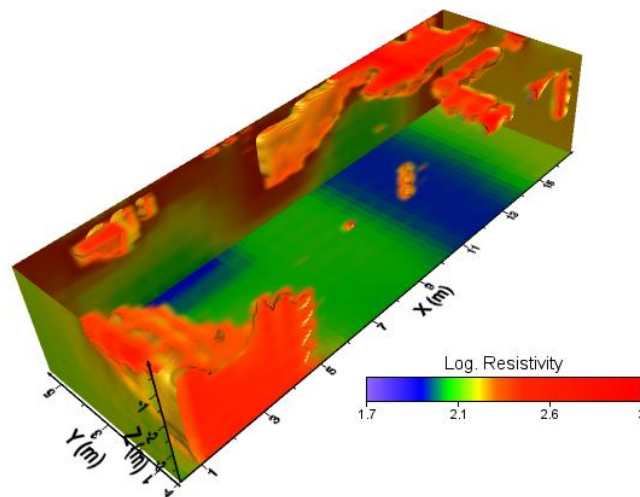


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ – ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΘΑΜΜΕΝΩΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ



ΝΙΒΟΡΛΗΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ

ΤΣΟΥΡΛΟΣ Π.

ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ Γ

ΤΣΟΚΑΣ Γ.

Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ..

Καθηγητής Α.Π.Θ.

*Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη
στους γονείς μου για την βοήθεια τους
και την εμπιστοσύνη τους σε εμένα όλα
αυτά τα χρόνια....*

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων. Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή στις βασικές αρχές που διέπουν την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην συνέχεια, γίνεται μία περιγραφή της περιοχής όπου έλαβε χώρα η συγκεκριμένη μελέτη, από ιστορικής και γεωλογικής σκοπιάς, αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων και στο τελευταίο κεφάλαιο υπάρχουν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή. Τα δεδομένα αναλύθηκαν αρχικά σε δύο διαστάσεις και έπειτα έγινε η σύνθεση τους και συνολική επεξεργασία, με σκοπό την δημιουργία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Οι τελικές εικόνες εμφανίζουν γεωηλεκτρικές ανωμαλίες που ερμηνεύονται ως δομές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Abstract

The topic of this thesis is the application of electrical resistivity tomography method, for the location of buried antiquities. The basic principles of the method are explained and the area of study is described in respect of its historical background and its geological environment. The methodology used for data acquisition and processing is analyzed. The processing of the data took place, first, in two dimensions and then data were combined and processed in a fully 3D mode. The resulting 3D geoelectrical images reveal anomalies which are associated to structures of potential archaeological interest.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	5
2. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης	8
2.1. Γενικά.....	8
2.2. Φαινόμενη αντίσταση	10
2.3 Αντιστροφή.....	12
3. Η περιοχή της μελέτης	14
3.1 Ιστορική αναδρομή στην περιοχή.....	14
3.2 Γεωλογικά στοιχεία για την γύρω περιοχή	16
4. Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων.....	18
4.1 Συλλογή των δεδομένων	18
4.2. 2-D αντιστροφή.....	24
4.3. 3-D αντιστροφή.....	29
5. Συμπεράσματα	44
6. Βιβλιογραφία	46

1. Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εφαρμογή της μεθόδου της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας (HT) για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων.

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία αποτελούν τμήμα μιας γεωφυσικής διασκόπησης μεγαλύτερης κλίμακας που εκτελέστηκε στην περιοχή της Ανακτορούπολης Καβάλας, στα πλαίσια του προγράμματος «Εκτέλεση εργασιών γεωφυσικής διασκόπησης εδάφους για τον εντοπισμό υπεδάφίων αρχαιοτήτων στην Ανακτορούπολη» (Εργο ΕΛΚΕ ΑΠΘ, Ε.Υ. Γ. Τσόκας) που εκτελέστηκε από μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του ΑΠΘ.

Στα πλαίσια του προγράμματος Ε.Σ.Π.Α. «Στερέωση-Αποκατάσταση Οχύρωσης Ανακτορούπολης», υπό την επίβλεψη της 12^{ης} Εφορείας Αρχαιοτήτων Καβάλας, ζητήθηκε από τα μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής να διενεργήσουν γεωφυσική διασκόπηση εδάφους με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων στην περιοχή εντός του κάστρου της Ανακτορούπολης, με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας βρίσκει άριστη εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου οι στόχοι έχουν σημαντική αντίθεση στην ηλεκτρική τους αντίσταση με το περιβάλλον. Στην αρχαιομετρία ως στόχους εννοούμε τις δομές που θέλουμε να εντοπίσουμε και συνήθως έχουν υψηλή αντίσταση επειδή αποτελούνται από δομικούς λίθους των οποίων το υλικό εξαρτάται από την εποχή. Ο εντοπισμός τους βασίζεται στην αντίθεση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεδομένου ότι βρίσκονται θαμμένοι σε χαλαρά εδάφη τα οποία παρουσιάζουν σχετικά μικρές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης.

Η συλλογή των δεδομένων έγινε με το όργανο Syscal Pro της IRIS Instruments, με την χρήση πολύκλωνων καλωδίων σε προφίλ 2 διαστάσεων. Το κάθε προφίλ είχε 24 ηλεκτρόδια σε αποστάσεις 0.75 μέτρων (17.25 μέτρα συνολικό μήκος). Έγιναν μετρήσεις σε

6 – Εφαρμογή της μεθόδου της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων

παράλληλα προφίλ, τα οποία είχαν μεταξύ τους απόσταση 0.75 μέτρων, με σκοπό να δημιουργηθεί ένας κάνναβος μετρήσεων στον οποίο μελετήθηκε η κατανομή της αντίστασης στις 3 διαστάσεις.

Με την παραπάνω διαδικασία μετρήθηκαν 13 κάνναβοι στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται αρχικά ξεχωριστά για το κάθε προφίλ και έπειτα για τον κάθε κάνναβο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τους καννάβους 5 και 10, καθώς και για 2 προφίλ που έγιναν ξεχωριστά με σκοπό τον εντοπισμό ενός διατοιχίσματος.

Στο 2^ο κεφάλαιο θα γίνει μία σύντομη αναφορά στις βασικές αρχές που διέπουν την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η περιοχή μελέτης και δίνονται κάποια ιστορικά στοιχεία για την περιοχή.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια της επεξεργασίας των δεδομένων με τελικό σκοπό την τρισδιάστατη εικόνα της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος.

Στο 5^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις πεδίου και από την παρούσα διπλωματική εργασία και στο τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσούρλο Παναγιώτη, Καθηγητή του Α.Π.Θ. για την πολύτιμη βοήθειά του στα πρώτα μου βήματα στην επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων και τις συμβουλές του για την επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής μου. Τον κ. Βαργεμέζη Γιώργο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Α.Π.Θ. για την συνεργασία του στα πλαίσια όχι μόνο αυτής της διπλωματικής, αλλά και σε κάθε μου βήμα στον χώρο της εφαρμοσμένης

γεωφυσικής κατά την διάρκεια των σπουδών μου. Τον κ. Τσόκα Γρηγόρη, Καθηγητή του Α.Π.Θ. επιστημονικό υπεύθυνο του προγράμματος για την εμπιστοσύνη του σε εμένα και την συμμετοχή μου στο επιστημονικό πρόγραμμα, από την οποία απέκτησα πολύτιμες εμπειρίες και τον κ. Φίκο Ηλία, μέλος Ε.ΔΙ.Π. για την βοήθεια του σε τεχνικά ζητήματα και τις συμβουλές του στο ύπαιθρο.

2. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

2.1. Γενικά

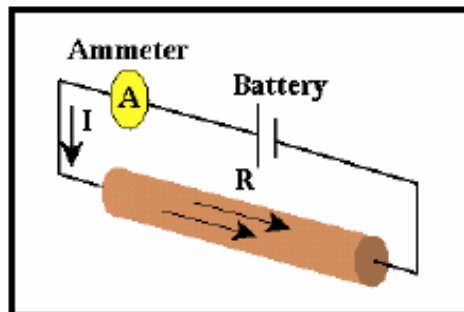
Για την μελέτη της δομής του υπεδάφους με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, διοχετεύοντας ηλεκτρικό ρεύμα σ' ένα δίπολο ηλεκτροδίων ρεύματος AB, μετράται η διαφορά δυναμικού σε ένα άλλο δίπολο MN. Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού V με την ένταση του ρεύματος I , μας δίνει την αντίσταση R , σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$R = \frac{V}{I}$$

Η τιμή όμως της αντίστασης εξαρτάται και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού, γι' αυτό τον λόγο σημαντική είναι η κατανόηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης όπου λαμβάνει υπόψιν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού σύμφωνα με τον τύπο:

$$\rho = \frac{s}{l} * R,$$

όπου S η διατομή του αγωγού, l το μήκος του αγωγού και R η αντίσταση του αγωγού.



2.1.1. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση αγωγού μήκους l , διατομής S και αντίστασης R .

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση μετράται σε Ohm.m ενώ το αντίστροφό της, η αγωγιμότητα ορίζεται ως:

$$\sigma = \frac{1}{\rho},$$

και μετράται σε Siemens ανά μέτρο (S/m)

Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης ενός πετρώματος εργαστηριακά, χρησιμοποιούνται κυλινδρικά κομμάτια και εφαρμόζεται ο παραπάνω τύπος. Το σχήμα λοιπόν της κάθε δομής επηρεάζει την αντίστασή της. Όπως είναι κατανοητό, μέσα στην γη, το σχήμα των διαφόρων πετρωμάτων (αγωγών) δεν μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί, παρ' όλα αυτά όποιο και να είναι επηρεάζει την τιμή της αντίστασης συνεπώς μιλάμε για ειδική ηλεκτρική αντίσταση.

Η αντίσταση του ρεύματος εκφράζει την ευκολία ή την δυσκολία που συναντάει το ρεύμα καθώς διαρρέει τον αγωγό, την γη στην συγκεκριμένη περίπτωση, και εξαρτάται από την λιθολογία, την θερμοκρασία και το πορώδες ή καλύτερα θα λέγαμε το ποσοστό υγρασίας. Προσπαθούμε λοιπόν να αποδώσουμε, τις διαφορετικές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, κυρίως σε αλλαγές στην λιθολογία, με δεδομένο ότι στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας αναφερόμαστε σε πολύ μικρά βάθη. Σε μεγαλύτερων διαστάσεων διασκοπήσεις ο παράγοντας της υγρασίας παίζει κυρίαρχο ρόλο στην τελική τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ σημαντική είναι και η επίδραση της θερμοκρασίας σε έρευνες γεωθερμικών πεδίων.

Βλέποντας λοιπόν την τιμή της αντίστασης μπορούμε να συμπεράνουμε αν μιλάμε για έναν καλό ή έναν κακό αγωγό. Διαφορετικά είδη πετρωμάτων, έχουν διαφορετικές τιμές αντίστασης δεν υπάρχουν όμως απόλυτα συγκεκριμένες αντιστοιχίες τιμών ειδικής

ηλεκτρικής αντίστασης με τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Για την ακρίβεια η τιμή της αντίστασης κάθε πετρώματος μπορεί να πάρει ένα εύρος τιμών. Γι' αυτό τον λόγο η ερμηνεία των μετρήσεων που θα προκύψουν απαιτεί χρήση γεωλογικών παρατηρήσεων και όποιων άλλων γνώσεων μπορεί να έχουμε για την περιοχή έρευνας, με σκοπό την σωστή ερμηνεία και την αποφυγή μεγάλων παρερμηνειών.

2.2. Φαινόμενη αντίσταση

Στην περίπτωση που το μοντέλο μας στο οποίο θέλουμε να μετρήσουμε την ηλεκτρική αντίσταση είναι η γη, τα πράγματα είναι πιο σύνθετα. Στην περίπτωση αυτή η διάδοση του ρεύματος γίνεται μέσα σε ένα ανομοιογενές υλικό, έχοντας ως συνέπεια η τιμή της αντίστασης που μετράμε να εξαρτάται και από έναν ακόμα παράγοντα, από την θέση των ηλεκτροδίων. Η μετρούμενη αυτή ποσότητα, ονομάζεται φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση, δεν έχει κάποια φυσική υπόσταση, αλλά μας βοηθάει να υπολογίσουμε την πραγματική κατανομή των ειδικών αντιστάσεων στο υπέδαφος.

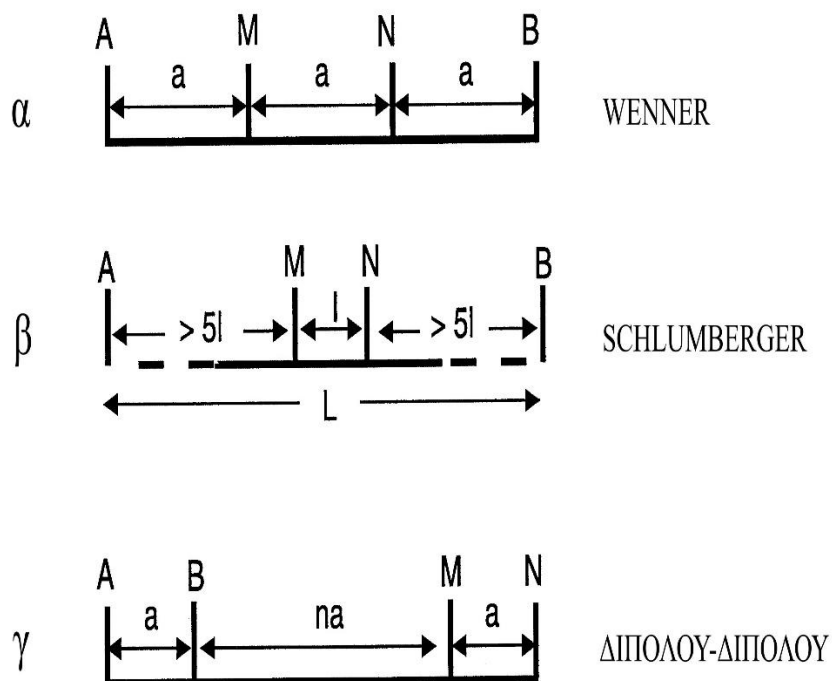
Η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_a = R * K,$$

όπου R η αντίσταση του υλικού και K ο γεωμετρικός παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την διάταξη των ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιήσουμε.

