



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

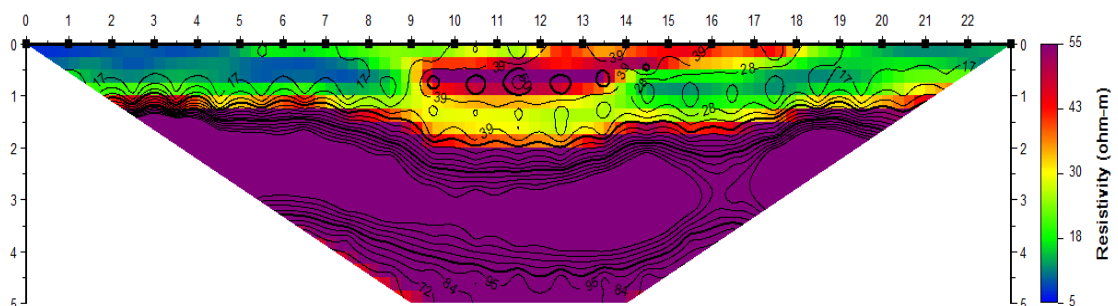


ΒΛΑΧΟΝΑΣΙΟΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΙΔΗΣ ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ

ΑΕΜ:5798

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ
ΛΕΙΨΑΝΩΝ ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2022





ΒΛΑΧΟΝΑΣΙΟΣ ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΙΔΗΣ ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ:5798

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΛΕΙΨΑΝΩΝ
ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέποντες

ΤΣΟΥΡΛΟΣ Π.

Καθηγητής Α.Π.Θ.

ΤΣΟΚΑΣ Γ.

Καθηγητής Α.Π.Θ.



© Βλαχονάσιος Χριστοφορίδης Επαμεινώνδας, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ, Τομέας Γεωφυσικής, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΛΕΙΨΑΝΩΝ
ΘΑΜΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΟΥ - Διπλωματική εργασία

© Vlachonasios Christoforidis Epameinondas, School of Geology, Department of Geophysics, 2022

All rights reserved.

APPLICATION OF ELECTRICAL TOMOGRAPHY FOR THE DETECTION OF BURIED
ROAD REMAINS – Bachelor Thesis

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



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



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση της γεωφυσικής μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας με σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων λειψάνων δρόμου. Αρχικά, γίνεται μια εισαγωγή και ανάλυση των βασικών αρχών της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας. Έπειτα, ακολουθεί μια περιγραφή της περιοχής που έλαβε χώρα η συγκεκριμένη έρευνα και περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό, την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων. Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη της εργασίας αυτής. Γενικά, τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε ειδική επεξεργασία και προέκυψαν εικόνες των ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους σε δυο διαστάσεις. Στις εικόνες αποτυπώνεται χαρακτηριστικά σχετικά επιφανειακή δομή μεγάλης ηλεκτρικής αντίστασης που ερμηνεύεται ως δομή αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Καθώς οι μετρήσεις έγιναν σε διαδοχικές παράλληλες τομές ήταν δυνατή η συσχέτιση των αποτελεσμάτων και η σύνθετη ερμηνεία των γεωηλεκτρικών εικόνων. Μετά τη συσχέτιση επιβεβαιώνεται η παρουσία μιας γραμμικής γεωηλεκτρικής δομής που θα μπορούσε να αποδοθεί σε εν δυνάμει αρχαίο δρόμο.



Abstract

In this work, the geophysical method of electrical tomography is used in order to identify buried road remains. Initially, an introduction and analysis of the basic principles of the method of electrical tomography is made. Following, a description of the area where the specific survey took place and the methodology used to locate, collect and process the data is described. The last chapter sets out the conclusions drawn from the study of this work. In general, the data were subjected to special processing and images of the subsurface electrical in two dimensions were produced. The images typically depict a relatively superficial resistive anomaly that is interpreted as a structure of archaeological interest. As measurements were made in successive parallel sections it was possible to correlate the results and jointly interpret the geoelectrical images. The correlation verifies the presence of a linear geoelectrical structure that could be attributed to a potentially ancient road.





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή.....	10
2. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης – Ηλεκτρική τομογραφία	12
2.1 Γενικά.....	12
2.2 Φαινόμενη αντίσταση	14
2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν	15
2.3.1 Διάταξη Διπόλου – Διπόλου.....	16
2.3.2 Διάταξη Multiple Gradient	17
2.4 Μέθοδος Αντιστροφής.....	18
3. Περιοχή μελέτης και συλλογή δεδομένων	19
3.1 Περιοχή μελέτης - Παλαιοκώμη Σερρών.....	19
3.1.1 Στοιχεία για την Περιοχή μελέτης.....	20
3.2 Συλλογή δεδομένων και μετρήσεις.....	21
4. Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα	26
4.1 Επεξεργασία δεδομένων- 2D-Αντιστροφή	26
4.1.1 Επεξεργασία δεδομένων.....	26
4.1.2 2D-Αντιστροφή.....	28
4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων	35
4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων- Τομές KL1-K1 (dd_mg).....	35
4.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων- Τομές K1-K5.....	36
5. Συμπεράσματα.....	42
6. Βιβλιογραφία	45

1. Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αφορά την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας για τον εντοπισμό θαμμένων λειψάνων δρόμου.

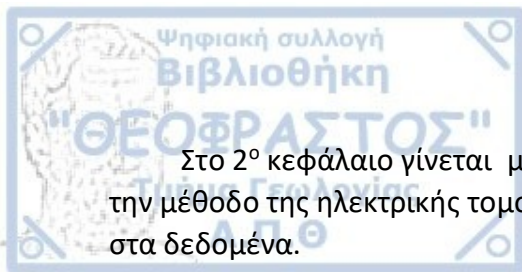
Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται και αναλύονται στα παρακάτω κεφάλαια, καθώς και τα αποτελέσματα στην παρούσα εργασία αποτελούν τμήμα μιας γεωφυσικής διασκόπησης μεγαλύτερης κλίμακας που εκτελέστηκε στην περιοχή της Παλαιοκώμης Αμφίπολης στον νομό Σερρών, με κύριο σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων τμημάτων του δρόμου της αρχαίας Εγνατίας οδού με την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων, κυρίως ηλεκτρικών. Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν από τα μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Α.Π.Θ.

Στα πλαίσια προγράμματος ζητήθηκε από τα μέλη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής να διενεργήσουν γεωφυσική διασκόπηση εδάφους με κύριο σκοπό τον εντοπισμό θαμμένων λειψάνων δρόμου λίγο έξω από την περιοχή της Παλαιοκώμης Σερρών, με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Στην περιοχή έχουν εντοπιστεί πιθανά ίχνη της Εγνατίας οδού μετά από μελέτη σχετικών αεροφωτογραφιών (Kaimaris et al., 2011) και για αυτό και η γεωφυσική έρευνα επικεντρώθηκε στις συγκεκριμένες θέσεις.

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας βρίσκει ευρεία εφαρμογή στις περιπτώσεις όπου οι στόχοι παρουσιάζουν σημαντική αντίθεση στην ηλεκτρική τους αντίσταση σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο. Πολλοί αρχαιολογικοί στόχοι εντοπίζονται με την συγκεκριμένη μέθοδο καθώς τα υλικά με τα οποία έχουν κατασκευαστεί (π.χ. δομικούς λίθοι) έχουν μεγαλύτερη ηλεκτρική αντίσταση από τα υλικά που τα περιβάλλουν. Δηλαδή, ο εντοπισμός τους βασίζεται κατά κύριο λόγο στην αντίθεση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δεδομένου ότι βρίσκονται συχνά θαμμένοι σε χαλαρά εδάφη, τα οποία είναι κυρίως αμμοχάλικα, ιλύς και άργιλος, τα οποία και παρουσιάζουν αρκετά μικρές τιμές ηλεκτρικής αντίστασης.

Η συλλογή των δεδομένων έγινε με το όργανο Syscal Pro της IRIS Instruments, με τη χρήση πολύκλωνων καλωδίων σε προφίλ 2 διαστάσεων. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκε και διαφορικό GPS για μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτύπωση των τελικών μετρήσεων, το Trimble R6 – TSC3, το οποίο χρησιμοποιεί το Ελληνικό Σύστημα Εντοπισμού (HEPOS) και η αποτύπωση έγινε στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87. Ένας επιπλέον λόγος που χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο όργανο είναι η τοπογραφική αποτύπωση του ανάγλυφου. Μετά από αρχικές δοκιμές όλα τα προφίλ ηλεκτρικής τομογραφίας που εκτελέστηκαν είχαν 24 ηλεκτρόδια με απόσταση 1 μέτρο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Έγιναν μετρήσεις σε παράλληλα προφίλ, τα οποία είχαν μεταξύ τους απόσταση 4 μέτρων, με σκοπό την δημιουργία ενός καννάβου που θα χρησιμοποιηθεί σε σχεδιαστικό πρόγραμμα για τον προσδιορισμό των θαμμένων λειψάνων του εν δυνάμει δρόμου.

Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται αρχικά ξεχωριστά για κάθε ένα από τα πέντε προφίλ, και έπειτα συνδυασμός των αποτελεσμάτων για ολόκληρο τον κάνναβο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι μετρήσεις των 5 προφίλ σε σχέση με τις ηλεκτρικές αντιστάσεις και ερμηνεύονται σε σχέση με τη θέση του πιθανού δρόμου.



Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών αρχών που αφορούν την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας και μια εισαγωγή στην εφαρμογή της αντιστροφής στα δεδομένα.

Σκοπός του 3^{ου} κεφαλαίου είναι η περιγραφή των ιστορικών και γεωλογικών στοιχείων της περιοχής μελέτης, και η ανάλυση της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων. Επίσης, παρατίθενται εικόνες από το ύπαιθρο και την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας σε προφίλ δυο διαστάσεων, αλλά και γενικότερες πληροφορίες για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Στο 4^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις πεδίου, από την παρούσα πτυχιακή εργασία και στο τέλος παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους επιβλέποντες Καθηγητές κύριο Τσούρλο Παναγιώτη, και Γρηγόρη Τσόκα για την πολύτιμη βοήθεια τους στην πρώτη μου επαφή στο πεδίο για την συλλογή και επεξεργασία γεωφυσικών δεδομένων και τις συμβουλές τους για την επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής μου. Τους ευχαριστώ επίσης όχι μόνο για την συνεργασία στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής, αλλά για την εισαγωγή μου στο αντικείμενο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής κατά την διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

2. Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης – Ηλεκτρική τομογραφία

2.1 Γενικά

Αρχικά, η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος αποτελεί μια από τις σημαντικότερες και ευρύτερα διαδεδομένες μεθόδους διερεύνησης της εφαρμοσμένης γεωφυσικής. Σκοπός της μεθόδου είναι ο καθορισμός της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την εύρεση της γεωλογικής δομής. Χρησιμοποιείται αξιοποιώντας τους νόμους που διέπουν τον γεωηλεκτρισμό και πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο με σκοπό τον εντοπισμό και την έρευνα υδροφόρων οριζόντων, ή ακόμη και συνοδευτική μέθοδος στον κλάδο της Τεχνικής γεωλογίας σε διάφορα έργα.

Για την μελέτη και ανάλυση του υπεδάφους με την μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιείται ο νόμος του Ohm, δηλαδή διοχετεύεται ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα δίπολο ηλεκτροδίων ρεύματος (πχ AB) και μετριέται η διαφορά δυναμικού σε ένα ξεχωριστό δίπολο (πχ MN). Ποσοτικά ο νόμος αυτός μπορεί να αναλυθεί σαν μια ποσότητα R, όπου συμβολίζεται η αντίσταση και μετριέται σε Ohm, ότι ισούται με το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού V με την ένταση του ρεύματος I. Η σχέση προσδιορίζεται βάση της παρακάτω εξίσωσης:

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

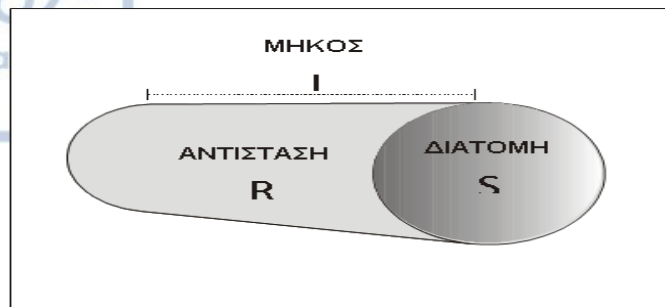
2.1

Σε γενικές γραμμές η χρήση της μετρούμενης ωμικής αντίστασης με απώτερο στόχο τον προσδιορισμό δομών σε γεωφυσικές έρευνες παρουσιάζει μια πληθώρα προβλημάτων, αφού αυτή δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το υλικό που είναι κατασκευασμένος ο στόχος, αλλά και από τη γεωμετρία του. Ένα πολύ σύνηθες παράδειγμα είναι η αλλαγή της μετρούμενης αντίστασης σε έναν ηλεκτρικό αγωγό, ο οποίος έχει συγκεκριμένο μήκος και διατομή, αν μεταβληθεί τόσο το μήκος όσο και η διατομή του, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1.1. Οπότε, για να λαμβάνεται υπόψιν και η γεωμετρία του αγωγού χρησιμοποιείται η ιδιότητα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σύμφωνα με τον τύπο:

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

2.2

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



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

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (electrical resistivity) ενός πετρώματος μετριέται σε Ohm.m, ενώ το αντίστροφο της ονομάζεται ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity) και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} , \quad 2.3$$

όπου μετριέται σε Siemens/m στο διεθνές σύστημα SI και δείχνει την ευκολία ή δυσκολία διάδοσης των ηλεκτρικών φορτίων μέσα από έναν γεωλογικό σχηματισμό.

Ακόμη, η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός γεωλογικού υλικού μπορεί να τον χαρακτηρίσει σαν καλό ή κακό αγωγό. Υπάρχουν διάφορα παραδείγματα ορυκτών που είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, όπως για παράδειγμα ο γραφίτης και τα αμιγή μέταλλα, καθώς και ένας αρκετά διαδεδομένος κακός αγωγός είναι το απιονισμένο νερό που χρησιμοποιείται σε αρκετά εργαστήρια.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, το πορώδες, η γεωμετρία του πετρώματος, αλλά και η γεωλογική τους ηλικία. Η ηλικία επηρεάζει την ηλεκτρική αντίσταση γιατί όσο μεγαλύτερη είναι τόσο αυξάνεται η συνοχή των πετρωμάτων και ως ένα βαθμό παρουσιάζουν μεγάλες αντιστάσεις. Επίσης, η θερμοκρασία είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, αφού αύξηση στην θερμοκρασία οδηγεί στην ελάττωση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και κατ' επέκταση στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Στην συγκεκριμένη εργασία προσπαθούμε να εντοπίσουμε διαφορές στις τιμές κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία είναι συνάρτηση της αντίστασης που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα, με σκοπό να γίνει συσχέτιση με την αλλαγή λιθολογίας σε σχετικά μικρά βάθη.

Έτσι λοιπόν, η ερμηνεία των στρωμάτων του υπεδάφους βάσει της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης απαιτεί χρήση γεωλογικών παρατηρήσεων και αρκετά καλή γνώση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης.

Τέλος, τα όργανα που χρησιμοποιούνται στη γεωηλεκτρική διασκόπηση είναι συνήθως απλά και αποτελούνται από ένα βολτόμετρο για την μέτρηση της τάσης και μία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος με αμπερόμετρο. Πέρα από αυτά οι συσκευές ηλεκτρικής διασκόπησης περιλαμβάνουν και πολύκλινα καλώδια, ηλεκτρόδια, μετροταινίες, τοπογραφικές συσκευές και υπολογιστικά προγράμματα για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

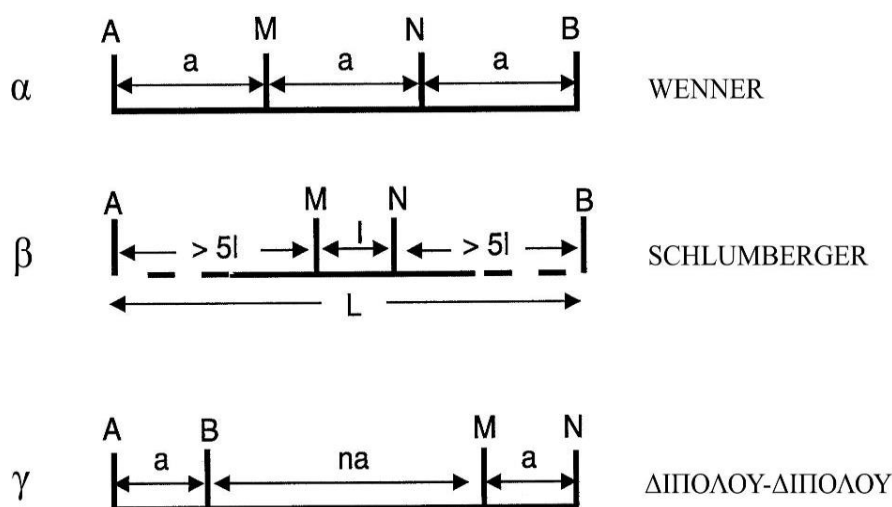
2.2 Φαινόμενη αντίσταση

Αρχικά, είναι γνωστό ότι ο φλοιός της Γης, ιδιαίτερα το πάνω μέρος του είναι εξαιρετικά ανομοιογενές και για αυτόν τον λόγο η θεωρία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.1 ισχύει και χρησιμοποιείται μόνο για μικρά τμήματα αυτού. Αντιθέτως, για τα περισσότερα μεγάλα τμήματα χρησιμοποιούνται πολύπλοκοι τύποι, αν και σε γενικές γραμμές είναι δύσκολο να καθοριστούν μαθηματικές σχέσεις για ανομοιογενείς γεωηλεκτρικές δομές.

