



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΜΑΡΙΑ ΚΕΦΑ

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ
ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ ΣΤΗΝ ΞΗΛΟΚΕΡΑΤΙΑ ΚΙΛΚΙΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2021





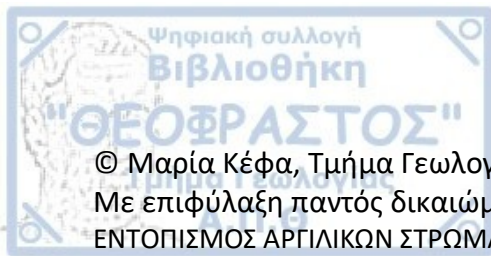
ΜΑΡΙΑ ΚΕΦΑ

ΑΕΜ: 5641

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ ΣΤΗΝ ΞΗΛΟΚΕΡΑΤΙΑ ΚΙΛΚΙΣ

Επιβλέπων:

Σταμπολίδης Αλέξανδρος, *ΕΔΙΠ Τομέα Γεωφυσικής*



© Μαρία Κέφα, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ ΣΤΗΝ
ΞΗΛΟΚΕΡΑΤΙΑ ΚΙΛΚΙΣ – Πτυχιακή Εργασία

© Maria Kefa, School of Geology, Dept. of Geophysics, 2021

All rights reserved.

CLAY ACQUISITION WITH ELECTRIC TOMOGRAPHY AND INDUCED POLARIZATION METHODS IN
XILOKERATIA OF KILKIS– *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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

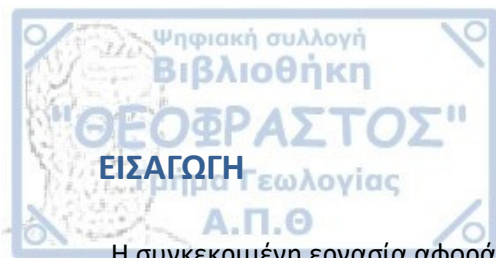
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.





ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ	9
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΠΟΛΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	9
1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ	11
1.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ	11
1.4 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ	14
1.5 ΌΡΓΑΝΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	15
1.6 ΕΥΘΥ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	15
2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ.....	16
2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ	16
2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	17
2.3 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	18
2.3.1 Prosys II	18
2.3.2 Τοπογραφικά στοιχεία.....	19
2.3.3 RES2DINV	19
2.3.4 DC_2DPRO	21
2.3.4.1 Σύνθεση μοντέλων από τις δύο διατάξεις στο DC_2DPRO	23
2.3.5 Surfer / Golden software.....	24
2.3.6 Επεξεργασία δεδομένων επαγόμενης πόλωσης	25
2.3.6.1 Ομαλοποίηση δεδομένων επαγόμενης πόλωσης	27
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	27
3.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	27
3.2 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ.....	33
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	36
4.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....	36
4.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ	36
4.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....	36
4.4 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ.....	36
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	40





Η συγκεκριμένη εργασία αφορά τη χρήση ηλεκτρικών μεθόδων και συγκεκριμένα ηλεκτρικής τομογραφίας και επαγόμενης πόλωσης με σκοπό την εύρεση αργιλικών κοιτασμάτων στην περιοχή Ξηλοκερατιά του Κιλκίς. Στόχος ήταν ο εντοπισμός αργιλικών στρωμάτων τα οποία θα περιείχαν όσο το δυνατό λιγότερα αμμώδη υλικά, καθώς η χρήση τους προοριζόταν για εκμετάλλευση από το εργοστάσιο κεραμοποιίας της ΚΕΒΕ.

Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην περιοχή και στη συνέχεια επεξεργάστηκαν μέσω διάφορων λογισμικών. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε ένα πλήθος τομών παίρνοντας μετρήσεις για κάθε μία απ αυτές, ωστόσο, στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται στοιχεία για δύο τομές όπου και παραθέτονται τα τελικά αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από την επεξεργασία των δεδομένων, συγκρίνοντας τις γεωφυσικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν και εξάγοντας συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητά τους.

Καθώς οι χαμηλές αντιστάσεις αντικατοπτρίζουν όχι μόνο αργιλικά στρώματα αλλά και την παρουσία αδρόκοκκων υλικών ή και υπόγειου υδροφορέα, κρίθηκε απαραίτητη η χρήση επαγόμενης πόλωσης ώστε να εξακριβωθεί μέσω της υψηλής φορτιστικότητας η παρουσία των αργίλων.

Τέλος, δίνεται έμφαση στην καταλληλότητα της κάθε μεθόδου αλλά και στις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν από τα στοιχεία των τελικών τομών.

1. ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την διασκόπηση και τον εντοπισμό ρηχών δομών, προσδιορίζοντας τις ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους. Έτσι, μετριέται στην επιφάνεια της Γης η διαφορά δυναμικού από ρεύματα που παράγονται με φυσικό ή τεχνητό τρόπο. Η τάση αυτή που προκύπτει αντανακλά την δυσκολία του ρεύματος να διαπεράσει το υπέδαφος, ορίζοντας έμμεσα την ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Γενικά, οι ηλεκτρικές μέθοδοι θα μπορούσαν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες με βάση το αν τα ηλεκτρικά μεγέθη που μετριοούνται οφείλονται σε φυσικά ή τεχνητά ρεύματα ή πεδία. Επομένως διακρίνονται:

1. Ηλεκτρικά μεγέθη φυσικών ηλεκτρικών ρευμάτων ή πεδίων

- Μέθοδος φυσικού δυναμικού
- Μέθοδος τελλουρικών ρευμάτων

2. Ηλεκτρικά μεγέθη τεχνητών ρευμάτων ή πεδίων

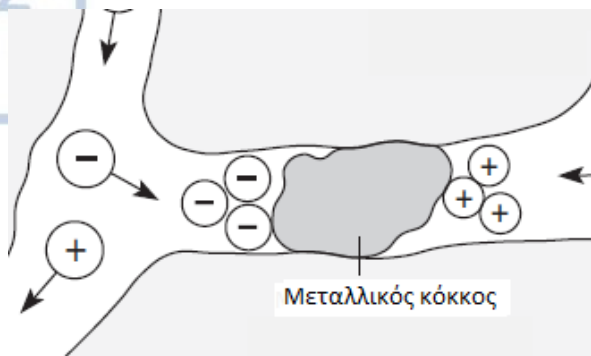
- Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
- Μέθοδος επαγόμενης πολικότητας
- Μέθοδος ισοδυναμικών γραμμών

Το εύρος χρήσης των ηλεκτρικών μεθόδων είναι μεγάλο και περιλαμβάνει κλάδους της Τεχνικής Γεωλογίας, της Κοιτασματολογίας, της Υδρογεωλογίας, της Γεωθερμίας και της Αρχαιολογίας. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι της επαγόμενης πολικότητας και της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην έρευνα αργιλικών σχηματισμών για βιομηχανική χρήση.

1.2 Μέθοδος επαγόμενης πολικότητας

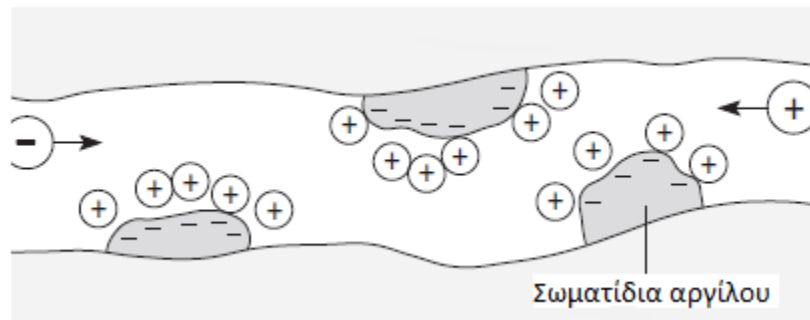
Με την απότομη διακοπή του ρεύματος που εισάγεται στο έδαφος παρατηρείται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το δυναμικό δεν μηδενίζεται απευθείας, αλλά αντιθέτως ελαττώνεται με εκθετικό βαθμό ως προς το χρόνο, όπου και μηδενίζεται. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό και ως επαγόμενη πολικότητα είναι αποτέλεσμα ηλεκτροχημικών αντιδράσεων μεταξύ κόκκων μεταλλικών ορυκτών ή τάσεων που αναπτύσσονται μεταξύ επιφανειών επαφής, καθιστώντας την λειτουργία του υπεδάφους ως πυκνωτή που αποφορτίζεται όσο περνάει ο χρόνος. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται πόλωση ηλεκτροδίου όταν υπάρχουν μεταλλικά ορυκτά ή ρυπαντές και πόλωση μεμβράνης σε αργιλικά στρώματα εξαιτίας των αντιδράσεων και των τάσεων που προαναφέρθηκαν.

Στην πρώτη περίπτωση η πόλωση ηλεκτροδίου προκύπτει όταν μέσα στους πόρους των πετρωμάτων βρίσκονται μεταλλικά ορυκτά τα οποία εμποδίζουν τον χώρο και όταν εισάγεται ρεύμα, συσσωρεύονται σε αυτά ηλεκτρικά φορτία. Γι αυτό και χρειάζονται ορισμένα δευτερόλεπτα ή και λεπτά μέχρι να αποφορτιστούν.



Εικόνα 1: Πόλωση ηλεκτροδίου (τροποποιημένο από "Looking into the Earth", Musset A.E, Khan M.A.)

Ο δεύτερος μηχανισμός που παράγει αυτό το φαινόμενο είναι η πόλωση μεμβράνης που παρατηρείται στα αργιλικά υλικά. Ειδικότερα, τα επιφανειακά σωματίδια της αργίλου είναι συνήθως φορτισμένα αρνητικά και όταν το ρεύμα εισέρχεται μέσω του εδάφους, προσελκύονται από αυτά θετικά ιόντα του νερού με αποτέλεσμα τη συσσώρευσή τους και την παραγωγή ρεύματος μικρής τάσης. Έτσι όταν το δυναμικό στην επιφάνεια σταματά να εισάγεται, η αποφόρτιση της αργίλου διαρκεί για έναν ορισμένο χρόνο.



Εικόνα 2 Πόλωση μεμβράνης (τροποποιημένο από "Looking into the Earth", Musset A.E, Khan M.A.)

Μέσω των μετρήσεων καθορίζονται η φορτιστικότητα και η πολικότητα, που ορίζονται ως:

Πολικότητα P: $P = \frac{V_{t1}}{V_{DC}}$

Φορτιστικότητα: (M·sec) $M = \frac{1}{V_{DC}} \int_{t1}^{t2} V(t) dt$

V_{t1} : δυναμικό μετά από χρόνο t_1

V_{DC} : αρχικό δυναμικό

V_{DC} : αρχικό δυναμικό

t_1, t_2 : χρόνοι κατά την ελάττωση του δυναμικού

1.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά της αργίλου

Η άργιλος είναι ιζηματογενές υλικό (κλαστικό ίζημα) που αποτελείται από κόκκους μεγέθους μικρότερου των 0.002mm. Όταν αναμιγνύεται με νερό σχηματίζει μια κολλώδη συνεκτική μάζα που αν στεγνώσει μετατρέπεται σε ένα εύθραυστο και σκληρό υλικό. Οι άργιλοι παρουσιάζονται σαν πλαστικά σώματα, αποτελώντας βασικό συστατικό των εδαφών καθώς μπορεί να εμφανιστούν και σαν πετρώματα (αποτέλεσμα συμπίεστικών τάσεων). Η διείδυση του νερού σε αυτές καθιστά τρομερά δύσκολη την κίνηση του. Τα συνηθέστερα ορυκτά των αργίλων είναι καολινίτης, μοντοριλλονίτης, ιλλίτης και σε μικρότερη αναλογία χαλαζίας, άστριοι και μοσχοβίτης απ' όπου και προέρχονται (πρωτογενή ορυκτά).

Η παρουσία της αργίλου μέσα σε σχηματισμούς επηρεάζει έντονα τις μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης και με την ύπαρξη νερού ελαχιστοποιείται η ηλεκτρική αντίσταση ενώ η φορτιστικότητα αυξάνεται.

1.3 Μέθοδος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Η ηλεκτρική τάση η οποία μετράται κατά τη διάρκεια μιας γεωφυσικής διασκόπησης, καθορίζεται από τον νόμο του Ohm, σύμφωνα με τον τύπο:

$$V=RI$$

όπου η διαφορά δυναμικού(V) είναι ανάλογη με το γινόμενο της ηλεκτρικής αντίστασης (R) και της έντασης του ρεύματος (I). Επειδή στον νόμο του Ohm περιγράφεται η ιδιότητα του υλικού χωρίς να συμπεριλαμβάνονται οι διαστάσεις του, εισάγεται ο όρος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ρ):

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

Όπου η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός ομογενούς υλικού (ρ) είναι ανάλογη με το γινόμενο του εμβαδού διατομής του αγωγού A με την ηλεκτρική αντίσταση (R) και αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος (l) του αγωγού. Μονάδες μέτρησης στο SI είναι το Ohm·m, ενώ το αντιστρόφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης $\sigma=1/\rho$ εκφράζει την ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα με μονάδες μέτρησης στο SI, Siemens/m. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα προκύπτει μέσω της κίνησης ηλεκτρονίων και ιόντων που βρίσκονται στο πορώδες των πετρωμάτων, στα μεταλλικά ορυκτά ή μέσα στο υπόγειο νερό.

Καθώς η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δεν έχει σταθερή τιμή για κάθε πέτρωμα, μπορεί ωστόσο, να οριστεί ένα εύρος για κάθε σχηματισμό, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.). Για παράδειγμα δύο εντελώς διαφορετικοί σχηματισμοί μπορεί να εμφανίσουν την ίδια τιμή ειδικής αντίστασης, υπογραμμίζοντας τις περιβάλλουσες συνθήκες που επηρεάζουν την τιμή της. Τέτοιοι παράγοντες είναι η θερμοκρασία, η πίεση, οι υδρογεωλογικές συνθήκες, το πορώδες των σχηματισμών (πρωτογενές ή δευτερογενές), η τεκτονική και η σύσταση του νερού (όσα περισσότερα

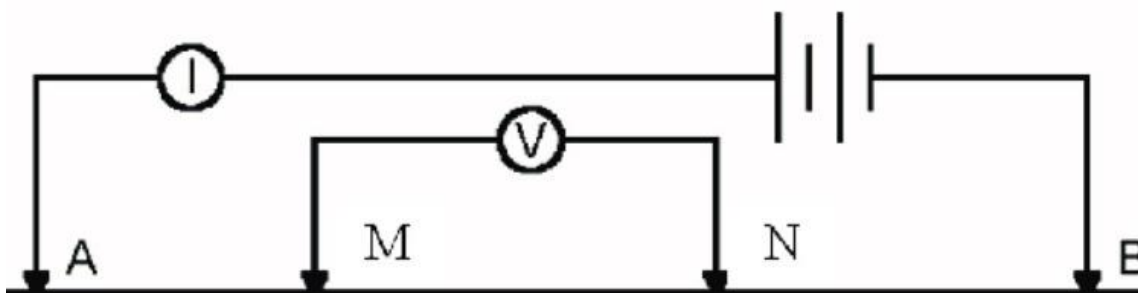
άλατα περιέχονται, τόσο πιο αγωγίμο είναι). Γενικότερα, τα ιζηματογενή πετρώματα έχουν ειδικές αντιστάσεις της τάξης $1-10^3 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, ενώ πλουτωνικά και μεταμορφωμένα έχουν τιμές ειδικής αντίστασης $10^3-10^5 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.

