολουθίας επεξεργασιών στα δεδομένα μας. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων το οποίο είναι στην πραγματικότητα συνδυασμός υπερερατού και χαμηλοπερατού φίλτρου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δισδιάστατη παρεμβολή με χρήση διακυβικών συναρτήσεων (*Walker2003, Scollar et al.1986, Geoplot 3.0 Instruction Manual 1.01, 1994*).



*Σχήμα 4.5 Αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης ζώνης συχνοτήτων και μαθηματικής παρεμβολής. Ως είσοδος χρησιμοποιήθηκε η εικόνα του σχήματος 4.4.*

Η παραπάνω διαδικασία θα αποτελέσει την **βάση** για την περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα φίλτρα που θα εφαρμοσθούν στην συνέχεια θα έχουν ως αρχή τα δεδομένα που έχουν διορθωθεί από θόρυβο, έχουν εξομαλυνθεί και έχουν υποστεί παρεμβολή.

Στη συνέχεια ακολούθησε η εφαρμογή του φίλτρου του γεωμετρικού μέσου όρου (*Median*). Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αφαιρέσει τις

τυχαίες πλαστές μετρήσεις που υπάρχουν στα δεδομένα μας. Είναι το πιο χρήσιμο φίλτρο για τα υψηλής πυκνότητας δείγματα δεδομένων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις μετρήσεις ή μέρος αυτών. Το φίλτρο αυτό σαρώνει τις μετρήσεις με τη χρήση ενός παραθύρου με έναν συντελεστή βάρους που ακολουθεί κανονική κατανομή. Το παράθυρο αυτό μπορεί να είναι τετράγωνο ή ορθογώνιο. Ταξινομεί έτσι τις μετρήσεις σε αυτό το παράθυρο με αύξουσα σειρά και επιλέγει την μέση τιμή ως νέα τιμή. Όλες οι άλλες μετρήσεις παραμένουν αμετάβλητες και οι εικονικές (*dummy*) τιμές αγνοούνται.

Στο παρακάτω *σχήμα (4.6)* φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτού του φίλτρου στα είδη επεξεργασμένα δεδομένα (βάση).



*Σχήμα 4.6 Αποτέλεσμα εφαρμογής του φίλτρου γεωμετρικού μέσου όρου στα «δεδομένα βάσης».*

Περιοχές με διαφορετική στατιστική κατανομή των τιμών των μετρήσεων είναι δυνατόν να ανιχνευθούν χρησιμοποιώντας την

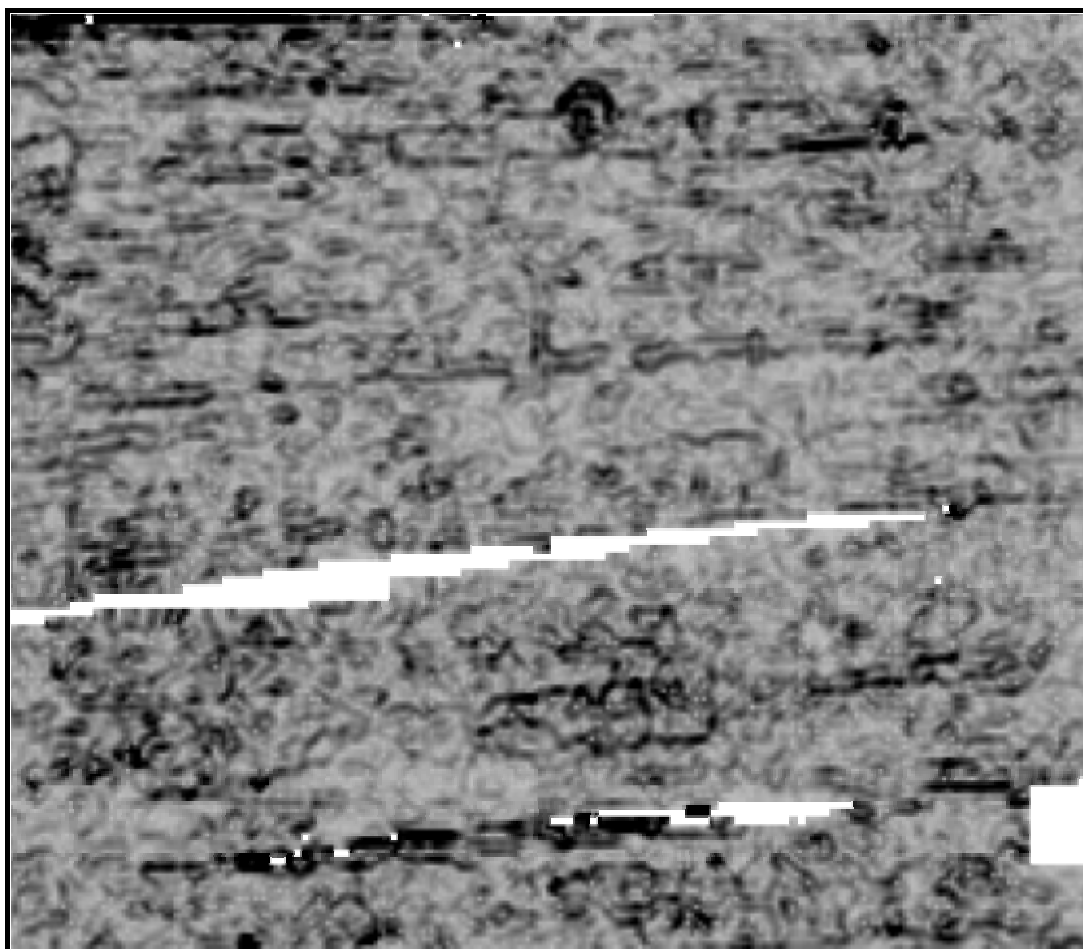
χαρτογράφηση τυπικής απόκλισης (*Standard Deviation*) ή τη διασπορά (*Variance*, μεταβλητότητα) των δεδομένων. Το φίλτρο αυτό αντικαθιστά μία ομάδα μετρήσεων είτε με τη τοπική διακύμανση (*local Variance*) είτε με τη τυπική απόκλιση (*Standard Deviation*). Εφαρμόζετε μόνο στο σύνολο των μετρήσεων. Υλοποιείται δε, με τη χρήση ενός παραθύρου το οποίο σαρώνει τις μετρήσεις. Το παράθυρο αυτό μπορεί να είναι τετράγωνο ή ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Η δε στάθμιση των τιμών μέσα σε αυτό μπορεί να είναι γκαουσιανή (*Gaussian*) ή ομοιόμορφη (*uniformly*).

Μέσα στο παράθυρο, υπολογίζεται κάθε φορά η τυπική απόκλιση ή η τοπική διακύμανση και στη συνέχεια οι τιμές αυτές αντικαθιστούν την τιμή στο κέντρο του παραθύρου. Οι εικονικές (*dummy*) τιμές αγνοούνται στους υπολογισμούς αυτούς.

Στο σχήμα (4.7) φαίνονται τα αποτελέσματα της αντικατάστασης των δεδομένων μας με τις τιμές της τυπικής απόκλισης υπολογισμένες σε παράθυρα γύρω από αυτές.

Είναι φανερό ότι η συγκεκριμένη διαδικασία λειτούργησε ως ανιχνευτής ορίων. Δηλαδή, διέσπασε κάθε μία από τις προφανείς επίμηκες ανωμαλίες σε δυο, κάθε μία εκ των οποίων αντιστοιχεί στα όρια της υπεδάφιας δομής. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι με τον τρόπο αυτό εντοπίζουμε ακριβώς το σημείο κάτω από το οποίο βρίσκεται μία ασυνέχεια των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εντοπισμού και χαρτογράφησης οικοδομικών λείψανων, ο εντοπισμός των ορίων δεν προσθέτει σημαντική πληροφορία. Επιπλέον, δημιουργεί μια πιο συγκεχυμένη εικόνα από ότι τα αποτελέσματα άλλων επεξεργασιών όπως αυτές που εφαρμόστηκαν προηγούμενα. Αν όμως οι στόχοι ήταν διαφορετικοί, όπως για παράδειγμα αν αναζητούσαμε μεγάλα ταφικά μνημεία, η παραπάνω πληροφορία που μας δίνει η συγκεκριμένη διαδικασία θα ήταν σημαντική. Ιδιαίτερα χρήσιμη θα ήταν επίσης σε περιπτώσεις ηλεκτρικής χαρτογράφησης για άλλους σκοπούς, για παράδειγμα σε περιβαλλοντικές έρευνες, υδρογεωλογικές, μεταλλευτικές κ.α



Σχήμα 4.7 Αποτέλεσμα του υπολογισμού της τυπικής απόκλισης σε παράθυρο. Η διαδικασία εφαρμόστηκε στα «δεδομένα βάσης»

Μια από τις τελευταίες διαδικασίες επεξεργασίας είναι αυτή της συμπίεσης του δυναμικού εύρους τιμών (*Compress*). Το φίλτρο αυτό εφαρμόζει ένα εφαπτομενικό ή λογαριθμικό βάρος στις μετρήσεις. Χρησιμοποιείται για να συμπίεσει τα δεδομένα στο δυναμικό εύρος των συσκευών απεικόνισης, δηλαδή στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή, στον εκτυπωτή. Μπορεί δε να εφαρμοστεί στο σύνολο ή σε κάποιο τμήμα των μετρήσεων.