Στην περίπτωση που αναφέρεται παραπάνω η διάδοση του ρεύματος γίνεται μέσα σε ανομοιογενές υλικό, που έχει ως συνέπεια η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης που μετρείται να εξαρτάται και από έναν ακόμη παράγοντα, την θέση και διάταξη των ηλεκτροδίων. Η μετρούμενη αυτή φυσική ποσότητα ονομάζεται φαινόμενη ηλεκτρική αντίσταση και μας βοηθάει στον καθορισμό της πραγματικής κατανομής των ειδικών αντιστάσεων στο υπέδαφος. Δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\rho_{\alpha} = R * K \quad , \quad 2.4$$

Στον χώρο της εφαρμοσμένης γεωφυσικής υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού. Όπως αναφερθήκαμε και στο παραπάνω κεφάλαιο, για κάθε μέτρηση - προφίλ χρειαζόμαστε ένα δίπολο ρεύματος (AB) και ένα δίπολο δυναμικού (MN). Οι πιο διαδεδομένες διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι Wenner, Schlumberger και η διπόλου – διπόλου, όπως φαίνονται στο σχήμα 2.2.1. Η κάθε μια από τις διατάξεις έχει διάφορα πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα, οπότε δεν υπάρχει μια διάταξη για όλες τις ανάγκες, αλλά ανάλογα με τον στόχο και την εκάστοτε έρευνα επιλέγεται κάθε φορά η πιο κατάλληλη. Παραδείγματος χάρη, η διάταξη Wenner παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων, καθώς πρέπει να μετακινούμε όλα τα ηλεκτρόδια κατά την πραγματοποίηση νέας μέτρησης. Τέλος, στην παρούσα εργασία και την έρευνα που ανατέθηκε χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις διπόλου – διπόλου, η διάταξη Multiple Gradient, καθώς και ο συνδυασμός και των δυο και επιλέχθηκε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η γεωμετρία από τις πιο ευρύτερα γνωστές διατάξεις.



Σχήμα 2.2.1 Οι πιο διαδεδομένες διατάξεις ηλεκτροδίων (Τσούρλος, 1995).

Από την γεωμετρία των διατάξεων στο σχήμα 2.2.1 διακρίνεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το βάθος διασκόπησης, το οποίο είναι διαφορετικό σε κάθε έρευνα αναλόγως με τον στόχο που πρέπει να βρεθεί, καθορίζεται από το μέγιστο άνοιγμα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Όμως, επειδή η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι μια μέθοδος διάχυσης, έχει ως αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το βάθος διασκόπησης να μειώνεται η διακριτική ικανότητα, ενώ σε μικρότερα βάθη η διακριτική ικανότητα είναι μεγάλη.

Στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται στην συγκεκριμένη εργασία, αλλά και γενικότερα στην μελέτη του υπεδάφους για τον προσδιορισμό κάποιου στόχου χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια δυναμικού (MN) που βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους και ηλεκτρόδια ρεύματος (AB), τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, αλλά σε μικρή απόσταση μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και στο έργο εντοπισμού θαμμένων λειψάνων δρόμου είναι η διπόλου – διπόλου.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι στην ουσία ένας συνδυασμός δυο διαφορετικών μεθόδων μέτρησης με σκοπό την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης σε μια τομή δυο διαστάσεων, δηλαδή πλευρικά και σε βάθος. Ακόμη, θα ήταν πολύ χρονοβόρο και κουραστικό για την εύρεση της αντίστασης σε όλο το προφίλ να γινόταν εναλλαγή ηλεκτροδίων χειροκίνητα για να προσδιοριστεί η κατανομή σε όλο το μήκος και βάθος. Έτσι, χρησιμοποιούνται πολύκλινα καλώδια που έχουν εξόδους για 24 ή 48 ή 96 ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια αυτά τοποθετούνται στο έδαφος, πακτώνονται εκεί με μια συγκεκριμένη απόσταση που έχουμε ορίσει εμείς και συνδέονται με το όργανο. Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα που ορίζουμε για την λειτουργία του οργάνου, δίνοντας ρεύμα σε ένα δίπολο και μετρώντας την διαφορά δυναμικού σε ένα άλλο μέχρι να τελειώσουν όλοι οι συνδυασμοί που έχουμε ορίσει από πριν. Τέλος, αφού γίνει όλη αυτή η διαδικασία η εργασία στο ύπαιθρο τελειώνει μετά από όλες τις μετρήσεις και τα προφίλ που θα αναλυθούν γίνονται υπολογισμοί και ανάλυση σε προγράμματα για την δημιουργία και σχεδιασμό δυσδιάστατων τομών.

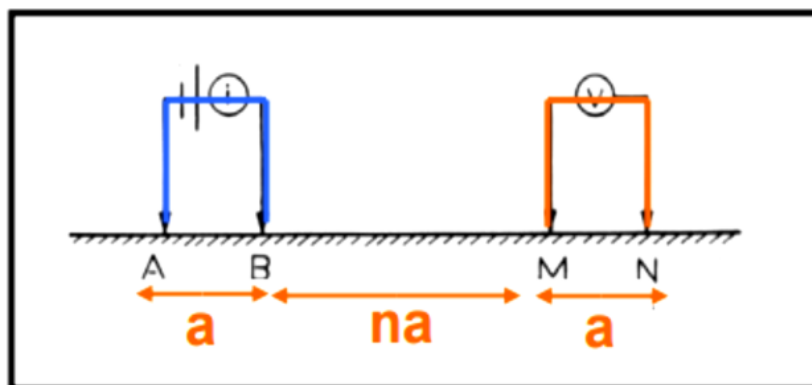
2.3 Διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν

Αρχικά, στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκαν διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων, δηλαδή 2 ηλεκτρόδια ρεύματος και 2 ηλεκτρόδια δυναμικού. Ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων και τις μεταξύ τους αποστάσεις προκύπτουν οι διατάξεις ηλεκτροδίων που απεικονίζονται στο σχήμα 2.2.1. Γενικά, οι διατάξεις τεσσάρων ηλεκτροδίων χρησιμοποιούνται πιο συχνά και είναι αρκετά αποτελεσματικές, καθώς μειώνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την αντίσταση επαφής, δηλαδή της ηλεκτρικής αντίστασης στην θέση του ηλεκτροδίου.

Στην συγκεκριμένη εργασία οι μετρήσεις έγιναν χρησιμοποιώντας τις διατάξεις διπόλου – διπόλου, την διάταξη multiple gradient και τον συνδυασμό και των δυο αυτών διατάξεων. Χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη διπόλων, έχουν μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης για συγκεκριμένο ανάπτυγμα ηλεκτροδίων σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους και έχουν μεγάλη πλευρική διακριτική ικανότητα. Ακολούθως, περιγράφονται οι 2 αυτές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την απόκτηση των γεωηλεκτρικών δεδομένων της περιοχής μελέτης.

2.3.1 Διάταξη Διπόλου – Διπόλου

Στην διάταξη διπόλου – διπόλου οι μετρήσεις πραγματοποιούνται τοποθετώντας τα δυο ηλεκτρόδια ρεύματος (AB) συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3.1.1. Η απόσταση μεταξύ των 2 ηλεκτροδίων ρεύματος είναι μικρή, όπως και η απόσταση μεταξύ των 2 ηλεκτροδίων δυναμικού και είναι ίση με a . Αντιθέτως, η απόσταση μεταξύ των δυο ζευγαριών ηλεκτροδίων είναι μεγαλύτερη και ίση με na ($na \gg 1$).



Σχήμα 2.3.1.1 Διάταξη ηλεκτροδίων διπόλου – διπόλου (Οικονόμου και Hamdan, 2015)

Η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_a = \pi na(n+1)(n+2) \Delta V / I \quad 2.5$$

Όπου $\pi na(n+1)(n+2)$: ο γεωμετρικός συντελεστής της διάταξης των ηλεκτροδίων

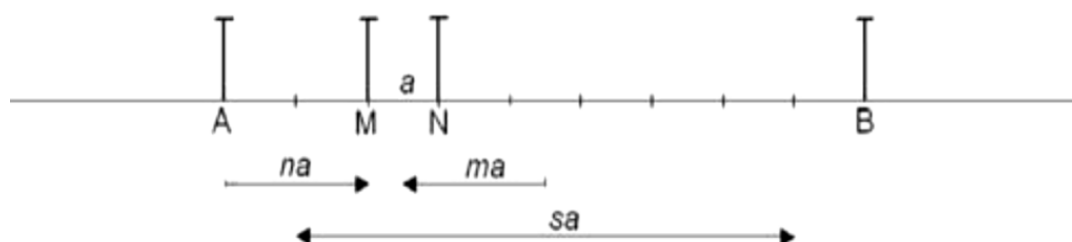
ΔV : η μέτρηση της διαφοράς δυναμικού

I : η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι η απόσταση, na , μεταξύ του διπόλου ρεύματος και του διπόλου δυναμικού μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και περιορίζεται μόνο από τον εδαφικό θόρυβο και από την ικανότητα των οργάνων μέτρησης και όχι από την απαίτηση για μεγάλα μήκη καλωδίων, όπως συμβαίνει στις υπόλοιπες διατάξεις. Η απόσταση na καθορίζει το βάθος διεύδυσης του ηλεκτρικού ρεύματος και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το βάθος διασκόπησης. Όμως, όσο μεγαλώνει η απόσταση τόσο μικραίνει η ανάλυση και η διακριτική ικανότητα, οπότε υπάρχει ένας γενικός κανόνας να επιλέγεται μήκος διπόλου περίπου στο ήμισυ των αναμενόμενων γεωφυσικών στόχων (Καμπάκη, 2016). Τέλος, ένα ακόμη πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η μεγάλη ευαισθησία στις πλευρικές μεταβολές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό μας βοηθάει στον ευκολότερο και πιο αξιόπιστο εντοπισμό στόχων, και στην συγκεκριμένη έρευνα θαμμένων λειψάνων δρόμου.

2.3.2 Διάταξη Multiple Gradient

Αρχικά, η διάταξη Multiple Gradient χρησιμοποιεί ένα πολυκαναλικό σύστημα που είναι ικανό να κάνει πολλές μετρήσεις ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στις υπόλοιπες διατάξεις που προαναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται 4 ηλεκτρόδια. Το δίπολο ρεύματος παραμένει σε σταθερή θέση, ενώ τα πιθανή ζεύγη ηλεκτροδίων σε διαφορετική θέση (Dahlin and Zhou, 2016). Στη συγκεκριμένη διάταξη οι μετρήσεις γίνονται τοποθετώντας τα δίπολα ρεύματος και δυναμικού όπως υποδηλώνεται στο Σχήμα 2.3.2.1. Ακόμη, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι ίση με $(s+2)*a$, όπου s είναι ο συντελεστής διαχωρισμού και a είναι η μικρότερη σχετική απόσταση μεταξύ διπόλου ρεύματος και δυναμικού.



Σχήμα 2.3.2.1 Διάταξη ηλεκτροδίων Multiple Gradient (Dahlin and Zhou, 2006).

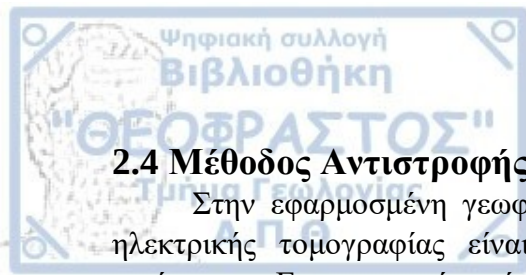
Επομένως, όπως παρατηρείται και στο παραπάνω σχήμα ο συντελεστής διπόλου της διαφοράς δυναμικού, ο οποίος συμβολίζεται με m , σε σχέση με το μεσαίο σημείο του διπόλου ρεύματος δίνεται από τον τύπο:

$$m = (X_{MN} - X_{AB})/2 \quad 2.6$$

όπου X_{AB} : ενδιάμεσα σημεία του διπόλου ρεύματος

X_{MN} : ενδιάμεσα σημεία του διπόλου δυναμικού

Ανάλογα με την θέση του διπόλου δυναμικού σε σχέση με το μέσο του διπόλου ρεύματος ο συντελεστής m μπορεί να πάρει θετική ή αρνητική τιμή, αν είναι τοποθετημένο δεξιά ή αριστερά αντίστοιχα. Τέλος, μια παρατήρηση για την διάταξη Multiple Gradient είναι ότι μοιάζει με την διάταξη πόλου – διπόλου, όταν το δίπολο δυναμικού είναι αρκετά κοντά σε ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, δηλαδή για μεγάλες τιμές του s .



2.4 Μέθοδος Αντιστροφής

Στην εφαρμοσμένη γεωφυσική οι μετρήσεις που υπολογίζουμε με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι μεταβολές της κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης. Για να προκύψει όμως μια πραγματική απεικόνιση θα πρέπει να περάσουμε στο πεδίο των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με την συμβολή μιας αρκετά πολύπλοκης μαθηματικής διαδικασίας που ονομάζεται αντιστροφή. Γενικά, η μέθοδος της αντιστροφής βασίζεται σε μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία κατά την οποία αλλάζουμε συνεχώς ένα αρχικό μοντέλο ηλεκτρικής αντίστασης το οποίο να μας δίνει μετρήσεις όσο το δυνατό πιο κοντά στις αντίστοιχες μετρήσεις πεδίου.

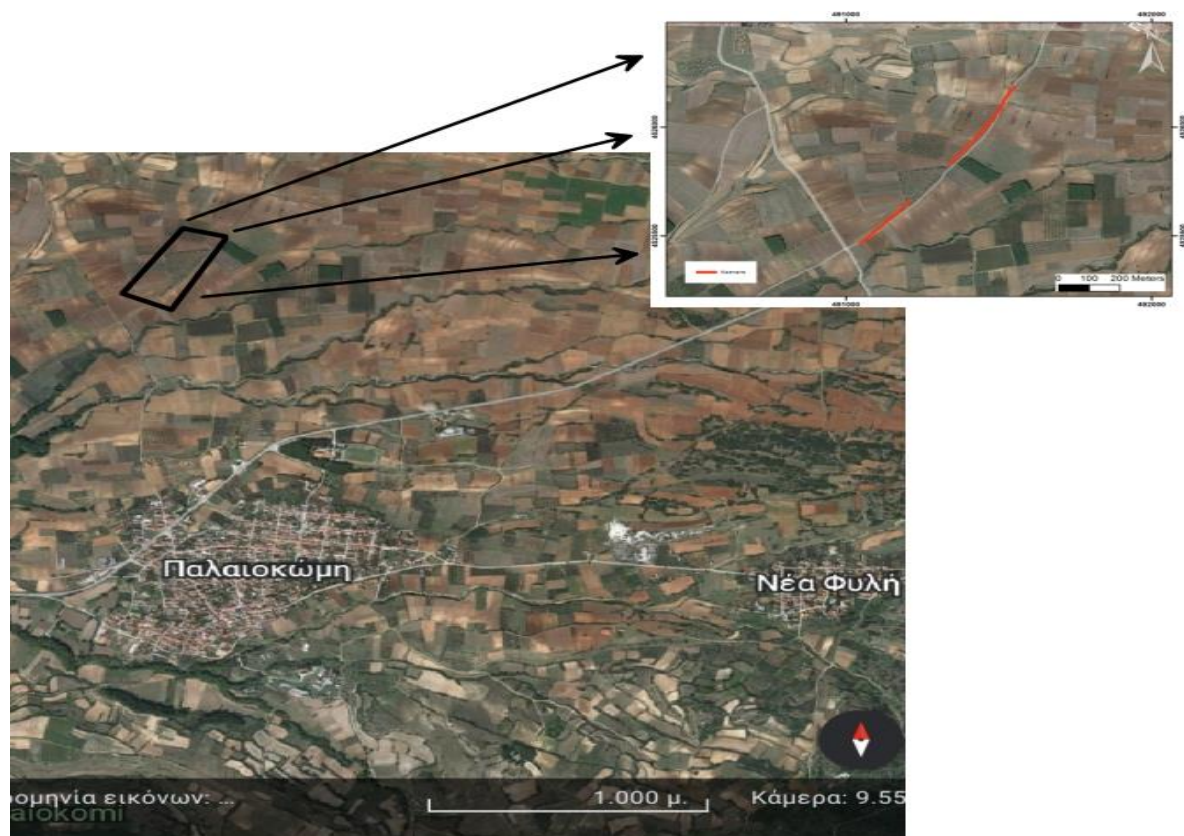
Ο υπολογισμός των φαινόμενων ειδικών αντιστάσεων για μια περιοχή μελέτης μιας γνωστής ηλεκτρικής δομής ονομάζεται επίλυση του ευθέος προβλήματος. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με δυο τρόπους είτε αριθμητικά είτε με αναλυτική προσέγγιση (Tsourlos, 1995). Αντιθέτως, το αντίστροφο πρόβλημα αφορά την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή την εύρεση του πιο κατάλληλου μοντέλου αντιστάσεων για να παράξει μετρήσεις που να προσομοιάζουν με τις πραγματικές, με όσο το δυνατόν μικρότερο σφάλμα.

3. Περιοχή μελέτης και συλλογή δεδομένων

3.1 Περιοχή μελέτης - Παλαιοκώμη Σερρών

Η περιοχή μελέτης ανήκει στον δήμο Αμφίπολης, στην δημοτική ενότητα Παλαιοκώμης του νομού Σερρών. Στην περιοχή αυτή βάσει προηγούμενων μελετών (Kaimaris et al., 2011) εκτιμάται ότι περνούσε ο δρόμος της αρχαίας Εγνατίας Οδού, η οποία δημιουργήθηκε κατά την Ρωμαϊκή αυτοκρατορία και διέσχιζε αρκετές πόλεις της Βόρειας Ελλάδας. Ο δρόμος αυτός περνούσε λίγο βορειότερα από την σημερινή τοποθεσία του χωριού Παλαιοκώμη. Παρακάτω, παρατίθεται μια εικόνα από το πρόγραμμα Google Earth που διακρίνεται η ευρύτερη περιοχή της δημοτικής ενότητας της Παλαιοκώμης, καθώς και η περιοχή που έγιναν οι μετρήσεις και η συλλογή δεδομένων. Με την κόκκινη γραμμή φαίνεται η πιθανή τοποθεσία του δρόμου από δορυφορικές εικόνες και περίπου σε αυτά τα σημεία, σε κάθετη όμως διεύθυνση προς την κόκκινη γραμμή, τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια και εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Τέλος, με το μαύρο πολύγωνο απεικονίζεται η περιοχή μελέτης που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας για την εύρεση πιθανού δρόμου, όπως παρατηρείται και στην εικόνα του Kaimaris et al., 2011 με το κόκκινο χρώμα.