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, για κάθε μέτρηση χρειαζόμαστε ένα δίπολο ρεύματος (AB) και ένα δίπολο δυναμικού (MN). Η θέση αυτών των διπόλων στον χώρο, και συγκεκριμένα οι αποστάσεις που θα έχουν μεταξύ τους, καθορίζουν τον γεωμετρικό παράγοντα, K. Οι πιο γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι Wenner, Schlumberger και η διπόλου-διπόλου. Η κάθε διάταξη, έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, συνεπώς δεν

υπάρχει μία διάταξη για όλες τις ανάγκες, αλλά ανάλογα με τον στόχο επιλέγεται κάθε φορά η πιο κατάλληλη. Στα επόμενα σχήματα φαίνεται η γεωμετρία των διατάξεων αυτών.



2.2.1. Οι πιο γνωστές διατάξεις ηλεκτροδίων (Τσούρλος 1995).

Το βάθος διασκόπησης καθορίζεται από το μέγιστο άνοιγμα που έχουν τα ηλεκτρόδια, επειδή όμως η μέθοδος αυτή, είναι μία μέθοδος διάχυσης, αυτό έχει ως αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το βάθος να μειώνεται η διακριτική ικανότητα.

Στην περίπτωση που κρατήσουμε σταθερό το άνοιγμα των ηλεκτροδίων (άρα σταθερό βάθος διασκόπησης) και μετακινούμε την διάταξη σε διαφορετικές θέσεις σε μία περιοχή, έχουμε ως αποτέλεσμα μία οριζοντιογραφία, την κατανομή δηλαδή της αντίστασης στο ίδιο βάθος, σε όλη την περιοχή έρευνας.

Στην περίπτωση όμως που θέλουμε να μελετήσουμε την κατανομή της αντίστασης με το βάθος μπορούμε να κρατήσουμε σταθερά τα ηλεκτρόδια δυναμικού (MN) και να

ανοίγουμε συνεχώς τα ηλεκτρόδια ρεύματος (AB) (η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιεί την διάταξη Schlumberger, μπορούμε να έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα χρησιμοποιώντας άλλες διατάξεις). Στη περίπτωση αυτή, έχουμε ως αποτέλεσμα μία βυθοσκόπηση, την κατανομή δηλαδή της αντίστασης σε διαφορετικά βάθη σε μία στήλη στο κέντρο της διάταξής μας.

Η ηλεκτρική τομογραφία αποτελεί την ενοποίηση των δύο μεθόδων και μετράει την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης σε μία τομή, σε δύο διαστάσεις (πλευρικά και σε βάθος). Επίσης για να μην είναι συχνή η αλλαγή των ηλεκτροδίων χρησιμοποιούνται πολύκλινα καλώδια, που έχουν εξόδους για 24 ή 48 ή 96 (υπάρχουν όργανα που μπορούν να χρησιμοποιήσουν και περισσότερα) ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται αρχικά στις θέσεις τους στο προφίλ, πακτώνονται στο έδαφος και συνδέονται με το όργανο και στην συνέχεια το όργανο, έχοντας ως οδηγό ένα πρωτόκολλο που έχουμε ορίσει εμείς, δίνει ρεύμα σε ένα δίπολο και μετράει την διαφορά δυναμικού σε ένα άλλο μέχρι να τελειώσουν όλοι οι συνδυασμοί που έχουμε ορίσει.

2.3 Αντιστροφή

Ένα μοντέλου εδάφους, πεπερασμένων στοιχείων, αναλόγως και με την μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί στην κάθε περίπτωση, μπορεί να δώσει μία μόνο κατανομή φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Ο υπολογισμός της κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης (λύνοντας τις διαφορικές εξισώσεις της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη) μίας γνωστής δομής πεπερασμένων στοιχείων, ονομάζεται ευθύ πρόβλημα.

Στην εφαρμοσμένη γεωφυσική όμως, αυτό που μετράμε στο ύπαιθρο είναι η φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση, έχοντας ως στόχο να καταλήξουμε στην δομή του υπεδάφους. Αυτό ονομάζεται αντίστροφο πρόβλημα και η λύση του δεν είναι μοναδική. Η διαδικασία μέσα από την οποία οι μετρούμενες ποσότητες της φαινόμενης ηλεκτρικής

αντίστασης μας δίνουν την δομή του υπεδάφους ονομάζεται αντιστροφή και βασίζεται σε μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία κατά την οποία αλλάζουμε συνεχώς ένα αρχικό μοντέλο μέχρις ότου οι εξαγόμενες τιμές φαινόμενες ηλεκτρικής αντίστασης από το μοντέλο μας (ευθύ πρόβλημα) να έχουν το ελάχιστο δυνατό σφάλμα με τις μετρήσεις πεδίου που συλλέξαμε.

Λόγω της μη μοναδικότητας της λύσης χρειάζεται προσοχή και έλεγχος από τον χρήστη σε κάθε στάδιο επεξεργασίας των δεδομένων και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Επίσης απαιτείται η λύση του ευθέως προβλήματος να είναι γνωστή, για να είναι δυνατή η παραγωγή συνθετικών δεδομένων.

3. Η περιοχή της μελέτης

Η περιοχή μελέτης ανήκει στον Δήμο Παγγαίου, στην δημοτική ενότητα Ελευθερών του Νομού Καβάλας. Στην περιοχή μελέτης υπάρχει ένα βυζαντινό κάστρο που πιστεύεται ότι ανήκει στην βυζαντινή πόλη Ανακτορούπολη, η οποία βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα του όρμου των Ελευθερών. Στην παρακάτω εικόνα από το google earth, φαίνεται η ευρύτερη περιοχή του όρμου των Ελευθερών καθώς και η περιοχή μελέτης. Στην δορυφορική αυτή εικόνα διακρίνονται πολύ καλά ο περίβολος του κάστρου, καθώς και κάποιες δομές μέσα από το κάστρο που αντιστοιχούν σε αρχαιολογικά ευρήματα (τοιχία, οικίες κ.α.).



3.1. Η ευρύτερη περιοχή των Ελευθερών και η περιοχή μελέτης.

3.1 Ιστορική αναδρομή στην περιοχή

Η βυζαντινή Ανακτορούπολη (αρχαία Οισύμη), ιδρύθηκε στο τρίτο τέταρτο του 7^{ου} π.Χ. αιώνα από τους Πάριους αποίκους της Θάσου. Η οικονομία της στηριζόταν στη γεωργική παραγωγή, ενώ, η αμπελοκαλλιέργεια καταλάμβανε ιδιαίτερη θέση στην περιοχή,

καθώς η γύρω περιοχή που ονομαζόταν Βιβλία, φημιζόταν για το κρασί της, τον βίβλινον οίνον.

Έως τον 4^ο π.Χ. αιώνα, ως αποικία της Θάσου, η Οισύμη εξαρτιόταν από αυτήν και αποτελούσε μέρος της Θασίων ηπείρου. Κατά την διάρκεια του 4^{ου} π.Χ. αιώνα όμως η περιοχή γνωρίζει μία σύντομη περίοδο ανεξαρτησίας, γεγονός που μαρτυράται από την κοπή χάλκινων νομισμάτων, τα οποία απεικόνιζαν την πολιούχο θεά Αθηνά και έφεραν επάνω την επιγραφή Οισυμαίων, δηλαδή το όνομα των κατοίκων της Οισύμης.

Τα χρόνια του βασιλεία Φιλίππου Β' (356-336 π.Χ.) η πόλη κατακτιέται από τους Μακεδόνες και μετονομάζεται σε Ημαθία.

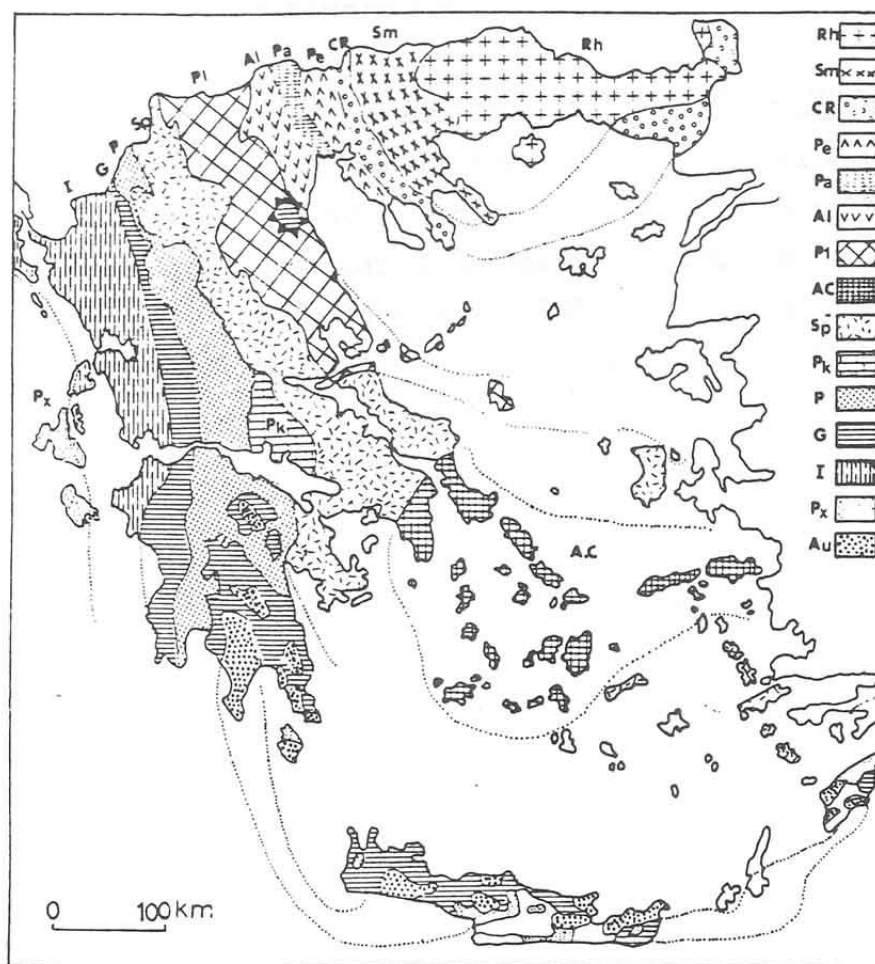
Κατά τα βυζαντινά χρόνια, βορειοανατολικά της Οισύμης, σε ένα χαμηλό λόφο αναπτύσσεται η πόλη της Ανακτορούπολης. Τα τείχη της Ανακτορούπολης, σύμφωνα με μία επιγραφή που βρέθηκε στο νότιο τείχος, αναγέρθηκαν στο 1167-1170 μ.Χ. από τον Μεγάλο Δούκα, Ανδρόνικο Κοντοστέφανο, διοικητή του βυζαντινού στόλου.

Στα μέσα του 14^{ου} αιώνα μ.Χ. η πόλη πέφτει στα χέρια του πειρατή Αλέξιου από την Βιθυνία, το 1357 μ.Χ. περνάει με προνόμιο του αυτοκράτορα Ιωάννη Ε', μαζί με άλλες πόλεις της περιοχής στους αδερφούς Αλέξιου και Ιωάννη οι οποίοι επέκτειναν την κυριαρχία τους από τις εκβολές του Στρυμόνα ως την Χριστούπολη (σημερινή Καβάλα), χάρη στις στρατιωτικές τους επιτυχίες ενάντια στους Σέρβους.

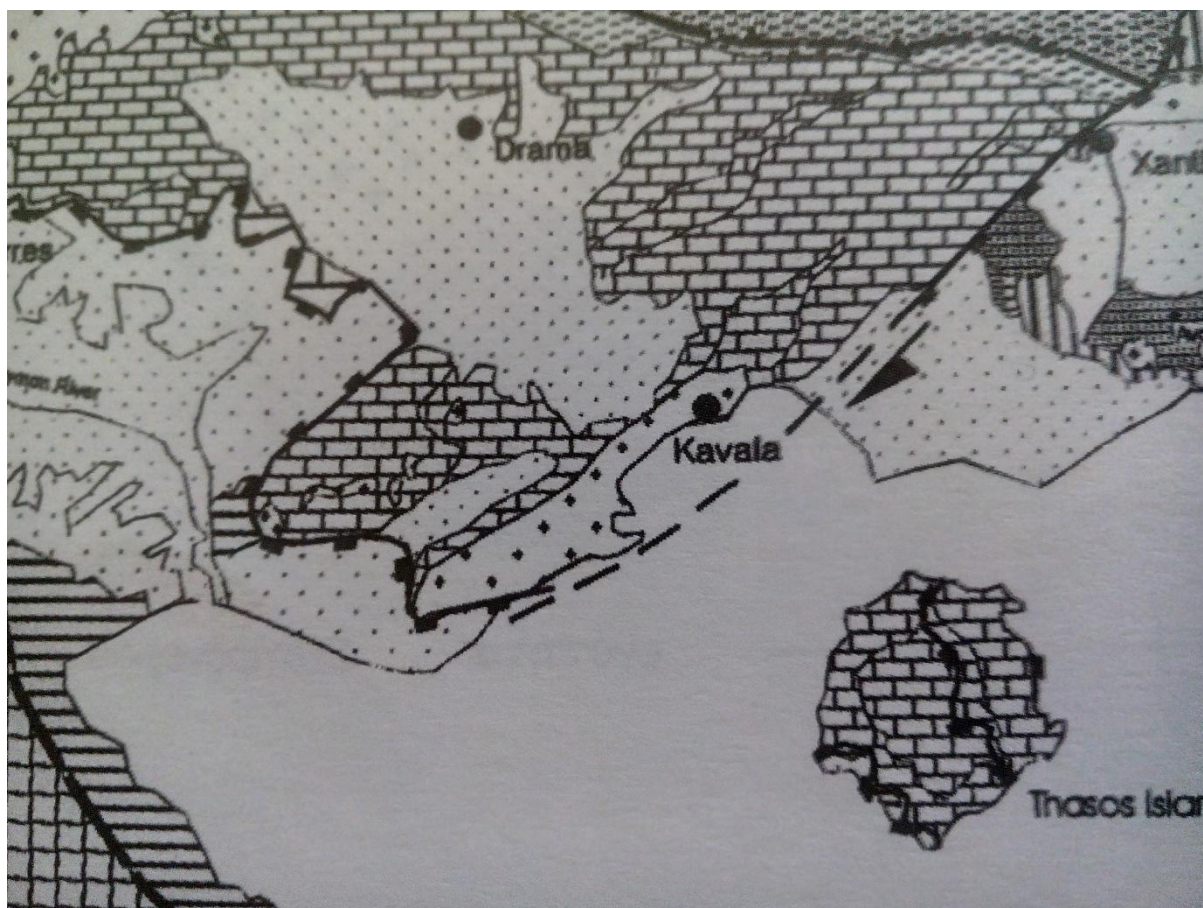
Στα τέλη του 14^{ου} αιώνα μ.Χ. το φρούριο κατακτήθηκε από τους Τούρκους και άρχισε η παρακμή. Παρ' όλο που τα πρώτα χρόνια το φρούριο κατοικούνταν, στα τέλη του 18^{ου} αιώνα μ.Χ. ο περιηγητής Cousinery βρίσκει το κάστρο απροσπέλαστο και εντελώς εγκαταλελειμμένο. Στην γύρω περιοχή όμως σημειώνει την ύπαρξη ενός μικρού χωριού με το όνομα Λεφτέρ, τις σημερινές Ελευθερές.