ΥΛΙΚΑ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ($\text{Ohm}\cdot\text{m}$)
ΑΕΡΑΣ	∞
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	0,2
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	0,5-300
ΑΜΜΟΙ	1-1000
ΑΡΓΙΛΟΙ	1-100
ΨΑΜΜΙΤΕΣ	$1-10^8$
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΙ	$50-10^7$
ΓΡΑΝΙΤΕΣ	$100-10^6$
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	$20-2 \cdot 10^3$

Πίνακας 1: Τυπικές τιμές ειδ. Ηλεκτρικών αντιστάσεων διαφόρων υλικών.

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης θεωρείται ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω του χαμηλού κόστους και του πλήθους των εφαρμογών της. Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων, εισάγεται στο έδαφος ρεύμα μέσω δύο ηλεκτροδίων ρεύματος και μετριέται η διαφορά δυναμικού σε ένα άλλο ζεύγος ηλεκτροδίων δυναμικού, η οποία υποδηλώνει το πόσο δύσκολα ρέει το ρεύμα στο υπέδαφος. Με τον τρόπο αυτό, εκφράζεται η ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αντικατοπτρίζουν την γεωηλεκτρική δομή μιας περιοχής δίνοντας μία έμμεση εικόνα για το γεωλογικό καθεστώς που επικρατεί.

Η ηλεκτρική αντίσταση που προκύπτει εξαρτάται από τη διάταξη των ηλεκτροδίων ρεύματος (A,B) και δυναμικού (M,N).

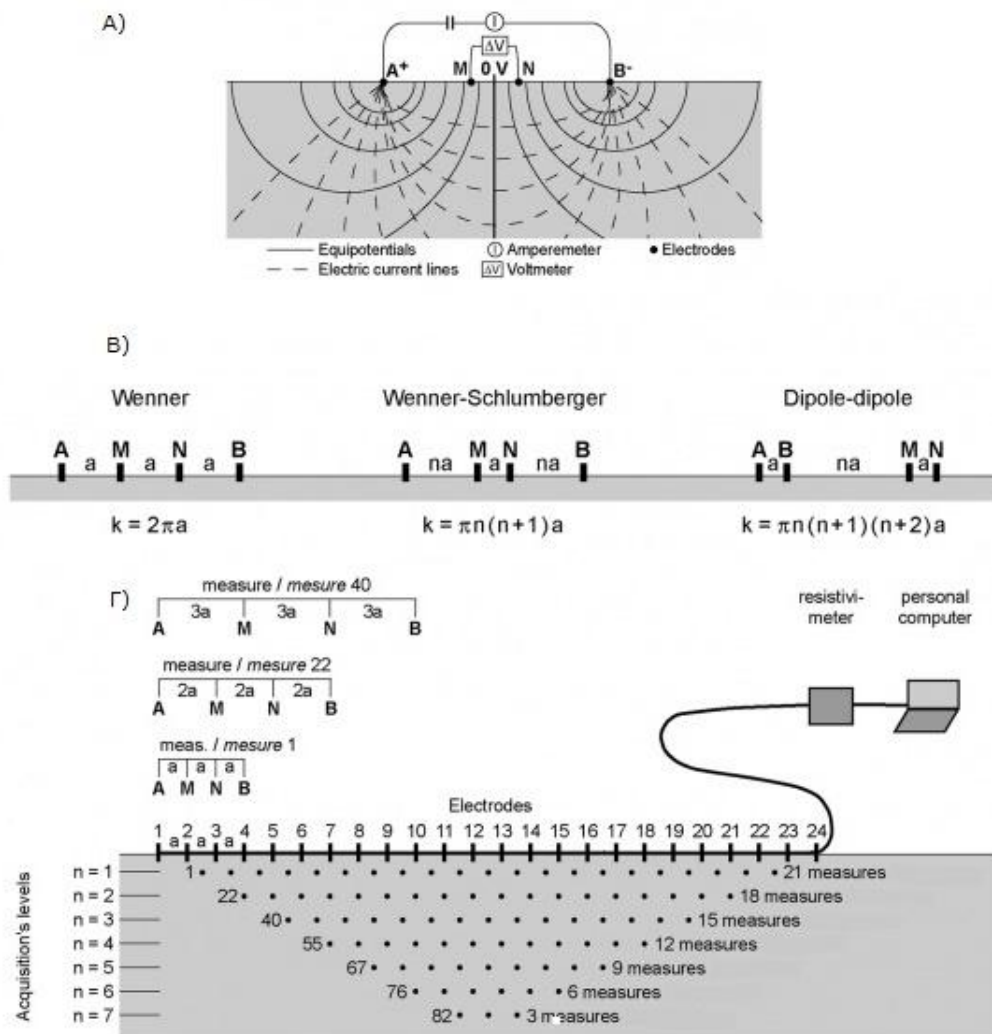


Εικόνα 3: Ηλεκτρόδια ρεύματος A,B και ηλεκτρόδια δυναμικού M,N κατά τη διεξαγωγή μιας μέτρησης ειδ. ηλεκτρικής αντίστασης.

Έτσι, ορίζεται η έννοια της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ρ_α που στην πραγματικότητα αποτελεί μία μέση τιμή των αντιστάσεων του εδάφους και εξαρτάται από την διαφορά δυναμικού ΔV_{MN} που μετριέται κατά τη διέλευση του ρεύματος έντασης I_{AB} και τον γεωμετρικό παράγοντα K που είναι διαφορετικός για κάθε διάταξη ηλεκτροδίων, όπως αναγράφεται στην εξίσωση:

$$\rho_\alpha = \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \cdot K = R \cdot K$$

Κάθε μια μέτρηση με την χρήση ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού αντιστοιχεί σε κάποια θέση στο χώρο και σε συγκεκριμένο βάθος που υπολογίζεται από την γεωμετρία των ηλεκτροδίων. Εάν συνδυάσουμε πολλές μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης, με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα κατά μήκος μιας τομής, διαλέγοντας κάθε φορά τα κατάλληλα ζεύγη ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού, μπορούμε να πάρουμε μια ηλεκτρική τομογραφία (Εικόνα 4.) Η ψευδοτομή, δηλαδή μία τομή όπου οι τιμές της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που μετρήθηκαν κατανέμονται στο χώρο ανάλογα με την γεωμετρία των ηλεκτροδίων, παρέχει μια ένδειξη της γεωηλεκτρικής δομής της περιοχής που ερευνήθηκε. Με σκοπό τη σωστή ερμηνεία των μετρήσεων εφαρμόζεται η διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων, δηλαδή μιας μαθηματικής διαδικασίας που μετατρέπει τα δεδομένα φαινόμενων ηλεκτρικών αντιστάσεων της τομογραφίας, σε τιμές της πραγματικής ειδικής αντίστασης. Η αντιστροφή γίνεται με την χρήση κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δύο, τα οποία μέσω της διαδικασίας αντιστροφής προσεγγίζουν τις πραγματικές τιμές της ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 4: Αρχή λειτουργίας της ηλεκτρικής τομογραφίας (τροποποιημένο από <https://journals.openedition.org/geomorphologie/10474>), α) κατανομή των συνεχών ρευμάτων και των ισοδυναμικών γραμμών στο υπέδαφος, β) διατάξεις ηλεκτροδίων Wenner, Schlumberger και διπόλου-διπόλου, γ) κατανομή δεδομένων στην ψευδοτομή από μετρήσεις διάταξης Wenner.

Η εκάστοτε διάταξη που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια μιας γεωφυσικής διασκόπησης θα πρέπει να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις ώστε να θεωρηθεί κατάλληλη για την ακρίβεια των μετρήσεων. Σημαντικοί παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο είναι η αναλογία σήματος ως προς το θόρυβο, το βάθος που καλύπτεται και η διακριτική ικανότητα που εξυπηρετεί η κάθε διάταξη. Συγκριμένα διακρίνονται οι εξής διατάξεις:

- **Wenner** : τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ρεύματος ισαπέχοντας το ένα με το άλλο απόσταση a . Η διάταξη αυτή έχει έντονη ευαισθησία σε βάθος, αλλά ασθενέστερη σε πλευρικές μεταβάσεις.
- **Schlumberger** : στη διάταξη αυτή τα καλώδια δυναμικού M, N απέχουν συμμετρικά μικρή σχετικά απόσταση (l) από το κέντρο της διάταξης ενώ τα A, B καλώδια (L) απόσταση το καθένα. Η ευρεία χρήση της συγκεκριμένης διάταξης οφείλεται στο ότι για μία μέτρηση βυθοσκόπησης απαιτείται η μετακίνηση μόνο των A και B καλωδίων και επίσης η σταθερότητα του διπόλου τάσης στο κέντρο ελαχιστοποιεί ανεπιθύμητο θόρυβο που οφείλεται σε πλευρικές ασυνέχειες.
- **Διπόλου - Διπόλου**: στην περίπτωση αυτή η απόσταση μεταξύ A, B και M, N είναι ίση με a , ενώ η απόσταση μεταξύ των διπόλων δυναμικού και ρεύματος απέχουν $na \gg a$. Υπερτερεί στην ανάλυση πλευρικών και κατακόρυφων μεταβολών, ωστόσο η αναλογία σήματος προς θόρυβο αποτελεί ένα βασικό μειονέκτημα.
- **Πόλου – Διπόλου**: η διάταξη είναι σχεδόν όμοια με αυτή της διπόλου-διπόλου με τη διαφορά ότι ένα απ' τα καλώδια ρεύματος τοποθετείται σε πολύ μεγάλη απόσταση και αυτό προκαλεί θόρυβο. Παρόλα αυτά έχει πολύ καλή διακριτική ικανότητα.
- **Πόλου- Πόλου**: ουσιαστικά είναι όμοια με την πόλου-διπόλου απλώς το ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απομακρύνεται στο άπειρο. Έτσι, εξαιτίας της μεγάλης απομάκρυνσης των καλωδίων υπάρχει πολύ μεγάλη κάλυψη αλλά ο λόγος σήματος-θορύβου δεν είναι ικανοποιητικός.
- **Πολλαπλής βαθμίδας** : τα ηλεκτρόδια ρεύματος A και B απέχουν απόσταση $f(s+2)a$ και η διαφορά δυναμικού που καταγράφεται προκύπτει απ' τις μετρήσεις του διπόλου δυναμικού σε όλες τις δυνατές θέσεις μεταξύ A και B . Η διάταξη αυτή υπερτερεί στο ότι έχει πολύ ισχυρή διακριτική ικανότητα.

Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα τομογραφιών με διατάξεις διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας διότι κρίθηκαν ιδανικότερες για την απεικόνιση των αργιλικών στρωμάτων.

Για τις μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης και ηλεκτρικής μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL Pro της Iris Instruments. Το συγκεκριμένο όργανο είναι πολυκάναλο και πλήρως αυτοματοποιημένο, παράγοντας συνεχές ρεύμα για την καταγραφή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, φυσικού δυναμικού και επαγόμενης πόλωσης.



Εικόνα 5: SYSCAL PRO, IRIS INSTRUMENTS

1.6 Ευθύ και αντίστροφο πρόβλημα

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τις μετρήσεις δεν δίνουν ακριβείς πληροφορίες για τις αντιστάσεις του εδάφους και συνεπώς οι ηλεκτρικές ιδιότητες από αυτές τις φαινόμενες τιμές δεν απεικονίζονται σωστά. Ο τρόπος για να πλησιάσουν οι τιμές αυτές τις πραγματικές τιμές της ειδικής αντίστασης, είναι μέσω της αντιστροφής.

Κατά την αντιστροφή, υπολογίζεται μέσω σύνθετων μαθηματικών σχέσεων ένα μοντέλο του οποίου οι τιμές του τείνουν να πλησιάσουν τις πραγματικές τιμές ειδικής αντίστασης του υπεδάφους.