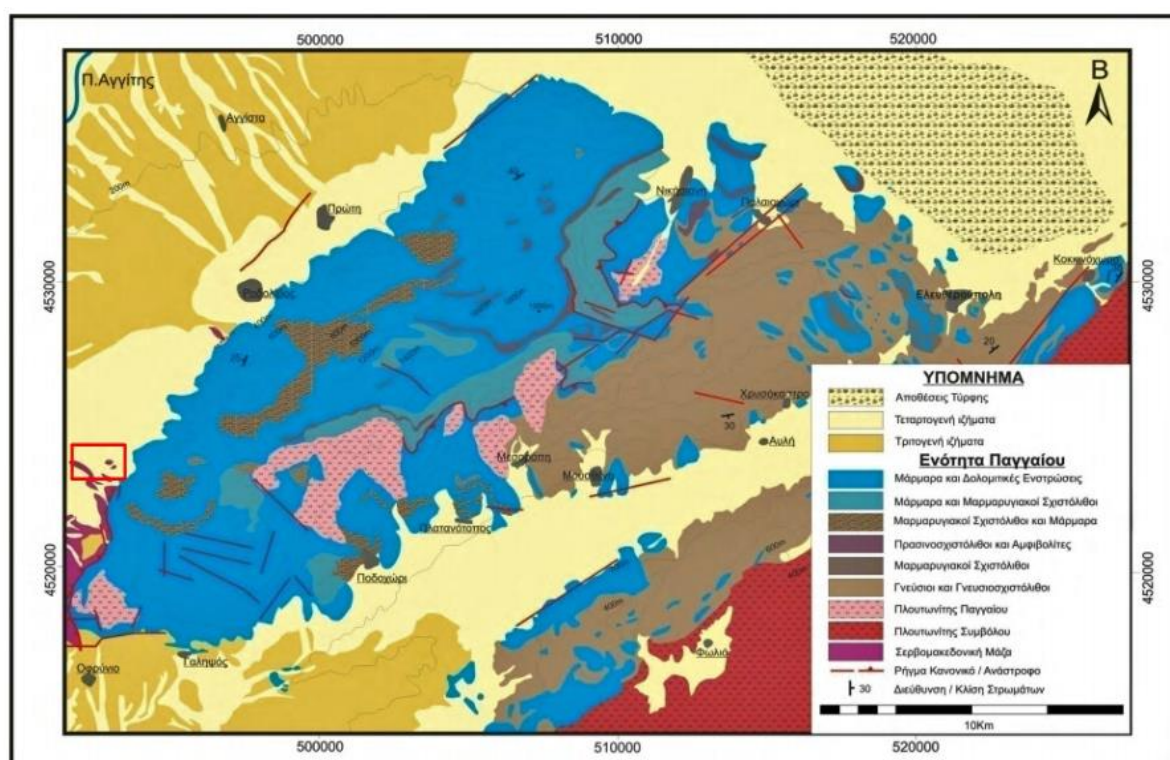


Εικόνα 3.1.1 Δορυφορική εικόνα της δημοτικής ενότητας Παλαιοκώμης και απεικόνιση της περιοχής μελέτης βόρεια του χωριού

3.1.1 Στοιχεία για την Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης ανήκει γεωλογικά στην μάζα της Ροδόπης, σαν γεωτεκτονική ζώνη, η οποία έχει κάποια συγκεκριμένα τεκτονικά χαρακτηριστικά και πετρώματα. Αρχικά, η ευρύτερη περιοχή της Παλαιοκόμης ανήκει στην ενότητα του Παγγαίου (σύμφωνα με τον Μουντράκη, 1983) και αποτελείται σε γενικές γραμμές, σύμφωνα με μελέτες, από ένα κατώτερο ορίζοντα με ορθογνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες, έναν μεσαίο ορίζοντα μαρμάρων σχετικά μεγάλου πάχους και έναν ανώτερο ορίζοντα με εναλλαγές σχιστολίθων και μαρμάρων, η οποία θεωρείται και η νεότερη ενότητα πετρωμάτων στην παρούσα γεωτεκτονική ζώνη (Papanikolaou & Panagopoulos, 1981).

Παρακάτω, παρατίθεται ένας συνοπτικός γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του νομού Καβάλας και του Όρους Παγγαίου.



Εικόνα 7.1.1 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του όρους Παγγαίου. (από Kronberg, 1972; Kronberg and Schenck, 1974; Ξυδά, 1978 και παρατηρήσεις κατά το παρόν πόνημα).

Εικόνα 3.1.1.1 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του όρους Παγγαίου (Kronberg 1972, Kronberg and Schenck 1974, Ξυδά 1978).

Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.1.1, η περιοχή μελέτης ανήκει στην ενότητα του Παγγαίου και γενικότερα στην μάζα της Ροδόπης. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί που παρατηρούνται είναι Τριτογενή και Τεταρτογενή ιζήματα, όπως ιλύς, άργιλος και πιο χονδρόκοκκα υλικά, όπως άμμος και χαλίγια, κάποιες εμφανίσεις της Σερβομακεδονικής μάζας και πιο ανατολικά από την περιοχή ενδιαφέροντος υπάρχουν μάρμαρα και δολομιτικές ενστρώσεις.

Για την περιοχή της Παλαιοκόμης υπάρχουν πολλά στοιχεία και έχουν γίνει διάφορες αρχαιολογικές έρευνες. Οι πληροφορίες που υπάρχουν για την περιοχή είναι έμμεσες και προέρχονται από ανασκαφές που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάστημα δεκαετιών.

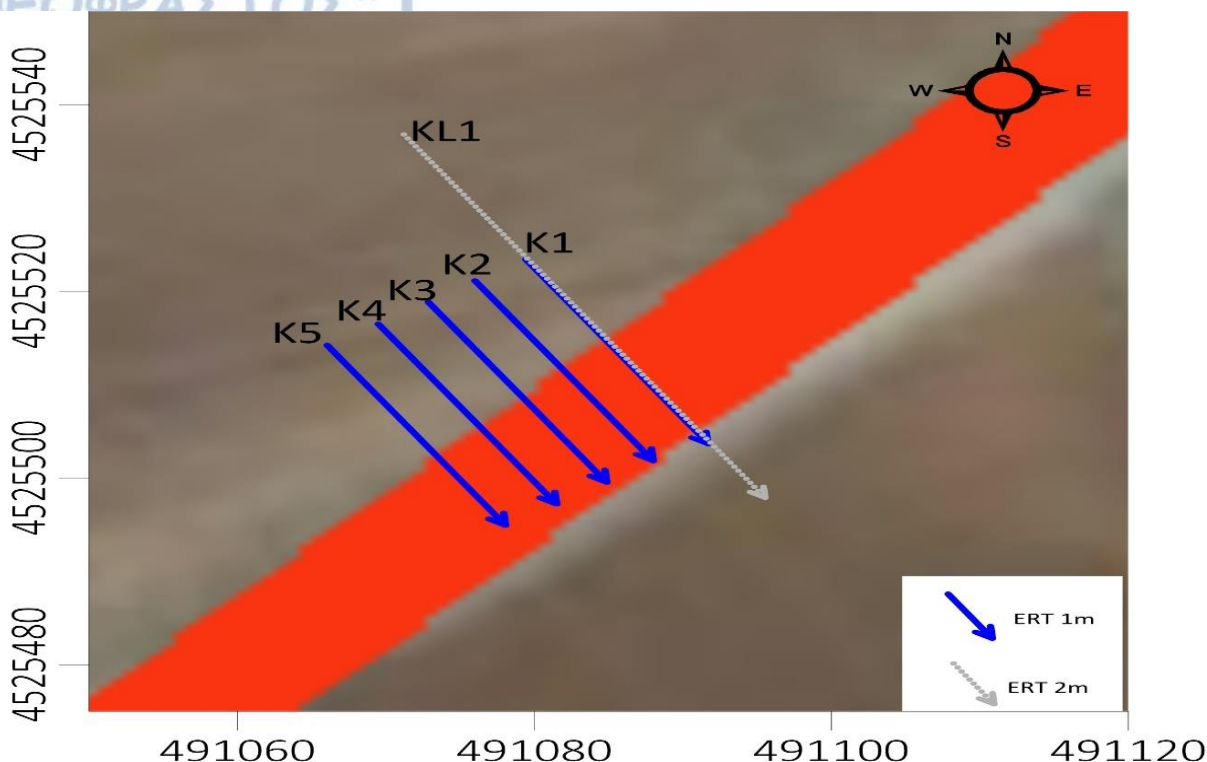
Επιπροσθέτως, έχει εντοπιστεί το αρχαίο νεκροταφείο της ρωμαϊκής εποχής και έχει δώσει αρκετές ελληνικές επιγραφές. Κατά την ρωμαϊκή εποχή, δημιουργήθηκε ένας από τους δυο σημαντικότερους δρόμους που κατέληγαν στην πρωτεύουσα Ρώμη και ήταν η via Εγνατία. Ο δρόμος αυτός διέσχισε όλη την Βόρεια Ελλάδα και κατέληγε στον ποταμό Έβρο. Επίσης, περνούσε από πολλές περιοχές, όπως η Πέλλα, η Θεσσαλονίκη, η Αμφίπολη, αλλά και από τους Φιλίππους.

3.2 Συλλογή δεδομένων και μετρήσεις

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, απώτερος στόχος της γεωφυσικής έρευνας ήταν ο καθορισμός της υπεδάφιας γεωλογικής δομής της περιοχής μελέτης και πιο συγκεκριμένα ο εντοπισμός θαμμένων λειψάνων δρόμου. Με βάση τον σκοπό της παρούσας μελέτης κρίθηκε καλύτερα αξιοποιήσιμη η χρήση της ηλεκτρικής τομογραφίας, ειδικότερα η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, επιλέγοντας την διπόλου – διπόλου και την multiple gradient (Βαφείδης και Κρητικάκης, 2015) ως κύριες διατάξεις για τους λόγους που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2.3. Οι μετρήσεις έγιναν σε μικρά βάθη με υψηλή ανάλυση και ήταν αρκετές για να καλυφθεί όλη η περιοχή και τα αποτελέσματα να είναι πιο αξιόπιστα. Για τον σκοπό της συγκεκριμένης έρευνας επιλέχθηκε ένα βάθος 5 μέτρων, το οποίο για τον εντοπισμό θαμμένων λειψάνων είναι αρκετά ικανοποιητικό.

Στη συνέχεια, δεδομένης της περιοχής ενδιαφέροντος, επιλέγονται οι θέσεις των γραμμών μελέτης, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και η αντίστοιχη τοποθέτησή τους, καθώς και ο αριθμός των μετρήσεων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μετρήθηκαν 5 ηλεκτρικές τομογραφίες και έγινε μια ακόμη στην αρχή με μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων για τον εντοπισμό των στόχων μεγαλύτερης αντίστασης και την μετέπειτα μείωση της απόστασης με σκοπό την καλύτερη ανάλυση του επιφανειακού στρώματος.

Στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 3.2.1) απεικονίζονται οι γραμμές που μετρήθηκαν και έχουν διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Με το λευκό χρώμα απεικονίζεται η αρχική πρώτη τομή που έγινε με αποστάσεις ηλεκτροδίων 2 μέτρα. Με το μπλε χρώμα είναι οι μετρήσεις με απόσταση ηλεκτροδίων του ενός μέτρου. Τέλος, με την κόκκινη γραμμή διακρίνεται η πιθανή θέση του εν δυνάμει δρόμου σύμφωνα με τις δορυφορικές εικόνες και τη βιβλιογραφία.



Εικόνα 3.2.1 Μετρήσεις στην περιοχή μελέτης, ERT 1m: απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στο 1 μέτρο, ERT 2m: απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στα 2 μέτρα και με το κόκκινο χρώμα το εκτιμώμενο ίχνος του θαμμένου δρόμου.

Χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια, τα οποία είχαν απόσταση μεταξύ τους για τις τομές K1-5 1 μέτρο και για την τομή KL1 2 μέτρα. Οι τομές K1-5 είναι παράλληλες και τοποθετήθηκαν ανά 4 μέτρα μεταξύ τους ώστε να καλυφθεί μεν η περιοχή αλλά και να είναι δυνατή η συγκριτική ερμηνεία τους.

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε τόσο με την χρήση της διάταξης διπόλου – διπόλου όσο και της multiple gradient (πολλαπλής βαθμίδας), όσο και τον συνδυασμό των δυο. Για να επιτευχθεί η λήψη των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας χρησιμοποιήθηκε το γεωφυσικό όργανο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης SYSCAL PRO της IRIS INSTRUMENTS. Το κύριο πλεονέκτημα του οργάνου αυτού είναι η μεγάλη ταχύτητα συλλογής δεδομένων, αφού έχει την δυνατότητα, δίνοντας ρεύμα σε ένα δίπολο να μετράει την διαφορά δυναμικού σε 10 δίπολα ταυτόχρονα.

Σε γενικές γραμμές, η διάταξη μέτρησης που υλοποιήθηκε έχει σχετικά μικρό βάθος διασκόπησης και αυτό έγινε στοχευμένα ώστε να εστιάσουμε στα επιφανειακά στρώματα στα οποία αναμένεται να εντοπιστούν οι δομές που μας ενδιαφέρουν. Πρώτα έγινε η δοκιμαστική μέτρηση με το άνοιγμα των 2 μέτρων για να επιτύχουμε το μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης και τον εντοπισμό των δομών με μικρότερη ανάλυση, έτσι ώστε να συνεχίσουμε με το άνοιγμα του ενός μέτρου σε μια πιο στοχευμένη περιοχή. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων είναι πολύ μικρές, οπότε υπάρχει σχετικά καλή ανάλυση. Επίσης, το πρωτόκολλο της διάταξης έχει 422 μετρήσεις για το ανάπτυγμα των 24 ηλεκτροδίων και τα ηλεκτρόδια απέχουν μεταξύ τους 1 μέτρο, δηλαδή μήκος αναπτύγματος 23 μέτρα, με το επιθυμητό βάθος διασκόπησης να υπολογίζεται στα 5 περίπου μέτρα.

Εκτός από το όργανο μέτρησης, για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου χρειάζεται και μια μπαταρία 12V, πολύκλινα καλώδια, μεταλλικά ηλεκτρόδια και μετροταινία με ξύλινους πασσάλους στήριξης για την υλοποίηση της γραμμής (ακριβής θέση των ηλεκτροδίων). Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή δεδομένων στο ύπαιθρο.



Εικόνα 3.2.2 Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη μετρήσεων

Για την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων στη γραμμή μέτρησης (εικόνα 3.2.3) χρησιμοποιήθηκαν σφυριά ενώ η σύνδεσή τους με το καλώδιο έγινε με μονωτική ταινία. Επίσης διακρίνονται τα πολύκλινα καλώδια, καθώς και τα μεταλλικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των δεδομένων.



Εικόνα 3.2.3 Τοποθέτηση ηλεκτροδίων και πολυκάναλων καλωδίων

Η συλλογή των δεδομένων από την εφαρμογή της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε σε αρκετά στάδια, τα οποία αναλύονται στην παρακάτω παράγραφο. Αρχικά, επιλέχθηκαν οι θέσεις των γραμμών μελέτης, σύμφωνα και με τις δορυφορικές εικόνες, στις οποίες θα τοποθετούνταν τα ηλεκτρόδια, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2.1. Η κάθε γραμμή αποτυπώθηκε και με τη συμβολή συσκευής GPS με σκοπό να δημιουργηθεί μια πιο αναλυτική εικόνα για την παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Στην εικόνα 3.2.4 παρατηρείται το όργανο της τοπογραφικής αποτύπωσης που χρησιμοποιήθηκε. Έπειτα, τοποθετήθηκαν τα 24 ηλεκτρόδια για την πρώτη μέτρηση (ERT 2m) με απόσταση μεταξύ τους δυο μέτρα, οπότε συνολικό μήκος 46 m, για να πετύχουμε μεγαλύτερο βάθος διασκόπησης και να εντοπιστεί η περιοχή των μεγαλύτερων αντιστάσεων. Αφού, έγινε η μέτρηση με την μεγαλύτερη απόσταση και εντοπίστηκαν μεγαλύτερες αντιστάσεις από το περιβάλλον, εφαρμόστηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας για την απόσταση του ενός μέτρου (ERT 1m) σε 5 γραμμές μελέτης με συνολικό μήκος, τα 23m.

Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόστηκαν ήταν η διπόλου – διπόλου, η multiple gradient και ο συνδυασμός και των δυο γεωμετρικών διατάξεων. Η τοποθέτηση των ηλεκτροδίων έγινε με την βοήθεια μια μετροταινίας για να προσδιοριστεί η διεύθυνση και ελέγχονται οι θέσεις τους και με την βοήθεια της συσκευής GPS. Η εγκατάσταση των ηλεκτροδίων έγινε με μεγάλη ακρίβεια, καθώς η λάθος θέση επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα των δεδομένων που θα συλλεχθούν. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόδια συνδέθηκαν με τα πολυκάναλα καλώδια και αυτά με το γεωφυσικό όργανο μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης Syscal Pro. Πριν γίνει εφαρμογή της μεθόδου, έγινε μια δοκιμή επικοινωνίας για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα ότι όλα τα ηλεκτρόδια έχουν συνδεθεί σωστά και η αντίσταση επαφής παρουσιάζει μια λογική τιμή (τυπικά $<0.5 \text{ KOhm}$). Το μέγιστο βάθος διασκόπησης με βάση το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων εκτιμάται σε 5 μέτρα.

Οι μετρήσεις κάθε φορά διεξάγονται αυτόματα βάσει της διάταξης που θα επιλεγεί από το χρήστη και ελέγχονται από τον υπολογιστή του οργάνου. Στο τέλος της μέτρησης τα δεδομένα μέσω καλωδίου και ειδικού λογισμικού μεταφοράς μεταφέρονται σε φορητό υπολογιστή και αποθηκεύονται σε ειδικού τύπου αρχεία (*.bin).



Εικόνα 3.2.4 Τοπογραφική αποτύπωση κάθε γραμμής μελέτης

4. Επεξεργασία δεδομένων και αποτελέσματα

Σε γενικές γραμμές, απώτερος στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο προσδιορισμός της στρωματογραφίας της περιοχής με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια για τον εντοπισμό των θαμμένων λειψάνων. Μετά την συλλογή των δεδομένων με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθεί η επεξεργασία τους και η αντιστροφή τους για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της πραγματικής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ρ του υπεδάφους. Τα προγράμματα- λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν αναλύονται εκτενέστερα στην συνέχεια και πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία των μετρήσεων για τις έξι γραμμές μελέτης, δηλαδή τις 5 γραμμές με απόσταση ηλεκτροδίων ενός μέτρου και την γραμμή μελέτης με απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στα δυο μέτρα, για τις δυο διατάξεις ηλεκτροδίων που επιλέχθηκαν: Multiple gradient(πολλαπλής βαθμίδας) και διπόλου- διπόλου.

4.1 Επεξεργασία δεδομένων- 2D-Αντιστροφή

4.1.1 Επεξεργασία δεδομένων

Αρχικά, το κύριο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων ξεκινά με την αυτόματη αποθήκευση τους στην κάρτα μνήμης του οργάνου και αμέσως μετά με την φόρτωση τους από το όργανο σε ένα ειδικό αρχείο («.bin»). Έτσι, τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω του προγράμματος Prosys II σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπου και θα γίνει η επεξεργασία τους. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι ένα λογισμικό πακέτο που προσφέρεται από την IRIS Instruments και χρησιμοποιείται για την μεταφορά, την επεξεργασία και την εξαγωγή δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης που ελήφθησαν με το Syscal Pro.