3.2 Γεωλογικά στοιχεία για την γύρω περιοχή

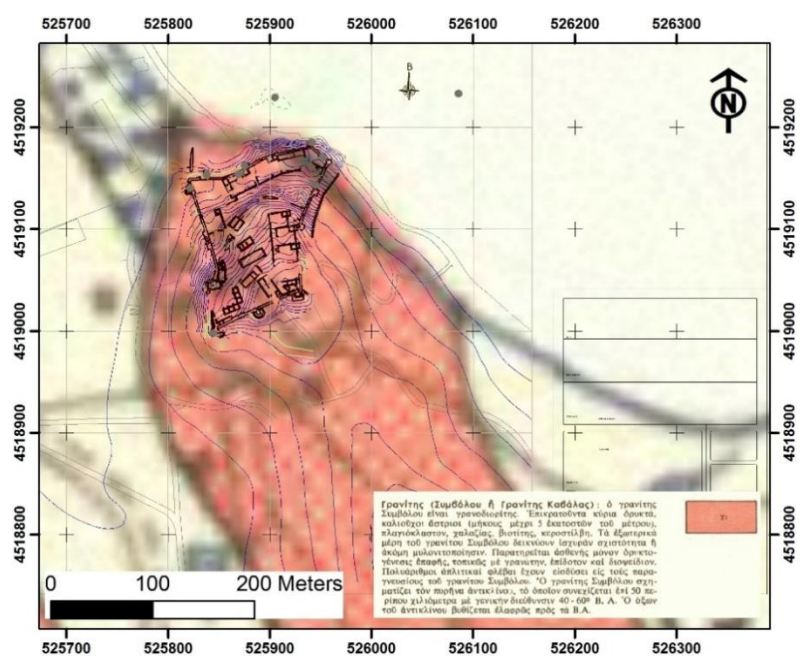
Η ευρύτερη περιοχή ανήκει γεωλογικά στην μάζα της Ροδόπης, στην ενότητα του Παγγαίου (σύμφωνα με Μουντράκη 1983) και στην περιοχή μελέτης υπάρχουν εμφανίσεις από γρανίτη, ο οποίος αποτελεί το υπόβαθρο της θέσης και εντοπίστηκε κατά την διάρκεια των εργασιών υπαίθρου. Όπως αναφέραμε και πιο πάνω οι αρχαιολογικοί στόχοι είναι θαμμένοι σε χαλαρά εδάφη. Οι εμφανίσεις γρανίτη στην περιοχή αποτελούν κρίσιμο στοιχείο, στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς μία τέτοια εμφάνιση σε μικρό βάθος, θα έχει παρόμοια ανωμαλία (μεγάλη αντίσταση) με έναν αρχαιολογικό στόχο.



3.2.1. Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. Rh: Μάζα της Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα, CR: Περιροδοπική ζώνη, (Pe: Ζώνη Παιανίας, Pa: Ζώνη Πάικου, Al: Ζώνη Αλμωπίας) = Ζώνη Αζιού, PI: Πελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Pk: Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας, P: Ζώνη Πίνδου, G: Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, I: Ιόνιος ζώνη, Px: Ζώνη Παξών ή Προαπούλια, Au: Ενότητα "Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι" πιθανόν της Ιονίου ζώνης. (Μουντράκης 1983).



3.2.2. Στην περιοχή μελέτης υπάρχει χαρτογραφημένος γρανίτης ηλικίας 38-23ma. (Μουντράκης 1983).



3.2.3. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής

4. Συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων

4.1 Συλλογή των δεδομένων

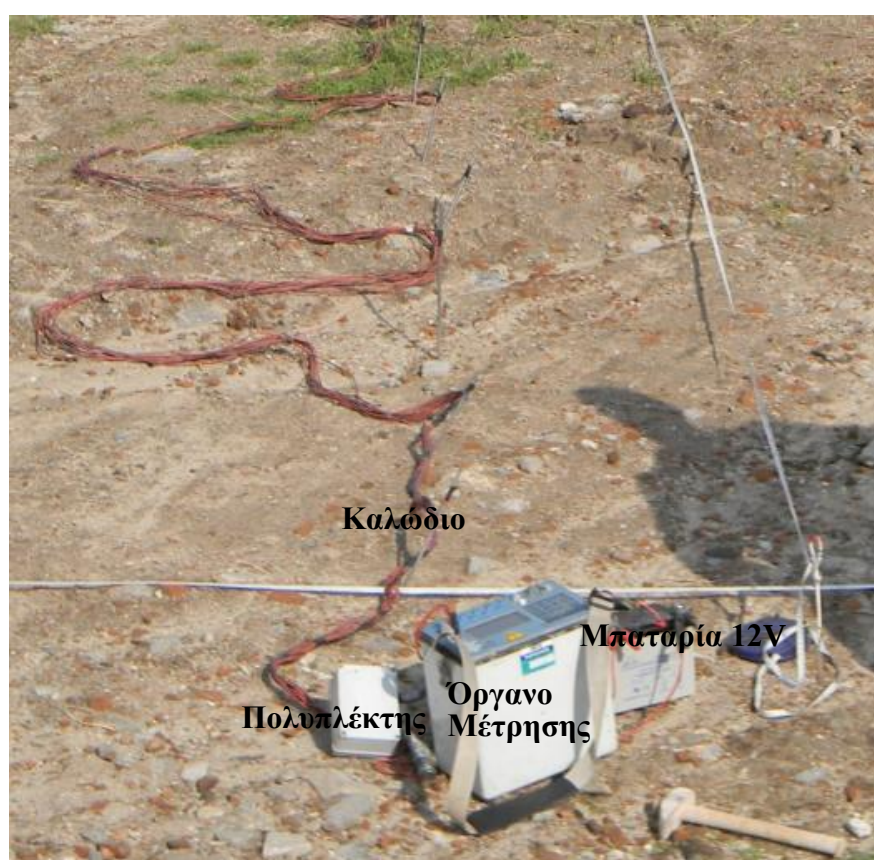
Ο σκοπός της μελέτης ήταν η χαρτογράφηση της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους, σε μικρά βάθη με υψηλή ανάλυση με σκοπό να καλυφθεί το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής. Ένα βάθος διασκόπησης των 4 μέτρων είναι παραπάνω από ικανοποιητικό για αρχαιολογικούς σκοπούς. Η διάταξη που επιλέχθηκε είναι η διπόλου-διπόλου.

Η διάταξη αυτή έχει πολύ καλή ανάλυση και είναι ευαίσθητη στις ανωμαλίες που προκαλούν κατακόρυφες δομές στο υπέδαφος (όπως οι θαμμένοι τοίχοι). Επίσης η γεωμετρία της διάταξης επιτρέπει την μέγιστη χρήση πολυκάναλων οργάνων, όπως το SYSCAL PRO της IRIS INSTRUMENTS. Αυτά τα όργανα μπορούν, δίνοντας ρεύμα σε ένα δίπολο, να μετράνε την διαφορά δυναμικού σε 10 διαφορετικά δίπολα ταυτόχρονα, μειώνοντας δραματικά τον χρόνο που διαρκούν οι μετρήσεις και αυξάνοντας την ταχύτητα συλλογής των δεδομένων. Αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα της διάταξης.

Η διάταξη αυτή βέβαια έχει μικρό βάθος διασκόπησης, σε σύγκριση με άλλες διατάξεις (ίδιου μήκους) αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς έχουμε ικανοποιητικό βάθος διασκόπησης με το ανάπτυγμα των 17.25 μέτρων. Επίσης ο λόγος σήματος προς θόρυβο (s/n ratio) είναι χαμηλός, έτσι ώστε η μέθοδος αυτή να απαιτείται να εφαρμόζεται σε περιοχές με καλό σήμα αλλά ούτε αυτό αποτελεί πρόβλημα καθώς έχουμε μικρές αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων και πολύ πυκνή πληροφορία.

Το πρωτόκολλο της διάταξης έχει 422 μετρήσεις για το ανάπτυγμα των 24 ηλεκτροδίων και τα ηλεκτρόδια απέχουν μεταξύ τους 0.75 μέτρα (μήκος αναπτύγματος 17.25 μέτρα) έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό βάθος διασκόπησης που ορίστηκε περίπου στα 4 μέτρα.

Για να επιτύχουμε αντιστροφή σε 3 διαστάσεις με το διαθέσιμο λογισμικό, οι τομογραφίες μετρήθηκαν σε παράλληλες οδεύσεις δημιουργώντας ένα κανονικό δίκτυο σε κάνναβο μετρήσεων. Στην συνέχεια, και αφού γίνει το φιλτράρισμα και η επεξεργασία των δεδομένων και των μετρήσεων, ακολουθεί η αντιστροφή σε 2 διαστάσεις, έπειτα η ένωση των αρχείων της κάθε τομογραφίας και η τρισδιάστατη πλέον διαδικασία της αντιστροφής. Επίσης επειδή οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι 0.75 μέτρα. κρίνεται σημαντικό και οι αποστάσεις των παράλληλων τομογραφιών να είναι 0.75 μέτρα. για να δημιουργηθεί ένας κανονικοποιημένος κάνναβος στις 3 διαστάσεις όπου τα ηλεκτρόδια θα ισαπέχουν ως προς x και y , όπου x και y ένα αυθαίρετο σύστημα συντεταγμένων το οποίο ορίζει ο χρήστης, τοποθετώντας το 0,0 στην μία γωνία του καννάβου και έπειτα ορίζοντας τις θέσεις όλων των ηλεκτροδίων μέσα σε αυτό το σύστημα. Ορίζοντας τις θέσεις των ηλεκτροδίων, ορίζει και τις θέσεις των μετρήσεων.



4.1.1. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.

Το επόμενο βήμα, εφόσον έγινε η επιλογή της διάταξης και του τρόπου που θα γίνει η λήψη των μετρήσεων, ήταν η δημιουργία, στον αρχαιολογικό χώρο, ενός καννάβου (ορθογώνιο παραλληλόγραμμο). Η μία του διάσταση είχε μήκος 17.25 μέτρα κατά την διεύθυνση της οποίας έγινε η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων και η λήψη των μετρήσεων και η άλλη του διάσταση $(n-1) \cdot 0.75$ μέτρα, όπου n ο αριθμός των παράλληλων τομογραφιών που μετρήθηκαν στον συγκεκριμένο κήναβο. Μετά το πέρας της κάθε μέτρησης, γινότανε η μετατόπιση και των 24 ηλεκτροδίων κατά 0.75 μέτρα, μέχρις ότου να φτάσουμε στην άκρη του καννάβου και να συνεχίσουμε στον επόμενο. Στην περιοχή μετρήθηκαν 13 τέτοιοι κήναβοι.

Για να δημιουργήσουμε τους κήναβους χρησιμοποιούμε μετροταινίες. Τοποθετούμε μία μετροταινία στην μία άκρη, και έπειτα εξασφαλίζουμε την καθετότητα των άλλων ως προς αυτήν με πυθαγόρειο θεώρημα. Προεκτείνοντας τις μετροταινίες δημιουργούμε τον κήναβο με το επιθυμητό μήκος. Για να στερεώσουμε τις μετροταινίες χρησιμοποιούμε ξύλινα πασσαλάκια.



4.1.2. Κήναβος μετρήσεων (κατά την αλλαγή των ηλεκτροδίων).

Στην συνέχεια έχουμε δύο μετροταινίες μόνιμα στο έδαφος, κατά μήκος της πλευράς που γίνονται οι παράλληλες τομογραφίες (της $(n-1) \cdot 0.75$ μέτρα μήκος πλευράς) και 1 ή 2 μετροταινίες κάθετα σε αυτές πάνω στις οποίες γίνονται οι μετρήσεις. Μόλις τελειώσουν οι μετρήσεις μεταφέρουμε τις μετροταινίες και τοποθετούμε τα ηλεκτρόδια στις καινούργιες τους θέσεις. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζουμε την σωστή θέση των ηλεκτροδίων, με τις ελάχιστες δυνατές μετακινήσεις μετροταινιών συνεπώς και πιο σύντομα.

Το ανάγλυφο δεν είναι ομαλό αλλά παρουσιάζει σχετικά μικρής έκτασης διαφοροποιήσεις (5-30cm). Έχοντας όμως μικρή απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, ακόμα και οι μικρές μεταβολές του ύψους επηρεάζουν τον γεωμετρικό παράγοντα, άρα την αντίσταση και μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις στην ερμηνεία. Για να έχουμε στο τελικό αποτέλεσμα όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιήσαμε διαφορικό GPS, το Trimble R6,- TSC3, το οποίο χρησιμοποιεί το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού (HEPOS) και η αποτύπωση έγινε σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87.

Με τον εξοπλισμό αυτόν, μετρήθηκε ένα πλήθος σημείων μέσα σε κάθε κάνναβο. Οι άκρες του καννάβου, η αρχή και το τέλος κάθε τομογραφίας, 6-7 σημεία σε κάθε τομογραφία και τυχαία σημεία μέσα στον κάνναβο. Επίσης, έγινε πύκνωση στα σημεία όπου η τοπογραφία είχε μεγάλες διαφοροποιήσεις. Από τα παραπάνω σημεία, για κάθε κάνναβο ξεχωριστά δημιουργήθηκε ένα DEM (Digital Elevation Model) μέσω του ArcGIS. Δημιουργήθηκαν επίσης τα shapefiles με τις τομογραφίες (ευθείες γραμμές) πάνω στις οποίες τοποθετήθηκαν ανά 0.75 μέτρα σημεία (points) τα οποία αντιστοιχούν στα ηλεκτρόδια.

Με την χρήση της εργαλειοθήκης του ArcGIS, από το DEM, μέσω παρεμβολής, υπολογιστήκαν τα υψόμετρα των σημείων (ηλεκτροδίων) τα οποία και αποθηκεύτηκαν σε έναν πίνακα.