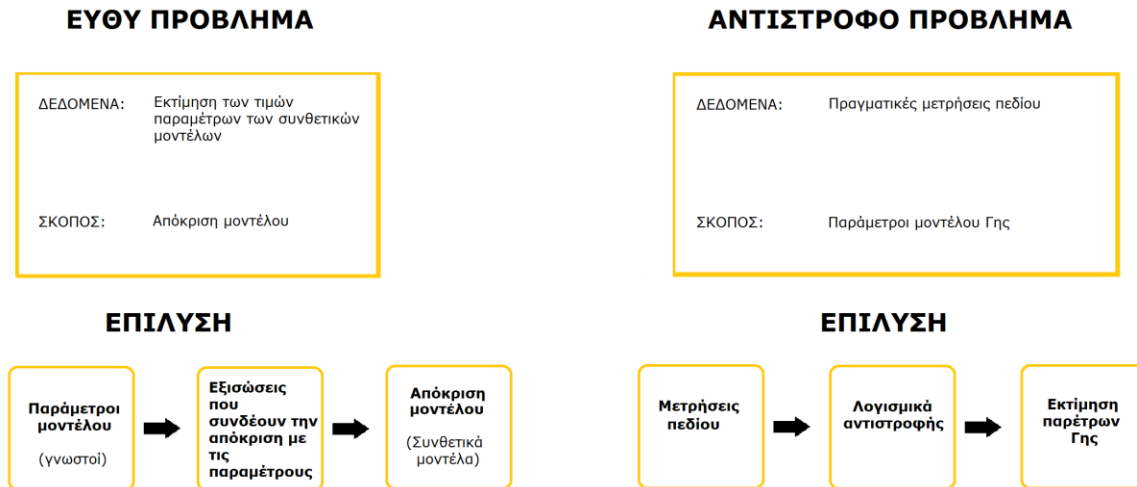
Με την υπόθεση ότι η μεταβλητή x εκφράζει τις παραμέτρους ενός συνθετικού μοντέλου, εννοώντας το πώς κατανέμεται η αντίσταση στο υπέδαφος και η μεταβλητή y αντιπροσωπεύει τα δεδομένα που ανακτήθηκαν από τις μετρήσεις, το ευθύ πρόβλημα αναζητά τον μετασχηματισμό T που συνδέει τις πραγματικές μετρήσεις με τα συνθετικά μοντέλα. Δηλαδή:

$$y = T(x)$$

Από την άλλη, το αντίστροφο πρόβλημα επιλύει τον αντίστροφο μετασχηματισμό T^{-1} όπου οι μετρήσεις από το πεδίο συνδέονται με τα συνθετικά μοντέλα κατανομής της αντίστασης με τη σχέση:

$$x = T^{-1}(y)$$

Έτσι, κατά την ηλεκτρική διασκόπηση τα βήματα που ακολουθούνται συνοπτικά για την επίλυση το ευθέως και αντίστροφου προβλήματος παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα:

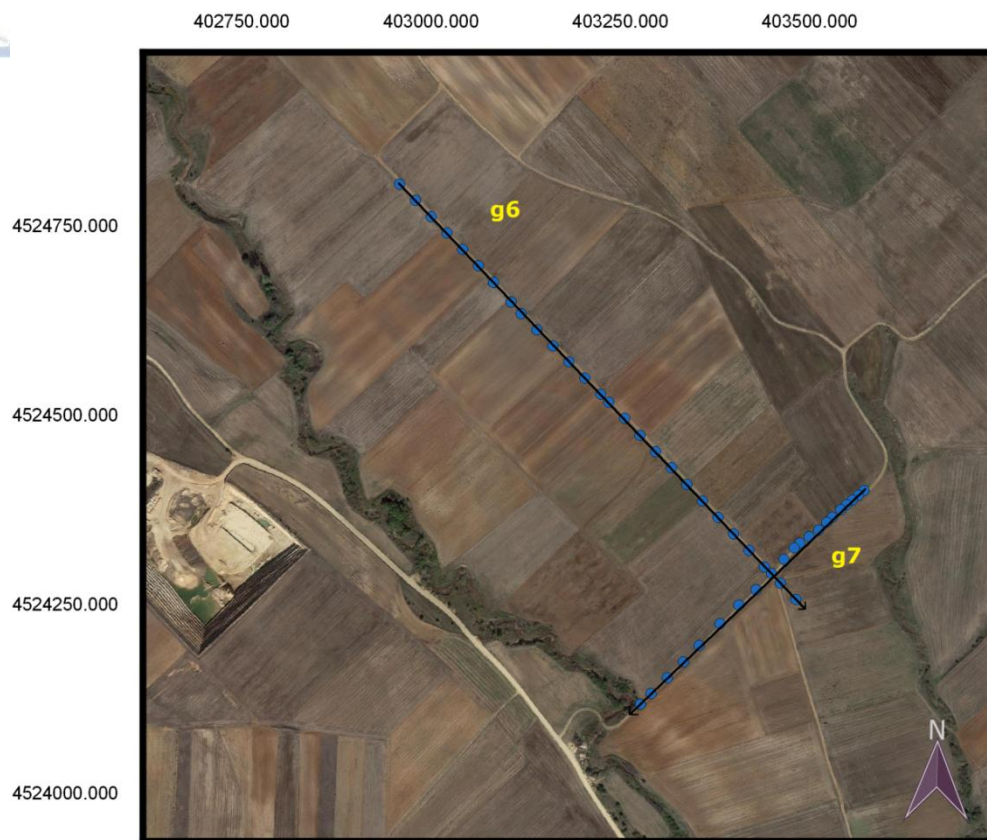


Εικόνα 6: Σχήμα επίλυσης ευθέως και αντίστροφου προβλήματος (τροποποιημένο από Papadopoulos, 2007).

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

2.1 Περιοχή

Η περιοχή της Ξυλοκερατιάς που μελετήθηκε, βρίσκεται δυτικά του Γαλλικού ποταμού σε απόσταση 22χμλ. Ν-ΝΔ του Κιλκίς και 39χλμ Β-ΒΔ από τη Θεσσαλονίκη. Γεωλογικά χαρακτηρίζεται από αργιλικά και αμμώδη υλικά κοντά στην επιφάνεια της γης. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, συλλέχθηκαν δεδομένα από δύο τομές την g6 με μήκος 760μ. και την g7 μήκους 410μ..



Εικόνα 7: Χάρτης από την περιοχή μελέτης, Ξυλοκερατιά, Κιλκίς. Με μπλε είναι οι μετρήσεις του GPS, τα g6, g7 συμβολίζουν τις ονομασίες των τομών και με βέλη οι κατευθύνσεις των μετρήσεων. (Σύστημα συντεταγμένων: GGRS87)

2.2 Μέθοδος Μετρήσεων

Σε κάθε τομογραφία χρησιμοποιήθηκαν 48 ηλεκτρόδια με ενδιάμεση απόσταση 5 μ. (συνολικό μήκος 235μ.) ενώ υπήρχε και αλληλοεπικάλυψη 60 μέτρων (δηλ. 25%) με την επόμενη, κατά μήκος ενός προφίλ (διαδικασία roll-along). Για παράδειγμα, για ένα προφίλ 760μ απαιτούνται 4 τομογραφίες με την διαδικασία που αναφέρθηκε. Αρχικά, οι μετρήσεις έγιναν με την διάταξη διπόλου–διπόλου ώστε η διασκόπηση να φτάσει ένα ικανοποιητικό βάθος και στη συνέχεια με τη διάταξη της πολλαπλής βαθμίδας αφενός για να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα της προηγούμενης και αφετέρου να προκύψουν τομογραφίες όπου διακρίνονται καλύτερα τα επιφανειακά στρώματα. Καθώς η άργιλος έχει γενικά μικρές τιμές αντίστασης όμοιες με τις τιμές ενός υπόγειου υδροφορέα, κρίθηκε αναγκαίο η μέτρηση με επαγόμενη πόλωση έτσι ώστε από τα αποτελέσματα της φορτιστικότητας να μπορούν να επιβεβαιώσουν την ύπαρξη των αργίλων .

Έπειτα από την πραγματοποίηση των μετρήσεων τα πρώτα δεδομένα μεταφέρονται από το όργανο μέτρησης στον υπολογιστή και από εκεί ξεκινά η πρώτη τους επεξεργασία. Αρχικά το λογισμικού Prosys II, που προσφέρεται από την IRIS Instruments, επιτρέπει την μεταφορά, επεξεργασία, διόρθωση και εξαγωγή των δεδομένων της φαινόμενης αντίστασης σε αρχείο δυαδικής μορφής *.bin. Πιο συγκεκριμένα, από τα αρχικά δεδομένα απομακρύνονται οι προβληματικές τιμές, οι οποίες είτε προέκυψαν από κάποιο σφάλμα του οργάνου μέτρησης, είτε θεωρούνται θόρυβος ή απλώς αφαιρούνται εξαιτίας καθορισμού παραμέτρων στις τιμές.

#	El-array	Spa.1	Spa.2	Spa.3	Spa.4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In
7	Dipole Dipole	0.00	5.00	40.00	45.00	7.58	0.72	0.00	25.49	-1.097	1145.761
8	Dipole Dipole	0.00	5.00	45.00	50.00	8.16	1.45	0.00	-7.90	-0.827	1145.761
9	Dipole Dipole	0.00	5.00	50.00	55.00	8.67	0.04	0.00	-32.41	-0.639	1145.761
10	Dipole Dipole	0.00	5.00	55.00	60.00	8.00	1.03	0.00	49.73	-0.442	1145.761
11	Dipole Dipole	0.00	10.00	50.00	60.00	8.70	0.14	0.00	17.37	-2.450	1061.866
12	Dipole Dipole	0.00	10.00	60.00	70.00	8.24	0.42	0.00	-13.58	-1.326	1061.866
13	Dipole Dipole	0.00	10.00	70.00	80.00	9.17	0.84	0.00	-18.92	-0.923	1061.866
14	Dipole Dipole	0.00	10.00	80.00	90.00	9.39	1.07	0.00	12.21	-0.630	1061.866
15	Dipole Dipole	0.00	10.00	90.00	55.00	8.69	0.14	0.00	-28.88	3.894	1061.866
16	Dipole Dipole	0.00	10.00	55.00	65.00	8.46	0.40	0.00	8.86	-1.778	1061.866
17	Dipole Dipole	0.00	10.00	65.00	75.00	8.66	0.42	0.00	61.87	-1.091	1061.866
18	Dipole Dipole	0.00	10.00	75.00	85.00	10.02	0.68	0.00	6.93	-0.817	1061.866
19	Dipole Dipole	0.00	15.00	80.00	95.00	9.14	0.58	0.00	40.46	-1.643	1238.984
20	Dipole Dipole	0.00	15.00	95.00	110.00	11.80	0.91	0.00	25.58	-1.253	1238.984
21	Dipole Dipole	0.00	15.00	110.00	85.00	10.48	0.57	0.00	-6.22	2.244	1238.984

Εικόνα 8: Εμφάνιση τιμών στο Prosys II ύστερα από φιλτράρισμα των τιμών από "ψεύτικες" μετρήσεις του οργάνου. Τα δεδομένα από 22124 μειώθηκαν στα 21053.

Επόμενο βήμα είναι ο διαχωρισμός των μετρήσεων σε επιμέρους αρχεία μία διαδικασία που γίνεται αυτόματα διαλέγοντας την επιλογή split. Στα αρχεία που προκύπτουν, λόγω σύμβασης που έγινε, το πρώτο ψηφίο φανερώνει την θέση των μετρήσεων κατά μήκος των οδεύσεων, ενώ το δεύτερο ψηφίο την διάταξη ή την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε (1←διπόλου-διπόλου, 2←πολλαπλής βαθμίδας, 3←επαγόμενη πόλωση). Για παράδειγμα στην Εικόνα 9 το αρχείο 11_1 αντιστοιχεί στην πρώτη μέτρηση της πρώτης οδεύσεως όπου χρησιμοποιήθηκε η διάταξη διπόλου-διπόλου. Μετά την κάτω παύλα "_" οι αριθμοί αντιστοιχούν στη θέση μνήμης μέσα στο όργανο.

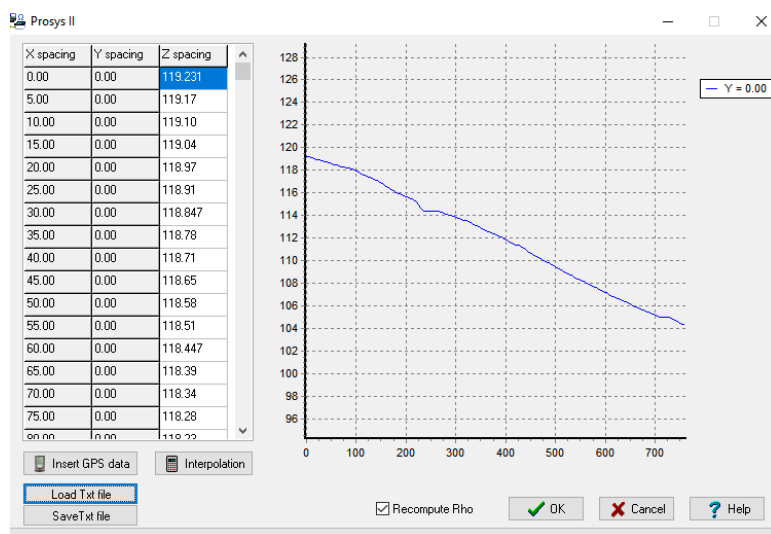
Όνομα	Ημερομηνία τροποποι...	Τύπος	Μέγεθος
11_1	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	274 KB
12_1072	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	621 KB
21_5246	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	274 KB
22_3159	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	621 KB
31_6317	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	274 KB
32_7388	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	621 KB
41_11562	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	274 KB
42_9475	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	621 KB
43_12633	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	621 KB
51_16807	21/5/2021 6:03 μμ	Αρχείο BIN	274 KB

Εικόνα 9: Αρχεία δεδομένων .bin μετά τον διαχωρισμό τους στο Prosys II.

Τελευταίο στάδιο είναι η ένωση των τομογραφιών της εκάστοτε διάταξης κατά μήκος της κάθε τομής με αφαίρεση ορισμένων μετρήσεων που δείχνουν να αποτελούν θόρυβο και εξαγωγή των τελικών αρχείων σε μορφή .dat ώστε να αναγνωσθούν από τα λογισμικά αντιστροφής.

2.3.2 Τοπογραφικά στοιχεία

Παράλληλα με τις μετρήσεις ηλεκτρικών αντιστάσεων, έγιναν καταγραφές τοπογραφικών σημείων με GPS πάνω στις οδεύσεις με βήμα 20μ. ή και 30μ.. Στη συνέχεια οι συντεταγμένες περάστηκαν στο QGIS πάνω από δορυφορικό χάρτη της Google και γνωρίζοντας το υψόμετρο από κάθε τοπογραφικό σημείο, δημιουργήθηκε μέσω του Prosys II μία υψομετρική καμπύλη για κάθε τομή η οποία εξήχθη σαν αρχείο .dat.



Εικόνα 10: Εισαγωγή τοπογραφίας στην τομή g6 στο Prosys II.

2.3.3 RES2DINV

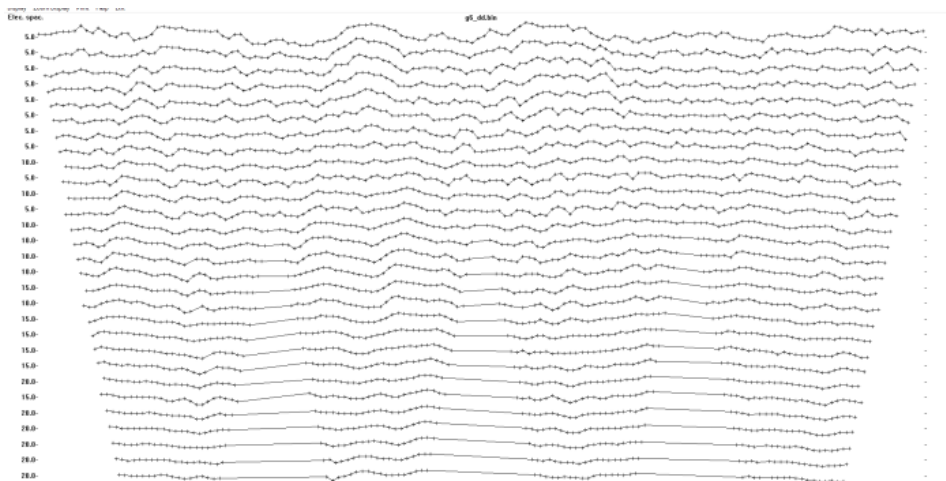
Το λογισμικό RES2DINV καθορίζει αυτόματα ένα μοντέλο δύο διαστάσεων για το υπέδαφος, από τα δεδομένα που ανακτήθηκαν από γεωηλεκτρικές μετρήσεις. Το πρόγραμμα είναι σχεδιασμένο να αντιστρέφει ένα μεγάλο όγκο δεδομένων (από 200 έως 21000 μετρήσεις) που συλλέχθηκαν από ένα σύστημα με μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων (25-16000 ηλεκτρόδια). Εφόσον τα δεδομένα των τομών που μελετώνται έχουν αποθηκευτεί, εισάγονται στο RES2DINV ώστε να γίνει η αντιστροφή τους.