Το πρώτο κομμάτι της επεξεργασίας μέσω του λογισμικού αυτού είναι το φιλτράρισμα των μετρήσεων, δηλαδή αφαιρούνται οι αρνητικές μετρήσεις, καθώς και αυτές που έχουν εξαιρετικά ακραίες τιμές αντίστασης (ιδιαίτερα μικρές ή μεγάλες) σε σχέση με τον μέσο όρο. Η διαδικασία ξεκινάει με την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα σε μορφή αρχείων «.bin». Έπειτα, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1.1.2 γίνεται εξαγωγή (export) του αρχείου σε ενδιάμεση μορφή αρχείου τύπου κειμένου (ASCII) με το ίδιο όνομα και με κατάληξη αρχείου «.dat». Επομένως, αποθηκεύεται τελικά σαν ένα αρχείο, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την αντιστροφή και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων- τελικών μετρήσεων. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία μέσω εικόνων από το πρόγραμμα και το περιβάλλον του λογισμικού Prosys II.

#	El array	Spa 1	Spa 2	Spa 3	Spa 4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In
1	Mixed / non converto...	0.00	3.00	1.00	2.00	16.17	0.61	0.00	8.07	20.948	8.138
2	Mixed / non converto...	0.00	5.00	1.00	2.00	19.18	0.25	0.00	4.34	20.424	11.472
3	Mixed / non converto...	0.00	5.00	2.00	3.00	25.05	0.11	0.00	11.35	15.245	11.472
4	Mixed / non converto...	0.00	5.00	3.00	4.00	18.52	1.10	0.00	-7.73	19.728	11.472
5	Mixed / non converto...	0.00	7.00	1.00	2.00	18.72	0.15	0.00	4.79	29.905	18.818
6	Mixed / non converto...	0.00	7.00	2.00	3.00	28.24	0.19	0.00	6.51	18.327	18.818
7	Mixed / non converto...	0.00	7.00	3.00	4.00	31.56	0.05	0.00	-5.21	15.753	18.818
8	Mixed / non converto...	0.00	7.00	4.00	5.00	26.71	0.57	0.00	101.07	17.335	18.818
9	Mixed / non converto...	0.00	7.00	5.00	6.00	19.14	0.64	0.00	-69.15	30.573	18.818
10	Mixed / non converto...	0.00	9.00	1.00	2.00	18.27	0.16	0.00	3.86	38.480	25.548
11	Mixed / non converto...	0.00	9.00	2.00	3.00	28.14	0.11	0.00	5.25	21.796	25.548
12	Mixed / non converto...	0.00	9.00	3.00	4.00	35.49	0.06	0.00	-5.92	16.635	25.548
13	Mixed / non converto...	0.00	9.00	4.00	5.00	38.50	0.05	0.00	82.56	15.653	25.548
14	Mixed / non converto...	0.00	9.00	5.00	6.00	39.65	0.15	0.00	54.39	18.807	25.548
15	Mixed / non converto...	0.00	9.00	6.00	7.00	28.26	0.04	0.00	51.18	21.894	25.548
16	Mixed / non converto...	0.00	9.00	7.00	8.00	21.41	0.06	0.00	-62.61	45.078	25.548
17	Mixed / non converto...	0.00	11.00	1.00	2.00	17.74	0.07	0.00	2.90	49.172	34.074
18	Mixed / non converto...	0.00	11.00	2.00	3.00	26.83	0.11	0.00	4.67	26.274	34.074
19	Mixed / non converto...	0.00	11.00	3.00	4.00	34.34	0.14	0.00	-6.87	18.843	34.074
20	Mixed / non converto...	0.00	11.00	4.00	5.00	39.70	0.05	0.00	73.78	15.891	34.074
21	Mixed / non converto...	0.00	11.00	5.00	6.00	45.95	0.11	0.00	-46.94	16.468	34.074
22	Mixed / non converto...	0.00	11.00	6.00	7.00	38.42	0.12	0.00	43.77	15.377	34.074
23	Mixed / non converto...	0.00	11.00	7.00	8.00	33.39	0.03	0.00	-59.07	18.326	34.074
24	Mixed / non converto...	0.00	11.00	8.00	9.00	40.31	0.09	0.00	102.57	39.467	34.074
25	Mixed / non converto...	0.00	11.00	9.00	10.00	39.46	0.07	0.00	-66.44	109.385	34.074
26	Mixed / non converto...	0.00	13.00	1.00	2.00	17.44	0.07	0.00	2.97	66.821	47.443
27	Mixed / non converto...	0.00	13.00	2.00	3.00	26.01	0.03	0.00	4.84	34.513	47.443
28	Mixed / non converto...	0.00	13.00	3.00	4.00	33.18	0.05	0.00	-7.42	23.664	47.443
29	Mixed / non converto...	0.00	13.00	4.00	5.00	39.07	0.00	0.00	68.46	18.848	47.443
30	Mixed / non converto...	0.00	13.00	5.00	6.00	46.25	0.03	0.00	41.71	17.881	47.443
31	Mixed / non converto...	0.00	13.00	6.00	7.00	41.47	0.05	0.00	-39.27	14.910	47.443
32	Mixed / non converto...	0.00	13.00	7.00	8.00	39.13	0.04	0.00	-55.03	15.126	47.443
33	Mixed / non converto...	0.00	13.00	8.00	9.00	47.39	0.06	0.00	98.88	22.862	47.443
34	Mixed / non converto...	0.00	13.00	9.00	10.00	48.40	0.03	0.00	-66.89	34.513	47.443
35	Mixed / non converto...	0.00	13.00	10.00	11.00	47.87	0.00	0.00	91.32	63.534	47.443
36	Mixed / non converto...	0.00	13.00	11.00	12.00	35.88	0.33	0.00	-61.59	22.111	7.628
37	Mixed / non converto...	0.00	15.00	1.00	2.00	17.24	0.06	0.00	2.00	86.803	62.586
38	Mixed / non converto...	0.00	15.00	2.00	3.00	25.49	0.05	0.00	4.70	43.951	62.586
39	Mixed / non converto...	0.00	15.00	3.00	4.00	32.44	0.04	0.00	-8.70	29.373	62.586
40	Mixed / non converto...	0.00	15.00	4.00	5.00	38.41	0.05	0.00	61.89	22.607	62.586
41	Mixed / non converto...	0.00	15.00	5.00	6.00	46.04	0.05	0.00	-35.62	20.382	62.586

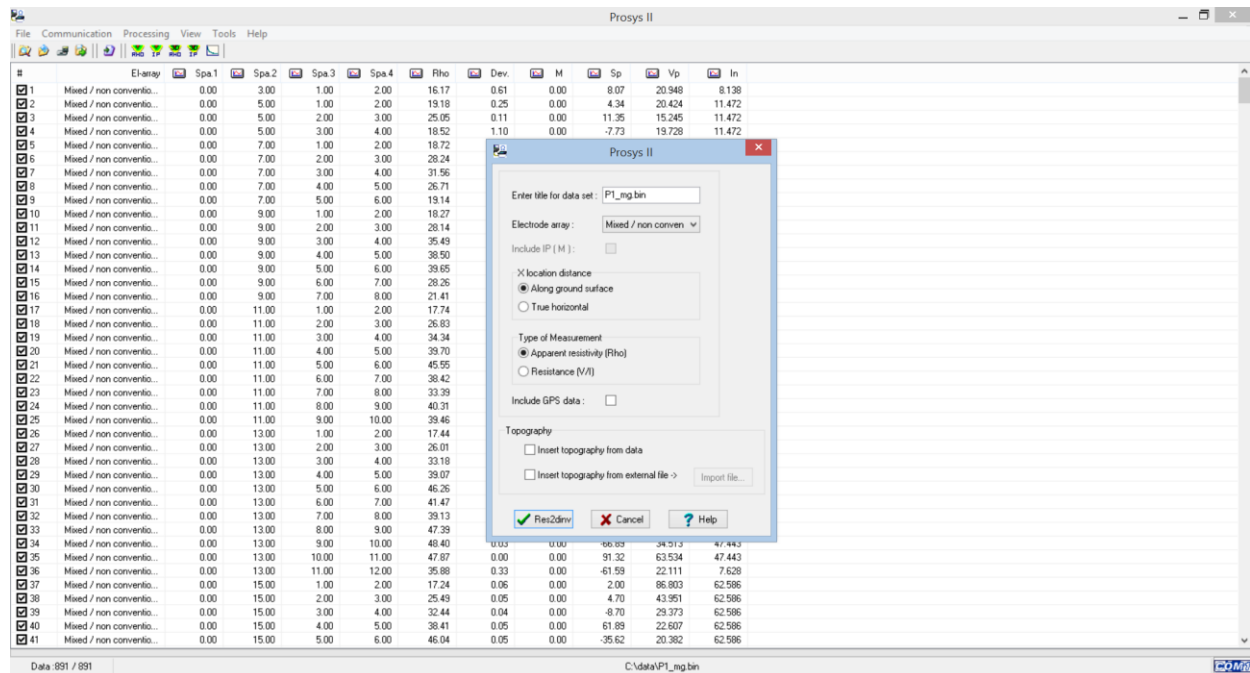
Εικόνα 4.1.1.1 Γραφικό περιβάλλον του Prosys II

Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα(Εικόνα 4.1.1.1) υπάρχουν διάφορα κελιά και γραμμές. Οι γραμμές απεικονίζουν τις μετρήσεις, κάθε μια γραμμή είναι και μια διαφορετική μέτρηση. Το πρώτο κελί δείχνει το τύπο της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η Multiple Gradient. Στα κελιά που αναφέρονται ως Spa 1, Spa 2, Spa 3, Spa 4 ορίζονται οι σχετικές αποστάσεις (spacings) των ηλεκτροδίων, Rho είναι οι τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης, Sp οι τιμές του φυσικού δυναμικού και Vp, In το δυναμικό (mV) και το ρεύμα (mA) της μέτρησης αντίστοιχα.

#	El array	Spa 1	Spa 2	Spa 3	Spa 4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In
1	Mixed / non converto...	0.00	3.00	1.00	2.00	16.17	0.61	0.00	8.07	20.948	8.138
2	Mixed / non converto...	0.00	5.00	1.00	2.00	19.18	0.25	0.00	4.34	20.424	11.472
3	Mixed / non converto...	0.00	5.00	2.00	3.00	25.05	0.11	0.00	11.35	15.245	11.472
4	Mixed / non converto...	0.00	5.00	3.00	4.00	18.52	1.10	0.00	-7.73	19.728	11.472
5	Mixed / non converto...	0.00	7.00	1.00	2.00	18.72	0.15	0.00	4.79	29.905	18.818
6	Mixed / non converto...	0.00	7.00	2.00	3.00	28.24	0.19	0.00	6.51	18.327	18.818
7	Mixed / non converto...	0.00	7.00	3.00	4.00	31.56	0.05	0.00	-5.21	15.753	18.818
8	Mixed / non converto...	0.00	7.00	4.00	5.00	26.71	0.57	0.00	101.07	17.335	18.818
9	Mixed / non converto...	0.00	7.00	5.00	6.00	19.14	0.64	0.00	-69.15	30.573	18.818
10	Mixed / non converto...	0.00	9.00	1.00	2.00	18.27	0.16	0.00	3.86	38.480	25.548
11	Mixed / non converto...	0.00	9.00	2.00	3.00	28.14	0.11	0.00	5.25	21.796	25.548
12	Mixed / non converto...	0.00	9.00	3.00	4.00	35.49	0.06	0.00	-5.92	16.635	25.548
13	Mixed / non converto...	0.00	9.00	4.00	5.00	38.50	0.05	0.00	82.56	15.653	25.548
14	Mixed / non converto...	0.00	9.00	5.00	6.00	39.65	0.15	0.00	54.39	18.807	25.548
15	Mixed / non converto...	0.00	9.00	6.00	7.00	28.26	0.04	0.00	51.18	21.894	25.548
16	Mixed / non converto...	0.00	9.00	7.00	8.00	21.41	0.06	0.00	-62.61	45.078	25.548
17	Mixed / non converto...	0.00	11.00	1.00	2.00	17.74	0.07	0.00	2.90	49.172	34.074
18	Mixed / non converto...	0.00	11.00	2.00	3.00	26.83	0.11	0.00	4.67	26.274	34.074
19	Mixed / non converto...	0.00	11.00	3.00	4.00	34.34	0.14	0.00	-6.87	18.843	34.074
20	Mixed / non converto...	0.00	11.00	4.00	5.00	39.70	0.05	0.00	73.78	15.891	34.074
21	Mixed / non converto...	0.00	11.00	5.00	6.00	45.95	0.11	0.00	-46.94	16.468	34.074
22	Mixed / non converto...	0.00	11.00	6.00	7.00	38.42	0.12	0.00	43.77	15.377	34.074
23	Mixed / non converto...	0.00	11.00	7.00	8.00	33.39	0.03	0.00	-59.07	18.326	34.074
24	Mixed / non converto...	0.00	11.00	8.00	9.00	40.31	0.09	0.00	102.57	39.467	34.074
25	Mixed / non converto...	0.00	11.00	9.00	10.00	39.46	0.07	0.00	-66.44	109.385	34.074
26	Mixed / non converto...	0.00	13.00	1.00	2.00	17.44	0.07	0.00	2.97	66.821	47.443
27	Mixed / non converto...	0.00	13.00	2.00	3.00	26.01	0.03	0.00	4.84	34.513	47.443
28	Mixed / non converto...	0.00	13.00	3.00	4.00	33.18	0.05	0.00	-7.42	23.664	47.443
29	Mixed / non converto...	0.00	13.00	4.00	5.00	39.07	0.00	0.00	68.46	18.848	47.443
30	Mixed / non converto...	0.00	13.00	5.00	6.00	46.25	0.03	0.00	41.71	17.881	47.443
31	Mixed / non converto...	0.00	13.00	6.00	7.00	41.47	0.05	0.00	-39.27	14.910	47.443
32	Mixed / non converto...	0.00	13.00	7.00	8.00	39.13	0.04	0.00	-55.03	15.126	47.443
33	Mixed / non converto...	0.00	13.00	8.00	9.00	47.39	0.06	0.00	98.88	22.862	47.443
34	Mixed / non converto...	0.00	13.00	9.00	10.00	48.40	0.03	0.00	-66.89	34.513	47.443
35	Mixed / non converto...	0.00	13.00	10.00	11.00	47.87	0.00	0.00	91.32	63.534	47.443
36	Mixed / non converto...	0.00	13.00	11.00	12.00	35.88	0.33	0.00	-61.59	22.111	7.628
37	Mixed / non converto...	0.00	15.00	1.00	2.00	17.24	0.06	0.00	2.00	86.803	62.586
38	Mixed / non converto...	0.00	15.00	2.00	3.00	25.49	0.05	0.00	4.70	43.951	62.586
39	Mixed / non converto...	0.00	15.00	3.00	4.00	32.44	0.04	0.00	-8.70	29.373	62.586
40	Mixed / non converto...	0.00	15.00	4.00	5.00	38.41	0.05	0.00	61.89	22.607	62.586
41	Mixed / non converto...	0.00	15.00	5.00	6.00	46.04	0.05	0.00	-35.62	20.382	62.586

4.1.1.2 Export και αποθήκευση του αρχείου σε .dat

Επιπροσθέτως, μετά την εισαγωγή των δεδομένων στο αρχείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.1.2 σώζεται το αρχείο με την μορφή κειμένου σε κατάληξη «.dat». Κάνουμε κλικ στο κουτάκι με το apparent resistivity (ρ_a), για να επιλέξουμε τον τύπο της μέτρησης, καθώς είναι η παράμετρος που μας ενδιαφέρει, σώζουμε το αρχείο με το ίδιο ακριβώς όνομα, όπως παρατηρούμε και στην εικόνα 4.1.1.3.



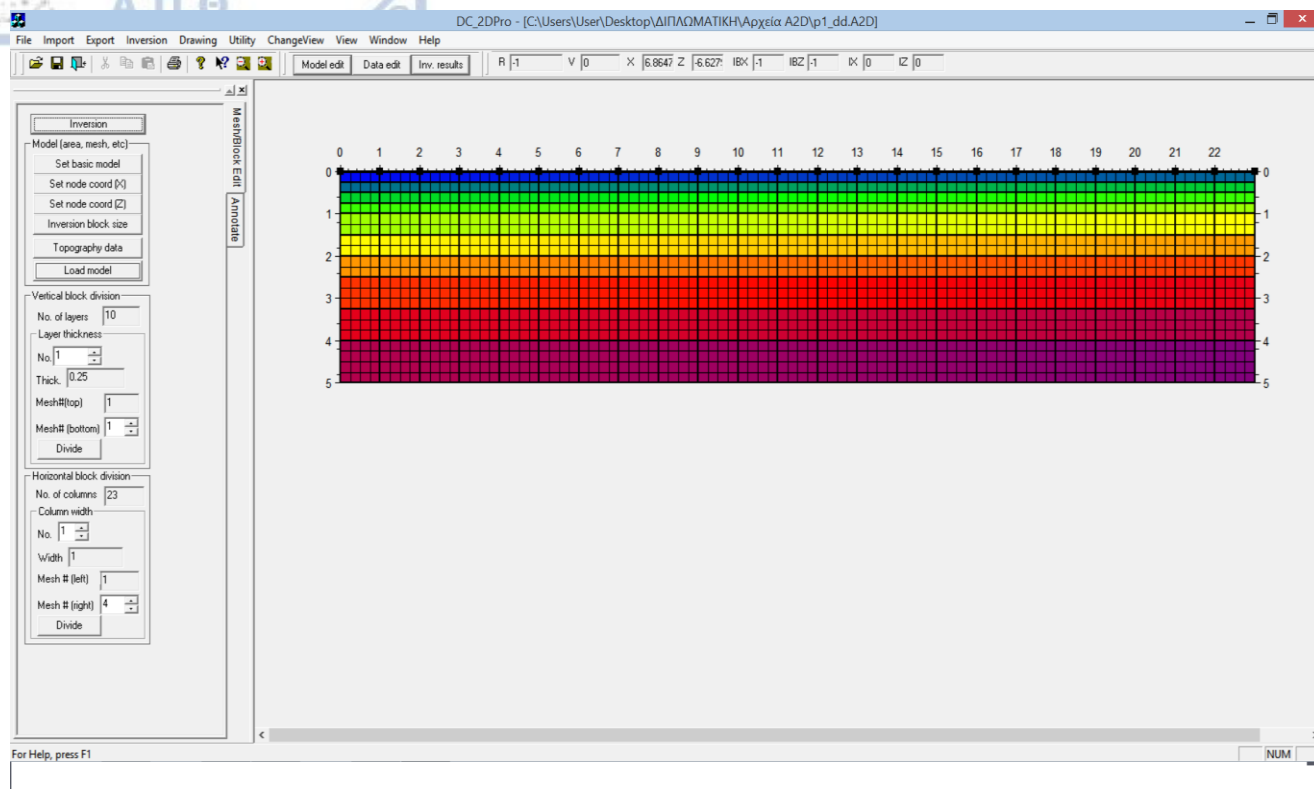
Εικόνα 4.1.1.3 Τελικό στάδιο επεξεργασίας του προγράμματος και αποθήκευση του αρχείου Rest2div

4.1.2 2D-Αντιστροφή

Αρχικά, πλέον μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέθοδο της αντιστροφής αφού τα αρχεία για τις διατάξεις που επιλέχθηκαν, δηλαδή την διπόλου- διπόλου, την multiple gradient και τον συνδυασμό τους, είναι σε μορφή «.dat» και έτοιμα για επεξεργασία. Για την αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων και της κάθε τομογραφίας ξεχωριστά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DC_2DPRO (Kim, 2011). Κύριος λόγος χρήσης της μεθόδου της αντιστροφής είναι ο προσδιορισμός της ηλεκτρικής δομής της περιοχής μελέτης. Το πρώτο στάδιο είναι η εισαγωγή των αρχείων «.dat» και εμφανίζεται το αρχικό μοντέλο παραμέτρων, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1.2.1.