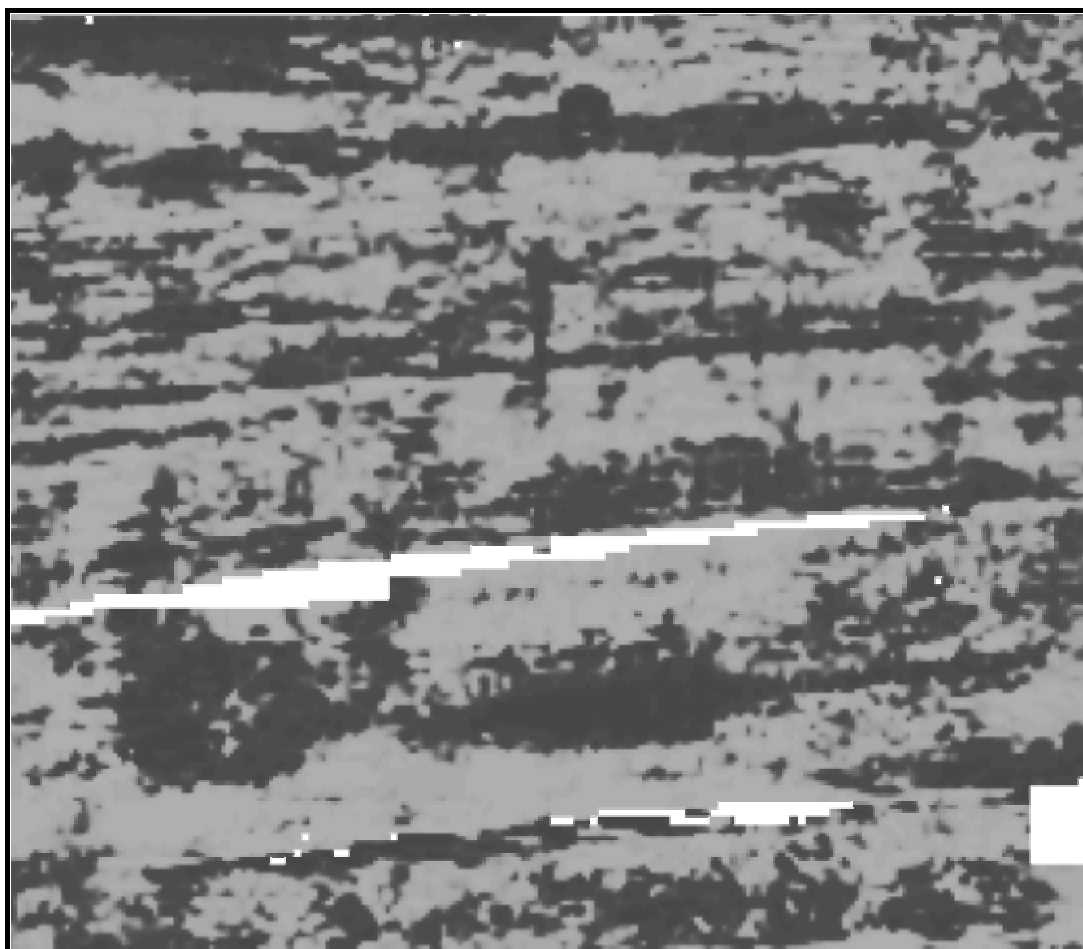
Αυτό το οποίο επιφέρει είναι η παρουσίαση με τους ίδιους ακριβώς τόνους του τεφρού χρώματος τόσο των μεγάλων όσο και των μικρών τιμών. Υπενθυμίζεται ότι το μέγεθος των ανωμαλιών εξαρτάται κατά πολύ από το βάθος ταφής των δομών που τις προκαλούν. Εξαρτάται βέβαια και από την διάφορα της τιμής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αυτό έχει, από αυτή του περιβάλλοντος στο οποίο φιλοξενείται. Ας υποθέσουμε όμως ότι έχουμε

δυσ ακριβώς ίδιες δομές οι οποίες βρίσκονται θαμμένες σε διαφορετικά βάθη. Αυτή που είναι θαμμένη ρηχότερα θα προκαλέσει εντονότερη (μεγαλύτερου πλάτους) ανωμαλία. Από την άλλη μεριά είναι σύνηθες στην αρχαιολογική έρευνα να έχουμε ερείπια διαφορετικών ιστορικών φάσεων τα οποία προφανώς βρίσκονται τα μες πάνω στα δε. Επομένως τα ερείπια της κατώτερης φάσης θα φαίνονται με ανοιχτόχρωμους τόνους του τεφρού χρώματος στις απεικονίσεις μας. Η συμπίεση θα προκαλέσει την ανάδειξη των βαθύτερων δομών δείχνοντας το αποτέλεσμα τους με τους ίδιους τόνους όπως οι επιφανειακότερες.

Σε άλλη, πιο συχνά απαντούμενη περίπτωση, μπορεί τμήμα της υπεδάφιας δομής, για παράδειγμα τοίχου, θεμελίωσης, να μη σώζονται στο ίδιο ύψος. Συνακόλουθα, στην απεικόνιση των αντιστάσεων θα βλέπουμε τα αντίστοιχα τμήματα της ανωμαλίας φωτεινότερα από ότι τα υπόλοιπα ή πιθανών να μην τα εντοπίσουμε καθόλου γιατί η ανωμαλία τους θα είναι αδύναμη. Η συμπίεση λειτουργεί καταλυτικά στις περιπτώσεις αυτές μεταμορφώνοντας την ανωμαλία έτσι ώστε αυτή να φαίνεται ενιαία, απεικονισμένη με τον ίδιο τόνο του τεφρού χρώματος.

Το συμπίεστικό φίλτρο σαρώνει το σύνολο των μετρήσεων και συμπιέζει κάθε μέτρηση σύμφωνα με τον αλγόριθμο που έχει επιλέξει ο χρήστης, εφαπτομενικό ή λογαριθμικό (Scollar et al.1986, *Geoplot 3.0, Instruction Manual 1.01, 1994*). Οι εικονικές (*dummy*) τιμές δεν λαμβάνονται υπόψη και παραμένουν αμετάβλητες.

Στο *σχήμα (4.8)* φαίνεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής της διαδικασίας συμπίεσης του δυναμικού εύρους στα «δεδομένα βάσης».



Σχήμα 4.8 Αποτέλεσμα συμπίεσης του δυναμικού εύρους στα «δεδομένα βάσης»

Η εφαρμογή των παραπάνω φίλτρων σκοπό έχει την βέλτιστη δυνατή απεικόνιση των θαμμένων αρχαιολογικών δομών. Περαιτέρω επεξεργασία με συνδυασμούς αυτών των φίλτρων μπορεί να δώσει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα.

Όπως φαίνεται στο *σχήμα (4.9)* λαμβάνοντας ως βάση τα δεδομένα εκείνα που έχουν διορθωθεί από θόρυβο και έχουν εξομαλυνθεί, εφαρμόζουμε το φίλτρο του γεωμετρικού μέσου που έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των τυχαίων, εσφαλμένων μετρήσεων. Έπειτα κάνουμε χρήση της διαδικασίας παρεμβολής και εν συνεχεία εφαρμόζουμε φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων για να απομακρύνουμε τα τεχνητά σήματα που έχουν προέλευση το στατιστικό σφάλμα που υπεισέρχεται εξαιτίας της παρεμβολής.

Έγιναν και άλλοι συνδυασμοί φίλτρων που σκοπό είχαν την καλύτερη απεικόνιση των αρχαιοτήτων οι οποίοι όμως δεν παρατίθενται εδώ γιατί



θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικότερο το *σχήμα (4.9)*. Οι δυνατότητες άλλωστε του προγράμματος *Geoplot Version 3.00* της *Geoscan Research* δίνουν στον χρήστη πολλές επιλογές για την επεξεργασία και την απεικόνιση τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών δεδομένων.

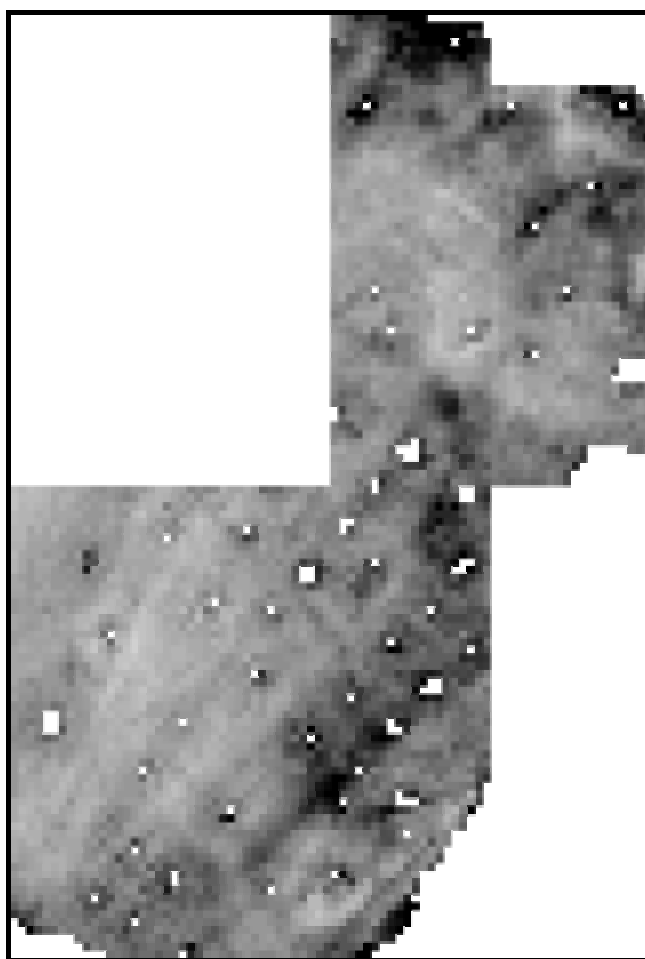


*Σχήμα 4.9* Αποτέλεσμα συνδυασμού επεξεργασιών στα «δεδομένα βάσης». Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε φίλτρο γεωμετρικού μέσου, έγινε κατόπιν παρεμβολή και τελικά εφαρμόστηκε φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων.



#### 4.2.2 Επεξεργασία δεδομένων στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας.

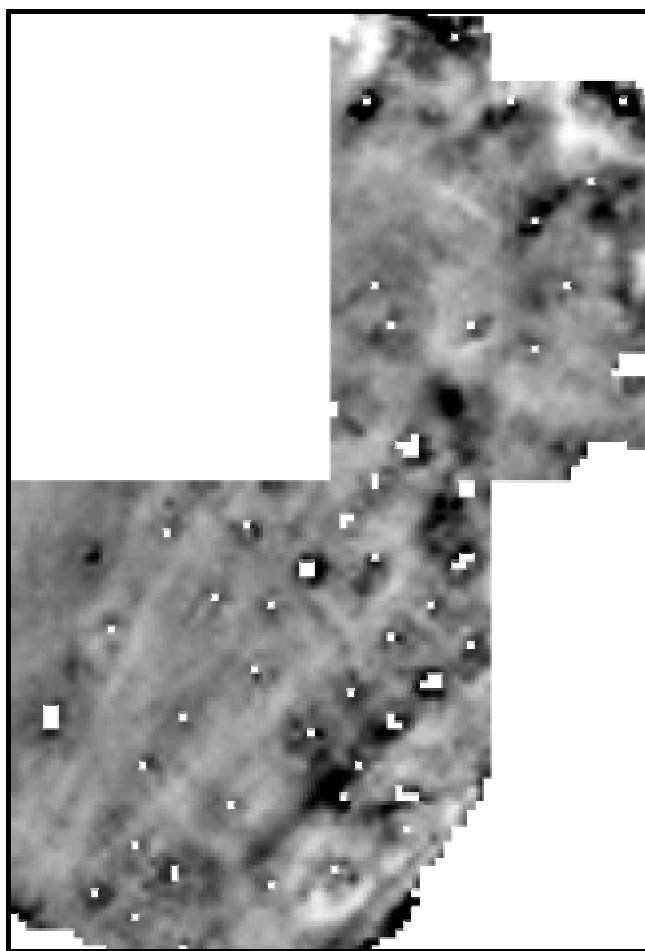
Όπως αναφέρθηκε, πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε επεξεργασία είναι αναγκαίο να παρατηρούμε τα αρχικά δεδομένα για να εντοπίσουμε τις πρώτες ενδείξεις θαμμένων αρχαιολογικών δομών, πιθανές γεωλογικές δομές και λάθη που φυσικά προέκυψαν κατά την συλλογή των μετρήσεων. Το *σχήμα (4.10)* δείχνει τα πρωταρχικά δεδομένα στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας.