Το RES2DINV είναι σχεδιασμένο ώστε να επεξεργάζεται και να δημιουργεί μοντέλα από τα γεωφυσικά δεδομένα που συλλέγονται στο ύπαιθρο, απεικονίζοντας την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους κατά μήκος και βάθος μιας τομής. Ουσιαστικά, το πρόγραμμα διαιρεί το υπέδαφος σε παραλληλόγραμμα όπου το καθένα έχει μια συγκεκριμένη τιμή ειδικής αντίστασης υπολογίζοντας τις φαινόμενες τιμές ειδικής αντίστασης και στη συνέχεια συγκρίνοντας αυτές με τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης που μετρήθηκαν. Κατά τη διάρκεια της αντιστροφής ορισμένες τιμές που

εμφανίζουν μεγάλο σφάλμα απορρίπτονται, ενώ μπορεί να καθοριστεί ο αριθμός των επαναλήψεων της αντιστροφής ώστε να προκύψει μικρό σφάλμα. Με την επιλογή READ εμφανίζονται τα στοιχεία της τομής και υπάρχει η δυνατότητα αφαίρεσης δεδομένων που δείχνουν να είναι εσφαλμένα με την επιλογή.

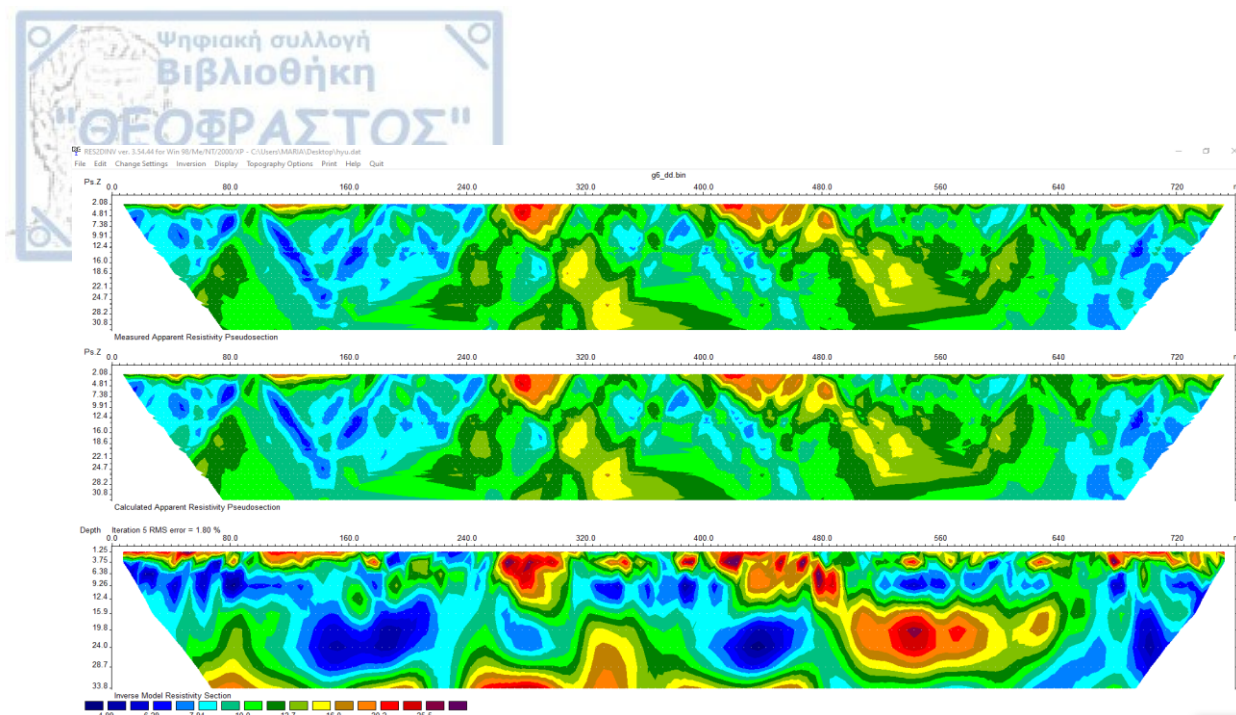
RES2DINV ver. 3.54.44 for Win 98/Me/NT/2000/XP - D:\downloads\thesis_proc\g6\dd_topo.Dat
File Edit Change Settings Inversion Display Topography Options Print Help Quit

```
g6_dd.bin
Electrode spacing is 5.000.
General array
Type of resistivity data (1=resistance,0=resistivity)
Total number of datum points is 3493.
X-distances are surface distances.
Topography present type 2
Minimum electrode location is 0.0.
Minimum electrode spacing is 5.0.
Total number of data levels is 29.
Total number of electrodes is 153.
```



Εικόνα 11: Ανάγνωση και απεικόνιση δεδομένων στο RES2DINV.

Τέλος, με την επιλογή Inversion→ Least squares Inversion ξεκινά η αντιστροφή των δεδομένων δημιουργώντας την τελική τομογραφία με δυνατότητα προσθήκης τοπογραφίας. Κατά την αντιστροφή εμφανίζονται οι τομές με τις τιμές των μετρήσεων από τα αρχικά δεδομένα ενώ καθώς επεξεργάζονται ανανεώνονται συνεχώς οι τομές ώστε να πραγματοποιηθούν όλες οι επαναλήψεις των αντιστροφών που θα μειώσουν το σφάλμα RMS. Για την εκάστοτε τομή εμφανίζονται τρία γραφήματα, όπου το πρώτο είναι η ψευδοτομή των μετρήσεων, το δεύτερο η ψευδοτομή των δεδομένων της αντιστροφής και το τρίτο η τελική τομή με τις ανεστραμμένες τιμές ειδικών αντιστάσεων. Για να θεωρηθεί επιτυχημένη η αντιστροφή θα πρέπει οι δύο πρώτες ψευδοτομές να είναι όσο το δυνατό όμοιες (Εικόνα 12).

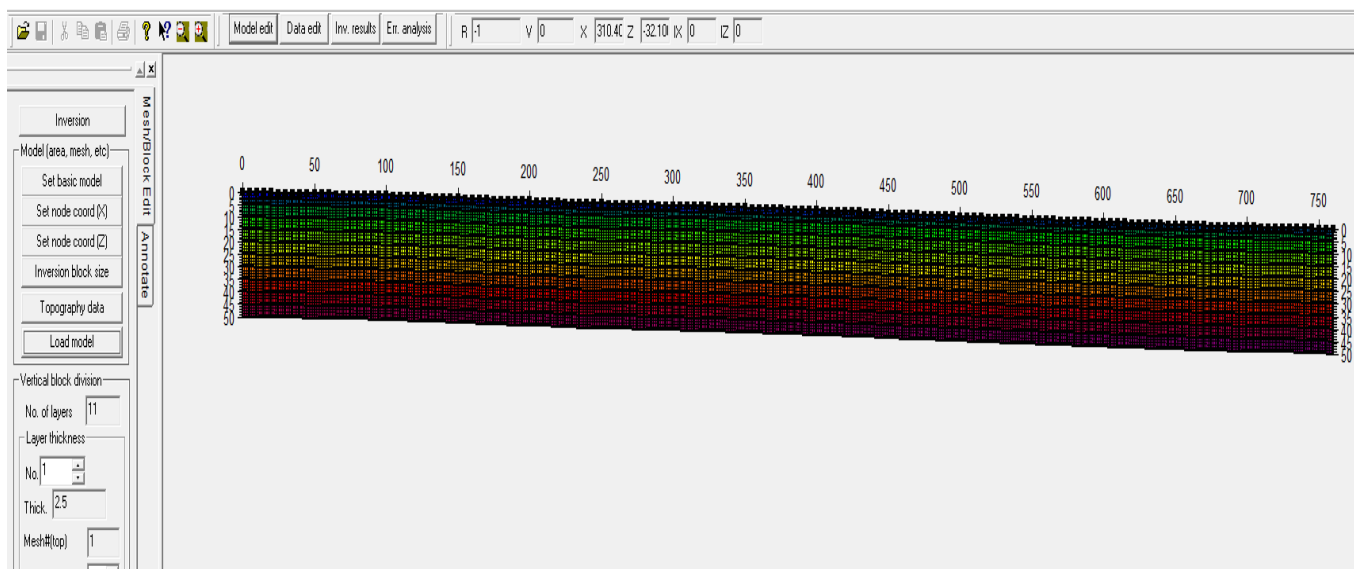


Εικόνα 12: Διαδικασία αντιστροφής στο RES2DINV

2.3.4 DC_2DPRO

Πρόκειται για ένα ακόμη λογισμικό όπου παράγει μοντέλα αντιστροφής που απεικονίζουν την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος. Τα βήματα που ακολουθούνται για την δημιουργία του τελικού μοντέλου είναι τα εξής:

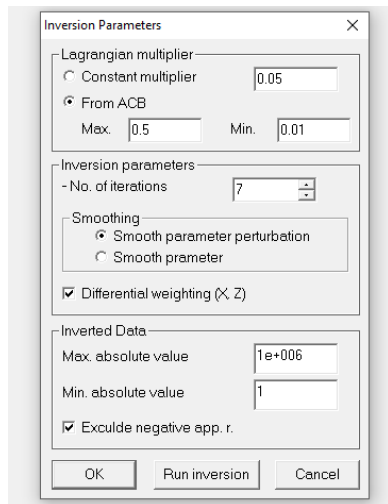
1^ο Βήμα: α) Εισαγωγή δεδομένων από .dat αρχείο β) προσθήκη τοπογραφικών στοιχείων πριν την έναρξη της αντιστροφής και γ) καθορισμός παραμέτρων, όπως το βάθος και το μήκος της τομής.



Εικόνα 13: Εισαγωγή δεδομένων στο DC_2DPRO πριν την αντιστροφή

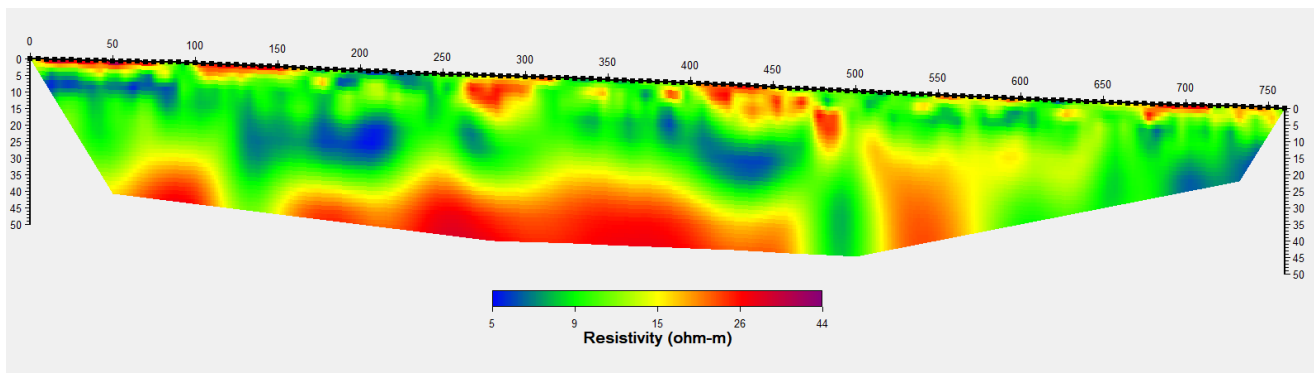
2^ο Βήμα: Επιλογή του αριθμού αντιστροφών (No of iterations) ώστε να προκύψει το μικρότερο δυνατό ποσοστό σφάλματος (RMS).

3^ο Βήμα: Εκτέλεση αντιστροφής και δημιουργία μοντέλου με την πραγματική κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης.



Στο πρόγραμμα RES2DINV ορίστηκε ο αριθμός των αντιστροφών να είναι πέντε ενώ στο DC_2DPRO επτά, χωρίς ωστόσο να υπάρχει σημαντική διαφορά καθώς μετά από ένα σημείο το σφάλμα ελαχιστοποιείται σε πολύ μικρό βαθμό.

Εικόνα 14: Ρυθμίσεις παραμέτρων πριν την αντιστροφή



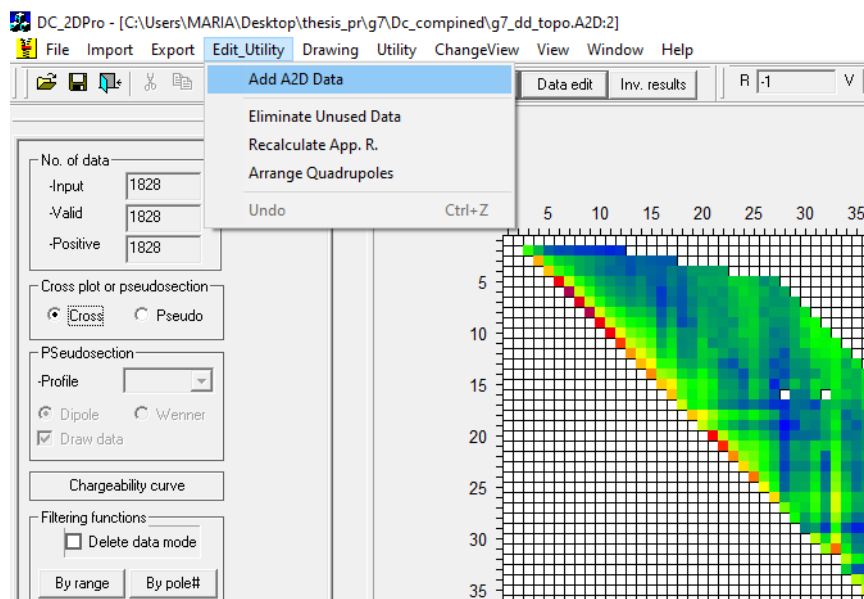
Εικόνα 15: Μοντέλο κατανομής πραγματικής αντίστασης έπειτα από αντιστροφή στο DC_2DPRO.