Το μοντέλο των παραμέτρων εμφανίζεται σε μορφή πλέγματος κυψελίδων. Για να επιλέξω το επιθυμητό βάθος διασκόπησης επιλέγω το set basic model και καθορίζω το βάθος. Στην παρούσα μελέτη, σύμφωνα με τον εμπειρικό κανόνα που το βάθος διασκόπησης ορίζεται

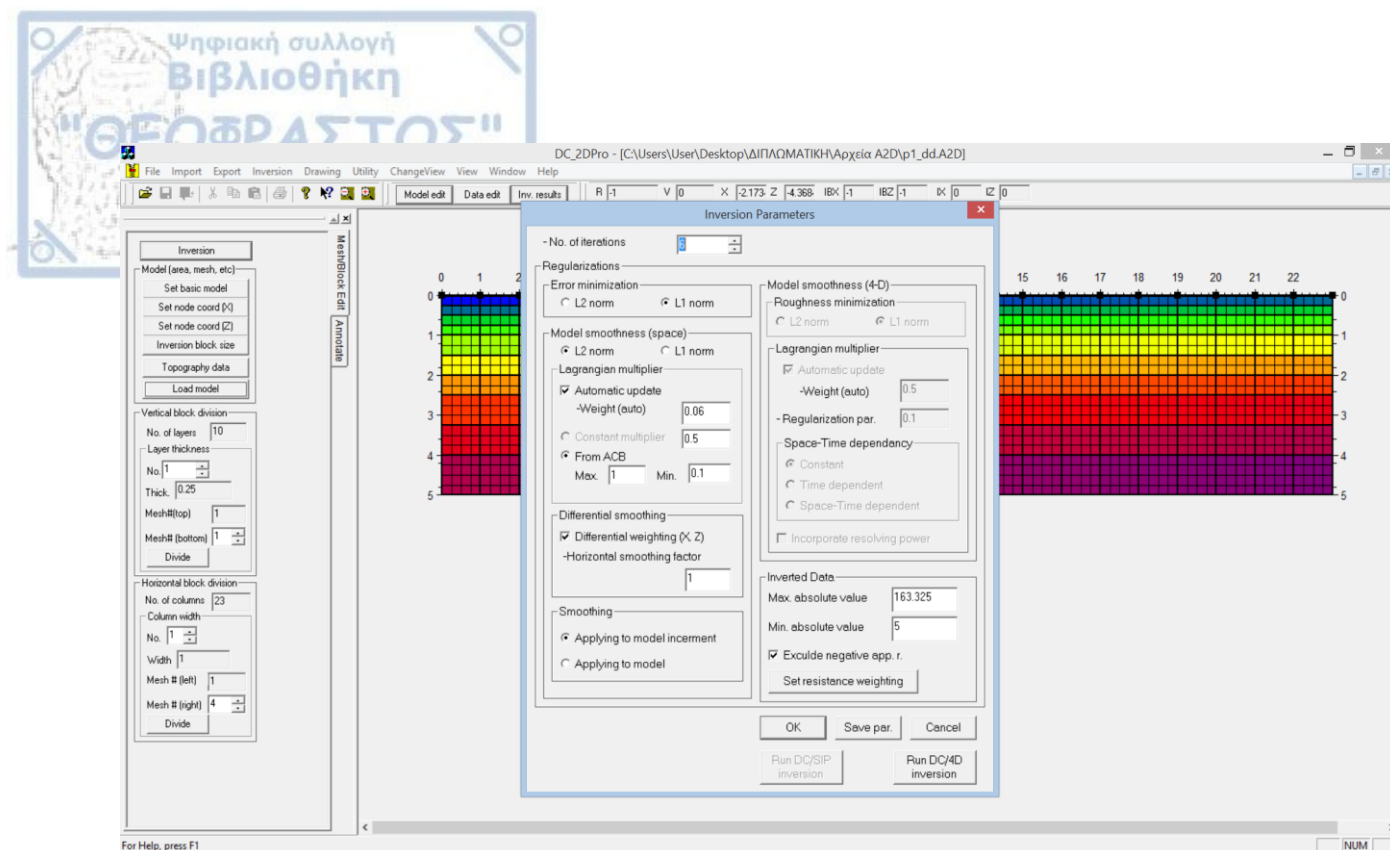
διαιρώντας το συνολικό ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων δια 4 ή 5, το εκτιμώμενο βάθος ορίστηκε στα 5m(συνολικό ανάπτυγμα 23 μέτρα).



Εικόνα 4.1.2.1 Το μοντέλο παραμέτρων σε μορφή πλέγματος κυψελίδων μετά τον καθορισμό βάθους

Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί την μέθοδο Gauss-Newton και εφαρμόζει αντιστροφή με καθορισμένο παράγοντα εξομάλυνσης, χρησιμοποιώντας είτε τον L1 ή L2 κανόνα αντιστροφής γραμμικών συστημάτων. Στην παρούσα εργασία για την καλύτερη και αναλυτικότερη απεικόνιση των δομών του υπεδάφους, αφού στόχος της μελέτης ήταν ο εντοπισμός θαμμένων λειψάνων δρόμου, καθώς και για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μετρήσεων επιλέχθηκε η L1-norm.

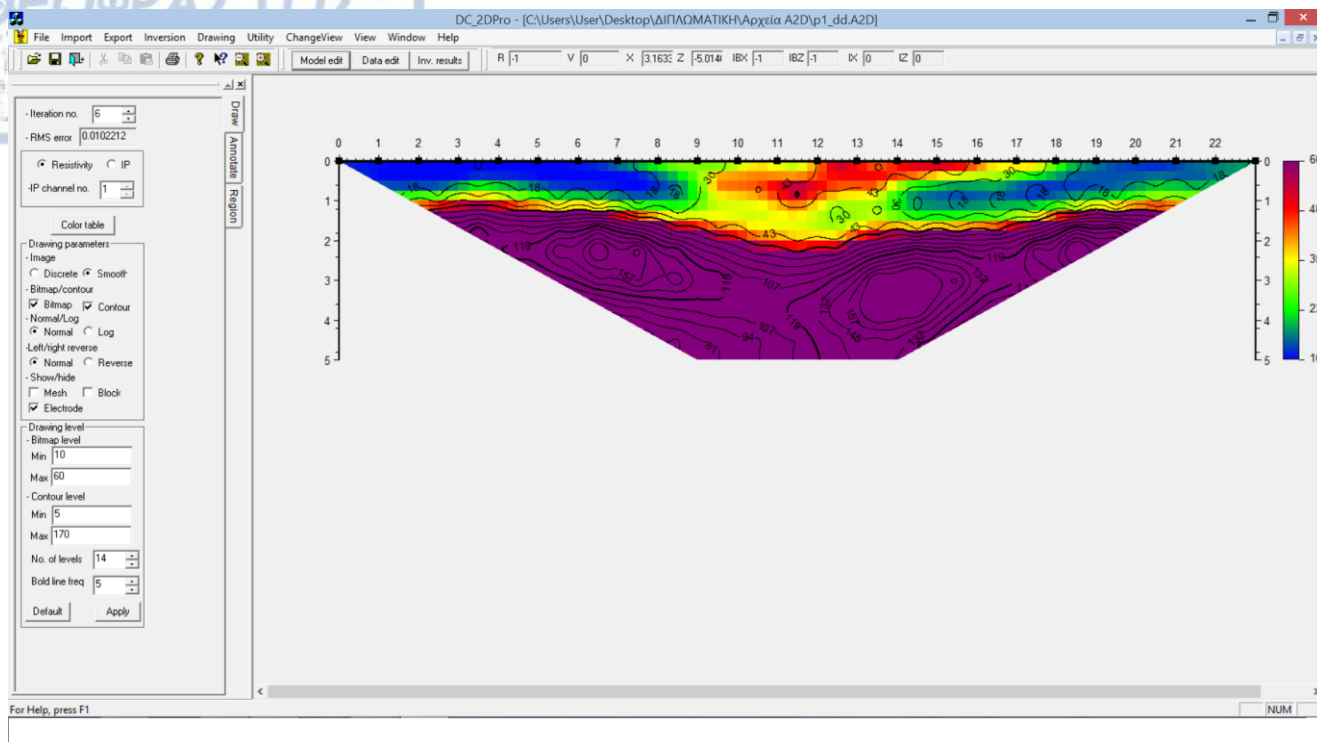
Το επόμενο βήμα επεξεργασίας μετά το μοντέλο παραμέτρων σε μορφή κυψελίδων είναι η επιλογή "Inversion", όπου εμφανίζεται το παρακάτω πλαίσιο. Έπειτα, επιλέγουμε στην ελαχιστοποίηση σφάλματος τον παράγοντα L1-norm.



Εικόνα 4.1.2.2 Παράθυρο επιλογών για την αντιστροφή δεδομένων

Γενικά, η μέθοδος της αντιστροφής πρακτικά επιλύει ένα ευθύ πρόβλημα και συγκρίνει τα συνθετικά δεδομένα που προέκυψαν με τα δεδομένα των μετρήσεων που έγιναν στο ύπαιθρο. Επομένως, υπολογίζει την διαφορά των δυο αυτών δεδομένων, δηλαδή $dy = (d_{\text{συνθετικά}} - d_{\text{πραγματικά}})$. Ο παράγοντας L1-norm υπολογίζει το άθροισμα των απόλυτων τιμών αυτής της διαφοράς, ενώ με τον L2-norm υπολογίζεται το τετράγωνο του αθροίσματος της προαναφερθείσας διαφοράς. Στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η L1-norm γιατί ο σκοπός της έρευνας ήταν ο εντοπισμός θαμμένων λειψάνων, οπότε χρειάστηκε η αναζήτηση στόχων μεγαλύτερης αντίστασης μέσα σε περιβάλλον μικρότερης αντίστασης. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα δομές, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλη αντίθεση στις τιμές των αντιστάσεών τους.

Η διαδικασία της αντιστροφής πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε μια τομογραφία και το αποτέλεσμα είναι μια αναλυτική εικόνα της δομής του υπεδάφους στις δυο διαστάσεις. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.1.2.3, οι εικόνες του υπεδάφους είναι τραπέζια, αφού το μέγιστο βάθος διασκόπησης, στην προκειμένη περίπτωση είναι 5m, το πετυχαίνουμε όταν αυξήσουμε το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων σε μεγαλύτερη απόσταση, δηλαδή στα δυο άκρα της τομογραφίας και η μέτρηση αντιπροσωπεύει την τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο κέντρο της διάταξης.



Εικόνα 4.1.2.3 Το τελικό μοντέλο μετά από την διαδικασία της αντιστροφής

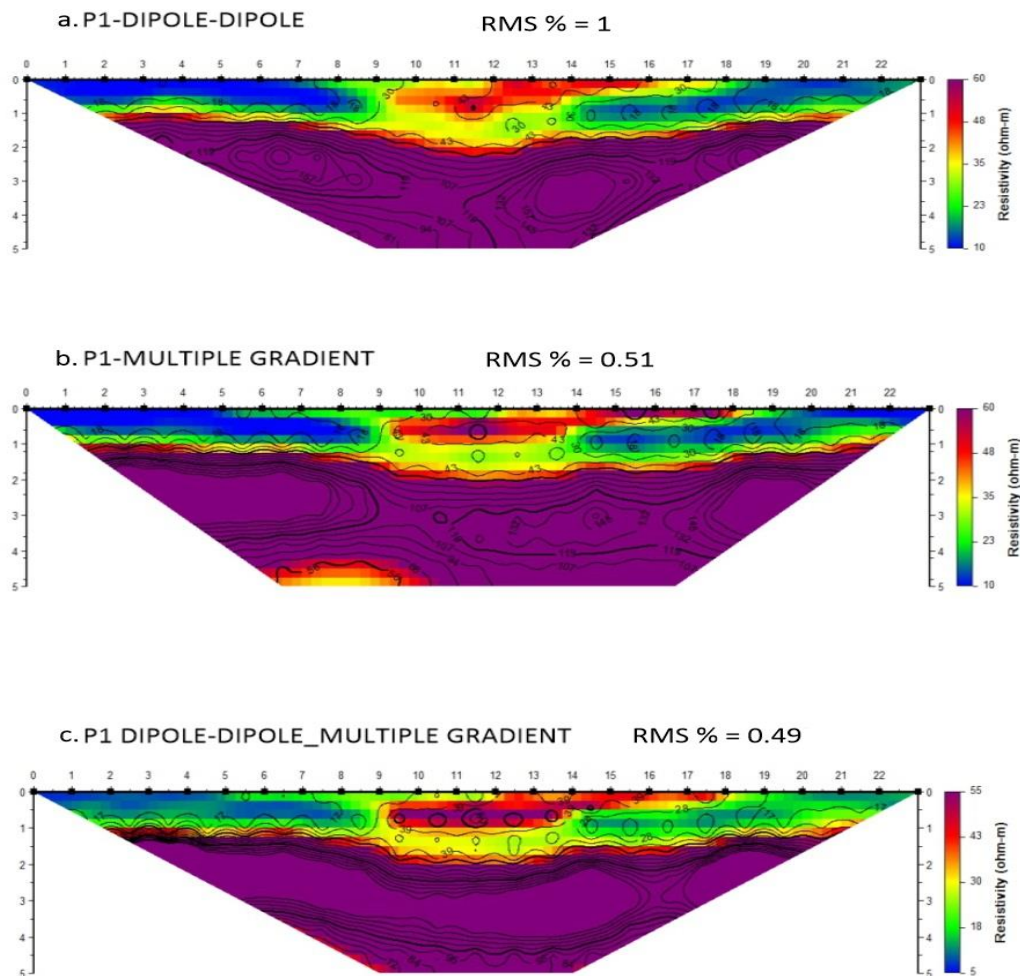
Στην εικόνα 4.1.2.3 παρατηρείται το αποτέλεσμα της διαδικασίας της αντιστροφής για την πρώτη τομογραφία μέσω της μεθόδου διπόλου- διπόλου. Το μήκος της τομής είναι 23m και το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι 5m. Το σχήμα είναι τραπέζιο και παρατηρούνται διάφορα χρώματα καθώς οι αντιστάσεις αποτυπώνονται σε κλίμακα «ουράνιου τόξου»: στο έντονο μωβ χρώμα αντιστοιχούν οι πολύ μεγάλες τιμές αντιστάσεων, ενώ με το γαλάζιο, πράσινο αποτυπώνονται οι πολύ μικρές τιμές. Για την καλύτερη σύγκριση όλων των τομογραφιών χρησιμοποιήθηκε η ίδια χρωματική κλίμακα με το ίδιο εύρος τιμών.

Επίσης, στο αριστερό μέρος του παραθύρου παρουσιάζονται οι διάφορες παράμετροι που μπορούν να αλλάξουν και είναι στην ευχέρεια του χρήστη για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, οι οποίες αφορούν κυρίως το σχεδιαστικό κομμάτι. Τέλος, υπολογίζεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως φαίνεται με την ονομασία 'RMS error' και αφορά την κατανομή της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των λογαρίθμων των υπολογιζόμενων και των παρατηρούμενων τιμών της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Όσο μικρότερο είναι το συγκεκριμένο σφάλμα τόσο μεγαλύτερη είναι η αξιοπιστία του αποτελέσματος της αντιστροφής.

Στην περιοχή μελέτης, όπως παρατηρείται και στην εικόνα 3.2.1, έγιναν 5 μετρήσεις με απόσταση ηλεκτροδίων στο 1m και μια πρώτη μέτρηση με απόσταση στα 2m για να εντοπιστεί με λιγότερη ανάλυση, αλλά σε μεγαλύτερο βάθος η περιοχή ενδιαφέροντος. Οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι διπόλου- διπόλου(dipole- dipole) και η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας(multiple gradient). Επίσης, το λογισμικό DC2DPRO μπορεί να παράξει ένα ακόμα μοντέλο που αποτελεί τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων των δυο διατάξεων, συμβολίζεται με «ddmg». Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά οι τρεις από τις πέντε τομές για όλες τις διατάξεις ηλεκτροδίων που εφαρμόστηκαν με σκοπό την επιλογή της πιο αναλυτικής

και αξιόπιστης διάταξης, της οποίας τα αποτελέσματα θα αναλυθούν και θα επεξεργαστούν για την συγκρότηση του τελικού χάρτη της περιοχής μελέτης με τον προσδιορισμό των θαμμένων λειψάνων δρόμου.