4.1.3. Τοπογραφική αποτύπωση του ανάγλυφου.

Η κύρια επεξεργασία των δεδομένων ξεκινά με την φόρτωση των δεδομένων από το όργανο σε ένα αρχείο με διαμόρφωση .bin. Αυτό το αρχείο περιέχει όχι μόνο τα δεδομένα που μετρήθηκαν αλλά και τις παραμέτρους μέτρησης (σφάλμα, ένταση ρεύματος, μετρημένη διαφορά δυναμικού κ.α.) και για να τα επεξεργαστούμε χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα της IRIS INSTRUMENTS, Prosys II. Αρχικά γίνεται ένα φιλτράρισμα των μετρήσεων, αφαιρώντας τις αρνητικές μετρήσεις και αυτές που έχουν πολύ υψηλές τιμές (αφαιρούνται ελάχιστες μετρήσεις). Επίσης με την χρήση του ίδιου προγράμματος γίνεται η διόρθωση της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων και ένας πρώτος έλεγχος της ποιότητας των δεδομένων.

Κάθε φορά που μετράμε μία νέα τομογραφία, το όργανο μας ζητάει να δώσουμε ένα όνομα. Αμέσως μετά λοιπόν, αυτό το μεγάλο αρχείο το σπάμε σε μικρότερα, καθένα από τα οποία είναι και μία τομογραφία, με το όνομα που την αποθηκεύσαμε. Δίνουμε πάντα στις

τομογραφίες μία σειριακή αρίθμηση για να ξέρουμε το κάθε αρχείο σε ποια τομογραφία αντιστοιχεί και σε ποια θέση.

#	Spa 1	Spa 2	Spa 3	Spa 4	Rho	Dev	Vp	In
1	0.00	1.00	2.00	3.00	487.68	0.05	-3095.608	119.645
2	0.00	1.00	3.00	4.00	425.88	0.03	-691.672	119.645
3	0.00	1.00	4.00	5.00	390.32	0.10	-247.752	119.645
4	0.00	1.00	5.00	6.00	112.31	0.46	-35.642	119.645
5	0.00	1.00	6.00	7.00	165.92	0.07	-30.090	119.645
6	0.00	1.00	7.00	8.00	86.74	0.14	-9.832	119.645
7	0.00	1.00	8.00	9.00	86.57	0.19	-6.542	119.645
8	0.00	1.00	9.00	10.00	63.39	0.49	-3.353	119.645
9	0.00	1.00	10.00	11.00	309.63	2.54	-11.911	119.645
10	0.00	1.00	11.00	12.00	-229.09	4.27	6.610	119.645
11	0.00	2.00	3.00	5.00	509.90	1.58	-4186.008	96.716
12	0.00	2.00	5.00	7.00	135.91	38.72	-159.396	96.716
13	0.00	2.00	7.00	9.00	93.23	0.56	-36.447	96.716
14	0.00	2.00	9.00	11.00	96.92	3.93	-17.223	96.716
15	0.00	2.00	11.00	13.00	49.18	13.78	-4.706	96.716
16	0.00	2.00	13.00	15.00	103.21	0.09	-5.925	96.716
17	0.00	2.00	15.00	17.00	151.19	0.74	-5.616	96.716
18	0.00	2.00	17.00	19.00	195.54	0.57	-4.970	96.716
19	0.00	2.00	4.00	6.00	370.09	0.07	-952.541	97.031
20	0.00	2.00	6.00	8.00	160.40	1.49	-103.210	97.031
21	0.00	2.00	8.00	10.00	78.24	0.45	-20.137	97.031
22	0.00	2.00	10.00	12.00	78.13	0.13	-10.054	97.031
23	0.00	2.00	12.00	14.00	116.56	0.25	-8.571	97.031
24	0.00	2.00	14.00	16.00	118.12	0.05	-5.429	97.031
25	0.00	2.00	16.00	18.00	192.16	0.66	-5.888	97.031
26	0.00	3.00	9.00	12.00	76.45	0.04	-34.494	102.059
27	0.00	3.00	12.00	15.00	118.01	0.05	-21.298	102.059
28	0.00	3.00	15.00	18.00	161.53	0.07	-14.577	102.059
29	0.00	3.00	18.00	21.00	207.65	0.07	-10.708	102.059
30	0.00	3.00	10.00	13.00	93.00	0.06	-29.947	102.283
31	0.00	3.00	13.00	16.00	115.87	0.04	-16.323	102.283
32	0.00	3.00	16.00	19.00	189.39	0.05	-14.042	102.283
33	0.00	3.00	19.00	22.00	190.29	0.06	-8.337	102.283
34	0.00	3.00	11.00	14.00	108.58	0.03	-25.867	102.452
35	0.00	3.00	14.00	17.00	132.37	0.06	-14.840	102.452

4.1.4. Γραφικό περιβάλλον του Prosys II.

Τα αρχεία της κάθε τομογραφίας, αφού ελεγχθούν και αυτά για τα δεδομένα που περιέχουν (απομάκρυνση πολύ υψηλών ή χαμηλών τιμών), εξάγονται από το πρόγραμμα σε ένα άλλο format, το οποίο αναγνωρίζουν τα προγράμματα αντιστροφής. Το αρχείο αυτό είναι ένα απλό αρχείο κειμένου, .dat, έχει όμως τα δεδομένα με συγκεκριμένη σειρά, έτσι το πρόγραμμα της αντιστροφής αναγνωρίζει από ποιο μέρος του αρχείου να πάρει τις πληροφορίες που χρειάζεται. Το πρόγραμμα αντιστροφής που χρησιμοποιήθηκε είναι το Res2DInv.

Από το αρχείο αυτό, λείπει η τοπογραφία. Για να την προσθέσουμε όμως, πρέπει να αλλάξουμε την διαμόρφωση του αρχείου για άλλη μία φορά. Μέσω του προγράμματος Res2DInv αλλάζουμε το format του αρχείου, από general array format, σε index based format και σε αυτό το αρχείο, στο τέλος του τοποθετούμε με την σειρά τα υψόμετρα από τα 24 ηλεκτρόδια, σε 24 σειρές (η 1^η σειρά το υψόμετρο από το 1^ο ηλεκτρόδιο κτλ.).

Εφ' όσον ολοκληρώσουμε την διαδικασία αυτή, με σκοπό να δημιουργήσουμε το τελικό αρχείο, σε index based format, που θα έχει μέσα και το υψόμετρο του κάθε ηλεκτροδίου, για κάθε τομογραφία ξεχωριστά, προχωράμε στην διαδικασία της αντιστροφής με σκοπό να αναπαράγουμε από τα δεδομένα μας, την κατανομή της αντίστασης στο υπέδαφος.

Η παραπάνω διαδικασία, γίνεται για έναν μεγάλο όγκο δεδομένων και έχει υψηλό βαθμό κούρασης για τον χρήστη, λόγω των επαναλαμβανόμενων εντολών που δίνει στον Η/Υ, πρέπει όμως να γίνει με μεγάλη προσοχή γιατί ένα λάθος σε αυτό το στάδιο, θα μας κοστίσει πολύ χρόνο μέχρι να το αντιληφθούμε και να το διορθώσουμε.

4.2. 2-D αντιστροφή

Η αντιστροφή της κάθε τομογραφίας ξεχωριστά, έγινε με το πρόγραμμα Res2DInv. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την μέθοδο Gauss-Newton, ενώ για την καλύτερη απεικόνιση των δομών του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε η L1-norm.

Η μέθοδος της αντιστροφής, επιλύει το ευθύ πρόβλημα, ενός τυχαίου μοντέλου αρχικά, και έπειτα συγκρίνει τα συνθετικά δεδομένα που προέκυψαν με τα δεδομένα που μετρήθηκαν. Υπολογίζει την διαφορά αυτών των δύο δεδομένων ($dy = d_{\text{συνθετικά}} - d_{\text{πραγματικά}}$). Με την μέθοδο της L1-norm, υπολογίζεται το άθροισμα των απολύτων τιμών αυτής της διαφοράς, ενώ με την L2-norm, υπολογίζεται το τετράγωνο του αθροίσματος αυτής της διαφοράς.

Η L1-norm, μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα δομές, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη αντίθεση στις τιμές των αντιστάσεων τους, ενώ με την L2-norm μπορούμε να προσεγγίσουμε πιο ομαλές αλλαγές. Στην περίπτωση της αρχαιομετρίας η L2-norm, τείνει να κάνει ένα over-smooth στο μοντέλο και υπάρχει κίνδυνος κάποιες δομές να μην φανούν τόσο έντονα.

Στην συνέχεια αλλάζει το αρχικό μοντέλο, με σκοπό να μειώσει αυτήν την διαφορά και κάνει την ίδια διαδικασία. Γίνονται περίπου 4-7 τέτοιες επαναλήψεις, έπειτα το σφάλμα δεν μπορεί να μειωθεί άλλο ή μειώνεται ελάχιστα. Τα αποδεχτά όρια σφάλματος, κυμαίνονται αναλόγως με την περιοχή, με το μήκος της τομής, με την πυκνότητα των δεδομένων, με την ποιότητα του σήματος και με την τιμή των αντιστάσεων επαφής. Τα σφάλματα στην συγκεκριμένη περιοχή ήταν ικανοποιητικά ($<5\%$).

Τις περισσότερες φορές, υπάρχουν μερικές τιμές, οι οποίες εμφανίζουν πολύ μεγάλα σφάλματα ($>50\%$). Το μοντέλο, με σκοπό να ικανοποιήσει αυτές τις τιμές αλλάζει, με αποτέλεσμα να απομακρύνεται από τις γειτονικές. Αυτές οι τιμές συνήθως περιέχουν θόρυβο ή πολύ μικρής διάστασης τοπικές δομές, που δεν μας ενδιαφέρουν και αλλοιώνουν την γενική εικόνα του μοντέλου. Αυτές τις τιμές, τις απομακρύνουμε, αποθηκεύουμε το αρχείο χωρίς αυτές πλέον και ξεκινάμε την διαδικασία από την αρχή. Προσπαθούμε στο τελικό αποτέλεσμα να κρατάμε επαρκή αριθμό μετρήσεων, ($>80\%$) όταν φυσικά αυτό είναι δυνατό, έχοντας ως στόχο η τελική εικόνα να είναι όσο πιο κοντά στην πραγματικότητα είναι δυνατό.

Την παραπάνω διαδικασία, την κάνουμε ξεχωριστά για κάθε μία τομογραφία και στο τέλος έχουμε μία εικόνα για την δομή του υπεδάφους στις δύο διαστάσεις, δηλαδή σε κατακόρυφες τομές κατά μήκος της μετρούμενης γραμμής. Οι εικόνες που παίρνουμε είναι τραπέζια, διότι το μέγιστο βάθος διασκόπησης, το έχουμε όταν ανοίξουμε τα ηλεκτρόδια στην μεγαλύτερη απόσταση, δηλαδή στα άκρα της τομογραφίας και η μέτρηση αντιπροσωπεύει την τιμή της φαινόμενης αντίστασης στο κέντρο της διάταξης. Καθώς η διάταξη κλείνει προς το κέντρο, μικραίνει και το μέγιστο άνοιγμα, συνεπώς μειώνεται το βάθος διασκόπησης.

Τα τραπέζια αυτά έχουν χρώματα, στην κλίμακα «ουράνιο τόξο». Με έντονο κόκκινο είναι οι πολύ μεγάλες τιμές αντιστάσεων, ενώ με γαλάζιο, ανοιχτό μπλε και σκούρο μπλε οι πολύ μικρές τιμές.

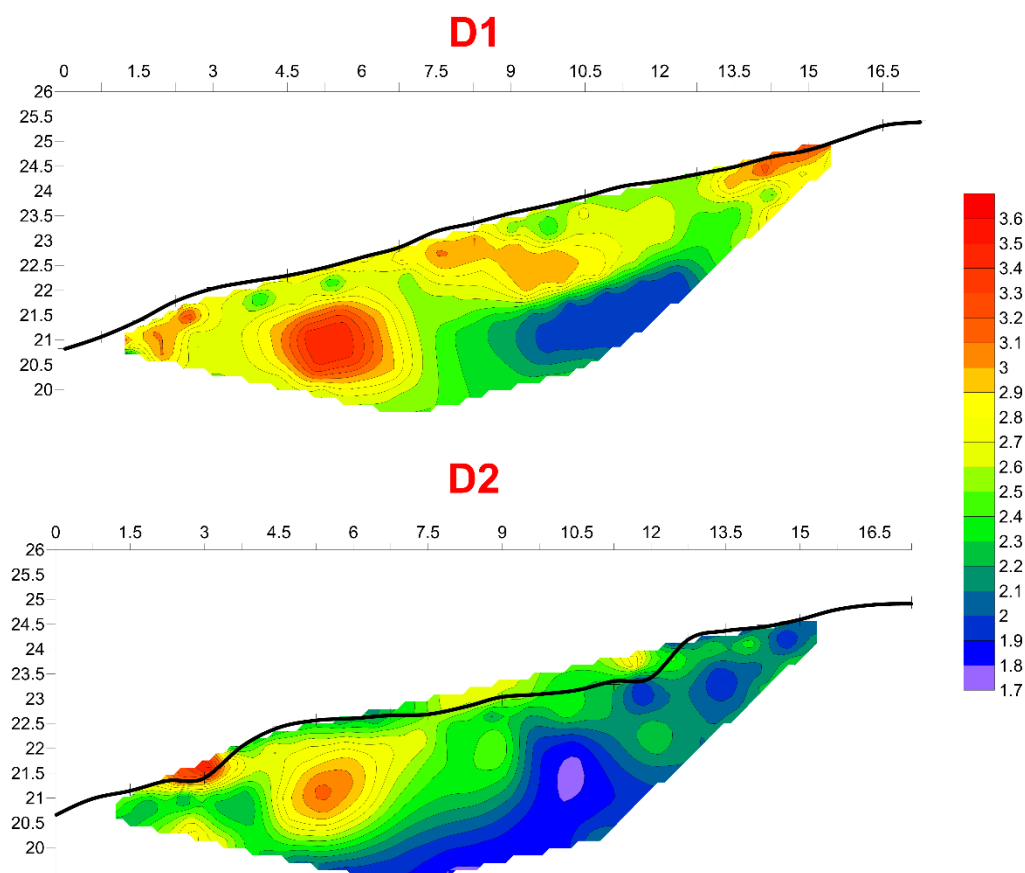
Κάθε μία από τις παραπάνω εικόνες, επειδή ακριβώς έχει γίνει ξεχωριστά η μία από την άλλη, έχει διαφορετική κλίμακα, αναλόγως με την μέγιστη και ελάχιστη ειδική ηλεκτρική αντίσταση που συναντάει η κάθε τομογραφία (τα ίδια χρώματα δεν είναι και ίδιες αντιστάσεις!). Πριν γίνει μία ερμηνεία είναι σημαντικό οι εικόνες να αναχθούν στην ίδια κλίμακα. Συνήθως αυτό γίνεται σε ένα άλλο πρόγραμμα το surfer, εξάγοντας την εικόνα ως αρχείο xyz. Εκεί μπορούμε να τοποθετήσουμε πολλές τομογραφίες στο ίδιο αρχείο και να κάνουμε συγκρίσεις, πιο άμεσα.