Για να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων και από τα δύο λογισμικά θα έπρεπε τα τελικά μοντέλα να έχουν την ίδια χρωματική κλίμακα καθώς και την ίδια αναλογία μεταξύ οριζόντιου και κάθετου άξονα. Για το λόγο αυτό, ακολούθησε εξαγωγή των δεδομένων αντιστροφής και από τα δύο προγράμματα RES2DINV και DC_2DPRO ώστε να περαστούν στο πρόγραμμα Surfer και να αποκτήσουν τα επιθυμητά κοινά χαρακτηριστικά.

2.3.4.1 Σύνθεση μοντέλων από τις δύο διατάξεις στο DC_2DPRO

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται σημαντικά η προσπάθεια για εξέλιξη τεχνικών στην ηλεκτρική τομογραφία, μέσω των οποίων θα συλλέγεται η μέγιστη πληροφορία από κάθε σετ δεδομένων και ταυτόχρονα θα μειώνεται η ποσότητα των δεδομένων που θα πρέπει να συλλεχθούν. Η απεικόνιση μετρήσεων μια περιοχής με παραπάνω από μία διατάξεις, που έχουν θεωρητικά αλλά και πρακτικά διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, είναι διαφορετική. Για παράδειγμα οι διατάξεις Wenner και Schlumberger φαίνεται να έχουν καλύτερη απεικόνιση σε βάθος ενώ οι πόλου-διπόλου και διπόλου-διπόλου παρουσιάζουν καλύτερη ανάλυση σε πλευρικές μεταβάσεις. Έχει προταθεί ότι τα συνθετικά σετ δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικές διατάξεις παρέχουν περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με το όταν είναι μεμονωμένα. Θεωρητικά συνθέτοντας τις μετρήσεις μιας περιοχής με διαφορετικές διατάξεις, θα συνδυάζονται και τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα της κάθε διάταξης ώστε να παραχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, θεωρήθηκε αναγκαίο να συνδυαστούν οι διατάξεις της πολλαπλής βαθμίδας με αυτή της διπόλου-διπόλου ώστε να σχηματιστεί μια καλύτερη εικόνα, εκμεταλλευόμενοι τα θετικά στοιχεία της καθεμιάς.

Το συνδυαστικό μοντέλο πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα DC_2DPRO μέσω του οποίου δημιουργήθηκαν πρώτα δύο αρχεία*.A2D (από τις αντίστοιχες μετρήσεις πολλαπλής βαθμίδας και διπόλου-διπόλου) χωρίς να αντιστραφούν. Στη συνέχεια, έχοντας ανοιχτό το ένα αρχείο, μέσω της επιλογής Add A2D Data (Εικόνα 16) εισάγονται και οι μετρήσεις της δεύτερης διάταξης ώστε μετά να ακολουθήσει η αντιστροφή του συνθετικού μοντέλου.



Εικόνα 16: Επιλογή προσθήκης αρχείου *.A2D για την δημιουργία συνθετικού μοντέλου.

2.3.5 Surfer | Golden software

Το Surfer είναι ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης παρέχοντας δυνατότητες όπως τη δημιουργία χαρτών, τον σχεδιασμό ισοϋψών, εικόνων, διανυσμάτων κ.ο.κ. μέσω των λογιστικών φύλλων και των εκτεταμένων επιλογών που προσφέρει. Η χρήση του είναι ευρεία για την μοντελοποίηση του εδάφους, ανάλυση επιφανειών, δημιουργία και αλληλοεπικάλυψη χαρτών δύο διαστάσεων και πολλές άλλες εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων αντιστροφής.

Έπειτα από την εξαγωγή τους από τα προγράμματα RED2DINV και DC_2DPRO, τα δεδομένα εισάγονται σε ένα υπολογιστικό φύλλο του Surfer με σκοπό να δημιουργηθεί το πλέγμα της τομής από τα σημεία και τιμές της αντίστασης που εισήχθησαν. (Εικόνα 17)

Surfer - [g6_mg_topo_topreslinearx]

File Edit View Format Data Tools Window Help

X: 0 Y: 0 W: 0 H: 0

Sheet1 g6_mg_topo_topreslinearx

	A	B	C	D	E	F
1	X-location	Z-location	Resistivity			
2	7.5	117.92	14.11			
3	12.5	117.923	22.36			
4	17.5	117.718	24.39			
5	22.5	117.645	17.05			
6	27.5	117.703	19.4			
7	32.5	117.634	23.6			
8	37.5	117.56	24.31			
9	42.5	117.357	18.05			
10	47.5	117.283	20.91			
11	52.5	117.334	32.89			
12	57.5	117.256	21.23			

Εικόνα 17: Δεδομένα αντιστροφής στο υπολογιστικό φύλλο.

Στη συνέχεια για τη δημιουργία του τελικού μοντέλου καθορίζονται τα δεδομένα από τις στήλες X,Y,Z, η μέθοδος που θα δημιουργήσει το πλέγμα καθώς επίσης και η γεωμετρία του πλέγματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε η μέθοδος Kriging. (Εικόνα 18)

Grid Data - Select Data

Gridding Method

- Kriging
- Cokriging
- Inverse Distance to a Power
- Triangulation with Linear Interpolation
- Minimum Curvature
- Natural Neighbor
- Nearest Neighbor
- Local Polynomial
- Radial Basis Function
- Polynomial Regression
- Modified Shepard's Method
- Data Metrics
- Moving Average

Dataset 1 (0 data points)

<None>

X:

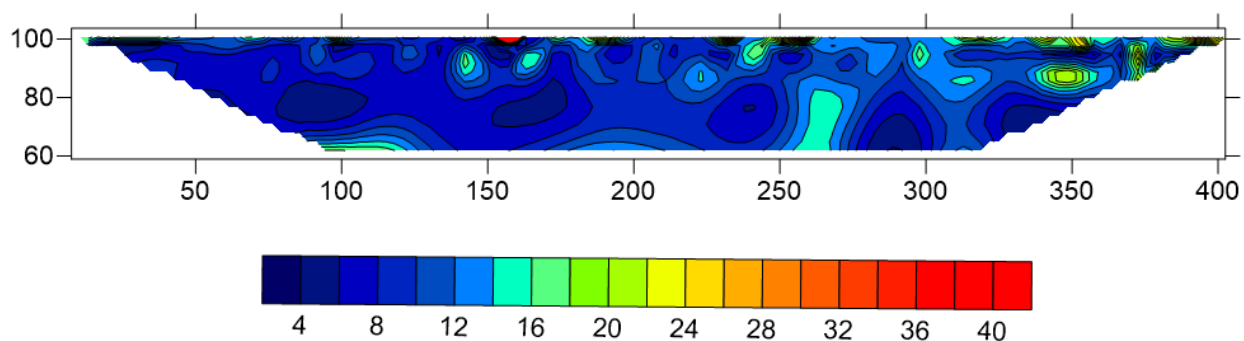
Y:

Z:

Εικόνα 18: Δημιουργία πλέγματος στο Surfer.

Μέσω του Kriging γνωστό και με τον όρο παλινδρόμηση του θεωρήματος Gauss δίνεται η καλύτερη γραμμική πρόβλεψη σημείων σε περιοχές που δεν υπάρχουν δεδομένα. Η χρήση της μεθόδου είναι ευρεία στη χωρική ανάλυση και στα πειράματα προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, στα γεωστατικά μοντέλα τα δεδομένα των μετρήσεων ερμηνεύονται ως αποτέλεσμα μιας τυχαίας διαδικασίας όπου με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η δημιουργία μιας μεθοδολογικής βάσης για τις τελικές χωρικές τιμές που προκύπτουν σε περιοχές χωρίς μετρήσεις. Μέσω αυτής της διαδικασίας προσδιορίζεται η 'αβεβαιότητα' που συνδέεται με την εκτιμήτρια συνάρτηση δηλαδή της συνάρτησης ενός τυχαίου δείγματος που χρησιμοποιείται για να βρεθεί μια άγνωστη παράμετρος μίας συνάρτησης κατανομής.

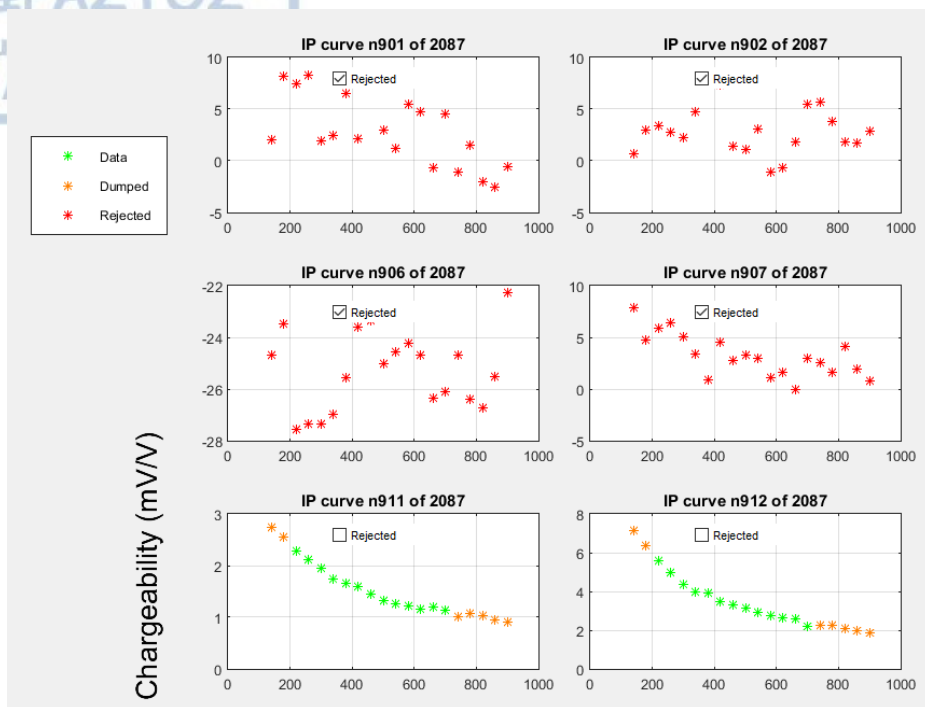
Εφόσον λοιπόν έχει προηγηθεί η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος, εμφανίζεται η επιθυμητή τομή και ύστερα προστίθενται διάφορα στοιχεία όπως χρωματική κλίμακα ή αλλάζουν τυχόν μορφές των αξόνων για να γίνουν πιο κατανοητές στον αναγνώστη (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Παράδειγμα τελικής τομής ύστερα από επεξεργασία στο Surfer.

2.3.6 Επεξεργασία δεδομένων επαγόμενης πόλωσης

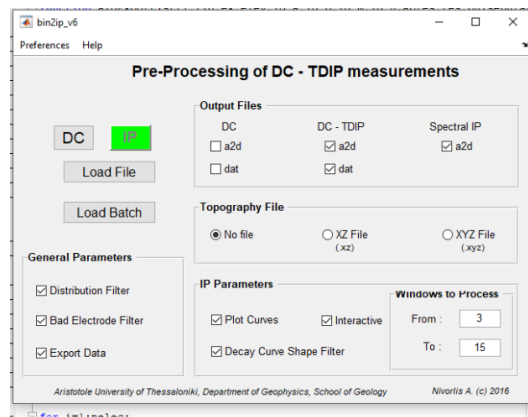
Τα δεδομένα της επαγόμενης πόλωσης που προκύπτουν από τις μετρήσεις είναι ουσιαστικά καμπύλες πτωτικής τάσης όπου ο άξονας x αντιστοιχεί στο χρόνο και ο γ στην ηλεκτρική τάση ενώ το εμβαδόν που καλύπτεται κάτω απ την καμπύλη αντιπροσωπεύει την φορτιστικότητα. Η φορτιστικότητα αναμένεται υψηλή στην περιοχή εξαιτίας των αργίλων που υπάρχουν. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πολλοί παράγοντες είναι δυνατό να προκαλέσουν θόρυβο στις μετρήσεις και να καταγραφούν δεδομένα που δεν αντιστοιχούν στην πραγματικότητα.



Εικόνα 20 : Μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης: με κόκκινο είναι οι μη αποδεκτές ενώ με πράσινο οι αποδεκτές καμπύλες φορτιστικότητας.

Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να γίνει ένας έλεγχος των καμπυλών που έχουν προκύψει ώστε να αφαιρεθούν τυχόν δεδομένα που δεν συμβαδίζουν με την πραγματικότητα. Έτσι, μέσω ενός αλγορίθμου στο λογισμικό προγραμματισμού της Matlab, γίνεται έλεγχος όλων των δεδομένων της επαγόμενης πόλωσης και αφαιρούνται χειροκίνητα τυχόν καμπύλες που θεωρούνται άκυρες.

Καθώς τρέχει ο αλγόριθμος, ζητείται να οριστούν οι μορφές των αρχείων που θα εξαχθούν μετά το πέρας της επεξεργασίας, το αν θα προστεθούν τοπογραφικά δεδομένα και ποιες παράμετροι θα εμφανιστούν ανοίγοντας τις μετρήσεις (εικόνα 21).



Εικόνα 21: Εισαγωγή δεδομένων επαγόμενης πόλωσης σε αλγόριθμο της Matlab για επεξεργασία.



Μετά το πέρας της επεξεργασίας, τα τελικά δεδομένα εξάγονται με τη μορφή *.dat και A2D ώστε να μπορούν να διαβαστούν από το τα λογισμικά αντιστροφής DC_2Dpro και RES2DINV.

2.3.6.1 Ομαλοποίηση δεδομένων επαγόμενης πόλωσης

Η απόκριση των πετρωμάτων και του εδάφους κατά την εισαγωγή ρεύματος σε αυτά είναι συνάρτηση της λιθολογίας και της αγωγιμότητας των υγρών. Η ερμηνεία των δεδομένων επαγόμενης πόλωσης αφορούν τυπικά τις συμβατικές παραμέτρους του πεδίου που είναι η φορτιστικότητα, η επίδραση του ποσοστού συχνότητας και η γωνία φάσης. Αυτές οι παράμετροι εξαρτώνται από τους μηχανισμούς πόλωσης της επιφάνειας και τις παραμέτρους της ηλεκτρικής αγωγιμότητας όγκου. Συνεπώς, έχουν χαμηλή ποσοτικοποίηση των επιφανειακών διεργασιών πόλωσης που ενδιαφέρουν τον γεωφυσικό. Μια παράμετρος που ποσοτικοποιεί το μέγεθος της πολικότητας της επιφάνειας είναι η ομαλοποιημένη φορτιστικότητα που προκύπτει ως πηλίκο της μετρούμενης φορτιστικότητας με την ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Για τα μη μεταλλικά ορυκτά, το τετράγωνο της αγωγιμότητας και η κανονικοποιημένη φορτιστικότητα είναι στενά συνδεδεμένες με την λιθολογία. Εργαστηριακά πειράματα δείχνουν ότι η φορτιστικότητα συνδέεται έντονα με την ηλεκτρική αντίσταση που είναι συνάρτηση της αλατότητας, του πορώδους και της περιεκτικότητας της αργίλου ενώ σχετίζεται με τις διεργασίες πόλωσης της επιφάνειας (Slater, Lee, Lesmes, David, 2002).