TOMH K1

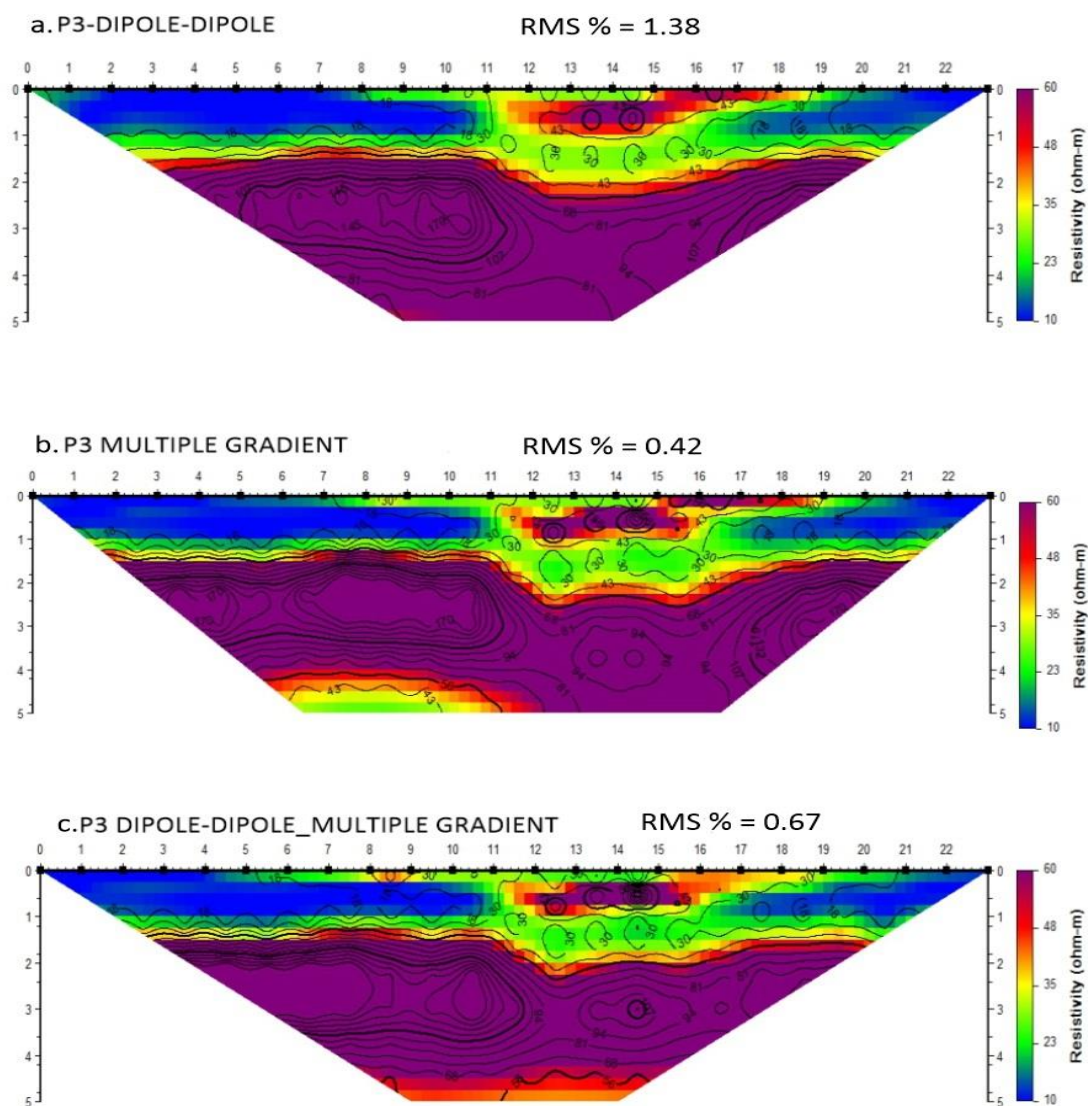


Εικόνα 4.1.2.4 Γεωηλεκτρική τομογραφία 1

Η παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4.1.2.4) αποτελεί τα αποτελέσματα των μετρήσεων για την τομή K1 για τις διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων. Στον οριζόντιο άξονα είναι το συνολικό μήκος της τομής, το οποίο είναι 23m και στον κατακόρυφο άξονα το βάθος διασκόπησης που ορίζεται στα 5m. Στα δεξιά της εικόνας αντιστροφής φαίνεται η χρωματική κλίμακα που αντιστοιχεί στην ηλεκτρική αντίσταση, όπου με το μωβ χρώμα παρουσιάζονται οι μεγάλες τιμές ηλεκτρικών αντιστάσεων και με το μπλε χρώμα οι μικρές τιμές. Επίσης, αναγράφεται και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που και στις τρεις διατάξεις θεωρείται πάρα πολύ μικρό, οπότε και δεν λαμβάνεται υπόψιν. Στο σχήμα a, δηλαδή στην διάταξη διπόλου- διπόλου παρατηρείται από τα 9,5 μέχρι και τα 16m μια αύξηση της τιμής της αντίστασης που παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα και είναι πιο εμφανής στα δυο υπόλοιπα σχήματα, όπου υπάρχει και το μωβ χρώμα, που παραπέμπει σε έναν στόχο με πολύ μεγαλύτερη αντίσταση από το περιβάλλον του.

Ακόμη, στις υπόλοιπες δυο διατάξεις η μεγαλύτερη αντίσταση παρατηρείται και μέχρι τα 18m κοντά στην επιφάνεια. Μια ακόμη παρατήρηση είναι ότι η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (σχήμα c) έχει το μικρότερο % σφάλμα RMS. Τέλος, το βάθος στο οποίο εντοπίζονται οι αλλαγές αυτές στις αντιστάσεις είναι από την επιφάνεια μέχρι περίπου το 1m.

TOMH K3

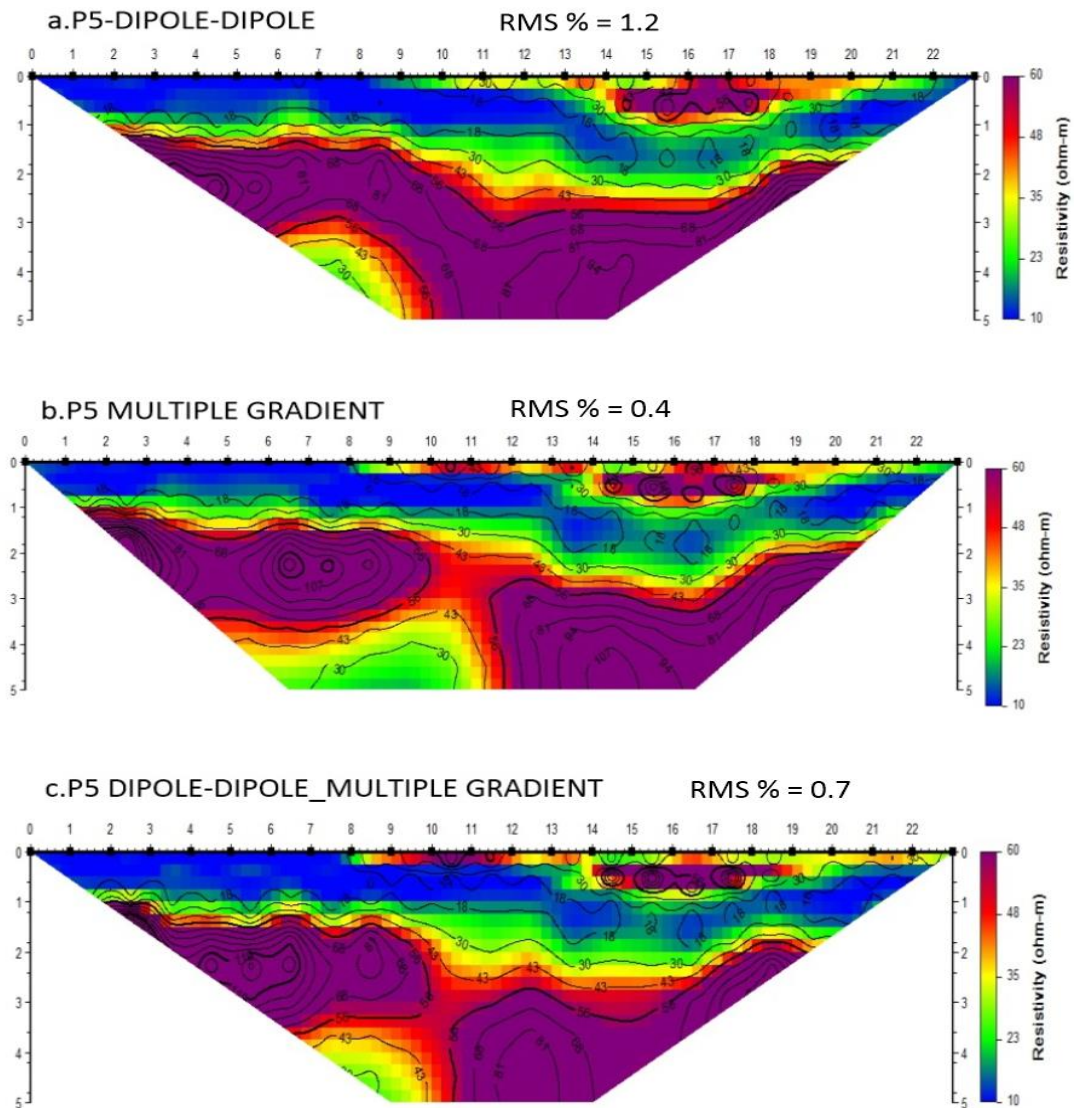


Εικόνα 4.1.2.5 Γεωηλεκτρική τομογραφία 3

Στην εικόνα 4.1.2.5 διακρίνεται η γεωηλεκτρική τομή 3, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 3.2.1, για τις τρεις διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν. Το σχήμα a παρουσιάζει την εικόνα αντιστροφής των αντιστάσεων που αφορούν την διάταξη διπόλου-διπόλου και τα σχήματα b, c τις διατάξεις πολλαπλής βαθμίδας και τον συνδυασμό των δυο αντίστοιχα. Όπως φαίνεται, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και για τις τρεις διατάξεις είναι πάρα πολύ μικρό, οπότε και θεωρείται αμελητέο. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μπορούμε να επισημάνουμε ότι και τα τρία σχήματα παρουσιάζουν παρόμοια μορφή και στα ίδια ακριβώς

σημεία πάνω στο τραπέζιο με το μωβ χρώμα διακρίνονται οι εναλλαγές των αντιστάσεων. Το γεγονός αυτό μπορεί να υποδηλώνει ότι τελικά τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης τομής να είναι αρκετά αξιόπιστα.

TOMH K5



Εικόνα 4.1.2.6 Γεωηλεκτρική τομή 5

Στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4.1.2.6) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της γεωηλεκτρικής τομής 5 και για τις 3 διατάξεις ηλεκτροδίων. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα και για τις τρεις διατάξεις έχει πολύ μικρή τιμή και έτσι τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα. Στο σχήμα α(διάταξη διπόλου- διπόλου) σε σύγκριση με τα δυο υπόλοιπα σχήματα- τραπέζια δεν φαίνονται οι μεγάλες τιμές αντιστάσεων κυρίως επιφανειακά μέχρι το βάθος των 30 εκατοστών και για το μήκος από τα 9 μέχρι περίπου 13.5 μέτρα.

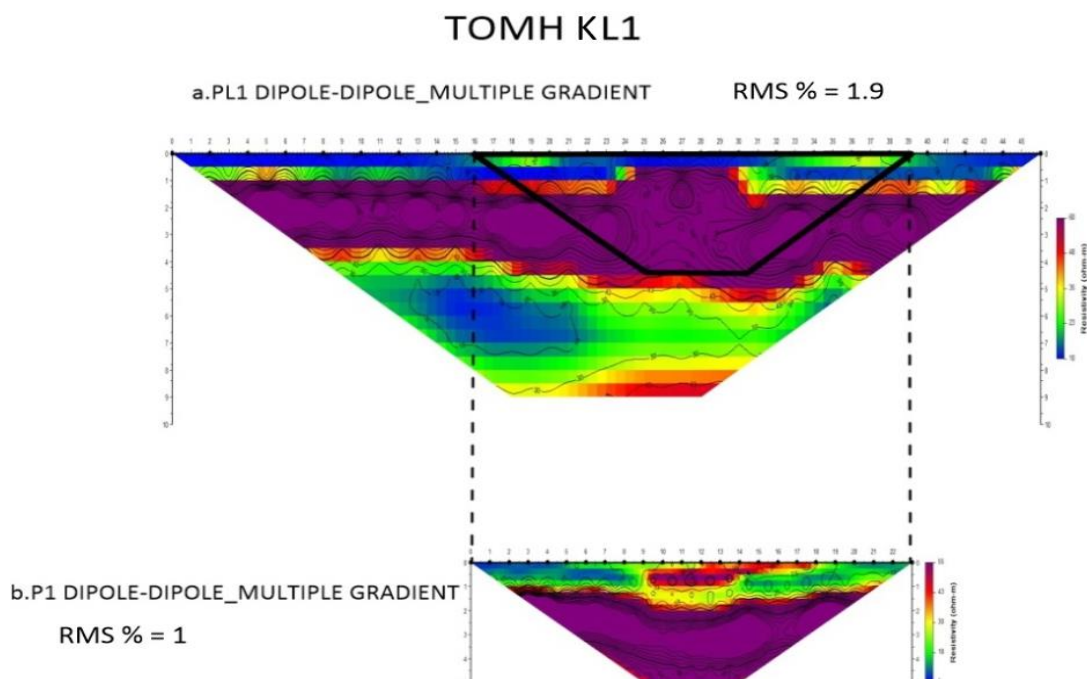
Συγκρίνοντας τα σχήματα b και c μπορούμε να παρατηρήσουμε την καλύτερη και αναλυτικότερη απεικόνιση της αλλαγής της αντίστασης, με τις πολύ μεγάλες τιμές να παριστάνονται με το μωβ χρώμα και τις πολύ μικρές με το μπλε, στο σχήμα c, το οποίο αφορά τον συνδυασμό των δυο διατάξεων. Τέλος, η δεύτερη περιοχή αρκετά μεγάλης ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία πιθανόν να είναι ένας στόχος που μας ενδιαφέρει, φαίνεται στο ίδιο βάθος και περίπου στο ίδιο σημείο και στις τρεις διατάξεις.

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια περιληπτική περιγραφή των μεθόδων και διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν, ενδεικτικά σε τρεις γεωηλεκτρικές τομές, με σκοπό να επιλεγεί η πιο αξιόπιστη και αναλυτική διάταξη για την επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Όπως αναλύθηκε, η καταλληλότερη διάταξη για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι ο συνδυασμός των διατάξεων της διπόλου- διπόλου και της πολλαπλής βαθμίδας (multiple gradient). Στο επόμενο κεφάλαιο, θα γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για όλες τις τομές που έγιναν μετρήσεις και η συγκρότηση του τελικού χάρτη των αποτελεσμάτων, δηλαδή των θαμμένων λειψάνων δρόμου και τον προσδιορισμό του πιθανού δρόμου.

4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

4.2.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων- Τομές KL1-K1 (dd_mg)

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύγκριση μεταξύ των τομών που αφορούν την πρώτη γραμμή μελέτης χρησιμοποιώντας την διάταξη «dd_mg» με την διαφορά όμως ότι στην μια τομή το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων είναι διπλάσιο, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 2m, ενώ στην άλλη τομή η απόσταση μεταξύ τους είναι 1 μέτρο.



Εικόνα 4.2.1.1 Σύγκριση τομών KL1-K1

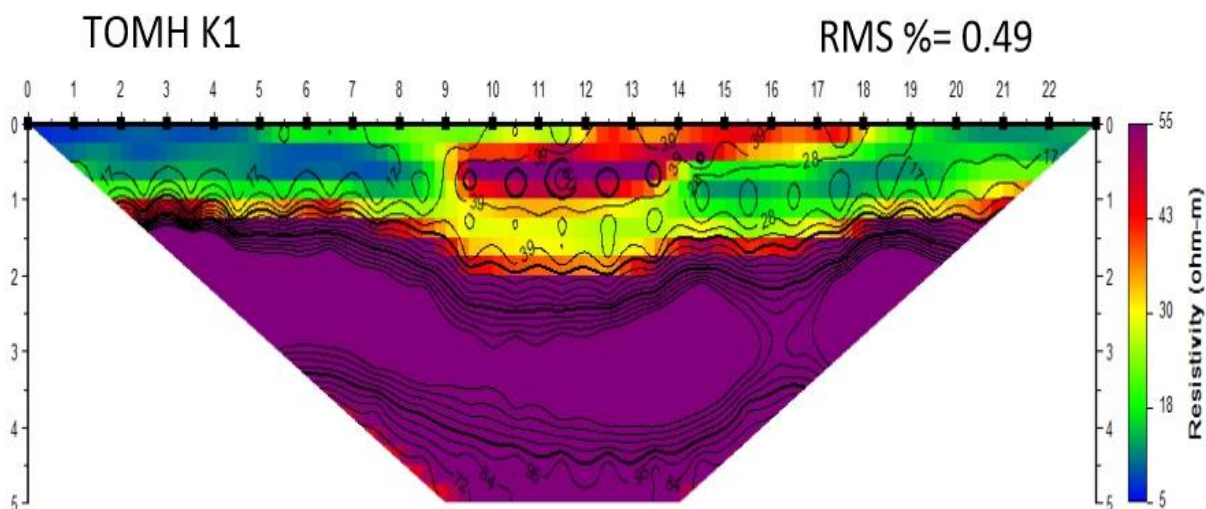
Στο σχήμα α απεικονίζεται η εικόνα αντιστροφής που αφορά το ανάπτυγμα ηλεκτροδίων με απόσταση 2 μέτρων μεταξύ τους. Έχει διπλάσιο βάθος διασκόπησης σε σχέση με το τραπέζιο στο σχήμα b, δηλαδή 10m, όμως η λεπτομέρεια (ανάλυση) της δομής των αντιστάσεων είναι πολύ μικρότερη σε αυτή την περίπτωση καθώς αυξάνονται οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Από την άλλη επιτρέπει την λήψη πληροφορίας για μεγαλύτερα βάθη το οποίο είναι μεν χρήσιμο αλλά όχι σημαντικό σε σχέση με το βάθος του στόχου που διερευνάται στην παρούσα μελέτη. Άρα, με τη μείωση του αναπτύγματος των ηλεκτροδίων στο συγκεκριμένο μήκος που μας ενδιαφέρει επιτυγχάνεται μεγαλύτερη λεπτομέρεια και εστιάζεται η έρευνα στο πιο επιφανειακό στρώμα το οποίο και φιλοξενεί τη δομή ενδιαφέροντος.

Στο πρώτο σχήμα (Εικόνα 4.2.1.1a) από τα 23 μέχρι τα 30 μέτρα μήκος φαίνεται μια περιοχή με μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων από το περιβάλλον, οπότε και στο συγκεκριμένο σημείο επιλέχθηκε να γίνει αναλυτικότερη έρευνα, καθώς παρατηρούνται ασυνήθιστες μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης. Αυτό επιτυγχάνεται με την μείωση της απόστασης των ηλεκτροδίων στην μισή και άρα στο μισό βάθος διασκόπησης, αλλά με πολύ μεγαλύτερη ανάλυση, όπως διακρίνεται και στο σχήμα b (Εικόνα 4.2.1.1b), στο οποίο φαίνονται καθαρά δυο περιοχές με πολύ μεγαλύτερες αντιστάσεις από το περιβάλλον. Οι ανωμαλίες αυτές (κόκκινο-μωβ χρώμα) σχετίζονται με πιθανά θαμμένα λείψανα δρόμου, ενώ τα χαλαρά ιζήματα με το μπλε-πράσινο χρώμα.