Στην περιοχή μελέτης έγιναν δύο τομογραφίες, για να εξακριβωθεί εάν υπάρχει η συνέχεια μέσα στο έδαφος ενός διατοιχίσματος. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται που έγιναν αυτές οι τομογραφίες, καθώς και τα αποτελέσματα τους στην θέση αυτή, μετά την επεξεργασία, με την τοπογραφία.

Η εικόνα είναι από το google earth. Το google earth χρησιμοποιεί σύστημα συντεταγμένων WGS84 οπότε ήταν απαραίτητη η μετατροπή των συντεταγμένων 4 σημείων στην εικόνα σε ΕΓΣΑ87 και η γεω-αναφορά της εικόνας στο ArcGIS. Επίσης η εικόνα δεν είναι πρόσφατη (10/1/2014), συνεπώς είναι πιθανό να υπάρχουν αποκλίσεις. Παρ' όλα αυτά για τα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, η εικόνα παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες.



4.2.1. Η θέση των τομογραφιών του διατοιγίσματος.



4.2.2. Τα αποτελέσματα των τομογραφιών.

Στις τομογραφίες, η μαύρη γραμμή είναι το προφίλ της επιφάνειας του εδάφους. Στον οριζόντιο άξονα οι αποστάσεις είναι σε μέτρα (17.25 μέτρα μήκος) ενώ στον κατακόρυφο έχουμε πραγματικό υψόμετρο σε ΕΓΣΑ 87.

Στην δεύτερη τομογραφία, λόγω του απότομου ανάγλυφου σε δύο θέσεις, περίπου στα 3 και 12 μέτρα, το πρόγραμμα κάνει πρόβλεψη (extrapolation) η οποία δεν έχει καμία σχέση με την πραγματικότητα καθώς οι θέσεις αυτές είναι επάνω από το έδαφος.

Οι τομογραφίες έχουν αναχθεί στην ίδια κλίμακα, η οποία φαίνεται δεξιά. Η κλίμακα αυτή αποτελεί τον δεκαδικό λογάριθμο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, όπως αυτή προέκυψε από την αντιστροφή. Χρησιμοποιούμε τον λογάριθμο για να έχουμε καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα, διότι οι μεταβολές είναι πολύ μεγάλες.

Στις δύο τομογραφίες, περίπου στα 4.5 με 6 μέτρα, παρουσιάζεται σε βάθος 1μ από το έδαφος ένα σώμα, με μεγάλη αντίσταση. Αυτό το σώμα, βρίσκεται στην νοητή προέκταση του διατοιχίσματος που έχει ήδη βρεθεί στην θέση, εκατέρωθεν των τομογραφιών. Είναι πολύ πιθανόν αυτή η ανωμαλία να αντιστοιχεί στην προέκταση αυτής της δομής στο υπέδαφος.

Στην πρώτη τομογραφία από τα 7.5 έως 10 μέτρα, υπάρχει ακόμα μία ανωμαλία, με σχετικά υψηλές αντιστάσεις. Η ανωμαλία αυτή, με λίγο μικρότερες αντιστάσεις εντοπίζεται και στην δεύτερη τομογραφία και είναι πιθανό να οφείλεται σε κάποια δομή που υπάρχει σε αυτή τη θέση.

Στις υπόλοιπες θέσεις των τομογραφιών συναντάμε γενικά χαμηλές αντιστάσεις, οι οποίες οφείλονται στο έδαφος που υπάρχει σε αυτές τις θέσεις. Δεν εμφανίζεται κάποια άλλη ανωμαλία, η οποία να παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Συνοψίζοντας να αναφέρουμε ότι το ενδιαφέρον σε αυτή την θέση, για τον εντοπισμό του διατοιχίσματος, υπάρχει από τα 4 μέχρι περίπου τα 7 μέτρα της πρώτης τομογραφίας, με μία υποψία να συνεχίζεται κάποια δομή και στα επόμενα 2 μέτρα.

4.3. 3-D αντιστροφή

Στην προηγούμενη θέση, λόγω της έλλειψης χώρου, δεν υπήρχε η δυνατότητα να γίνουν αρκετές παράλληλες τομογραφίες, οπότε η τρισδιάστατη απεικόνιση δεν είχε νόημα. Για να μπορεί να γίνει μία τέτοια απεικόνιση, πρέπει να γίνουν τουλάχιστον 5-6 τομογραφίες.

Στις υπόλοιπες θέσεις έρευνας όμως όπου υπήρχε ο χώρος έγιναν αρκετές παράλληλες τομογραφίες. Τα αποτελέσματα δύο θέσεων όπου χρησιμοποιήθηκε αυτή η μεθοδολογία, θα δούμε σε αυτήν την παράγραφο. Αρχικά θα μελετήσουμε την βόρειο δυτική θέση, εσωτερικά του τείχους. Στην θέση αυτή έγιναν 35 παράλληλες τομογραφίες, οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Οι τομογραφίες αυτές συνθέτουν τον κάνναβο G5 (η αρίθμηση των καννάβων γίνεται με αύξουσα σειρά, ανάλογα με την σειρά που μετρήθηκαν).



4.3.1. Οι τομογραφίες του καννάβου G5.

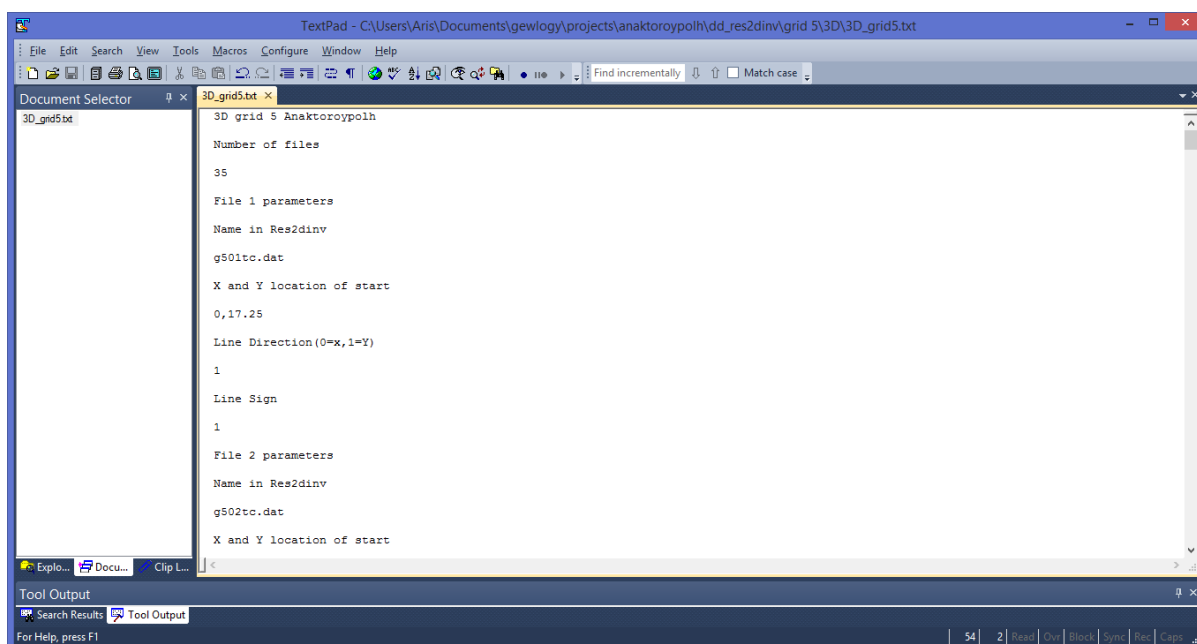
Αρχικά έγινε η δημιουργία του DEM και έπειτα η εξαγωγή του υψομέτρου για κάθε ηλεκτρόδιο, μέσω του ArcGIS. Ακολούθησε η δημιουργία του κατάλληλου αρχείου, με την τοπογραφική πληροφορία, και η αντιστροφή.

Στο πρώτο στάδιο έγινε η αντιστροφή των 35 τομογραφιών σε δύο διαστάσεις και εξάχθηκαν κάποια αρχικά συμπεράσματα. Φάνηκε από την αρχή ότι υπήρχαν κάποιες αντιστατικές δομές στην περιοχή, που εμφάνιζαν ενδιαφέρον.

Για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων δεν αρκεί η επεξεργασία των δεδομένων σε δύο διαστάσεις, κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία τους σε τρεις διαστάσεις, με σκοπό να μελετηθεί η κατανομή της αντίστασης στο υπέδαφος. Με αυτή την μέθοδο οι δομές ενδιαφέροντος μπορούν να αποκτήσουν ένα πιο ξεκάθαρο σχήμα και να ξεχωρίσουν από άλλες δομές, που πιθανώς να εμφανίζουν παρόμοιες ηλεκτρικές ιδιότητες.

Αρχικά δημιουργείται ένα καινούργιο σύστημα συντεταγμένων, όπου το (0,0) τοποθετείται στην μία γωνία του καννάβου. Ο χρήστης επιλέγει που θα το τοποθετήσει και στην συνέχεια αναφέρει την θέση των τομογραφιών, σύμφωνα με αυτό. Πιο συγκεκριμένα ορίζει την θέση του πρώτου ηλεκτροδίου της κάθε τομογραφίας μέσα στο πλέγμα, την φορά της τομογραφίας μέσα στο πλέγμα (εάν αναπτύσσεται δηλαδή ως προς x ή y) και την διεύθυνση ανάπτυξης που έχει η τομογραφία (για παράδειγμα εάν αναπτύσσεται στον άξονα x, τότε πρέπει επίσης να γνωρίζουμε εάν αναπτύσσεται προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά κατά την διεύθυνση του άξονα).

Για την υλοποίηση των παραπάνω, δημιουργείται από τον χρήστη ένα αρχείο κειμένου (.txt) το οποίο έχει συγκεκριμένη μορφή. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται η μορφή ενός τέτοιου αρχείου και δίνεται αναλυτικά ο τρόπος δημιουργίας του.



4.3.2. Το αρχείο συρραφής των τομογραφιών.

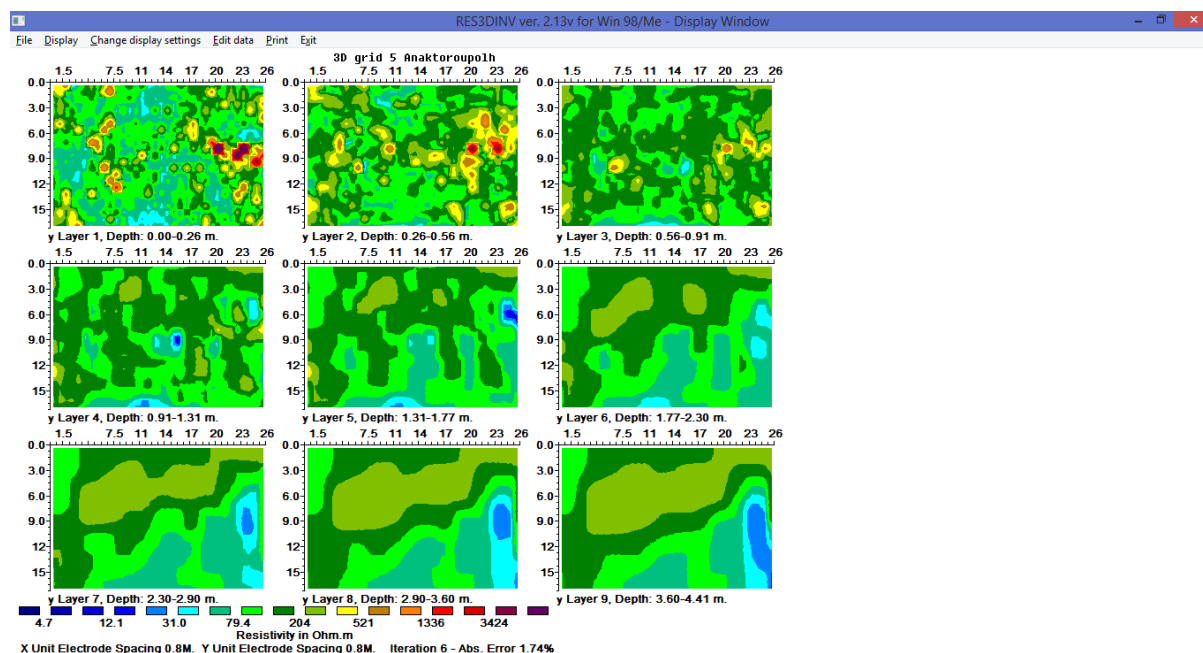
Στην πρώτη σειρά δηλώνεται το όνομα του αρχείου και στην τρίτη ο αριθμός των αρχείων που θα ενωθούν. Τα αρχεία περιέχουν τα δεδομένα από τις τομογραφίες σε index based format (με τοπογραφία). Από εδώ και κάτω, κάθε 9 σειρές αναφέρονται σε ένα αρχείο

και κάθε σειρά δίνει μία πληροφορία για το αρχείο αυτό. Αρχικά δηλώνεται το όνομα του αρχείου, στην συνέχεια η θέση του πρώτου ηλεκτροδίου της τομογραφίας, η διεύθυνση της τομογραφίας και η κατεύθυνση. Αυτό γίνεται για όλα τα αρχεία που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε και στο τέλος δηλώνουμε το όνομα του αρχείου που θα αποθηκευτούν οι πληροφορίες από αυτά τα αρχεία. Το αρχείο θα είναι σε μορφή index based format και θα έχει κατάληξη .dat.