Σχήμα 4.10 Πρωταρχικά δεδομένα χωρίς επεξεργασία από την θέση Καμπάνα της Μαρώνειας

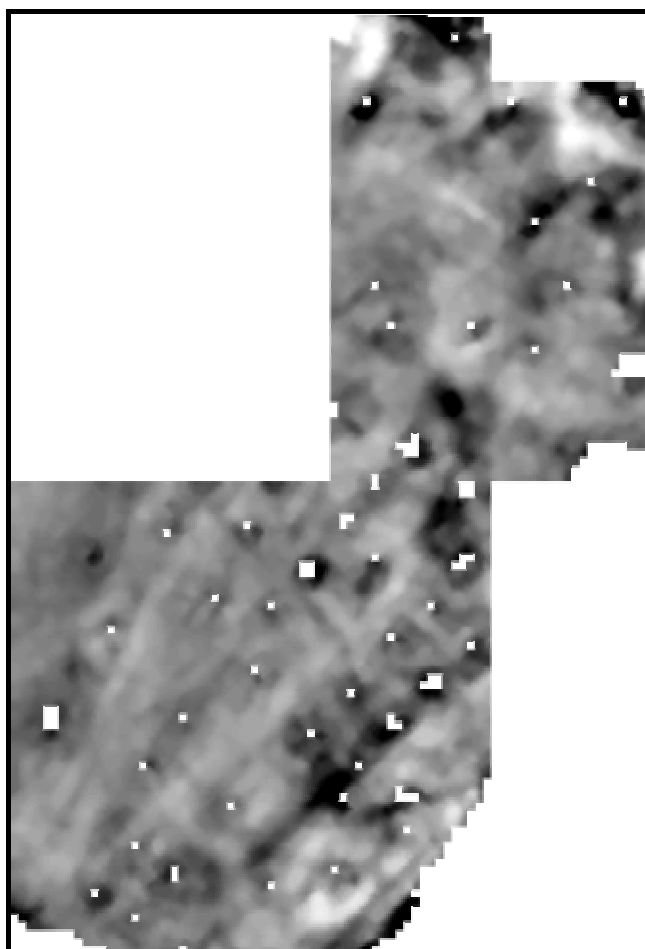
Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν κάνναβοι που να έχουν διάφορα στάθμης μεταξύ τους και συνεπώς εφαρμόζουμε κατευθείαν το φίλτρο απομάκρυνσης ακραίων τιμών το οποίο εντοπίζει αυτόματα και απομακρύνει τυχαίες, πλαστές μετρήσεις που συχνά παρατηρούνται σε δεδομένα ηλεκτρικών διασκοπήσεων.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε υπεραπλοποιημένο φίλτρο για να αφαιρεθούν οι ανωμαλίες με χαμηλό κυματάριθμο. Οι ανωμαλίες αντιστοιχούν σε μεγάλης κλίμακας χωρικές πληροφορίες που συνήθως οφείλονται στη γεωλογία της περιοχής έρευνας. Εφαρμόστηκε επίσης χαμηλοπερατό φίλτρο, με πολύ μικρή τιμή κατωφλίου έτσι ώστε να αποκοπεί ο υπέρυχνος θόρυβος χωρίς να παραμορφωθούν όμως οι ανωμαλίες που προέρχονται από αρχαιολογικές δομές. Αυτό γίνεται γιατί και οι τελευταίες εμφανίζονται σε σχετικά μεγάλους κυματάριθμους. Πρέπει επομένως να αποκοπεί ο θόρυβος προσεκτικά χωρίς να διαταράξουμε τα σήματα, τα οποία έχουν λίγο χαμηλότερες τιμές κυματάριθμων. Ολοκληρώνουμε με την εφαρμογή του φίλτρου παρεμβολής η οποία επίσης εξομαλύνει την απεικόνιση των μετρήσεων και μπορεί να βελτιώνει την ποιότητα της εικόνας. Το αποτέλεσμα εφαρμογής αυτών των φίλτρων είναι ορατό στο παρακάτω σχήμα (4.11).

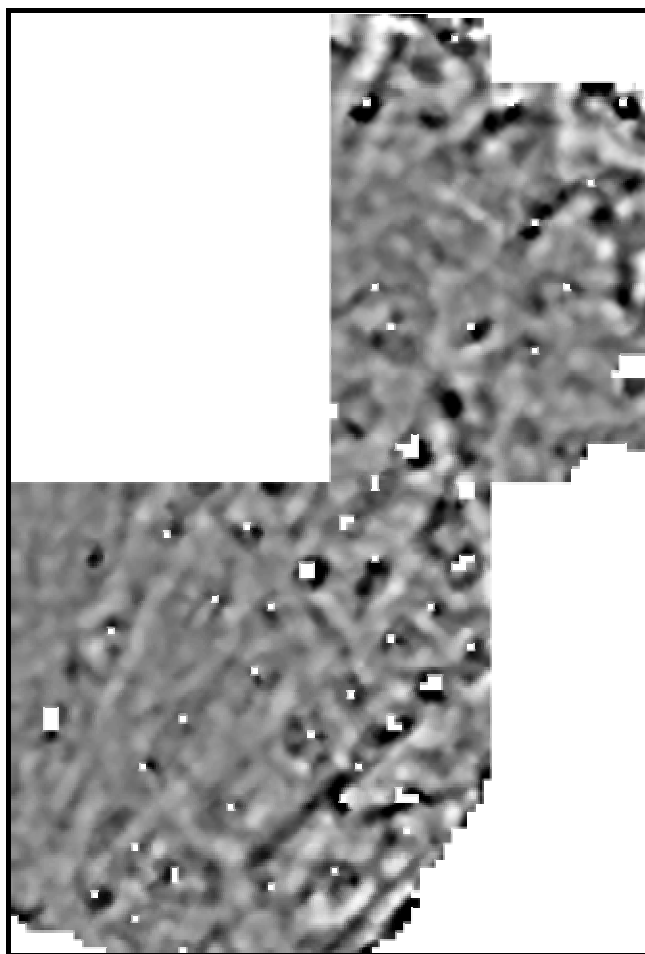


Σχήμα 4.11 Αποτέλεσμα της εφαρμογής ακολουθίας επεξεργασιών στα ηλεκτρικά δεδομένα από την θέση Καμπάνα στη Μαρώνεια. Εφαρμόστηκε φίλτρο απομάκρυνσης ακραίων τιμών, φίλτρο διέλευσης ζώνης κυματορίθμων και τελικά έγινε παρεμβολή.

Η περαιτέρω επεξεργασία έγινε βασιζόμενη στην ήδη υπάρχουσα και έτσι εφαρμόστηκε το φίλτρο του γεωμετρικού μέσου. Το φίλτρο αυτό απομάκρυνε εσφαλμένες τιμές. Στη συνέχεια έγινε παρεμβολή για δεύτερη φορά. Τα αποτελέσματα αυτής της ακολουθίας διεργασιών δίδονται στο *σχήμα (4.12)*. Επιπλέον, προστέθηκε μια ακόμη διεργασία στην προηγούμενη ακολουθία και εφαρμόστηκε εκ νέου υψιπερατό φίλτρο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο *σχήμα (4.13)*.



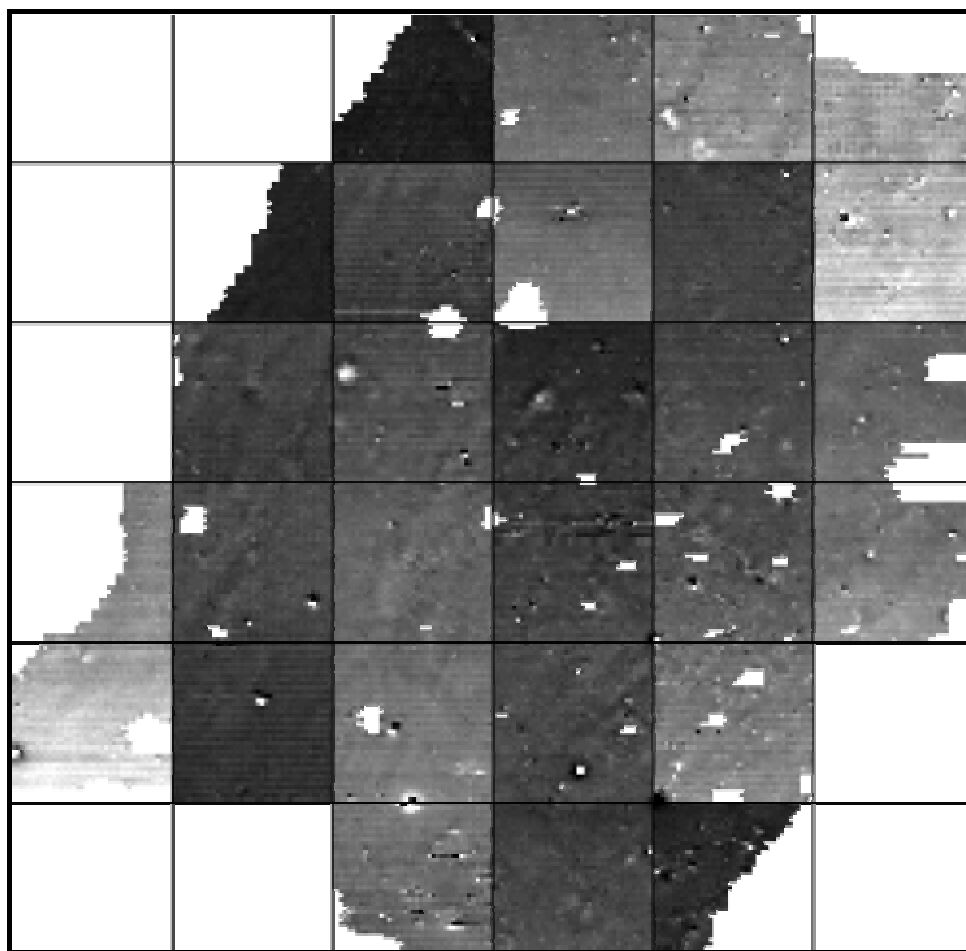
*Σχήμα 4.12 Εφαρμογή φίλτρου γεωμετρικού μέσου και παρεμβολής στα ήδη επεξεργασμένα δεδομένα της θέσης Καμπάνα στη Μαρώνεια.*



Σχήμα 4.13 Αποτέλεσμα εφαρμογής υπερπαρατού φίλτρου στα δεδομένα του σχήματος 4.12. συνεχίστηκε δηλαδή η ακολουθία εκείνων των διεργασιών με μια επιπλέον.