4.2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων- Τομές K1-K5

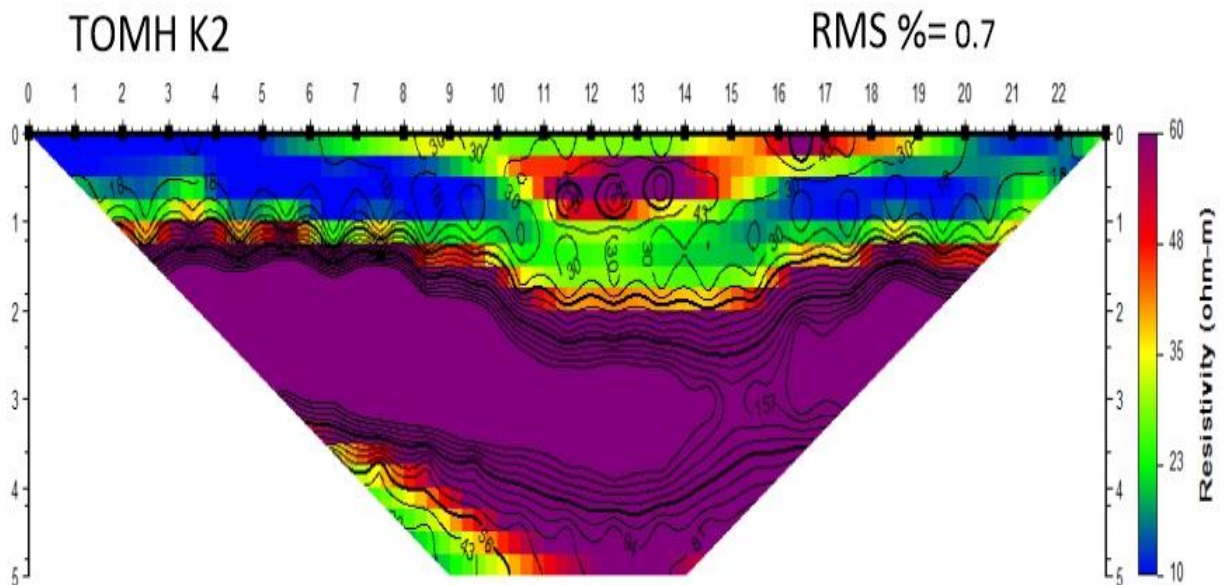
Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά και ανάλυση των αποτελεσμάτων για τις 5 γεωηλεκτρικές τομογραφίες. Επιλέχθηκε η καταλληλότερη διάταξη για την περιγραφή των μετρήσεων, η οποία είναι ο συνδυασμός των διατάξεων διπόλου- διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας, δηλαδή η διάταξη «ddmg». Χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των εικόνων αντιστροφής της κάθε τομής, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2.1, για τον εντοπισμό των αντιστάσεων που παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα έχουν την ίδια χρωματική κλίμακα που αντιστοιχεί με το μωβ χρώμα σε μεγάλες τιμές αντιστάσεων και με το μπλε σε μικρές τιμές. Επίσης, το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων παραμένει το ίδιο και για τις 5 τομές με συνολικό μήκος τα 23m και απόσταση μεταξύ του κάθε ηλεκτροδίου 1m. Τέλος, το βάθος διασκόπησης και για τις 5 γεωηλεκτρικές τομογραφίες είναι 5m, το οποίο είναι αρκετό για τον προσδιορισμό των θαμμένων λειψάνων δρόμου.

Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα των μετρήσεων για κάθε γραμμή ηλεκτροδίων και ο αντίστοιχος σχολιασμός για τις αντιστάσεις που παρατηρούνται.



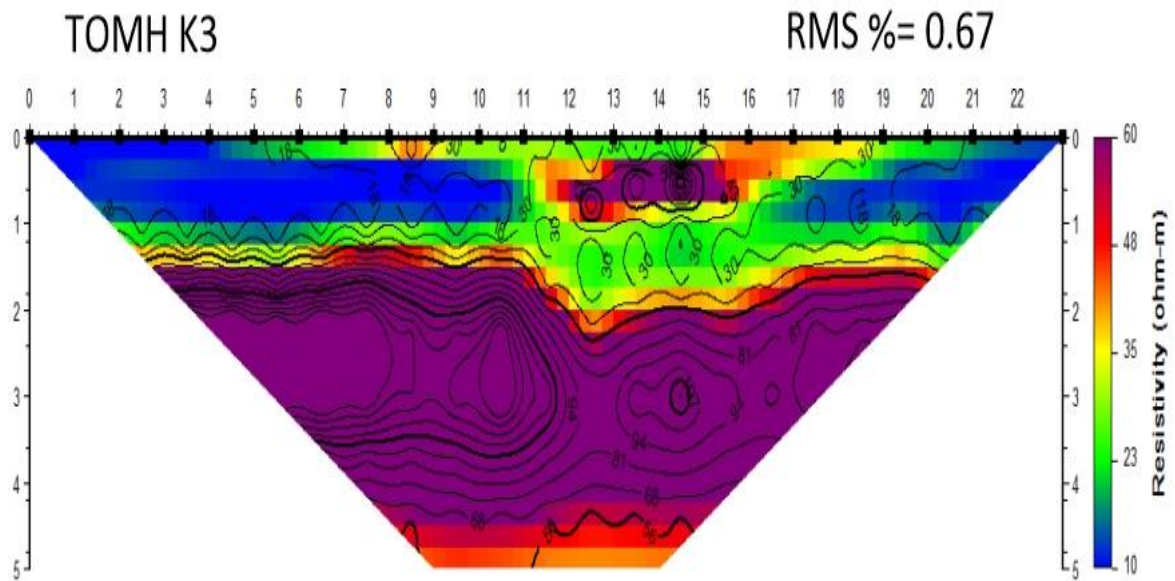
Εικόνα 4.2.2.1 Τομή K1 (dd_mg)

Αρχικά, όπως διακρίνεται στην εικόνα 4.2.2.1, η τομή K1 αφορά την πρώτη γραμμή μετρήσεων στην περιοχή μελέτης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) είναι πολύ μικρό. Στο παραπάνω σχήμα και μέχρι το 1.5m βάθος σε ορισμένα σημεία οι αντιστάσεις κυμαίνονται από 5-55 ohm-m. Μέχρι και τα 9m μήκος και το βάθος του 1 μέτρου περίπου συναντώνται χαμηλές αντιστάσεις, οι οποίες απεικονίζονται με το μπλε και το πράσινο χρώμα, και αφορούν κυρίως ιλύ και άργιλο, δηλαδή σε γενικές γραμμές χαλαρά ιζήματα και λεπτόκοκκο υλικό, σύμφωνα και με την γεωλογία της περιοχής μελέτης. Τα ίδια υλικά εμφανίζονται και επιφανειακά από τα 18 μέτρα μέχρι το τέλος του αναπτύγματος, όπως και από τα 14 μέτρα και μετά για τα βάθη 0.5-1.5m περίπου. Αξιοσημείωτη είναι η παρουσία αρκετά μεγαλύτερων αντιστάσεων από τα 9-18m μήκους, όπου φαίνονται σαν δυο διαφορετικοί σχηματισμοί με μεγάλη απόκλιση της αντίστασής τους με το περιβάλλον. Πρόκειται μάλλον για δυο δομές, όπου η μια εντοπίζεται στα βάθη 0.3-0.8m, δηλαδή έχει πάχος 0.5m, και από τα 9 μέχρι 13.5 μέτρα μήκος, ενώ η άλλη δομή βρίσκεται πιο επιφανειακά και μέχρι το βάθος των 30 εκατοστών από τα 12 μέχρι τα 18 μέτρα περίπου. Ο πιο επιφανειακός σχηματισμός παρουσιάζει αντιστάσεις 35-45 ohm-m, ενώ ο βαθύτερος στόχος 45-55 ohm-m και παρουσιάζονται με πιο έντονο κόκκινο και μωβ χρώμα. Το γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι στόχοι με αρκετά μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων βρίσκονται ανάμεσα σε χαλαρά ιζήματα, τα οποία έχουν εμφανώς μικρότερες τιμές, μας προϊδεάζει ότι πιθανόν να είναι θαμμένα λείψανα δρόμου. Τέλος, από το βάθος 1.5m και μετά απεικονίζεται ένας σχηματισμός με μεγάλες αντιστάσεις που κυμαίνονται 50-100 ohm-m και κατά κύριο λόγο είναι άμμοι και χαλίκια.



Εικόνα 4.2.2.2 Τομή K2 (dd_mg)

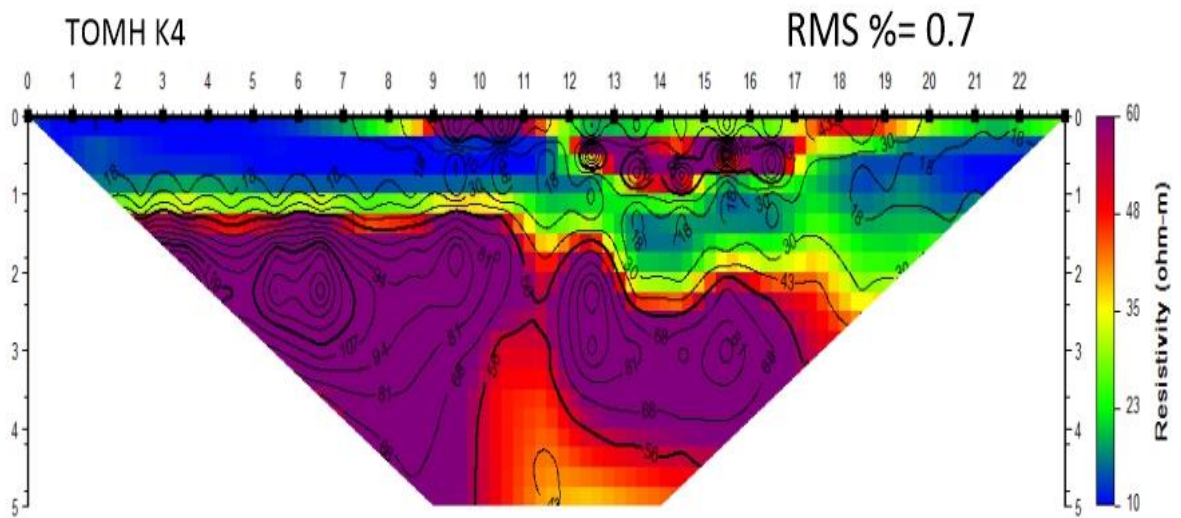
Η παραπάνω εικόνα(Εικόνα 4.2.2.2) αφορά την ανάλυση των αποτελεσμάτων για την δεύτερη γραμμή μελέτης (τομή K2). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι κάτω από 1% και θεωρείται πολύ χαμηλό, οπότε και τα αποτελέσματα μας θεωρούνται αξιόπιστα. Στα πρώτα 10 μέτρα μήκος και μέχρι το βάθος του 1.2m παρατηρούνται χαμηλές αντιστάσεις που παριστάνονται με μπλε και πράσινο χρώμα, αντιστοιχούν σε χαλαρά ιζήματα, κυρίως ιλύς και άργιλος. Σε γενικές γραμμές μέχρι το βάθος του 1.5m διακρίνονται πολύ χαμηλές αντιστάσεις της τάξης 15-30 ohm-m, με εξαίρεση δυο σημεία με μεγαλύτερες αντιστάσεις από το περιβάλλον. Υπάρχουν δυο γεωηλεκτρικοί σχηματισμοί με αντιστάσεις 43-60 ohm-m. Ο πρώτος εντοπίζεται από τα 10.5 μέχρι τα 14.5 μέτρα μήκος και σε βάθος 0.3m, ενώ το πάχος του είναι 0.5 μέτρα. Ο δεύτερος σχηματισμός βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια μέχρι το βάθος του 0.3m και εκτείνεται από τα 15 μέχρι τα 18.5 μέτρα. Επίσης, ο βαθύτερος στόχος παρουσιάζει αισθητά μεγαλύτερες ηλεκτρικές αντιστάσεις από τον πιο επιφανειακό. Πρόκειται πιθανόν για σχηματισμούς που παραπέμπουν σε θαμμένα λείψανα δρόμου λόγω της μεγάλης διαφοράς αντίστασης με το περιβάλλον και σε συγκεκριμένα σημεία. Μπορούμε να πούμε σε μια πρώτη εκτίμηση ότι ίσως πρόκειται για δυο πιθανούς δρόμους, ένα βαθύτερο και έναν πιο επιφανειακό. Τέλος, από το βάθος του 1.3m και μετά απεικονίζεται ένας σχηματισμός με ένα εύρος αντιστάσεων 80-160 ohm-m, που αντιστοιχεί σε άμμους και χαλίκια, όπως και στην τομή K1.



Εικόνα 4.2.2.3 Τομή K3 (dd_mg)

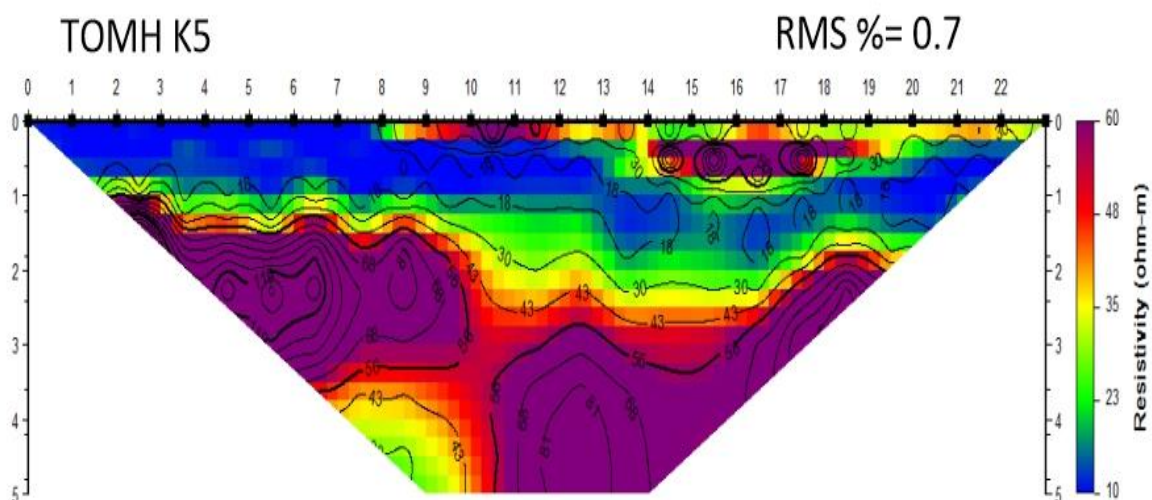
Τα παραπάνω αποτελέσματα (Εικόνα 4.2.2.3) προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων στην τρίτη γραμμή μελέτης (τομή K3). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως και στις προηγούμενες ηλεκτρικές τομογραφίες, είναι μικρότερο από 1%. Σε όλο το μήκος της τομής και μέχρι το βάθος 1.5m υπάρχουν χαλαρά ιζήματα, όπως γνωρίζουμε και από την γεωλογία της περιοχής αντιστοιχούν σε ιλύ και άργιλο, με πολύ χαμηλές αντιστάσεις και ένα εύρος 18-30 ohm-m. Εξάιρεση αποτελούν δυο γεωηλεκτρικοί σχηματισμοί με μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων, όπου ο ένας εκτείνεται από 12 μέχρι 15.5 μέτρα μήκος και σε βάθος 0.3m και έχει πάχος περίπου 50 εκατοστά. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζει αντιστάσεις της τάξης 48-60 ohm-m, ενώ ο δεύτερος σχηματισμός που εκτείνεται από τα 16 μέχρι τα 18 μέτρα μήκος και μέχρι το βάθος 0.25m παρουσιάζει ηλεκτρικές αντιστάσεις 35-45 ohm-m. Και οι δυο σχηματισμοί μπορούν να αποτελέσουν στόχους της παρούσας έρευνας, αφού εμφανίζονται με αντιστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το περιβάλλον και σχετικά κοντά στην επιφάνεια, γεγονός που παραπέμπει σε θαμμένα λείψανα δρόμου. Επίσης, απεικονίζονται και οι δυο στόχοι στο παραπάνω σχήμα με το έντονο κόκκινο και μωβ χρώμα.

Ακόμη, σε σχέση με τις δυο προηγούμενες τομές μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο πιο επιφανειακός σχηματισμός ξεκινάει σε κάθε τομή όλο και πιο δεξιά προσεγγίζοντας προς το τέλος του αναπτύγματος των ηλεκτροδίων, ενώ και ο βαθύτερος σχηματισμός εμφανίζεται ελάχιστα πιο δεξιά, περίπου ένα μέτρο σε κάθε τομή, όμως αυτό που παραμένει ίδιο είναι το βάθος στο οποίο βρίσκεται. Τέλος, όπως και στις προηγούμενες τομές, από το 1.5m και βαθύτερα παρατηρούνται σχηματισμοί με μεγάλες αντιστάσεις 55-95 ohm-m, κυρίως αμμοχάλικα.



Εικόνα 4.2.2.4 Τομή K4 (dd_mg)

Η εικόνα 4.2.2.4 αφορά την ανάλυση των μετρήσεων στην τέταρτη γραμμή μελέτης (τομή K4). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, όπως και στις προηγούμενες ηλεκτρικές τομογραφίες, είναι μικρότερο από 1%. Σε όλο το μήκος της τομής και μέχρι το βάθος 1.5m περίπου κυριαρχούν χαλαρά ιζήματα με πολύ χαμηλές αντιστάσεις και ένα εύρος 18-35 ohm-m. Εξαίρεση αποτελούν δυο γεωηλεκτρικοί σχηματισμοί με φανερά μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων, όπου ο ένας εκτείνεται από 12 μέχρι 17 μέτρα μήκος και σε βάθος 0.3m και έχει πάχος περίπου 50 εκατοστά. Ο σχηματισμός αυτός παρουσιάζει αντιστάσεις της τάξης 48-60 ohm-m, ενώ ο δεύτερος σχηματισμός που εκτείνεται από τα 9 μέχρι τα 11 μέτρα μήκος και μέχρι το βάθος 0.25m παρουσιάζει ηλεκτρικές αντιστάσεις 35-45 ohm-m. Και οι δυο σχηματισμοί μπορούν να αποτελέσουν θαμμένα λείψανα δρόμου, αφού εμφανίζονται με αντιστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το περιβάλλον και σχετικά κοντά στην επιφάνεια. Επίσης, απεικονίζονται και οι δυο στόχοι στο παραπάνω σχήμα με το έντονο κόκκινο και μωβ χρώμα, όπως και σε όλες τις τομές. Μια μεγάλη διαφορά με τις προηγούμενες τομές είναι η τοποθεσία του πιο επιφανειακού σχηματισμού, όπου οι μεγαλύτερες αντιστάσεις έχουν μετατοπιστεί αρκετά πιο αριστερά, περίπου 6.5 μέτρα, προς το τέλος του αναπτύγματος των ηλεκτροδίων. Επίσης, στα 17.5 μέχρι τα 19 μέτρα παρατηρούνται και εκεί μεγαλύτερες αντιστάσεις από το περιβάλλον με τιμές από 40 μέχρι 50 ohm-m. Επομένως αυτός ο επιφανειακός σχηματισμός παρουσιάζεται «τεμαχισμένος» σε δυο τμήματα δεξιά και αριστερά της κεντρικής βαθύτερης δομής. Τέλος, από το 1.5m και βαθύτερα παρατηρούνται σχηματισμοί με αντιστάσεις 55-110 ohm-m, οι οποίες αντιστοιχούν σε άμμους και χαλίκια.