Η μέθοδος επαγόμενης πόλωσης είναι ένα πολύτιμο γεωφυσικό εργαλείο καθώς παρέχει ξεχωριστές πληροφορίες για την ισχύ της πόλωσης χαμηλής συχνότητας που προκύπτει στο υπέδαφος. Εφόσον ομαλοποιηθεί καθίσταται ανεξάρτητο από παραμέτρους που μπορεί να δίνουν λανθασμένα αποτελέσματα. Συνεπώς ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα ώστε να γίνει η ομαλοποίηση:

- Αντιστροφή 'διορθωμένων' καμπυλών και εξαγωγή αποτελεσμάτων αντιστροφής με μορφή .dat
- Εισαγωγή του αρχείου σε υπολογιστικό φύλλο
- Δημιουργία επιπλέον στήλης με τιμές το πηλίκο της κάθε μέτρησης φορτιστικότητας με την αντίστοιχη τιμή ηλεκτρικής αντίστασης
- Αποθήκευση αρχείου και εισαγωγή στο Surfer για δημιουργία τελικής απεικόνισης

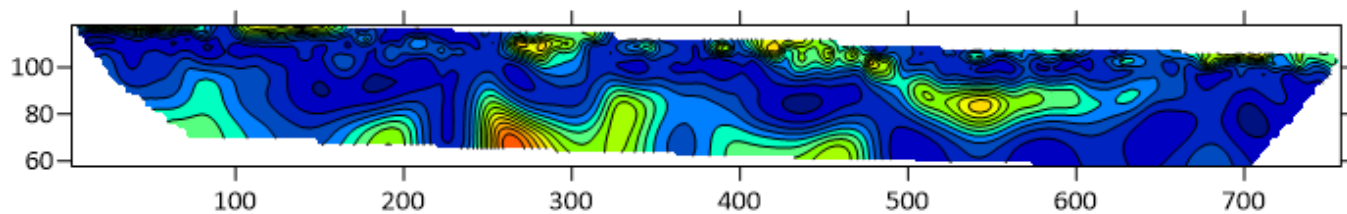
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Ηλεκτρική Τομογραφία

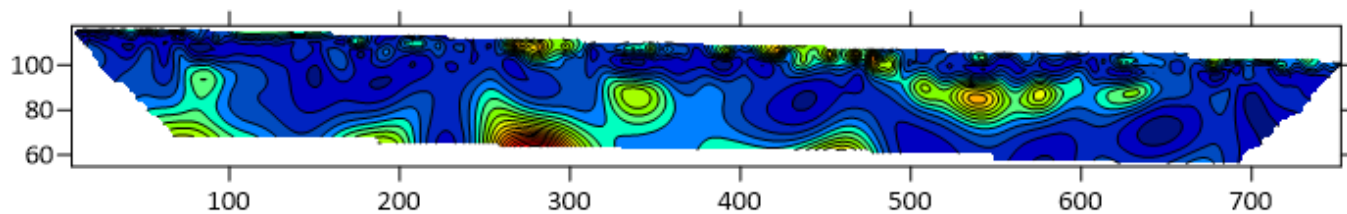
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ηλεκτρικής τομογραφίας για τις τομές g6, g7:

1) Αποτελέσματα τομής g6 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου

DC_2DPRO

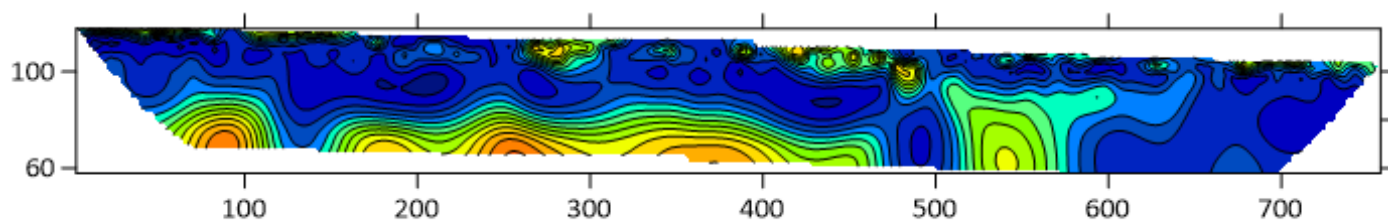


RES2DIVN

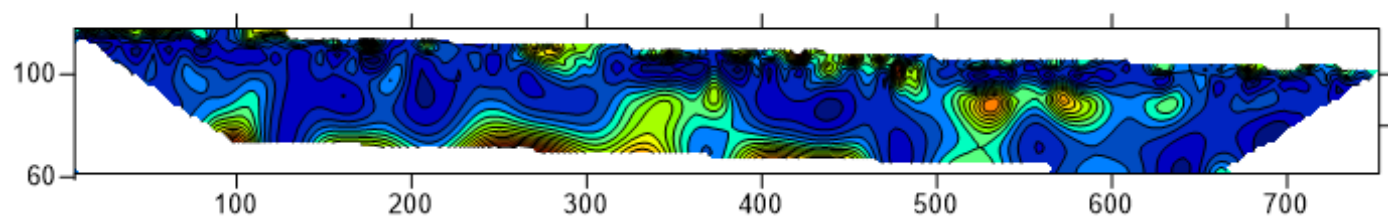


2) Αποτελέσματα τομής g6 με τη διάταξη πολλαπλής βαθμίδας

DC_2DPRO



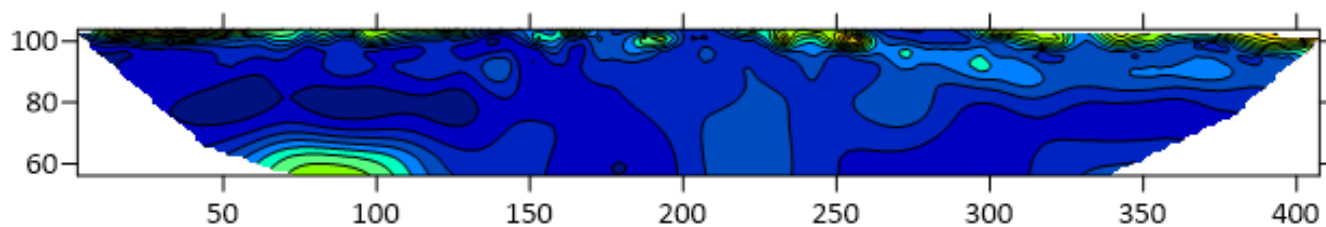
RES2DIVN



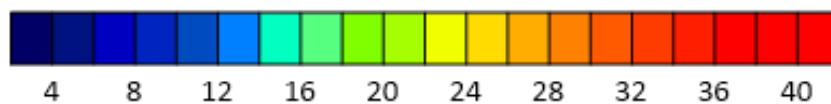
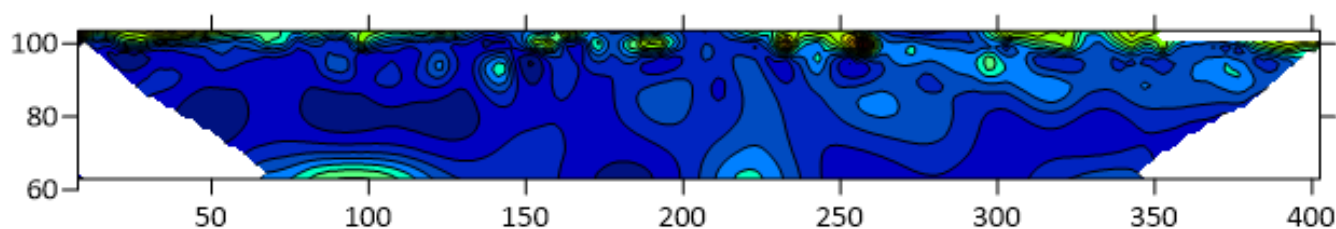
Resistivity (Ohm-m)

3) Αποτελέσματα τομής g7 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου

DC_2DPRO



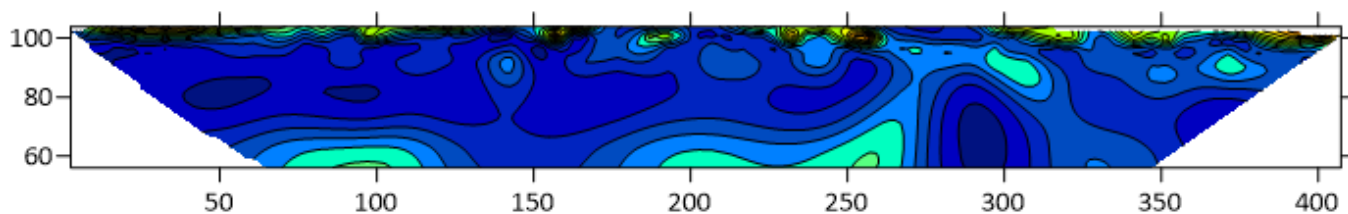
RES2DIVN



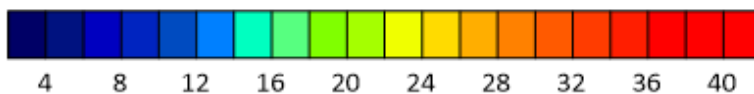
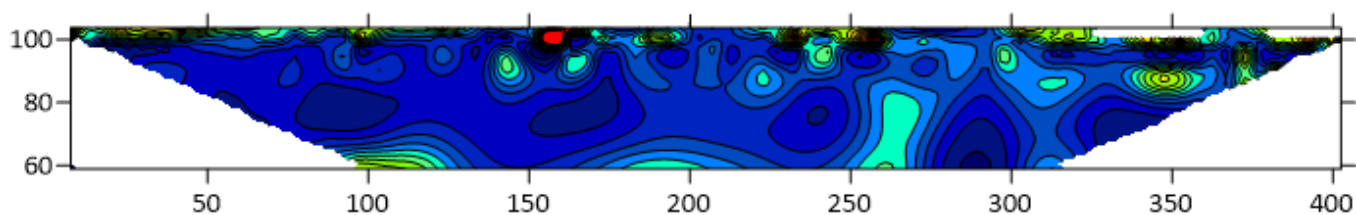
Resistivity (Ohm-m)

4) Αποτελέσματα τομής g7 με τη διάταξη πολλαπλής βαθμίδας

DC_2DPRO



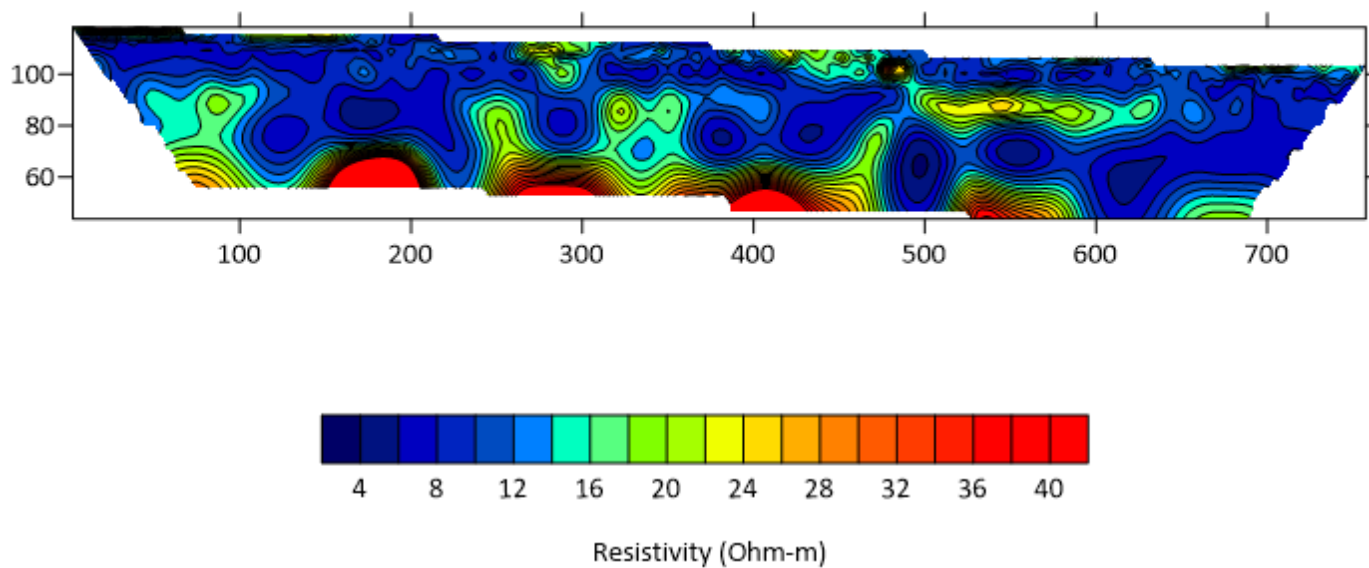
RES2DIVN



Resistivity (Ohm-m)