### 4.3 Επεξεργασία Μαγνητικών Μετρήσεων θέση Καμπάνα της Μαρώνειας

Οι μαγνητικές μετρήσεις από την φύση τους απαιτούν διαφορετική επεξεργασία από τις ηλεκτρικές. Φυσικά πρέπει πάλι να επιθεωρούμε, πριν από την εφαρμογή οποιασδήποτε επεξεργασίας τα δεδομένα, ώστε να εντοπίσουμε και να απομονώσουμε την επίδραση των μεγάλων γεωλογικών και σιδηρούχων αποκρίσεων. Τα αρχικά δεδομένα δίνονται στο *σχήμα (4.14)*.



*Σχήμα 4.14 Πρωταρχικά μαγνητικά δεδομένα χωρίς επεξεργασία από την περιοχή του Αρχαίου Θεάτρου στη θέση Καμπάνα της Μαρώνειας. Οι μετρήσεις είναι από διαφορικό κατακόρυφο μαγνητόμετρο.*

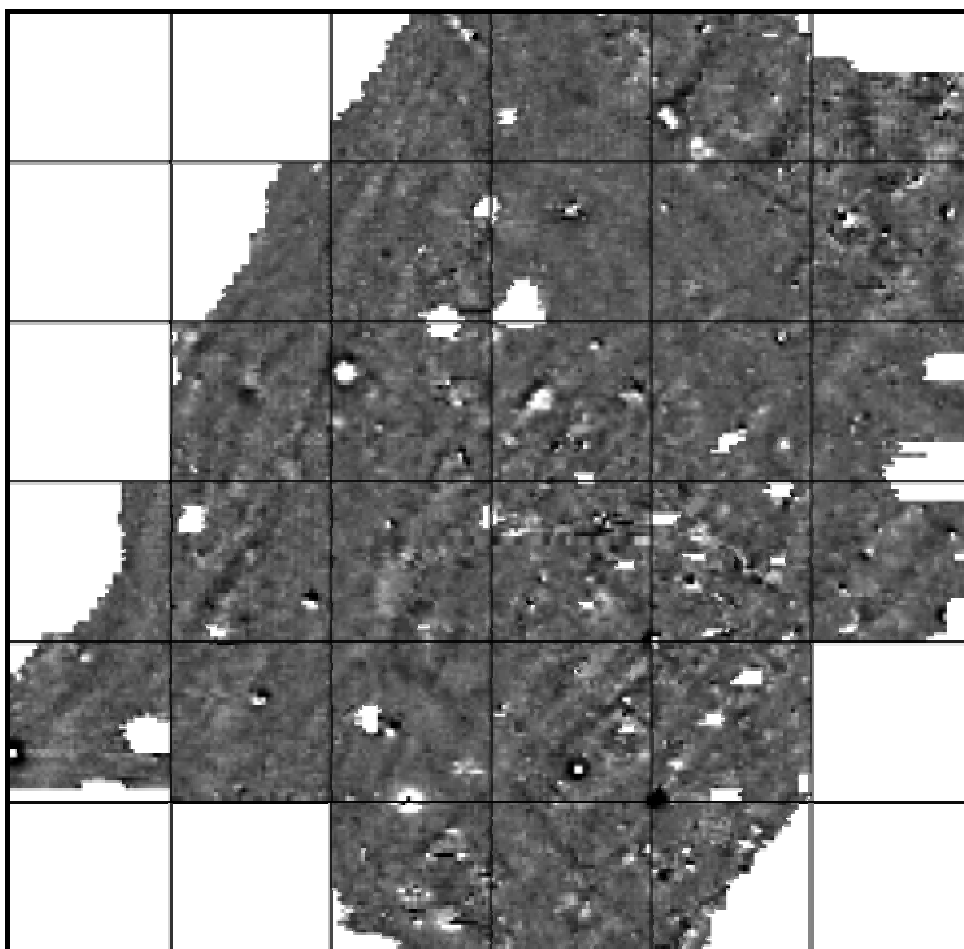
Παρατηρούμε ότι υπάρχουν κάρναβοι με διάφορα στάθμης και αυτό πιθανόν να συμβαίνει εξαιτίας της μη σωστής επιλογής του σημείου μηδενικής αναφοράς. Πιθανόν επίσης να οφείλεται σε σφάλμα του κανονικού έλεγχου

ευθυγράμμισης επαναμηδενισμού του οργάνου η οποία γίνεται σε τακτικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της διασκόπησης.

Μια πρώτη επεξεργασία που έγινε είναι η εφαρμογή του φίλτρου απομάκρυνσης ακραίων τιμών το οποίο εντοπίζει αυτόματα και απομακρύνει τυχαίες και ακραίες τιμές (*iron spike*-μορφή καρφίου) που συχνά εμφανίζονται σε μαγνητικά δεδομένα. Στη συνέχεια επιχειρήθηκε συρραφή των ασυνεχειών που παρατηρούνται στα όρια των καννάβων (κελιών). Ακολούθησε η χρήση διαδικασίας ισοστάθμισης των καννάβων (*Zero Mean Grid*) η οποία μεταθέτει τη μέση τιμή κάθε καννάβου πάνω ή κάτω έτσι ώστε να γίνει μηδέν. Η διαδικασία αυτή προκαλεί μικρή παραμόρφωση στα δεδομένα.

Κατόπιν, ακολουθήθηκε διαδικασία ισοστάθμισης των οδεύσεων (*Zero Mean Traverse*). Η διαδικασία αυτή μεταθέτει τον μέσο όρο των τιμών των οδεύσεων στο μηδέν. Η διαδικασία αυτή θεωρείται αναγκαία για διαφορεικά δεδομένα γιατί επαναφέρει το διπολικό χαρακτήρα των ανωμαλιών ο οποίος πιθανόν χάθηκε λόγω ερπυσμού του μέσου όρου. Ο ερπυσμός αυτός είναι σύμφυτος με την αρχή λειτουργίας του οργάνου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, η διαδικασία διορθώνει πιθανά σφάλματα λόγω κακής τοποθέτησης του οργάνου στη θέση που έπρεπε να πάρει κάποια μέτρηση.

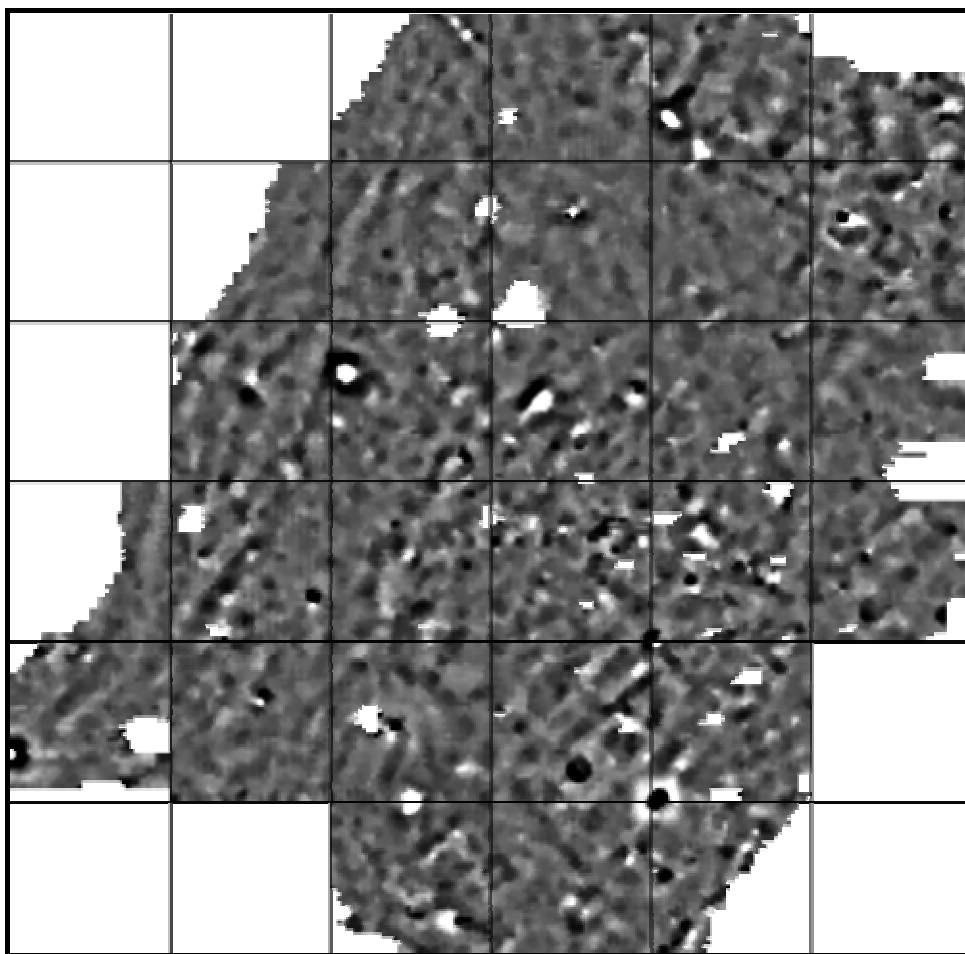
Η ακολουθία ολοκληρώθηκε με την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Έτσι ενισχύεται η ορατότητα των αδύναμων αρχαιολογικών δομών όπως βαθιά θαμμένα θεμέλια, μεγάλοι τάφροι και ανεπαίσθητες γραμμικές δομές. Στο παρακάτω *σχήμα (4.15)* είναι εμφανή τα αποτελέσματα της ακολουθίας διεργασιών που περιγράφηκε προηγούμενα σε σχέση με τις αρχικές μετρήσεις



Σχήμα 4.15 Αποτέλεσμα εφαρμογής ακολουθίας διεργασιών στα διαφορικά μαγνητικά δεδομένα της θέσης Καμπάνα στη Μαρώνεια. Εφαρμόστηκε φίλτρο απομάκρυνσης ακραίων τιμών, έγινε συρραφή καννάβων, ακολούθησε ισοστάθμιση καννάβων και ισοστάθμιση οδεύσεων. Τέλος, εφαρμόστηκε χαμηλοπερατό φίλτρο.

Μετά ακολουθεί εφαρμογή του φίλτρου γεωμετρικού μέσου. Το φίλτρο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τα υψηλής πυκνότητας δεδομένα όπως στη περίπτωση της Μαρώνειας είναι τα μαγνητικά. Κατόπιν έγινε παρεμβολή για την εξομάλυνση των μετρήσεων και ολοκληρώθηκε η επεξεργασία με την χρήση του υπεραπερατού φίλτρου για την απομάκρυνση των τεχνητών σημάτων που έχουν προέλευση το στατιστικό σφάλμα που υπεισέρχεται εξαιτίας της παρεμβολής.