Εικόνα 4.2.2.5 Τομή K5 (dd_mg)

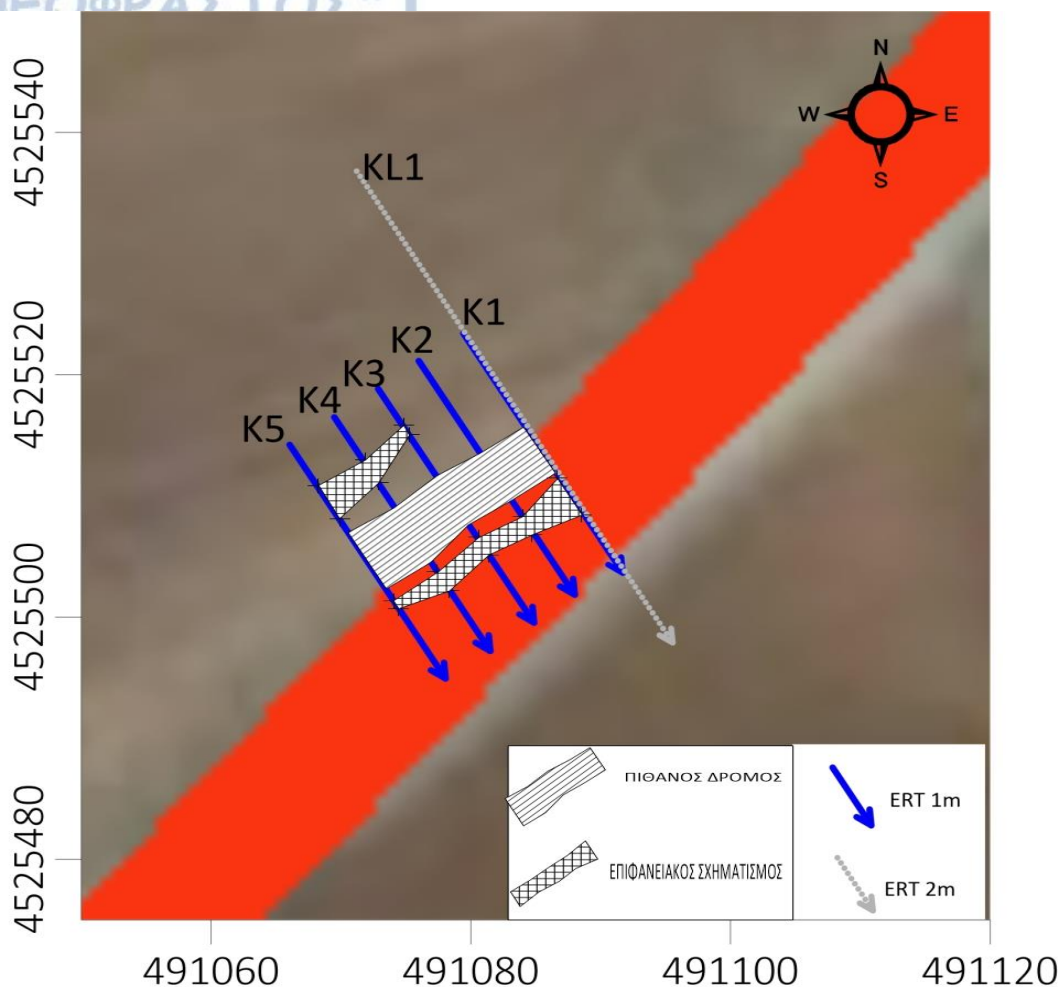
Τα παραπάνω αποτελέσματα (Εικόνα 4.2.2.5) προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων στην πέμπτη γραμμή μελέτης (τομή K5). Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα είναι ίσο με 0.7%, έχει πολύ μικρή τιμή και τα αποτελέσματά μας θεωρούνται αξιόπιστα. Σε όλο το μήκος της τομής, δηλαδή σε όλο το ανάπτυγμα των ηλεκτροδίων, και μέχρι το βάθος 1.5m και σε ορισμένα σημεία, όπως από τα 10 μέχρι τα 17 μέτρα, τα 2m επικρατούν ιλύς και άργιλος, δηλαδή λεπτόκοκκα υλικά και πολύ χαλαρά ιζήματα. Οι αντιστάσεις τους κυμαίνονται από 10 μέχρι 35 ohm-m. Φανερή εξαίρεση αποτελούν δυο γεωηλεκτρικοί στόχοι που βρίσκονται μέσα στα χαλαρά ιζήματα, αλλά με πολύ μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων από το περιβάλλον. Ο ένας στόχος είναι πιο επιφανειακός από τα 9 μέχρι τα 12.5 μέτρα μήκος και έχει πάχος περίπου 25 εκατοστά και ο δεύτερος είναι βαθύτερος, από τα 14 μέχρι τα 19 μέτρα μήκος, ξεκινάει από τα 0.3m βάθος και έχει πάχος 50 εκατοστά. Οι τιμές των αντιστάσεων είναι 48-60 ohm-m, όπως και στις προηγούμενες τομές. Επομένως, αυτοί οι σχηματισμοί μπορούν να αποτελέσουν στόχο της παρούσας έρευνας αφού βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια και οι αντιστάσεις τους έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από τα υπόλοιπα πετρώματα. Επίσης, σε σχέση με την προηγούμενη τομή (K4) ο πιο επιφανειακός στόχος είναι περίπου στην ίδια θέση, όμως ο βαθύτερος σχηματισμός έχει μετατοπιστεί 2m προς τα δεξιά προσεγγίζοντας την αρχή του αναπτύγματος των ηλεκτροδίων. Τέλος, από το 1.5m και σε ορισμένα σημεία 2m και βαθύτερα παρατηρείται ένας σχηματισμός με μεγάλες αντιστάσεις 55-85 ohm-m, που σύμφωνα και με την γεωλογία της περιοχής παραπέμπει σε άμμο και χαλίκια.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ικανή για την αποτύπωση της κατανομής της αντίστασης στο υπέδαφος. Επίσης, η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων και των μετρήσεων μπορεί να δώσει μια πολύ αντιπροσωπευτική εικόνα για το μέγεθος και το πάχος των δομών ενδιαφέροντος. Γενικά επιβεβαιώνεται ότι η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι πολύ αποτελεσματική στον εντοπισμό δομών, οι οποίες παρουσιάζουν αντίθεση στις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλον, όπως οι δομές αρχαιολογικών λειψάνων.

Ειδικότερα, η παρούσα έρευνα εντόπισε δομές οι οποίες αναλύονται και παρουσιάζονται στην εργασία και πιθανόν να ταυτίζονται με τα λείψανα ενός θαμμένου δρόμου όπου λόγω των δομικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους έχουν ιδιαίτερα αυξημένη τιμή ηλεκτρικής αντίστασης. Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε οι μετρήσεις να γίνουν σε παράλληλες τομές ηλεκτρικής τομογραφίας με αποστάσεις ηλεκτροδίων 1 μέτρου και η ερμηνεία να βασιστεί στην αντιστροφή των συνδυασμένων διατάξεων διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας.

Μετά την ανάλυση των μετρήσεων, τα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιορίσουν τον εν δυνάμει δρόμο πάνω στον χάρτη που απεικονίζεται στην εικόνα 3.2.1. Ο χάρτης αυτός αντιστοιχεί στην περιοχή μελέτης και παρουσιάζονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Για την επεξεργασία του χάρτη σε σχέση με τις τιμές των αντιστάσεων με σκοπό την γεωλογική ερμηνεία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα μοντελοποίησης "Surfer". Το πρόγραμμα αυτό επιτρέπει στον χρήστη να δημιουργήσει επαγγελματικούς χάρτες χρησιμοποιώντας διάφορα εργαλεία και να «μοντελοποιήσει» τα δεδομένα του για μια πιο αναλυτική ερμηνεία.

Στην εικόνα 5.1 φαίνεται ο τελικός χάρτης, όπου απεικονίζεται ο πιθανός δρόμος, αρχαιολογικού ενδιαφέροντος, με βάση τις αντιστάσεις που προέκυψαν από την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Οι γραμμές μελέτης με το μπλε χρώμα αφορούν το ανάπτυγμα ηλεκτροδίων 1m μεταξύ τους, ενώ με το άσπρο των 2m. Η εικόνα αυτή του δρόμου προέκυψε ενώνοντας τα όρια των δομών μεγάλων αντιστάσεων ίδιου βάθους στα επιφανειακά στρώματα ώστε να σχηματιστεί ένα αντιπροσωπευτικό πολύγωνο με σκοπό τον προσδιορισμό των ορίων των δομών αυτών.



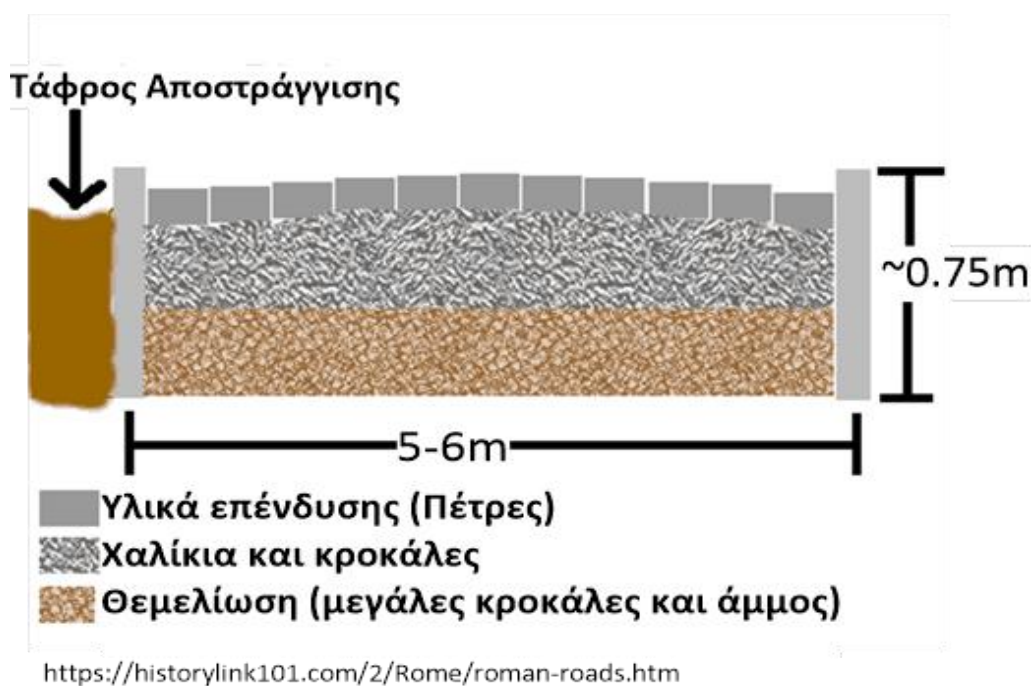
Εικόνα 5.1 Τελικός χάρτης θαμμένων λειψάνων δρόμου στην περιοχή της Παλαιοκόμης

Στην εικόνα 5.1 διακρίνεται και ένας άλλος σχηματισμός, ο οποίος έχει μεγαλύτερες αντιστάσεις από το περιβάλλον, δηλαδή από τα χαλαρά ιζήματα, και παρατηρείται στην επιφάνεια. Πρόκειται πιθανόν για κάποιον άλλο δρόμο, ή τμήματα άλλου δρόμου νεότερου, καθώς διαφέρει με τον εν δυνάμει δρόμο της μελέτης τόσο στο πάχος, στα όριά του ως προς το βάθος αλλά και ως προς τις τιμές των αντιστάσεων. Επίσης, παρατηρούμε ότι δεν συνεχίζεται διαδοχικά σε όλες τις τομές ώστε να σχηματίσει προσεγγιστικά μια γραμμική δομή, αλλά από την τομή K3 και πηγαίνοντας προς τα ΝΔ υπάρχουν εμφανίσεις του σχηματισμού αυτού και Β-ΒΔ του βαθύτερο σχηματισμού, γεγονός που δεν δείχνει μια συνέχεια στις τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων. Τα όρια των σχηματισμών παρουσιάζονται ως γραμμοσκιασμένα πολύγωνα στην εικόνα 5.1 για τον πιθανό δρόμο και τον επιφανειακό σχηματισμό.

Τέλος, για επιβεβαίωση της ερμηνείας της βαθύτερης ανωμαλίας και της συσχέτιση της με την Εγνατία οδό στην εικόνα 5.2, παρουσιάζεται μια αποτύπωση μιας τυπικής Ρωμαϊκής οδού (<https://historylink101.com>). Ο δρόμος αυτός είχε τρία βασικά επίπεδα, το πρώτο ήταν η θεμελίωση με μεγάλες κροκάλες και αμμώδεις σχηματισμούς, το δεύτερο αποτελούμενο από χαλίκια και κροκάλες και το πιο επιφανειακό με υλικά επένδυσης. Το τυπικό πάχος ήταν 0,75 μέτρα και το μήκος 5-6 μέτρα. Η βαθύτερη αντιστατική δομή στην περιοχή μελέτης έχει

παρόμοιες διαστάσεις (πάχος >0.5μέτρο, πλάτος 5-6μέτρα) ενώ οι αντιστάσεις δικαιολογούν πλήρως την παρουσία υλικών (άμμοι, χαλίκια) ίδια με αυτά Ρωμαϊκού δρόμου.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα εργασία τα γεωφυσικά αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα ως προς την ποιότητά τους. Με βάση τη γνώση της δομής και την εικόνα των αντιστάσεων θεωρείται πολύ πιθανό η γραμμική δομή να σχετίζεται με αρχαίο ρωμαϊκό δρόμο. Για την επιβεβαίωση της ερμηνείας αυτής απαιτείται η διεξαγωγή δοκιμαστικής ανασκαφικής έρευνας σε συγκεκριμένα σημεία.



Εικόνα 5.2 Τυπική δομή Ρωμαϊκής οδού



6. Βιβλιογραφία

- Aspinall A, Gaffney CF. 2001. The Schlumberger array-potential and pitfalls in archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 8: 199–209.
- 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.
- 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.
- Edwards, W., Okita, M., Goodman, D., 2000. Investigation of Subterranean Tomb in Miyazaki, Japan. *Archaeological Prospection* 7, 215–224.
- <https://earth.google.com/web/@0,0,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>
- Γραβάλας Τριαντάφυλλος, Θεσσαλονίκη 2021. Διερεύνηση εδαφικών ρωγμών με γεωφυσικές μεθόδους. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.
- Griffiths, D., Barker, R., 1993. Two dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics* 19, 211–226.
- Γρηγοριάδης Αλέξανδρος, Χανιά, Δεκέμβριος 2016. Γεωηλεκτρική γεωφυσική διασκόπηση για την κατασκευή λιμνοδεξαμενής στο οροπέδιο Ασκύφου Χανίων.
- <http://canyoning-caving.blogspot.com/2019/12/blog-post.html>
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B4%CF%81%CE%B9%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%98%CE%AC%CE%BB%CE%B1%CF%83%CF%83%CE%B1
- https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B1%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF%CE%BA%CF%8E%CE%BC%CE%B7_%CE%A3%CE%B5%CF%81%CF%81%CF%8E%CE%BD
- <https://historylink101.com/2/Rome/roman-roads.htm>
- http://odysseus.culture.gr/h/2/gh251.jsp?obj_id=21706
- <https://www.goldensoftware.com/products/surfer/features>
- <https://www.xronometro.com/amfpolis-egnatia/>



- <https://www.xronometro.com/amfipolis-sparagmata/>
- Kaimaris D., Geogoula O., Karadedos G., Patias P., 2011. The marks of ancient Via Egnatia in aerial photographs and satellite images: En Choro Techniessa: Volume in honor to Prof. Skarpia-Heupel.
- Kim, Y.H., 2011. DC2Dpro – User's Manual, KIGAM, Daejeon, Korea.
- Κακλής Τριαντάφυλλος, Θεσσαλονίκη 2011. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ ΠΙΕΡΙΑΣ ΛΕΚΑΝΗΣ Ν.ΚΑΒΑΛΑΣ.
- Μουντράκης Δ. 1994. Εισαγωγή στην γεωλογία της Μακεδονίας και Θράκης. Απόψεις για την γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελληνικής Ενδοχώρας και των Εσωτερικών Ελληνίδων. Δελτ. Ελλ. Γεωλ. Ετ., 30-46.
- Νιβορλής Αριστείδης, Θεσσαλονίκη. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΘΑΜΜΕΝΩΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΩΝ. Διπλωματική εργασία.
- Παπαζάχος Βασίλειος, Θεσσαλονίκη 1996. Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις ΖΗΤΗ.
- Παπαζάχος Βασίλειος, Παπαζάχος Κωνσταντίνος, 2^η έκδοση Δεκέμβριος 2013. Εισαγωγή στη Γεωφυσική. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Τσελέντης Άκης, Παρασκευόπουλος Π., Αθήνα 2013. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Εκδόσεις Liberal Books.
- Tsokas, G.N., Rocca, A.Ch., 1987. Field investigation of a Macedonian tumulus by resistivity soundings. Geoexploration 24, 99–108.
- Tsokas, G.N., Tsourlos, P.I., Stampolidis A., Katsanopoulou D., Soter S. Tracing a Major Roman Road in the Area of Ancient Helike by Resistivity Tomography. 22 June 2009.
- Tsourlos, P., 1995. Modelling interpretation and inversion of multielectrode resistivity survey data. Ph.D. Thesis, University of York.