Μετά την ολοκλήρωση αυτού του αρχείου, τοποθετούμε όλα τα αρχεία που θα ενώσουμε μαζί με αυτό το έγγραφο κειμένου στο ίδιο φάκελο. Από το πρόγραμμα Res2DInv διαλέγουμε την επιλογή “Collate data into Res3DInv format” και ανοίγουμε το αρχείο κειμένου. Το πρόγραμμα ανοίγει τα αρχεία, ένα-ένα, με την σειρά που τα ορίσαμε εμείς, αντιγράφει τα δεδομένα τους και τα ενώνει σε ένα αρχείο. Η διαδικασία αυτή είναι αυτοματοποιημένη αλλά απαιτούνται προσεκτικοί σχεδιασμοί από τον χρήστη, κυρίως κατά την δημιουργία του συστήματος αναφοράς και την δήλωση της θέσης της κάθε τομογραφίας σε αυτό το σύστημα αναφοράς.

Μετά την δημιουργία του παραπάνω αρχείου, που περιέχει όλη την πληροφορία για τον κάνναβο που μελετάμε, εκτελούμε την διαδικασία της τρισδιάστατης αντιστροφής με το λογισμικό Res3DInv. Οι ίδιες αρχές ισχύουν και σε αυτήν την διαδικασία, όπως και στην προηγούμενη, της αντιστροφής στις δύο διαστάσεις, απλά ο όγκος της πληροφορίας είναι πολύ μεγαλύτερος. Επίσης γίνεται συσχέτιση των τιμών της αντίστασης σε πλευρικές θέσεις με αποτέλεσμα μία πιο καλή και ρεαλιστική απεικόνιση των δομών ενδιαφέροντος. Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω του αυξημένου όγκου των δεδομένων χρειάζεται μεγάλη υπολογιστική ισχύς για να εκτελεστούν οι πράξεις της αντιστροφής από το σύστημα, σε διαφορετική περίπτωση η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από μερικά λεπτά έως αρκετές ώρες.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος Res3DInv καθώς και τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου μοντέλου για τον κάνναβο 5.



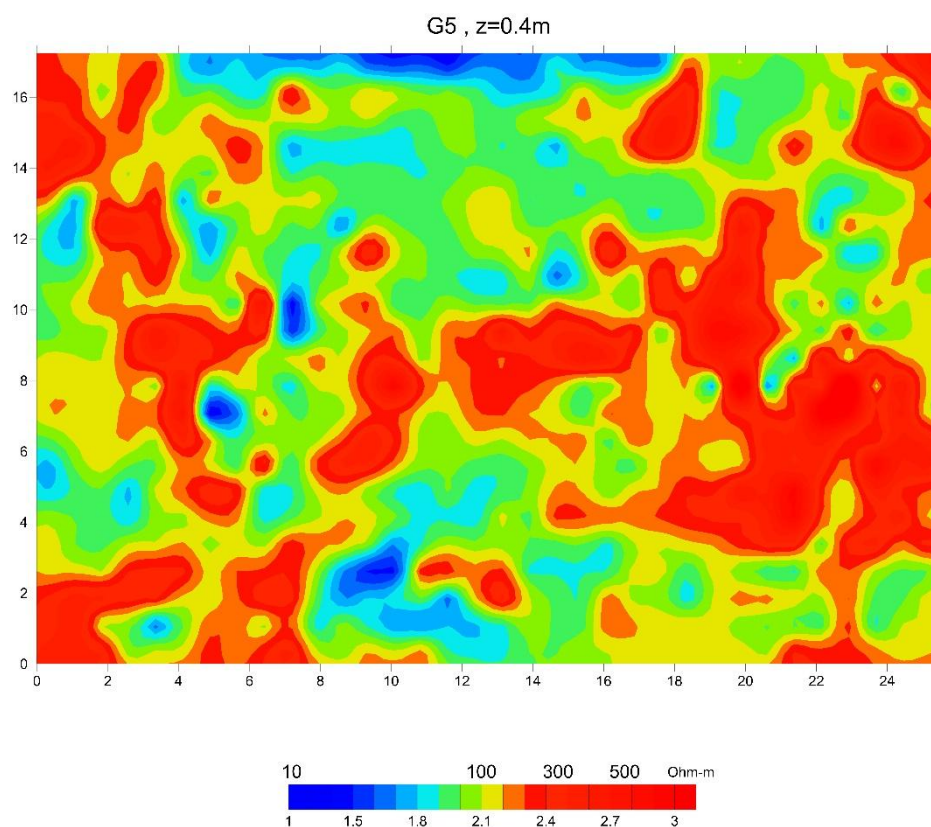
4.3.3. Εικόνα από το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος Res3DInv με τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τον κάνναβο G5.

Το πρόγραμμα προβάλλει το αποτέλεσμα σε κατόψεις. Η κάθε κάτοψη αντιπροσωπεύει την κατανομή της αντίστασης σε συγκεκριμένο βάθος. Ιδιαιτερότητα του προγράμματος είναι ότι παρουσιάζει τον άξονα x αντεστραμμένο, δηλαδή αυξάνει προς τα κάτω όπως φαίνεται και στο σχήμα. Αυτό οφείλεται στον σειριακό τρόπο με τον οποίο το πρόγραμμα παρουσιάζει τα δεδομένα.

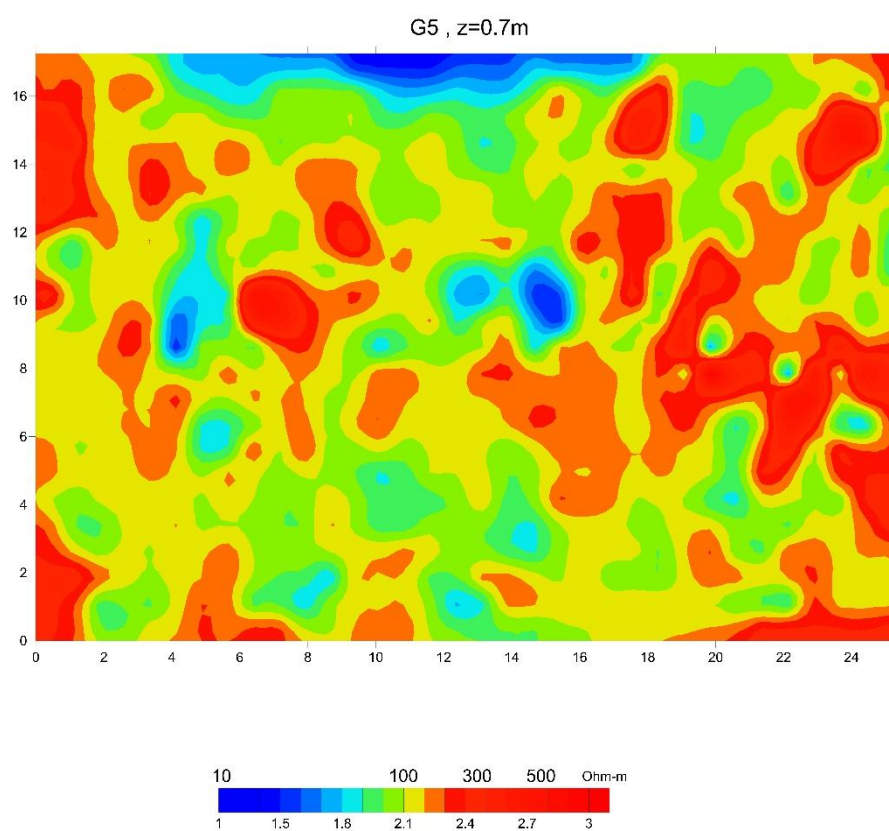
Η παραπάνω εικόνα μας δίνει κάποιες αρχικές ενδείξεις αλλά οι πολύ υψηλές αντιστάσεις στα επιφανειακά στρώματα μέχρι τα 0.20 ή ακόμα και 0.50 μέτρα δημιουργούν πρόβλημα στην ανάγνωση της κλίμακας εκεί που μας ενδιαφέρει περισσότερο, από τα 0.50 έως και τα 2.50 μέτρα. Οι αντιστάσεις αυτές δεν οφείλονται σε κάποια δομή ενδιαφέροντος και αλλοιώνουν την εικόνα, γι' αυτό και δεν λαμβάνονται υπόψιν. Επίσης παραμένει το πρόβλημα του αντεστραμμένου άξονα.

Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα *surfer*. Εξάγουμε τα δεδομένα από το πρόγραμμα *Res3DInv* σε ένα αρχείο κειμένου, στο οποίο αποθηκεύουμε την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για κάθε θέση μέσα στο τρισδιάστατο πλέγμα που έχουμε δημιουργήσει. Στην συνέχεια με την χρήση του *surfer* δημιουργούμε, με παρόμοιο τρόπο όπως στις δύο διαστάσεις, τις κατόψεις που είδαμε και στο πρόγραμμα *Res3DInv*, πλέον όμως έχουμε την δυνατότητα να αλλάξουμε την κλίμακα για να τονίσουμε τις αντιθέσεις που μας ενδιαφέρουν ενώ παράλληλα λύνουμε το πρόβλημα του αντεστραμμένου άξονα.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω μεθοδολογίας φαίνεται στις επόμενες εικόνες. Έχοντας αφαιρέσει την πρώτη επιφανειακή κάτοψη, διαμορφώνεται η χρωματική κλίμακα έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να βελτιωθεί οπτικά και να μας βοηθά να διακρίνουμε δομές με μεγαλύτερη ευκολία. Η κάθε κάτοψη αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο βάθος, η κλίμακα είναι κοινή και φαίνεται στην τελευταία εικόνα.

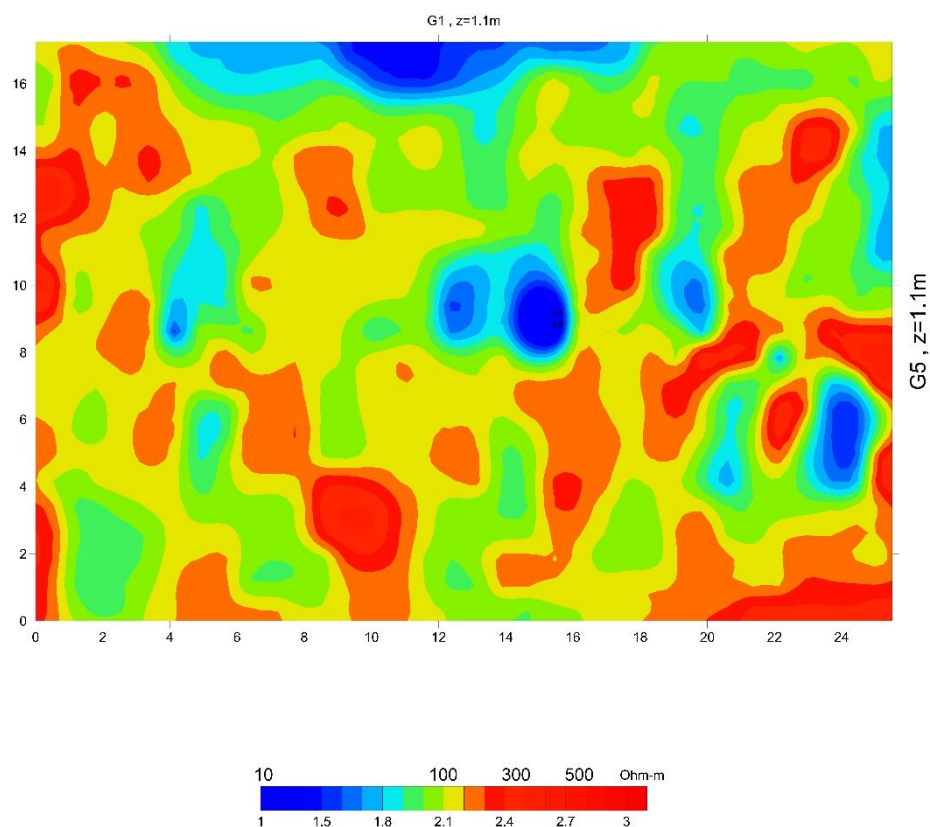


4.3.4. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 0.40 μέτρων.

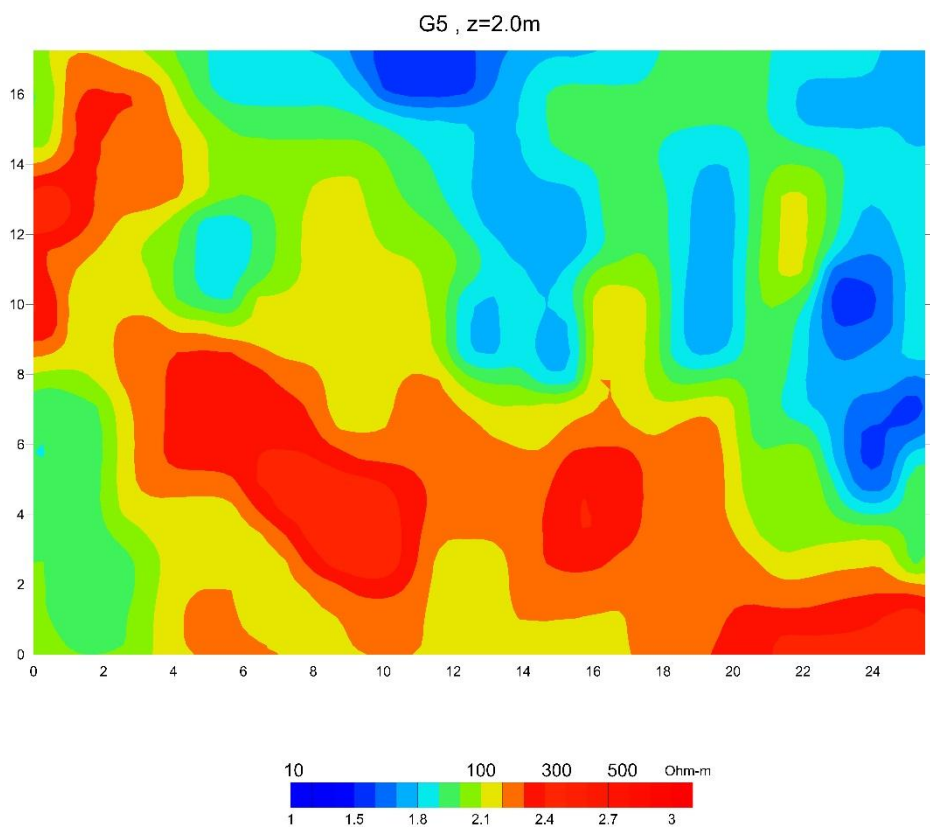


4.3.5. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 0.70 μέτρων.