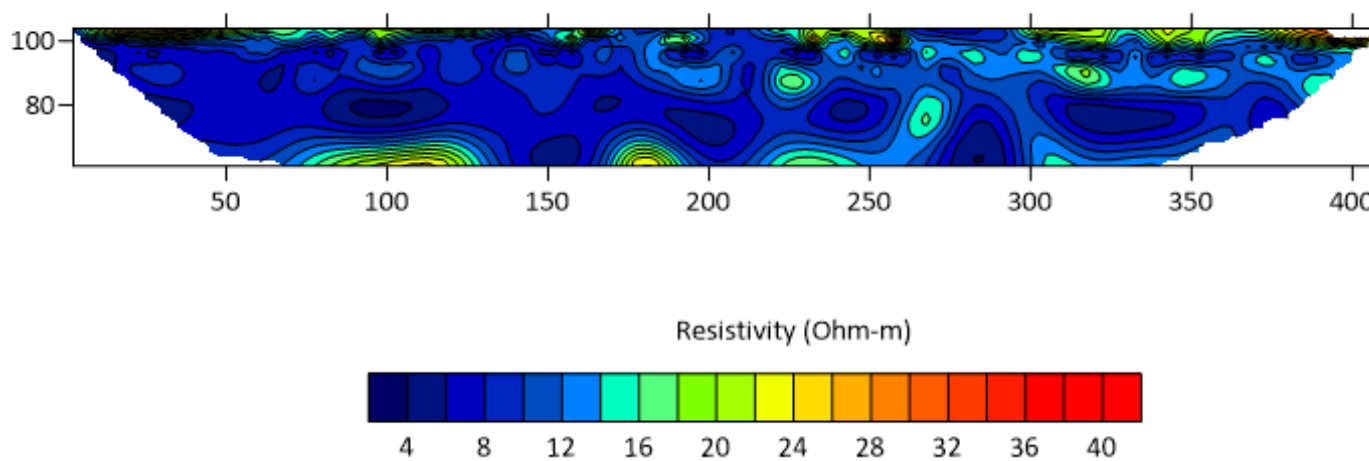
5) Αποτελέσματα τομής g6 με συνδυασμό μεθόδων

g6 with compined methods

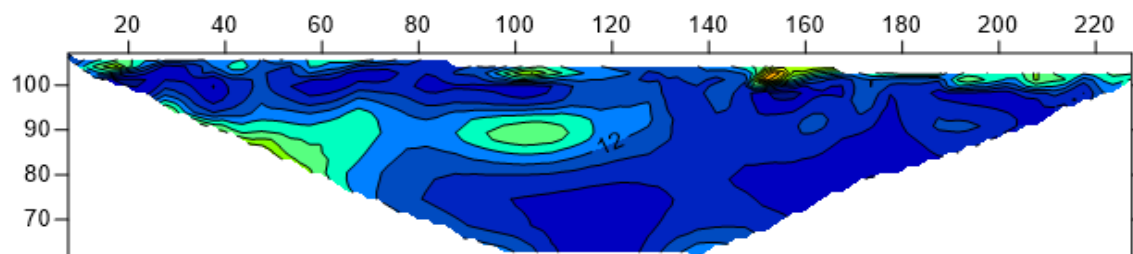


6) Αποτελέσματα τομής g7 με συνδυασμό μεθόδων

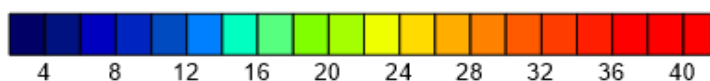
g7 with compined methods



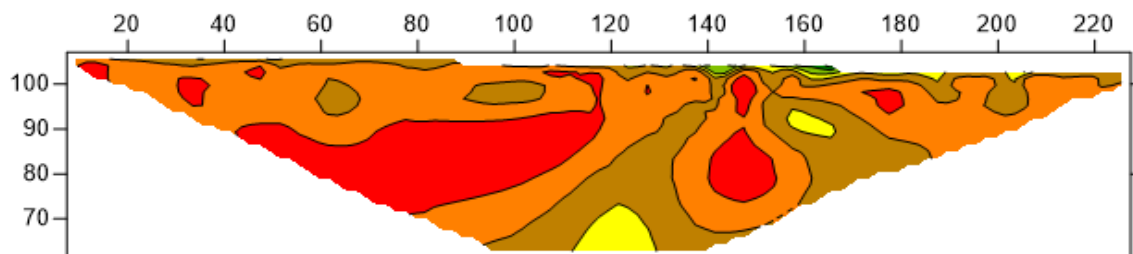
α) Ηλεκτρική τομογραφία σε σύγκριση με τα αποτελέσματα αντιστροφής επαγόμενης πόλωσης με αφιλτράριστα και φιλτραρισμένα δεδομένα:



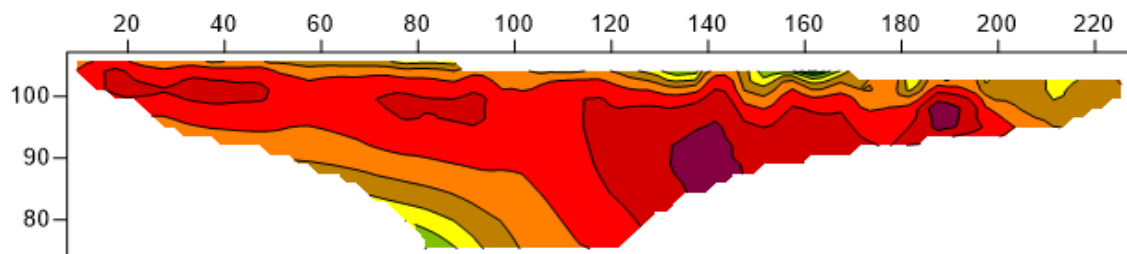
Resistivity (Ohm-m)



IP without filtering



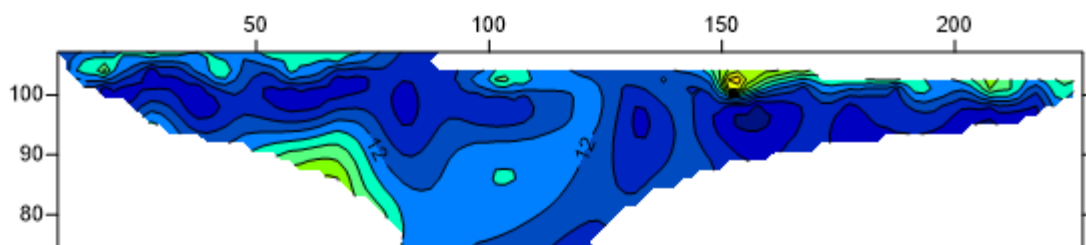
IP after Matlab filtering



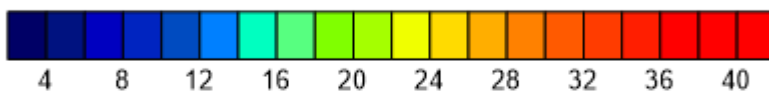
Chargeability (mV/V)



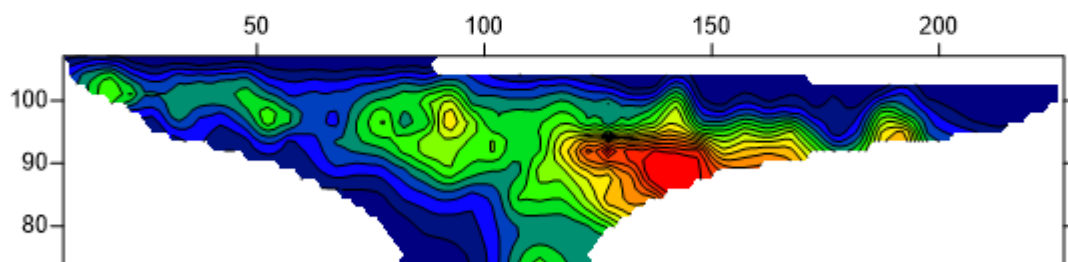
β) Τομή ηλεκτρικής τομογραφίας και τομή με ομαλοποιημένες τιμές επαγόμενης πόλωσης από επεξεργασία στο λογισμικό RES2DIVN:



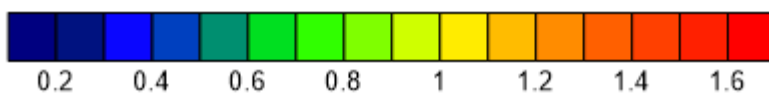
Resistivity (Ohm-m)



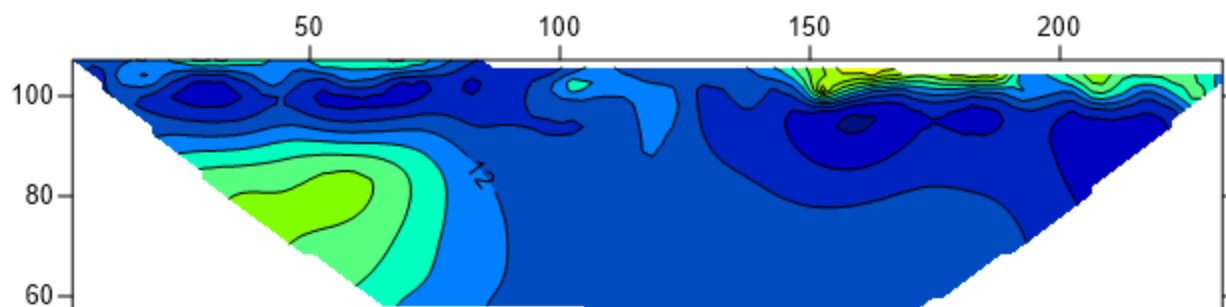
Normalized IP (RES2DIVN)



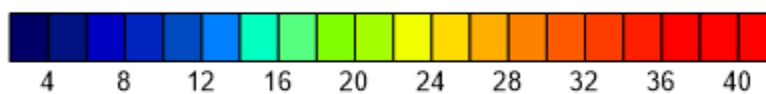
Normalized Chargeability MNa (mS/M)



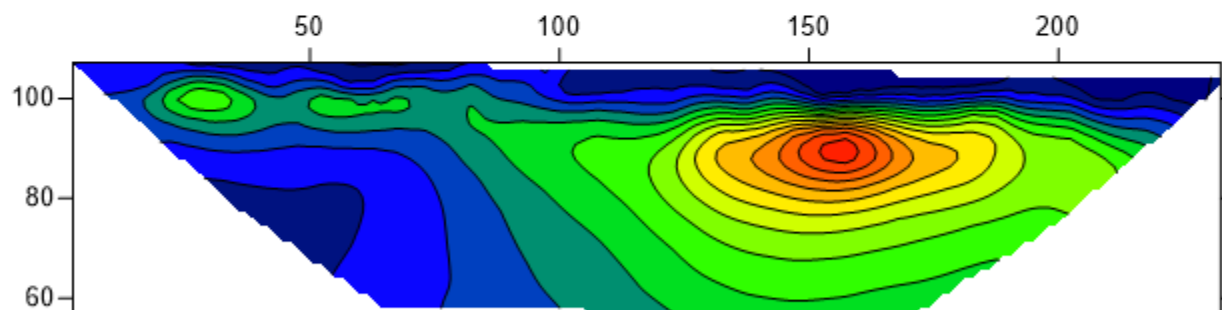
γ) Τομή ηλεκτρικής τομογραφίας και τομή με ομαλοποιημένες τιμές επαγόμενης πόλωσης από επεξεργασία στο λογισμικό DC_2DPRO:



Resistivity (Ohm-m)



Normalized IP (DC_2Dpro)



Normalized Chargeability MNa (mS/M)





4.1 Διατάξεις

Παρατηρώντας τις ηλεκτρικές τομογραφίες, συμπεραίνονται τα εξής: η χρήση της διάταξης πολλαπλής βαθμίδας φάνηκε να δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την ανάλυση της τομογραφίας και την πλευρική διακριτική ικανότητα καθώς παρέχει πληροφορίες με μεγάλη λεπτομέρεια σε σχέση με τη διάταξη διπόλου – διπόλου. Ακόμη, η διάταξη αυτή, δίνει τη δυνατότητα καταγραφής δεδομένων με πολύ καλή αναλογία σήματος- θορύβου, ωστόσο, το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι μικρότερο (45m) συγκριτικά με της διπόλου-διπόλου (50m).

Αντίθετα, οι ηλεκτρικές τομογραφίες με διάταξη διπόλου-διπόλου προσφέρουν έγκυρη πληροφορία σε βάθος με μειονέκτημα το χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο.

4.2 Λογισμικά αντιστροφής

Μεταξύ των δύο προγραμμάτων αντιστροφής μπορεί να ειπωθεί πως σε γενικές γραμμές οι τιμές της αντίστασης είναι όμοιες ωστόσο οι τομογραφίες διαφοροποιούνται ελάχιστα εξαιτίας διάφορων παραμέτρων που καθορίζονται πριν την αντιστροφή. Παρόλα αυτά, καθώς τα αποτελέσματα από τα δυο αυτά προγράμματα για την κάθε τομή δείχνουν να είναι παραπλήσια συμπεραίνεται πως και τα δύο λογισμικά είναι αξιόπιστα.

4.3 Συνδυασμός διατάξεων

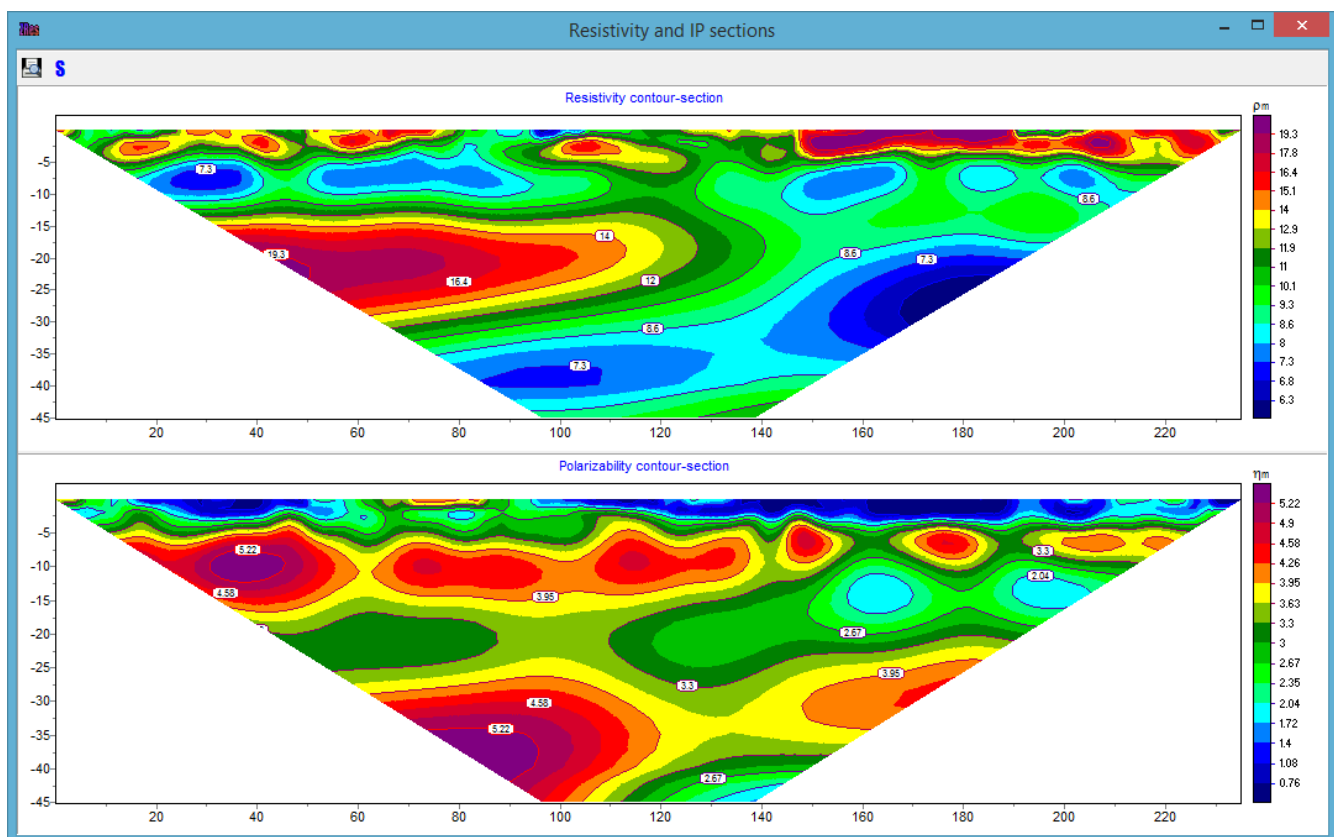
Παρατηρώντας τις τομές g6, g7 με συνδυασμό δεδομένων από τις δύο διατάξεις διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας, φαίνεται να παρουσιάζονται ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε και πριν, θεωρητικά η αντιστροφή του ενοποιημένου αυτού αρχείου θα έδινε καλύτερη ανάλυση και ισχυρό σήμα σε βάθος αφού θα συνδυάζονταν τα προτερήματα των δύο διατάξεων. Κάτι τέτοιο προέκυψε εν μέρει, ωστόσο, επειδή η διάταξη διπόλου-διπόλου έχει υψηλότερη ευαισθησία σε σχέση με αυτή της πολλαπλής βαθμίδας, φαίνεται η δεύτερη να επικράτησε λίγο παραπάνω. Για να μη συνέβαινε αυτό, θα μπορούσε να είχε χρησιμοποιηθεί ένας παράγοντας αντιστάθμισης στα δεδομένα ώστε να ισοσταθμίσει την “συμμετοχή” των δεδομένων από την κάθε διάταξη (Athanasίου et al 2006).