Σχήμα 4.16 Αποτέλεσμα συνδυασμού φίλτρου γεωμετρικού μέσου και υπεραποεξέλιξης στα δεδομένα του σχήματος 4.15 .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

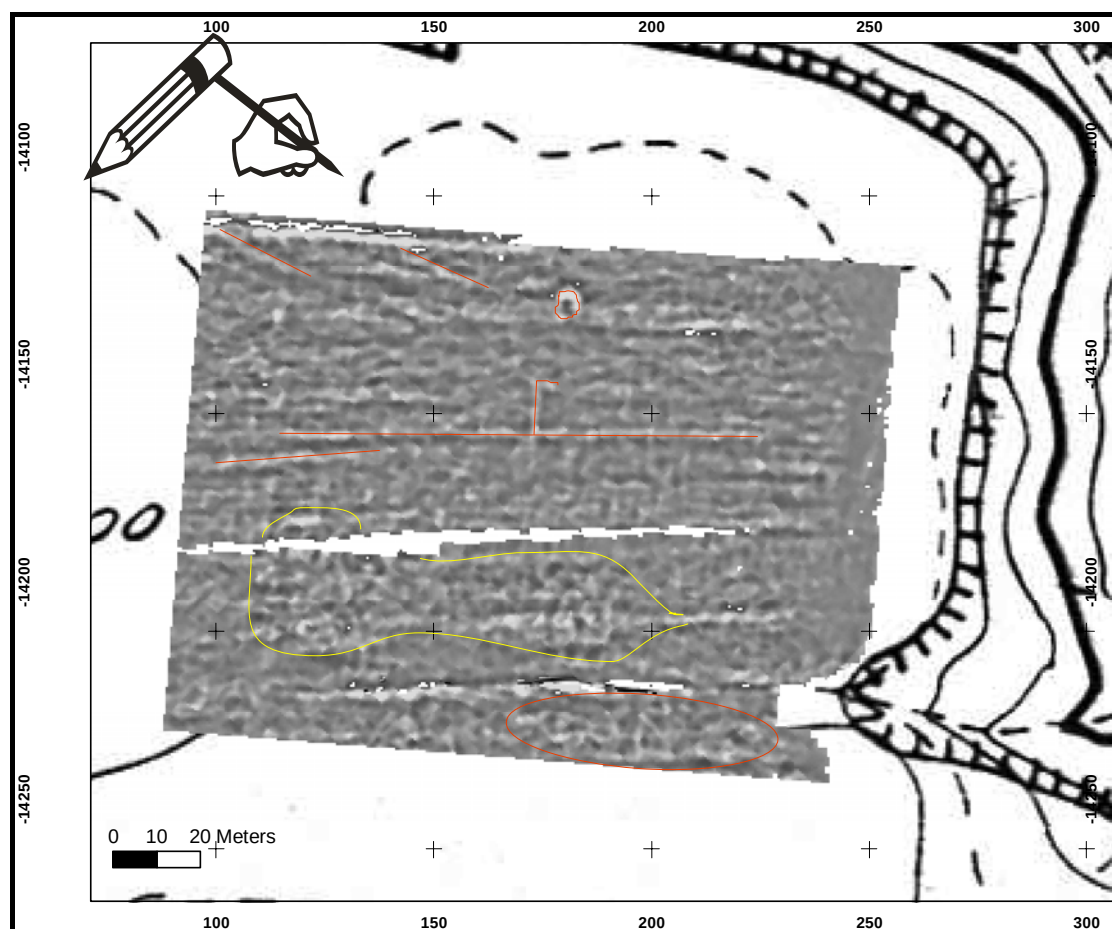
Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αφορούν τις μετρήσεις των ηλεκτρικών διασκοπήσεων που έγιναν στην περιοχή της Νέας Απολλωνίας, στην θέση Καμπάνα της Μαρώνειας καθώς και τις μετρήσεις των μαγνητικών διασκοπήσεων από την ίδια περιοχή.

### 5.1 Αποτελέσματα της έρευνας ηλεκτρικών διασκοπήσεων από την περιοχή της Νέας Απολλωνίας.

Με μια πρώτη ματιά των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τα επεξεργασμένα δεδομένα των ηλεκτρικών διασκοπήσεων της Νέας Απολλωνίας βλέπουμε ότι πρόκειται για μια φτωχή σε ευρήματα περιοχή.

Στο *σχήμα (5.1)* δίνεται η απεικόνιση της ηλεκτρικής αντίστασης από αυτή την περιοχή. Τα κενά που εμφανίζονται κατά τόπους είναι μικρές περιοχές όπου δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις εξαιτίας της βλάστησης.

Γενικά σε όλη την έκταση της έρευνας υπάρχουν θετικές γραμμές ανωμαλιών (σκούροι τόνοι) με διεύθυνση περίπου ΔΒΔ-ΑΝΑ οι οποίες έχουν σκιαγραφηθεί με κόκκινο χρώμα. Στις περιοχές που είναι κυκλωμένες με κίτρινες γραμμές είναι πιθανό ότι υπάρχουν ερειπίωνες εξαιτίας των ακανόνιστων ανωμαλιών που περικλείουν. Είναι εμφανής επίσης μια περίπτωση όπου σχηματίζεται σαφές γεωμετρικό σχήμα παραλληλογράμμου. Στο κάτω μέρος του σχήματος (5.1) φαίνονται κάποιες ανωμαλίες, σκιαγραφημένες με κόκκινο χρώμα, που διατάσσονται σε γεωμετρικά σχήματα που προσομοιώνουν κατόψεις θεμελιώσεων. Ενώ στο πάνω μέρος του σχήματος παρατηρείται μια κυκλική ανωμαλία που πιθανώς να οφείλεται σε κάποια κυκλική δομή.



Σχήμα 5.1 Κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης στη περιοχή έρευνας της Νέας Απολλωνίας σε τόνους του γκρι. Με κόκκινο χρώμα είναι σκιαγραφημένες πιθανές θαμμένες αρχαιότητες ενώ με κίτρινο χρώμα είναι περιοχές που πιθανόν να περικλείουν ερειπιώνες εξαιτίας του ακανόνιστου σχήματος των ανωμαλιών.

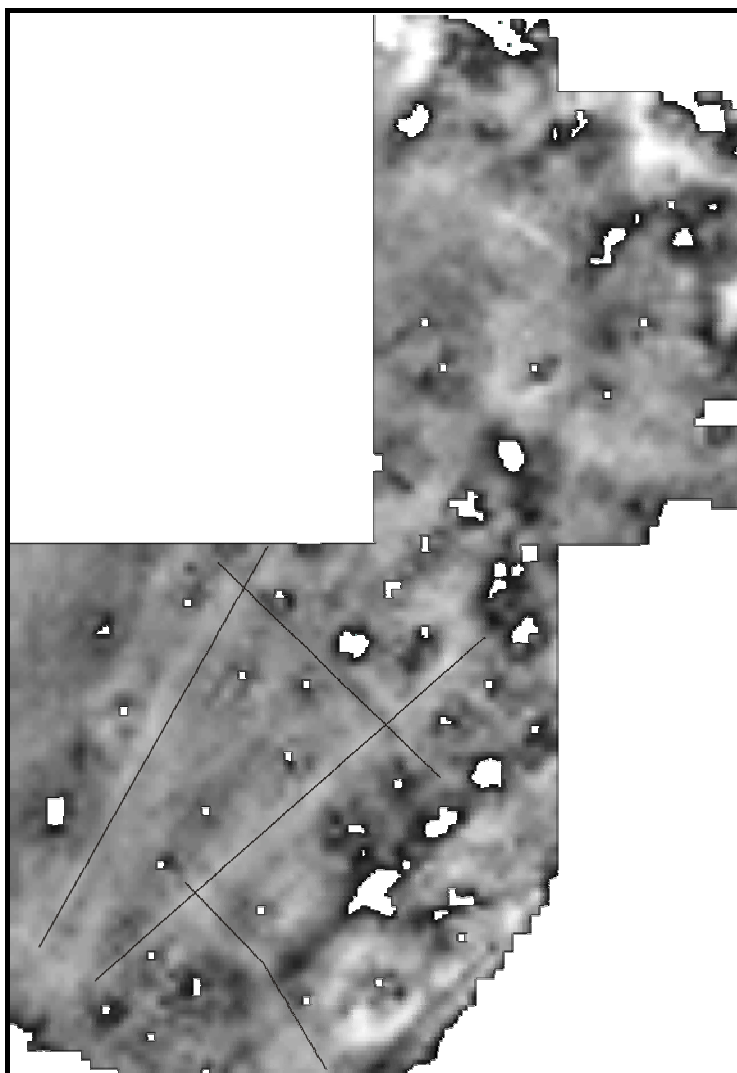
## 5.2 Αποτελέσματα της έρευνας ηλεκτρικών διασκοπήσεων από την θέση Καμπάνα της Μαρώνειας.

Στα *σχήμα (5.2)* δίνεται η απεικόνιση της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στο χώρο που ερευνήθηκε. Τα κενά που εμφανίζονται κατά τόπους είναι μικρές περιοχές όπου δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις λόγω βλάβστησης.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να προσέξουμε κατά την ερμηνεία των ηλεκτρικών διασκοπήσεων γιατί όπως παρατηρούμε γύρω από τα δέντρα, στο ριζικό τους σύστημα, παρατηρούνται υψηλές αντιστάσεις.

Γενικά, σε όλη την έκταση έρευνας υπάρχουν θετικές γραμμικές ανωμαλίες (σκούροι τόνοι) με διεύθυνση περίπου ΒΒΔ-ΝΝΑ και ΒΒΑ-ΝΝΔ. Οι ανωμαλίες σχηματίζουν σαφή γεωμετρικά σχήματα. Οι διευθύνσεις συμφωνούν, όπως θα δούμε παρακάτω, με αυτές που παρατηρήθηκαν από τη μαγνητική διασκόπηση και επιπλέον συμπίπτουν ως επί το πλείστον.

Οι γραμμικές ανωμαλίες, διατάσσονται σε γεωμετρικά σχήματα που προσομοιώνουν κατόψεις θεμελιώσεων. Τόσο στη μαγνητική έρευνα όσο και στην παρούσα οι διευθύνσεις των ανωμαλιών ερμηνεύονται ως δομικές διευθύνσεις. Στη θεώρηση αυτή συνηγορεί και το γεγονός ότι οι διευθύνσεις των αρχαίων θεμελιώσεων, που έχουν αποκαλυφθεί γύρω από το χώρο που ερευνήθηκε, ταυτίζονται με αυτές που αποτυπώνει η γεωφυσική έρευνα. Γενικά δίδεται η αίσθηση ότι οι θεμελιώσεις που εντοπίζονται αντιστοιχούν σε πυκνό πολεοδομικό ιστό.



Σχήμα 5.2 Κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης, στη περιοχή έρευνας στη θέση Καμπάνα στη Μαρώνεια, σε αποχρώσεις του γκρι.