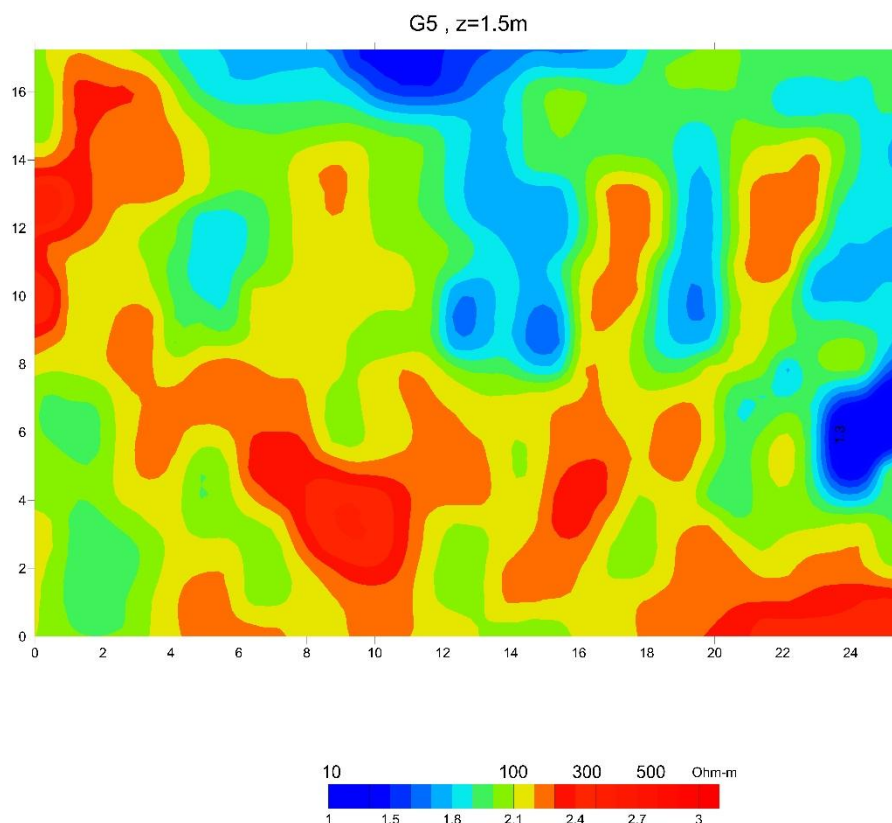
36 – Εφαρμογή της μεθόδου της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων



4.3.6. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 1.10 μέτρων.



4.3.7. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 1.50 μέτρων.

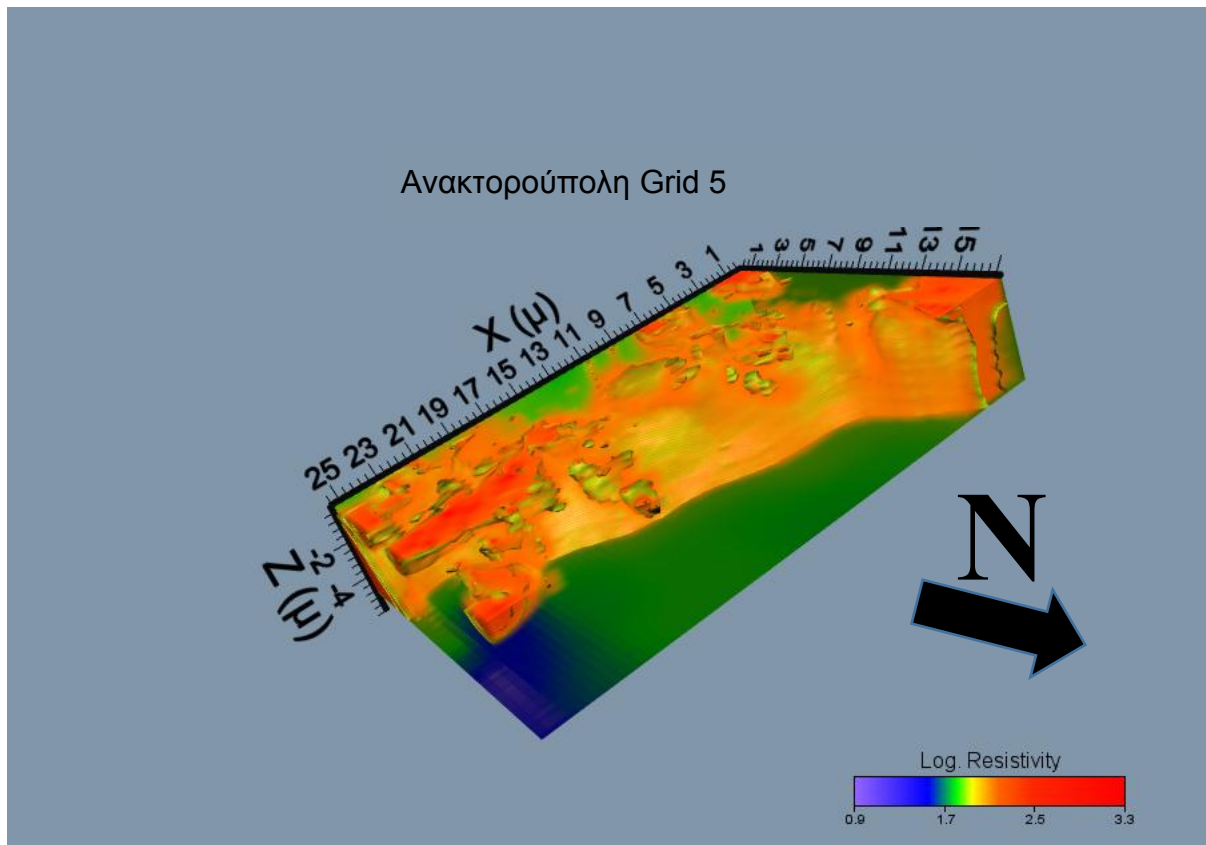


4.3.8. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 2 μέτρων.

Στις παραπάνω εικόνες, φαίνονται αρκετές δομές με μεγάλες αντιστάσεις (>300 Ohm-m), οι οποίες φαίνεται να παρουσιάζουν πιθανούς στόχους. Μερικές από αυτές έχουν και μία χαρακτηριστική εμμονή ή ακόμα σχηματίζουν σχήματα τα οποία μπορεί να ταυτίζονται με την κάτοψη ενός κτηρίου. Αυτές είναι και οι θέσεις που η πιθανότητα να υπάρχει θαμμένη μία δομή αυξάνεται σημαντικά.

Η παραπάνω μορφή των δεδομένων βέβαια, παρόλο που περιέχει πληροφορίες για τις τρεις διαστάσεις, απεικονίζεται σε δύο. Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Voxler για να δημιουργήσουμε ένα πραγματικό τρισδιάστατο μοντέλο, στο οποίο οι δομές ενδιαφέροντος μπορούν να φανούν με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, να δούμε το σχήμα τους πιο καθαρά και σε άλλες εφαρμογές ακόμα και να κάνουμε ογκομέτρηση κάποιου υλικού ή χώρου.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το τρισδιάστατο μοντέλο όπως αυτό προέκυψε από το Voxler.



4.3.9. Τρισδιάστατη απεικόνιση του καννάβου G5, με την χρήση του προγράμματος Voxler.

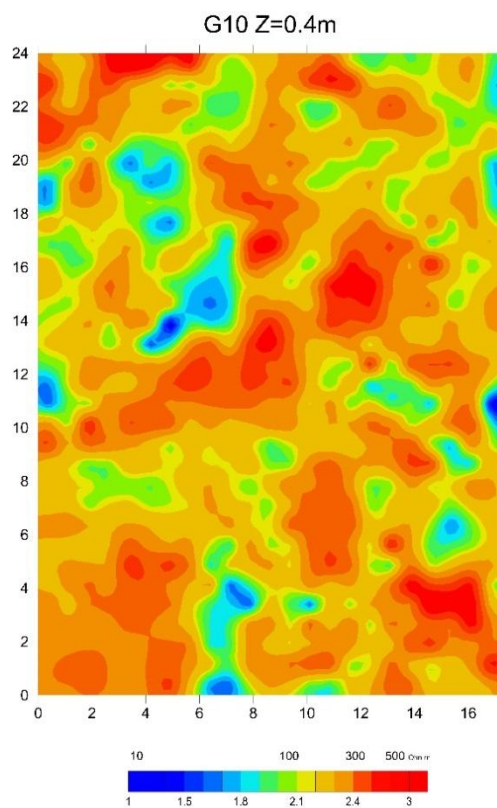
Παρατηρούνται κάποιες δομές, στο βόρειο – δυτικό άκρο του καννάβου και μία δομή με διεύθυνση δυτική - βόρειο δυτική, ανατολική - νότιο ανατολική, περίπου στο νότιο όριο του καννάβου, που παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση και πιθανώς να έχουν ενδιαφέρον.

Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η θέση του καννάβου 10 στη περιοχή μελέτης, ο οποίος αποτελείται από 33 παράλληλες τομογραφίες και τα τελικά αποτελέσματα, έπειτα από την επεξεργασία που αναφέρθηκε σ' αυτό το κεφάλαιο.

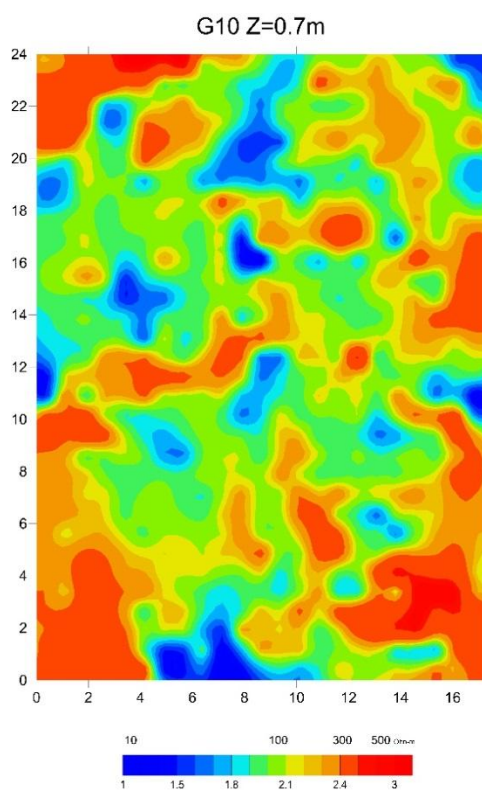


4.3.10. Η θέση του καννάβου G10.

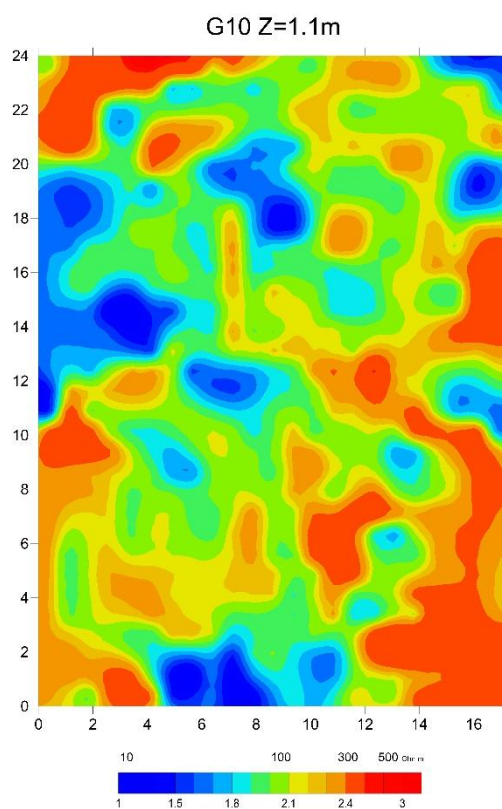
40 – Εφαρμογή της μεθόδου της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων



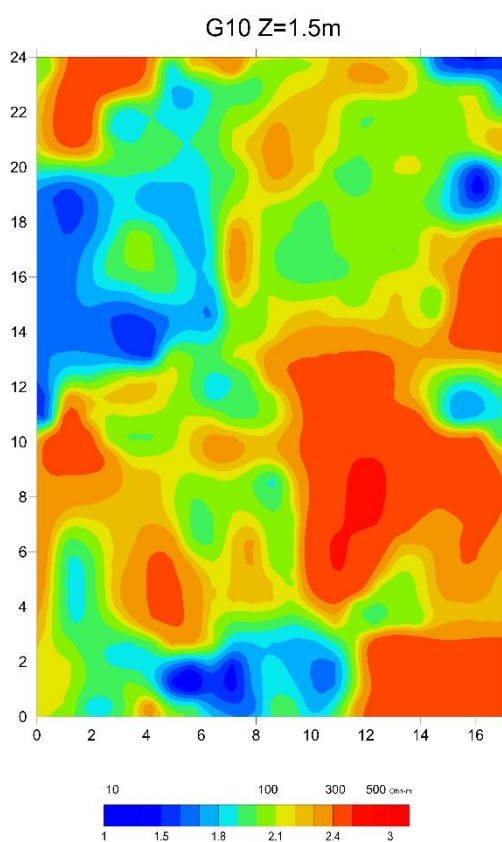
4.3.11. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 0.40 μέτρων.



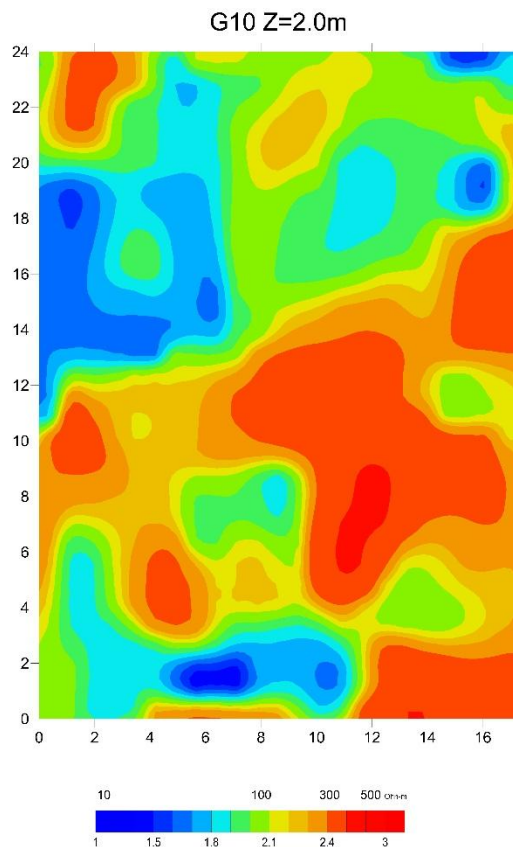
4.3.12. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 0.70 μέτρων.