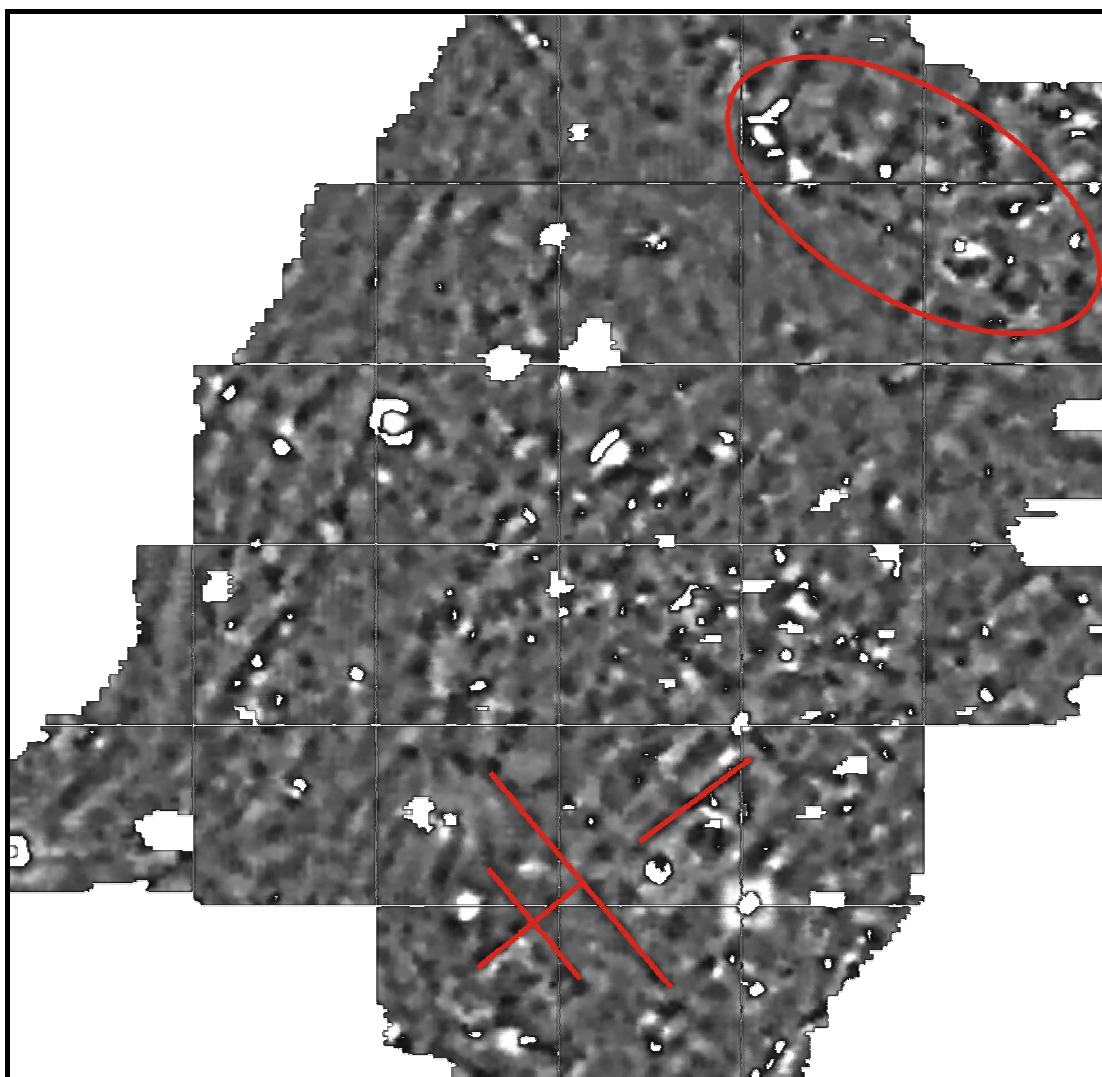
### 5.3 Αποτελέσματα μαγνητικών διασκοπήσεων από την θέση Καμπάνα της Μαρώνειας.

Στο σχήμα (5.3) δίνεται η απεικόνιση της κατανομής των πρώτων κατακόρυφων διαφορών του ολικού μαγνητικού πεδίου στο χώρο που ερευνήθηκε. Τα κενά που εμφανίζονται σε περιορισμένους τόπους στο χώρο που εξερευνήθηκε οφείλονται στην βλάστηση. Δηλαδή, είναι πολύ μικρές νησίδες μέσα στις οποίες δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις γιατί υπήρχαν συστάδες πυκνής βλάστησης.

Γενικά, στην έκταση του χώρου που ερευνήθηκε, υπάρχουν αρνητικές γραμμικές ανωμαλίες(σκούροι τόνοι-υπενθυμίζεται η αντιστροφή πολικότητας) μεγάλου μήκους. Αυτές εμφανίζονται με διεύθυνση περίπου BBD-NNA και BBA-NNA και τείνουν να σχηματίσουν σαφή γεωμετρικά σχήματα.

Στο σχήμα (5.3) οι αρνητικές γραμμικές ανωμαλίες, οι οποίες εμφανίζονται μέσα σε κόκκινο κύκλο δημιουργούν γεωμετρικά σχήματα που προσομοιώνουν κατόψεις θεμελιώσεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι παρουσιάζονται στις ίδιες δομικές διευθύνσεις με αυτές των αποκαλυμμένων θεμελίων. Αυτός είναι ένας επιπλέον λόγος να θεωρηθούν ότι αντανakλούν την ύπαρξη πιθανών αρχαίων λειψάνων. Επιπλέον, δίνουν την αίσθηση ύπαρξης πυκνού πολεοδομικού ιστού.

Στο κάτω μέρος του ιδίου σχήματος με κόκκινες γραμμές παρατηρείται μια δομή που πιθανόν να ανήκει σε κάποιο οικοδόμημα.



Σχήμα 5.3 Κατανομή των πρώτων κατακόρυφων διαφορών του ολικού μαγνητικού πεδίου στο χώρο έρευνας στη θέση Καμπάνα στη Μαρώνεια, σε αποχρώσεις του γκρι

Οι μηχανισμοί που προκαλούν τις μαγνητικές ανωμαλίες που κατεγράφησαν μπορούν να κατανοηθούν από τις μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας που πραγματοποιήθηκαν. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν τόσο δε δείγματα του αρχαίου δομικού υλικού που ευρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους όσο και στο υλικό των αποκαλυμμένων λειψάνων θεμελιώσεων κοντά στο χώρο έρευνας. Επίσης μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο επιφανειακό στρώμα του εδάφους αλλά και στο υπόστρωμα που εμφανίζεται στα κοντινά σκάμματα στα οποία αποκαλύφθηκαν αρχαιότητες. Οι μετρήσεις αυτές καταχωρούνται στον παρακάτω πίνακα (5.1).



Πίνακας 5.1. Μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας στο έδαφος και τα αρχαία δομικά υλικά στη θέση Καμπάνα κοντά στο αρχαίο θέατρο της Μαρώνειας.

| ΕΙΔΟΣ ΥΛΙΚΟΥ                                                           | ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ (ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ) | ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ (S.I) | ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| Έδαφος - Επιφανειακό στρώμα Topsoil                                    | 25                            | 128              | 35,8            |
| Έδαφος – Βαθύτερο στρώμα Subsoil                                       | 26                            | 182              | 36,4            |
| Κεραμική (διάσπαρτα δείγματα στο χώρο)                                 | 14                            | 1600             | 603             |
| Δομικό υλικό (Ασβεστιτικός Σχιστόλιθος)<br>Α κτήριο συμπλέγματος ιερού | 63                            | 21,2             | 19,7            |
| Δομικό υλικό (Ασβεστιτικός Σχιστόλιθος)<br>Α κτήριο συμπλέγματος ιερού | 46                            | 13,2             | 16,3            |
| Πιθανό δομικό υλικό<br>Κάνναβος M6985                                  | 9                             | 78,3             | 8,85            |

Εύκολα συνάγεται από τις μετρήσεις του πίνακα (5.1) ότι υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην τιμή της μαγνητικής επιδεκτικότητας μεταξύ των στρωμάτων του εδάφους και του κυρίως δομικού υλικού (Ασβεστιτικός Σχιστόλιθος) που χρησιμοποιήθηκε στους αρχαίους χρόνους.

Η διαφορά αυτή είναι περίπου μια τάξη μεγέθους πράγμα που σημαίνει ότι τα οικοδομικά λείψανα αναμένεται να δημιουργήσουν ανιχνεύσιμη μαγνητική ανωμαλία αρνητικού χαρακτήρα ως έχοντα τη χαμηλότερη μαγνητική επιδεκτικότητα. Επειδή η έρευνα έγινε το Σεπτέμβριο του 2004, οι παραπάνω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα υλικά που αποκαλύφθηκαν από την ανασκαφή μέχρι το χρονικό αυτό σημείο. Επομένως και τα συμπεράσματα αναφέρονται μέχρι το χρονικό αυτό όριο, δηλαδή δεν αποκλείεται δεν αποκλείεται κάποια ανατροπή εφόσον προστεθούν νέα ανασκαφικά δεδομένα.

Συμπερασματικά, τα παραπάνω δείχνουν ότι αναμένεται να εμφανιστούν ανωμαλίες, που θα προέρχονται από θαμμένα λείψανα. Φυσικά αναμένεται να εμφανιστούν ανωμαλίες στο μετρημένο πεδίο και από την παρουσία εκσκαφών στην αρχαία επιφάνεια ή την παρουσία δομών που έχουν υποστεί έντονη επίδραση πυρράς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1 Συμπεράσματα Ηλεκτρικών προσομοιώσεων.

Συνοψίζοντας όλα τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται από την μελέτη κάθε μοντέλου καταλήγουμε σε συμπεράσματα που αφορούν αρχικά την διάταξη πόλου-πόλου και την ανάλογή της, την διάταξη δίδυμου ηλεκτροδίου. Γενικά είναι φανερό ότι όσο πυκνώνει το βήμα δειγματοληψίας τόσο καλύτερη εικόνα απόκρισης του μοντέλου θα παίρνουμε.

Το βάθος διεξόδου της διάταξης εντοπίζεται στα 0,5m και με ανάπτυγμα των κινούμενων ηλεκτροδίων επίσης 0,5m. Με περαιτέρω αύξηση του βάθους ταφής του στόχου και με μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων η απόκριση των προσομοιώσεων θα είναι παραμορφωμένη.

Επίσης από τα μοντέλα που εξετάστηκαν είναι φανερό ότι όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα της δομής αυτών τόσο πιο παραμορφωμένη εικόνα παίρνουμε πολύ δε περισσότερο, υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούν δυο διαφορετικά μοντέλα με διαφορετική διάταξη να δώσουν την ίδια εικόνα.

### 6.2 Συμπεράσματα Ακολουθιών Επεξεργασίας των δεδομένων.

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν κατά την διάρκεια τόσο των ηλεκτρικών όσο και των μαγνητικών διασκοπήσεων επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα *Geoplot Version 3.00* της *Geoscan Research* και έπειτα από εφαρμογές διαφόρων φίλτρων πήραμε αποτελέσματα από τα οποία προκύπτουν οι πιθανές θέσεις αρχαίων λειψάνων.