4.3.13. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 1.10 μέτρων.



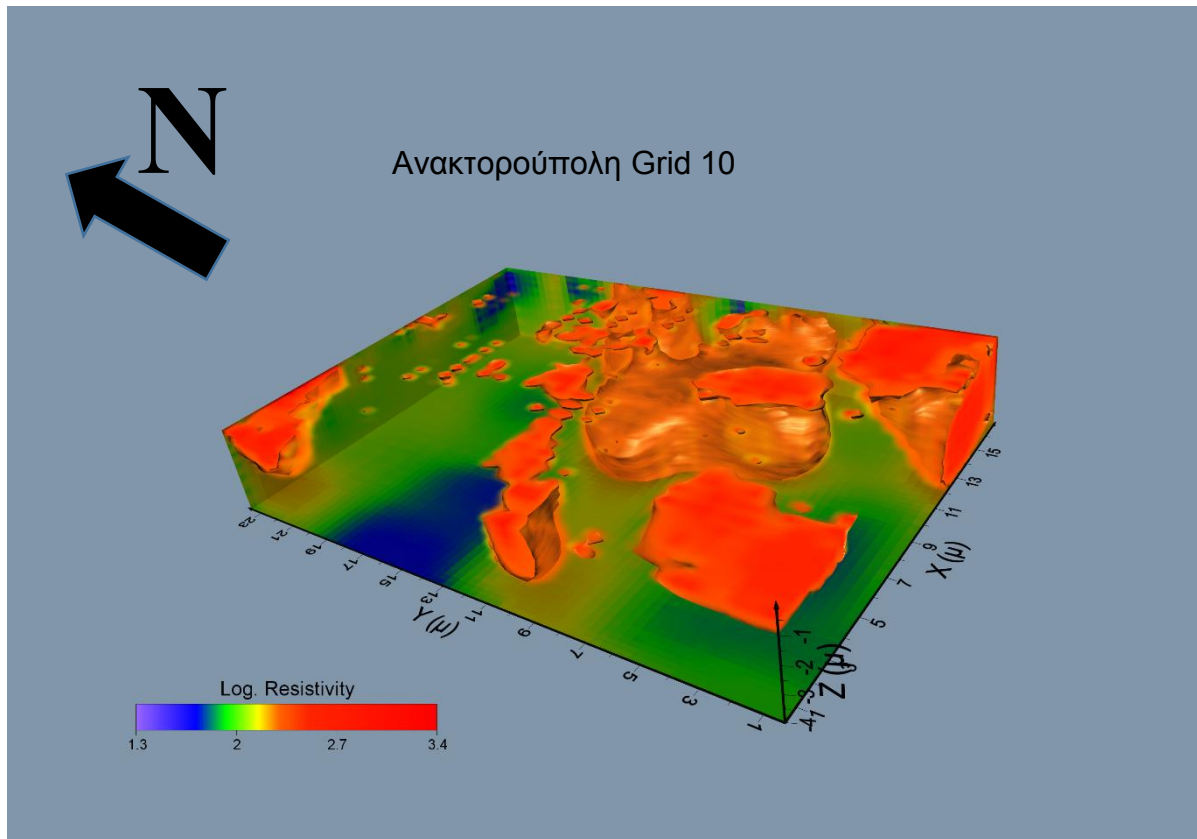
4.3.14. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 1.50 μέτρων.



4.3.15. Κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο βάθος των 2 μέτρων.

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες, στην θέση αυτή παρατηρούνται αρκετές δομές με υψηλές αντιστάσεις, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται μεγάλες τιμές στο κέντρο του καννάβου. Οι τιμές αυτές παρουσιάζουν και μία εμμονή στο βάθος και είναι πιθανό να συνδέονται με κάποια δομή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.

Στην επόμενη εικόνα από το πρόγραμμα Voxler η δομή αυτή φαίνεται ακόμα πιο καθαρά πλέον, να αποκτά έναν όγκο και να έχει ένα κάθετο όριο με τις γύρω δομές, που έχουν χαμηλότερη τιμή αντίστασης. Η τιμή της αντίστασης αυτής της δομής, καθώς και η γεωμετρία της, μαρτυράει μία θέση πιθανού αρχαιολογικού ενδιαφέροντος.



4.3.16. Τρισδιάστατη απεικόνιση του καννάβου G10, με την χρήση του προγράμματος Voxler.

5. Συμπεράσματα

Η μέθοδος της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας, μπορεί να μας δώσει μία εικόνα για την κατανομή της αντίστασης στο υπέδαφος. Επιπλέον, με την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, μπορεί να μας δώσει μία πολύ καλή εικόνα για την γεωμετρία των δομών ενδιαφέροντος. Στην παρούσα εργασία τέτοιες είναι οι αντιστατικές δομές που παρουσιάζονται στις εικόνες του κεφαλαίου 3 και πιστεύεται ότι είναι πιθανό να ταυτίζονται με θαμμένες δομές, αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, όπου λόγω του δομικού υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους, έχουν αυξημένη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Πολύ σημαντικό στάδιο για την σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, αποτελεί το στάδιο της συλλογής δεδομένων στο ύπαιθρο. Απαιτείται προσεκτικός χειρισμός και συνεχής έλεγχος των οργάνων μέτρησης για την αποφυγή λαθών ή/και τραυματισμών καθώς και η καταγραφή γεωλογικών παρατηρήσεων της περιοχής ή ακόμα και γενικές παρατηρήσεων, όπως το ανάγλυφο, η βλάστηση, θέσεις με μπάζα κλπ., με σκοπό να μας βοηθήσουν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Η επαναλαμβανόμενη και ταυτόχρονα μη αυτοματοποιημένη διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων, από την αλλαγή των διαφόρων μορφών των αρχείων που περιέχουν τα δεδομένα, μέχρι και το στάδιο της τελικής τους σύνθεσης, απαιτεί μεθοδικότητα και συνεχή ποιοτικό έλεγχο από τον χρήστη για την ορθότητα των τελικών αποτελεσμάτων.

Το στάδιο της αντιστροφής των δεδομένων, μέσω των λογισμικών αντιστροφής μας δίνει την πληροφορία που θέλουμε αλλά κρίνεται απαραίτητη η επεξεργασία αυτής της πληροφορίας (με λογισμικά όπως το surfer, voxler κα) με σκοπό μία καλύτερη απεικόνιση αυτής, για να πετύχουμε την σωστή ερμηνεία των μετρήσεων.

Η μέθοδος αυτή, μπορεί να προσφέρει πολύ σημαντικά αποτελέσματα, κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι δομές που θέλουμε να εντοπίσουμε, έχουν σημαντική αντίθεση στις ηλεκτρικές τους ιδιότητες (ειδική ηλεκτρική αντίσταση) με το περιβάλλον.

Πολύ καλή εφαρμογή βρίσκει στην περίπτωση της αρχαιομετρίας, όπου οι στόχοι (θαμμένες δομές) εμφανίζουν μεγάλες αντιστάσεις και βρίσκονται μέσα σε αγωγίμα (μικρή ειδική ηλεκτρική αντίσταση) εδάφη.

Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η καλή χωρική ανάλυση που μπορεί να προσφέρει, παράλληλα με ένα ικανοποιητικό βάθος διασκόπησης, ανάλογα φυσικά και με τον στόχο που θέλουμε να εντοπίσουμε, η γρήγορη συλλογή των δεδομένων και η επεξεργασία των δεδομένων, που σε σύγκριση με άλλες γεωφυσικές μεθόδους διασκόπησης, μπορεί να δώσει αποτελέσματα ταχύτατα.

Η εφαρμογές της μεθόδου βέβαια δεν περιορίζονται μόνο στην αρχαιομετρία αλλά σε ένα πλήθος γεωλογικών και γεωτεχνικών εργασιών, καθώς συνδυάζει ταχύτητα και ακρίβεια με ένα χαμηλό κόστος και δίνει άριστα αποτελέσματα κυρίως όταν υπάρχει έντονη αντίθεση μεταξύ του περιβάλλοντος και των δομών ενδιαφέροντος.

6. Βιβλιογραφία

- Aspinall A, Gaffney CF. 2001. The Schlumberger array-potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 8: 199–209.
- Athanasiou, E., 2004. Combined inversion of geoelectrical data by the use of contact electrodes. M.Sc. Thesis, Aristotle University of Thessaloniki.
- Athanasiou E, Tsourlos PI, Vargemezis GN, Papazachos CB, Tsokas GN. 2007. Nondestructive DC resistivity surveying using flat base electrodes. *Near Surface Geophysics* 5(4): 263–272
- Atzemoglou A, Tsourlos P, Pavlides S. 2003. Investigation of the tectonic structure of the NW part of the Amynteon Basin (NW Greece) by means of a vertical electrical sounding (VES) survey. *Journal of the Balkan Geophysical Society* 6(4): 188–201.
- Barton, K., Fenwick, J., 2005. Geophysical investigations at the ancient royal site of Rathcroghan, County Roscommon, Ireland. *Archaeological Prospection* 12, 3–18.
- Burnett DS. 1988. *Finite Element Analysis (from concept to applications)*. Addison-Wesley: AT&T Laboratories: New Jersey
- Candansayar, M.E., Başokur, A.T., 2001. Detecting small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archaeological survey. *Geophysical Prospecting* 49, 13–25.
- Chambers JE. 2001. The application of 3D electrical tomography to the investigations of brownfield sites. PhD thesis, University of Sheffield.
- Chouker F. 2001. Archaeological site investigation by geoelectrical measurements in Tel-Halawi (northern Syria). *Archaeological Prospection* 8: 257–263.
- Clark A. 1990. *Seeing Beneath the Soil-Prospecting Methods in Archaeology*. B.T. Batsford: London.

- Cosentino P, Martorana R. 2001. The resistivity grid applied to wall structures: first results. Proceedings of the 7th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society, European Section, Birmingham, UK.
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting* 52, 379–398.
- Dahlin T, Loke MH. 1997. Quasi-3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. Proceedings of the 3rd Meeting of the Environmental and Engineering Geophysics; 8–11 September 1997, Aarhus, Denmark; 143–146.
- Ευγενίδου Δ., Κάστρα Μακεδονίας και Θράκης. Βυζαντινή Καστροκτισία, Αθήνα 2003, σ.82 – 85.
- Edwards, W., Okita, M., Goodman, D., 2000. Investigation of Subterranean Tomb in Miyazaki, Japan. *Archaeological Prospection* 7, 215–224.
- Ellis R, Oldenburg DW. 1994. Applied geophysical inversion. *Geophysical Journal International* 116: 5–11
- Forte, E., Pipan, M., 2008. Integrated seismic tomography and ground penetrating radar (GPR) for the high resolution study of burial mounds (tumuli). *Journal of Archaeological Science* 35, 2614–2623.
- Ζήκος Ν.,Ανακτορούπολη. Καινούριες ιστορικές πληροφορίες και αρχαιολογικά δεδομένα, Πρακτικά Β' Διεθνούς Συνεδρίου Βαλκανικών Ιστορικών Σπουδών: Η Καβάλα και τα Βαλκάνια. Η καβάλα και το Αιγαίο, (Καβάλα, 15 – 18 Σεπτεμβρίου 2005), Καβάλα 2009, τομ. Γ', σ. 19 – 40.
- Griffiths, D., Barker, R., 1993. Two dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics* 19, 211–226.

- Günther, T., Rücker, C., Spitzer, K., 2006. Three-dimensional modelling and inversion of DC resistivity data incorporating topography-II. inversion. *Geophysical Journal International* 166, 506–517.
- Κακούρης Ι., Ανακτορούπολη. Ιστορικές πληροφορίες και αρχαιολογικά δεδομένα, Πρακτικά Α' Τοπικού Συμποσίου: Η Καβάλα και η περιοχή της, (Καβάλα, 18 – 20 Απριλίου 1977), Θεσσαλονίκη 1980, σ. 249 – 262.
- Karastathis VK, Karmis PN, Drakatos G, Stavrakakis G. 2002. Geophysical methods contributing to the testing of concrete dams. Application of the Marathon Dam. *Journal of Applied Geophysics* 50: 247–260.
- Kamei, H., Marukawa, Y., Kudo, H., Nishimura, Y., Nakai, M., 2000. Geophysical survey of Hirui-Otsuka mounded tomb in Ogaki, Japan. *Archaeological Prospection* 7, 225–230
- Loke MH, Barker RD. 1995. Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics* 60(6): 1682–1690.
- Loke, M.H., Barker, R., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting* 44, 499–523.
- Μουντράκης, Δ. 1994. Εισαγωγή στη γεωλογία της Μακεδονίας και της Θράκης. Απόψεις για την γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελληνικής Ενδοχώρας και των Εσωτερικών Ελληνίδων. *Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Ετ.*, 30, 31-46
- Noel M. 1991. Multielectrode Resistivity Tomography for Imaging Archaeology. *British Archaeological Reports*: Oxford.
- Nyari, Z., Kanli, A.I., 2007. Imaging of buried 3D objects by using electrical profiling methods with GPR and 3D geoelectrical measurements. *Journal of Geophysics and Engineering* 4, 83–93.

- Παπαζάχος Βασίλης, 1999 Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N., Sarris, A., 2006. Two-dimensional and three-dimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection* 13, 163–181.
- Papadopoulos, N.G., Tsourlos, P., Tsokas, G.N., Sarris, A., 2007. Efficient ERT measuring and inversion strategies for 3D imaging of buried antiquities. *Near Surface Geophysics* 5, 349–362.
- Sarris A. 2004. Preliminary Report of the Geophysical Investigations in the Archaeological Site of Sikyon. Institute for Mediterranean Studies: Rethimno, Crete, 29 pp.
- Tsokas, G.N., Rocca, A.Ch., 1987. Field investigation of a macedonian tumulus by resistivity soundings. *Geoexploration* 24, 99–108.
- Tsokas GN, Giannopoulos A, Tsourlos P, Vargemezis G, Tealby JM, Sarris A, Papazachos CB, Savopoulou T. 1994. A large scale geophysical survey in the archaeological site of Europos (northern Greece). *Journal of Applied Geophysics* 32: 85–98.
- Tsourlos, P., 1995. Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Ph.D. Thesis, University of York.
- Tsourlos, P.I., Szymanski, J.E., Tsokas, G.N., 1999. The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics* 64 (5), 1357–1363.
- Yi, M.J., Kim, J.H., Chung, S.H., 2003. Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing. *Geophysics* 68 (3), 931–941.