Οι ακολουθία της επεξεργασίας των μετρήσεων από την εφαρμογή των ηλεκτρικών διασκοπήσεων ήταν αρχικά, η εφαρμογή του φίλτρου απομάκρυνσης ακραίων μετρήσεων (*Despike*) το οποίο εντοπίζει αυτόματα και απομακρύνει τυχαιές, ακραίες μετρήσεις που συχνά παρατηρούνται σε δεδομένα ηλεκτρικών διασκοπήσεων ή εντοπίζει και απομακρύνει τυχαία

υψίσυχνα σήματα (*iron spike*-μορφή καρφίου) που συχνά εμφανίζονται σε μαγνητικά δεδομένα. Ακολουθεί η εφαρμογή του φίλτρου συρραφής των κελιών (καννάβων) (*Edge Match*). Το φίλτρο αυτό αφαιρεί τις ασυνέχειες μεταξύ των πλευρών των καννάβων, κυρίως όταν οι ηλεκτρικές διασκοπήσεις γίνονται με την διάταξη του Διδύμου Ηλεκτροδίου (*Twin Probe*) και είναι αποτέλεσμα της μη σωστής τοποθέτησης των σταθερών ηλεκτροδίων. Ακολουθώντας εφαρμόστηκε φίλτρο διέλευσης ζώνης συχνοτήτων το οποίο είναι στην πραγματικότητα συνδυασμός υψιπερατού και χαμηλοπερατού φίλτρου. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δισδιάστατη παρεμβολή με χρήση διακυβικών συναρτήσεων. Στα δεδομένα αυτά αφού έχουν διορθωθεί από θόρυβο και έχουν εξομαλυνθεί, εφαρμόζουμε το φίλτρο του γεωμετρικού μέσου που έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση των τυχαίων, εσφαλμένων μετρήσεων. Έπειτα κάνουμε χρήση της διαδικασίας παρεμβολής και εν συνεχεία εφαρμόζουμε φίλτρο διέλευσης υψηλών συχνοτήτων για να απομακρύνουμε τα τεχνητά σήματα που έχουν προέλευση το στατιστικό σφάλμα που υπεισέρχεται εξαιτίας της παρεμβολής. Με την παραπάνω ακολουθία επεξεργασιών περνούμε την βέλτιστη εικόνα στην οποία μπορούν να εντοπισθούν οι θέσεις των θαμμένων αρχαιοτήτων λιγότερο στην αρχαιολογική περιοχή της Ν Απολλωνίας και περισσότερο στον Αρχαιολογικό χώρο της Μαρώνειας στην Θέση Καμπάνα.

Για την επεξεργασία των μετρήσεων που αποκτήθηκαν με την εφαρμογή μαγνητικών διασκοπήσεων έγινε αρχικά εφαρμογή του φίλτρου απομάκρυνσης ακραίων τιμών και στη συνέχεια επιχειρήθηκε συρραφή των ασυνεχειών που παρατηρούνται στα όρια των καννάβων (κελιών). Ακολούθησαν δυο βασικά βήματα στην επεξεργασία των μαγνητικών μετρήσεων που είναι η διαδικασία ισοστάθμισης των καννάβων (*Zero Mean Grid*) η οποία μεταθέτει τη μέση τιμή κάθε καννάβου πάνω ή κάτω έτσι ώστε να γίνει μηδέν και έπειτα η διαδικασία ισοστάθμισης των οδεύσεων (*Zero Mean Traverse*). Η διαδικασία αυτή μεταθέτει τον μέσο όρο των τιμών των οδεύσεων στο μηδέν. Η διαδικασία αυτή θεωρείται αναγκαία για διαφορεικά δεδομένα γιατί επαναφέρει το διπολικό χαρακτήρα των ανωμαλιών ο οποίος πιθανόν χάθηκε λόγω ερπυσμού του μέσου όρου. Ο ερπυσμός αυτός είναι

σύμφυτος με την αρχή λειτουργίας του οργάνου ρυθμιζόμενης μαγνητικής ροής όπως αυτό που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, η διαδικασία διορθώνει πιθανά σφάλματα λόγω κακής τοποθέτησης του οργάνου στη θέση που έπρεπε να πάρει κάποια μέτρηση.

Η ακολουθία συνεχίζεται με την εφαρμογή φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων. Έτσι ενισχύεται η ορατότητα των αδύναμων αρχαιολογικών δομών όπως βαθιά θαμμένα θεμέλια, μεγάλοι τάφροι και ανεπαίσθητες γραμμικές δομές. Μετά ακολουθεί εφαρμογή του φίλτρου γεωμετρικού μέσου. Το φίλτρο αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τα υψηλής πυκνότητας δεδομένα όπως στη περίπτωση της Μαρώνειας είναι τα μαγνητικά. Κατόπιν έγινε παρεμβολή για την εξομάλυνση των μετρήσεων και ολοκληρώθηκε η επεξεργασία με την χρήση του υπεπερατού φίλτρου για την απομάκρυνση των τεχνητών σημάτων που έχουν προέλευση το στατιστικό σφάλμα που υπεισέρχεται εξαιτίας της παρεμβολής.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις τελικές εικόνες μετά την επεξεργασία των μετρήσεων και παρατίθενται παρακάτω πρέπει να ερμηνευθούν σε συνδυασμό και με τα δεδομένα που θα προκύψουν από τις επικείμενες δοκιμαστικές ανασκαφές και στις δυο περιοχές. Με αυτό τον τρόπο θα έχουμε τα καλύτερα δυνατά συμπεράσματα των ερευνών μας. Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι όλες οι έρευνες πραγματοποιήθηκαν χωρίς την παραμικρή επέμβαση στον χώρο, δηλαδή με μη καταστροφικό τρόπο.

Τόσο τα συνθετικά παραδείγματα όσο και τα πραγματικά δεδομένα μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι δεν μπορεί να καθοριστεί γενικός κανόνας ως προς την ακολουθία των επεξεργασιών, στην οποία πρέπει να υποβληθούν τα δεδομένα.

Είναι φανερό ότι η απομάκρυνση των ακραίων τιμών, η συρραφή των δεδομένων διαφορετικών κελιών, και η παρεμβολή πρέπει να διενεργούνται πάντα και μάλιστα με τη σειρά που αναφέρθηκαν εστί ώστε να αποφεύγονται οι παρενέργειες.

Σημαντική επίσης παράμετρος η οποία καθορίζει και το είδος της επεξεργασίας που πρέπει να επακολουθήσει είναι το βάθος ταφής των αρχαιοτήτων. Όπως έδειξαν τα συνθετικά παραδείγματα το βάθος διείσδυσης

της διάταξης διδύμου ηλεκτροδίου είναι περίπου ίσο (ή λίγο μεγαλύτερο) με την απόσταση που έχουν τα κινητά ηλεκτρόδια μεταξύ τους. Επίσης έδειξαν ότι αν η απόσταση αυτή γίνει μεγαλύτερη από τη μια οριζόντια διάσταση των αρχαιοτήτων, τότε οι εικόνες που παίρνουμε δεν είναι γενικά καλές. Στην περίπτωση αυτή βοήθα ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης σε παράθυρα. Το γεγονός αυτό αναδεικνύεται με την περίπτωση των δεδομένων της Απολλωνίας (σχήμα 4.5).

Συνολικά όμως, μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει αλγόριθμος ακολουθίας επεξεργασίας. Κάθε περίπτωση πρέπει να θεωρείται ως μοναδική, να αντιμετωπίζεται με τη δέουσα προσοχή και να δοκιμάζονται διάφορες επεξεργασίες πριν καταλήξουμε στην εικόνα που θεωρούμε καλύτερη. Οι αρχαιολογικές και οι γεωλογικές πληροφορίες πρέπει να συνεκτιμούνται με μεγάλο βάρος.

Τέλος, είναι φανερό ότι αν δεν φαίνεται μια συγκεκριμένη ανωμαλία, έστω αμυδρά, στην εικόνα των αρχικών δεδομένων τότε το πιθανότερο είναι ότι δεν θα μπορέσουμε να κάνουμε τίποτε, οποιαδήποτε επεξεργασία και αν εφαρμόσουμε.

### 6.3 Συμπεράσματα από την περιοχή της Νέας Απολλωνίας.

Συνολικά εξερευνήθηκαν **19200m<sup>2</sup>** με τη μέθοδο της ηλεκτρικής χαρτογράφησης. Η έρευνα είχε αναγνωριστικό χαρακτήρα και από την ανάλυση που έγινε στα προηγούμενα κεφάλαια προκύπτει ότι στον συγκεκριμένο χώρο υπάρχουν ανωμαλίες σε κάποιες περιοχές που χαρακτηρίζονται ως ερειπιώνες καθώς επίσης υπάρχουν κάποιες γραμμικές ανωμαλίες που πιθανόν να οφείλονται σε λείψανα του αρχαίου πολεοδομικού ιστού. Γενικότερα χαρακτηρίζεται ως μια έρευνα φτωχή σε αποτελέσματα και αυτό γιατί σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις ηλεκτρικές προσομοιώσεις το βάθος ταφής των σωμάτων στην αρχαιολογική περιοχή της Ν Απολλωνίας είναι μεγαλύτερο πιθανών του 0,5m και άρα δεν είναι ευδιάκριτες οι θαμμένες αρχαιότητες. Το γεγονός αυτό ενισχύεται και

από την εμφάνιση στην επιφάνεια του εδάφους, των εξωτερικών τειχών της αρχαίας πόλης. Επίσης στις θέσεις των ερειπιώνων εκεί δηλαδή όπου οι αρχαιολογικές δομές είναι κατεστραμμένες είναι ευνόητο ότι η εικόνα που παίρνουμε δεν είναι ευκρινής. Αν συνδυάσουμε αυτό το γεγονός με την πολυπλοκότητα του μοντέλου, που αναφέρθηκε παραπάνω στα συμπεράσματα των ηλεκτρικών προσομοιώσεων, κατανοούμε ότι είναι λογικό να πάρουμε μια τέτοια παραμορφωμένη εικόνα.

Σημαντικό πρόβλημα και αιτία των φτωχών αποτελεσμάτων μπορεί να θεωρηθεί και η βαθιά άροση των αγρών οι οποίοι εξευνήθησαν. Η βαθιά άροση πρέπει να είχε καταστρέψει σημαντικό τμήμα των θαμμένων λείψανων των αρχαιοτήτων.

Παρόλα αυτά σε αρκετά σημεία οι γεωφυσικές ανωμαλίες τείνουν να λάβουν μορφή κανονικού γεωμετρικού σχήματος. Στα σημεία αυτά μπορούμε να πούμε ότι έχουμε λείψανα θεμελιώσεως οικοδομημάτων.

Αναμένονται λοιπόν τα ανασκαφικά ευρήματα στη συνέχεια και ιδιαίτερα αυτά που θα προκύψουν από τα δοκιμαστικά σκάμματα και θα αναδείξουν τις δομές που προκάλεσαν τη γεωφυσική εικόνα. Έτσι θα οδηγηθούμε σε πλήρη ερμηνεία των γεωφυσικών δεδομένων.

#### 6.4 Συμπεράσματα από την θέση Καμπάνα στη περιοχή της Μαρώνειας.

Συνολικά εξερευνήθηκαν **11200m<sup>2</sup>** με τη μέθοδο της μαγνητικής χαρτογράφησης και ένα μέρος αυτής της έκτασης **5500 m<sup>2</sup>** με την μέθοδο της ηλεκτρικής χαρτογράφησης. Από την ανάλυση των προηγούμενων σελίδων προκύπτει, ότι η γεωφυσική διασκόπηση στο συγκεκριμένο χώρο, έδειξε την ύπαρξη ανωμαλιών με σαφή γεωμετρικά σχήματα. Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήξαμε για κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Χρησιμοποιώντας και τις δυο μεθόδους, τα αποτελέσματα γίνονται πληρέστερα.

Οι δομές που προκαλούν τις γραμμικές ανωμαλίες στην ηλεκτρική διασκόπηση είναι πιθανά λείψανα του αρχαίου πολεοδομικού ιστού. Ιδιαίτερο

ενδιαφέρον προσδίδεται στις αρνητικές ανωμαλίες, της μαγνητικής διασκόπησης, επειδή οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας έδειξαν ότι τα θαμμένα οικοδομικά λείψανα αναμένεται να δημιουργούν ανωμαλίες με αρνητικό χαρακτήρα.

Στην περίπτωση του αρχαιολογικού χώρου της Μαρώνειας τα αρχαιολογικά λείψανα έχουν μικρότερο βάθος ταφής σε σχέση με αυτό στην περιοχή της Ν Απολλωνίας. Άρα είναι πιο εύκολη η αποτύπωση τους. Επίσης βοηθάει πολύ το γεγονός ότι βρίσκονται σε καλή κατάσταση οι αρχαιότητες και για αυτό δίνουν πιο ευκρινή εικόνα. Εκείνο που είναι όμως το πιο σημαντικό είναι ότι οι μαγνητικές διασκοπήσεις έγιναν με οδεύσεις και βήμα δειγματοληψίας 0,5m το οποίο βελτιώνει κατά πολύ τα αποτελέσματα που παίρνουμε.

Και σε αυτήν την περίπτωση όμως, όπως και στην Ν Απολλωνία, αναμένονται τα ανασκαφικά ευρήματα, ιδιαίτερα αυτά που θα προκύψουν από δοκιμαστικά σκάμματα στη θέση των ανωμαλιών που εντοπίστηκαν. Δηλαδή οι χάρτες που προέκυψαν από την γεωφυσική εξερεύνηση πρέπει να θεωρούνται στοιχείο το οποίο επιδέχεται περαιτέρω ερμηνείας εφόσον προστεθούν νέα δεδομένα, ιδίως ανασκαφικά.



## Βιβλιογραφία

Αδάμ-Βελένη Π. Απολλωνία η Μυγδονική. Το αρχαιολογικό έργο στη Μακεδονία και Θράκη 14,2000., 273-286, 2002.

Aitken, M.J., (1974). Physics and Archaeology. Clarendon Press, Oxford.

Aedona, E., A. Sarris, D. Kondopoulou and Y. Sanakis (1998) A detailed study of the archaeological site of Kitros (N. Greece) by combined magnetic and spectrometry methods. Poster presented at the 31<sup>st</sup> International Symposium on Archaeometry (Archaeometry '98), Budapest, Hungary.

Βλάχος, Δ. και Λιβιεράτος, Ε., (1981). Μαγνητομετρικές αποτυπώσεις αρχαιολογικών χώρων. Προκαταρκτική έκθεση μιας εφαρμογής. Ημερίδα «Συμβολή της Τοπογραφίας και Φωτογραμμετρίας στην Καταγραφή και Αποτύπωση Μνημείων και Ιστορικών συνόλων», Αθήνα 6 Αυγούστου.

Bevan, B.W., (2000). The Pole Pole Resistivity Array Compared to the Twin Electrode Array. Geosight Technical Report No.6.

Geoplot Version 3.00 for Windows (2003) Instruction Manual Version 1.94.

Καραδήμα Χ. Αρχαίο θέατρο Μαρώνειας 1981-2001: Τα αποτελέσματα της ανασκαφικής έρευνας την τελευταία εικοσαετία, Επιστημονική ημερίδα πολιτιστική εξέλιξη από την αρχαιότητα έως τα νεότερα χρόνια. Περιλήψεις εισηγήσεων, 2002.

Katambalos, K.E. and Tsioumis, A., (1988). Two case studies of two-level magnetic surveys in archaeological prospection. "Eratosthenes", 23, 309-327.

Katambalos, K.E., Loverdu-Tsigarida, K. and Tsioumis, A., (1991). Magnetic prospection at sites of archaeological interest: The castle of Platamon. Paper presented at the 2<sup>nd</sup> Southern European Conference on Archaeometry (March 1991 Delfi, Greece).

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966). Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Rpress Inc., Oxford.

Koukis (eds.) The Enginnering Geology Of Ancient Works, Monuments and Historical Sites-Preservation and Protection, 1121-24. Rotterdam: Balkema.

McNeil, J.D., (1980). Electrical Conductivity of Soils and Rocks. Technical note TN-5 Geonics Ltd. (Mississagua, Ontario).

Papamarinopoulos, St.P., Tsokas,G.N. and Williams,H., (1985). Magnetic and electric measurements on the island of Lesvos and the detection of byried relics. Geoexploration, 23, 169-187.

Papamarinopoulos, St.P. and Tsokas ,G.N. (1988). Gepysical studies in Eastern Crete for detection of ancient relics at Kavoussi." Proceedings of the international symposioum on Engineering Geology", Marinos and Koukis eds., Balkema, 1137-1142.

Papamarinopoulos, St.P., Jones,R. and Williams,H., (1988). Electric resistance survey of the southern part of the buried ancient town of Stymphalos. Geoexploration, 25, 255-261.

Rocca, A. (1992). The effect of anisotropy in the electrical measurements of archaeological sites. Proceedings of the A' Symposium of Archaeometry of the Greek Archaeometry Society, Athens 1990: 156-60.

Sarris, S. et Vassiliadis, C., (1978). Etude stratigraphique de l' Acropole D' Amathonte (Chypre) par sondage electriques. These du D.E.A. Universite Pierre et Marie Curie (Paris VI).

Sarris A. and R.E. Jones (2000). Geophysical and Related Techniques Applied to Archaeological Survey in the Mediterranean: A Review. Journal of Mediterranean Archaeology Vol. 13 No 1 June 2000, 3-75.

Savvaidis, A. G.N. Tsokas, Y Liritzis and M. Apostolou (1999) The location and mapping of ancient ruins on the castle of Lefkas (Greece) by resistivity and GPR methods. Archaeological Prospection 6: 63-73.

Scollar, I., Weidner, B. and Segeth, K., (1986). Display of archaeological magnetic data. Geophysics, 51, 623-633.

Sheriff, R.E., (1991). Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics. Society of Exploration Geophysicists (Tulsa, Oklahoma).

Tsokas, G.N., Rocca, A.C. and Papazachos, B.C. (1984). Magnetic prospecting at the prehistoric site of the village Mandalo in Northern Greece. South European Conference on Archaeometry, Delfi, Greece.

Tsokas, G.N., Rocca, A.C., (1986). Geophysical prospecting at archaeological sites with some examples from Northern Greece. First Break, 4, 8, 31-39.

Tsokas, G.N., and Saatsoglou-Paliadeli, C., (1988). The discovery of the relics of a complex of walls in ancient Aegean (Vergina, N. Greece) by geophysical investigations. *Archaeophysika*, 25, 435-437.

Tsokas, G.N. and L.G. Kyriakidis (1988) On a forward deconvolution process applied to magnetic data from archaeological sites. In P.G. Marinou and G.C.

Tsokas, G.N., Rocca, A.C., and Bessios, M. (1989). Geophysical investigations in the area of the tumulus of "Alikí" near Kitros, ancient Pydna. *Sci, Ann. Fac. Phys. Mathem.*, 1, 25-34.

Tsokas, G.N., Liritzis, J., (1990). Resistivity prospecting in the centre of Athens for the detection of buried Antiquities. *Prospezioni Archaeologiche*, 1, 133-143.

Tsokas, G.N., Giannopoulos A., Tsourlos P., Vargemezis G., Tealby J.M., Sarris A., Papazachos C.B and Savopoulou T., (1994). A large scale geophysical survey in the archaeological site of Europos (northern Greece). *Journal of Applied Geophysics* 32, 85-98.

Tsokas, G.N., G. Vargemezis, S. Kiliadis and Th. Pazaras (1996). Geophysical investigation of the archaeological site of Epanomi, Thessaloniki. Paper presented at the 3rd Symposium of the Greek Archaeometry Society, Athens, Greece.

Tsokas, G.N., A. Sarris, M. Pappa, M. Bessios, C.B. Papazachos, P. Tsourlos and A. Giannopoulos., (1997). A large scale magnetic survey in Maktygialos (Pieria), Greece. *Archaeological Prospection* 4: 123-37.

Tsourlos P., Tsokas G.N., Giannopoulos A. and Savopoulou T., (1996). Geoelectrical mapping and tomography at the late Roman Era cemetery of the

archaeological site of Europos (N. Greece). Paper presented at the 3rd Symposium of the Greek Archaeometry Society, Athens, Greece.

Τσόκας, Γ.Ν., (1993). Πρόσφατη εξέλιξη και προοπτική των γεωφυσικών μεθόδων εντοπισμού αρχαιοτήτων. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> συνεδρίου συλλόγου γεωφυσικών Ελλάδας Φλώρινα, 106-126.

Τσόκας, Γ.Ν., (1988). Ανάπτυξη των γεωφυσικών εφαρμογών σε αρχαιολογικούς χώρους στην Ελλάδα. Πρακτικά Πρώτου Συμποσίου για τις νέες Εξελίξεις στη Σεισμολογία και Γεωφυσική του Ελληνικού Χώρου. Θεσσαλονίκη, 91-100.

Tsourlos, P.I and Ogilvy, R.D., (1998). An algorithm for the 3-D inversion of tomographic resistivity and induced polarization data: Preliminary results. Journal of the Balkan Geophysical Society, 2, 30-45.

Tsourlos, P.I., (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D.Thesis, Department of Electronics, University of York.

Vafidis, A., G.N. Tsokas, M.Z. Loucoyannakis, K. Vasiliadis, C.B. Papazachos and G. Vargemezis., (1995) Feasibility study on the use of seismic methods in detecting monumental tombs buried in tumuli. Archaeological Prospection 2, 119-28.

Wynn, J.C., (1986). Archaeological prospection: An introduction to the special issue. Geophysics, 51, 3, 533-537.

[http://www.aneth.gr/1212\\_popXartis2.asp](http://www.aneth.gr/1212_popXartis2.asp)  
<http://www.geoscan-research.co.uk/page15.html>  
<http://www.geoscan-research.co.uk/page28.html>  
[http://www.ims.forth.gr/rg\\_geophysics-gr.html](http://www.ims.forth.gr/rg_geophysics-gr.html)  
<http://galitzin.mines.edu/INTROGP/>