4.4 Επαγόμενη πόλωση

Με βάση τη θεωρία, η φορτιστικότητα αναμένεται υψηλή σε περιοχές όπου επικρατεί η “καθαρή” άργιλος (δηλ. δίχως προσμίξεις) και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι πολύ χαμηλή, εξαιτίας της

πόλωσης μεμβράνης. Στην πρώτη αντιστροφή με αφιλτράριστα δεδομένα φαίνεται πως κάτι τέτοιο δεν αντικατοπτρίζεται, γεγονός που συζητήθηκε μέσω της πλατφόρμας του LinkedIn και ακολούθησαν οι παρακάτω απόψεις :

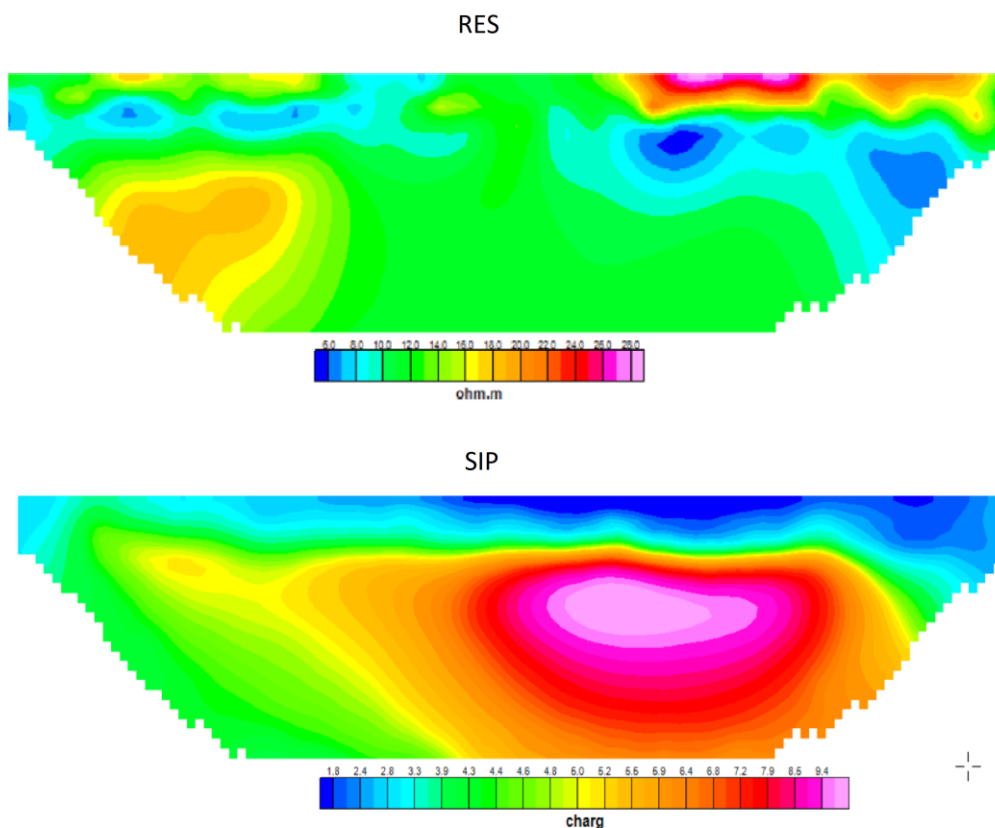
- Το όργανο μέτρησης δε θα πρέπει να είναι το ίδιο με αυτό που μετράει τις ηλεκτρικές αντιστάσεις καθώς για την επαγόμενη πόλωση απαιτείται ενέργεια 5kW και άνω ώστε τα δεδομένα να είναι αξιόπιστα ιδιαίτερα για βάθος πάνω από 30m. (Othman J., προσωπική επικοινωνία)
- Επειδή το RMS είναι κάτω από 1%, πιθανώς να προέκυψε over-fitting των τιμών δηλαδή το συγκριμένο σύνολο δεδομένων να περιέχει θόρυβο που μπορεί να προβλέψει λανθασμένα πολύ υψηλές και πολύ χαμηλές τιμές φορτιστικότητας και ειδικής αντίστασης αντίστοιχα, επηρεάζοντας την τελική ερμηνεία (Mashhadi S., προσωπική επικοινωνία.)
- Χαμηλή ευαισθησία δεδομένων κυρίως στα βαθύτερα τμήματα ή αδύναμη σύνδεση μεταξύ δεδομένων αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης (συχνά τα πρώτα επηρεάζονται από τα δεύτερα). Με τη χρήση του λογισμικού zondres2d προτάθηκε αντιστροφή με αντίστροφη συσχέτιση (εικόνα 22) (Kaminsky A., προσωπική επικοινωνία).



Εικόνα 22 :Αντιστροφή με αντίστροφη συσχέτιση στο λογισμικό Zondres2d. (Kaminsky A). (IP.rms=3.5%, RES.rms=0.7%)

Αυτή η μέθοδος αντιστροφής προέρχεται από την εκτενέστερη ανάπτυξη σύνθετης ερμηνείας και βασίζεται σε διάφορους τύπους δεδομένων (με διαφορετικές φυσικές παραμέτρους) που αντιστρέφονται ταυτόχρονα.

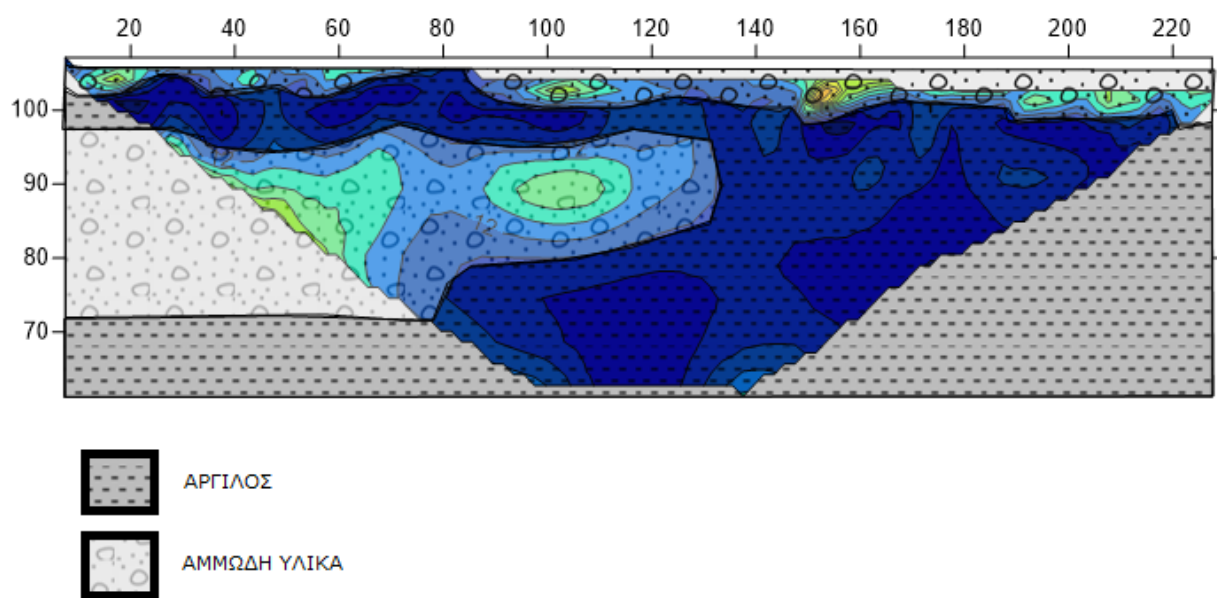
Με βάση τις παραπάνω απόψεις, ακολούθησε η επεξεργασία των μετρήσεων επαγόμενης πόλωσης ώστε να αφαιρεθούν λανθασμένες τιμές που αλλοιώνουν το τελικό αποτέλεσμα μέσω αλγορίθμου της Matlab. Κατά την διαδικασία απόρριψης μετρήσεων, παρατηρήθηκε πως κατά την εξαγωγή των φιλτραρισμένων τιμών προστέθηκαν αυτόματα θέσεις και αντίστοιχες τιμές φορτιστικότητας οι οποίες ξέφευγαν από τα όρια των υπολοίπων, ωστόσο δεν αφαιρέθηκαν.



Εικόνα 23: Τομές αντίστασης και φασματικής επαγόμενης πόλωσης μετά από αντιστροφή.

Τέλος, δοκιμάστηκε και η αντιστροφή της φασματικής επαγόμενης πόλωσης SIP (Spectral Induced Polarization) το οποίο φαίνεται να βρίσκει τον στόχο (δηλ. τις καθαρές αργίλους) σε μικρότερο βάθος σε σχέση με την προηγούμενη (Εικόνα 23). Η φασματική επαγόμενη πόλωση αναφέρεται στο συντελεστή αγωγιμότητας και τη φάση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης στον τομέα συχνοτήτων. Ο συντελεστής και η φάση μπορούν επίσης να προσδιοριστούν σαν ισοδύναμη σύνθετη αγωγιμότητα ή σύνθετη αντίσταση.

Οι μέθοδοι της ηλεκτρικής αντίστασης και επαγόμενης πόλωσης εφαρμόστηκαν με επιτυχία στον εντοπισμό αργιλικών σχηματισμών που χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντίσταση και υψηλή φορτιστικότητα. Παρακάτω παρουσιάζεται η γεωλογική τομή που συνδέει τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας με τους σχηματισμούς της περιοχής:



Εικόνα 24: Γεωλογική τομή βασισμένη στα γεωφυσικά δεδομένα.



Athanasiou E.N., Tsourlos P.I., Papazachos C.B., Tsokas G.N., Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 62, Issue 2, 2007, Pages 124-140,

Dahlin, Torleif & Zhou, Bing. (2006). Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*. 4. 113-123.

Delgado-Rodríguez, Omar. (2007). Estimation of clay content in soil based on resistivity modeling and laboratory measurements. *Geophysical Prospecting*. 55. 265-275.

Gyulai, Ákos & Baracza, M.K.. (2012). What is joint inversion?. *Magyar Geofizika*. 53. 275-280.

Jougnot D., Ghorbani A., Revil A., Leroy P., Cosenza P., Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: a mechanistic approach, *Geophysical Journal International*, Volume 180, Issue 1, January 2010, Pages 210–224

Musset A.E., Khan M.A. (2000) *Looking into the Earth*, Cambridge University Press 32 Avenue of the Americas, New York, NY 10013-2473, USA, 181-199p.

Slater, Lee & Lesmes, David. (2002). IP Interpretation in Environmental Investigations. *Geophysics*. 67. 77-88. 10.1190/1.1451353.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

<https://www.eoas.ubc.ca/ubcgif/iag/foundations/properties/2physprop-iag.htm> (ανακτήθηκε 30/04/2021)

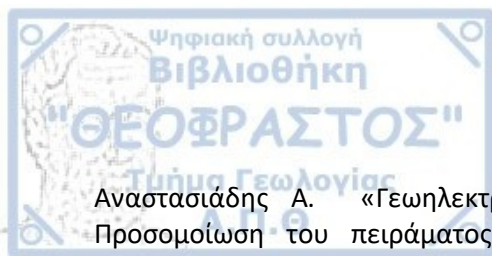
https://el.wikipedia.org/wiki/Ξυλοκερατιά_Κυλκίς (ανακτήθηκε 02/05/2021)

RE2DINV ver 3.59 for windows XP/Vista/7,(February 2010), Geoelectrical Imaging 2D & 3D GEOTOMO SOFTWARE Malaysia (www.geoelectrical.com)

IRIS Instruments. (n.d.) Syscal Pro Characteristics (<http://www.irisinstruments.com/syscal-prosw.html>).

http://surferhelp.goldensoftware.com/griddata/idd_grid_data_triangulation.htm (ανακτήθηκε 05/05/2021)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Kriging> (ανακτήθηκε 30/06/2021)



Αναστασιάδης Α. «Γεωηλεκτρική διασκόπηση στο λιγνιτωρυχείο Μαυροπηγής Ν. Κοζάνης. Προσομοίωση του πειράματος ηλεκτρικής τομογραφίας για τον σχεδιασμό της γεωφυσικής διασκόπησης και την ερμηνεία των γεωηλεκτρικών δεδομένων», Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Πολυτεχνείο Κρήτης

Μαύρος Σ.,(2020), Μελέτη της εφαρμογής της ηλεκτρικής τομογραφίας σε τομές πολύ μεγάλου μήκους, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

Παπαζάχος Κ. Β.(1996), Εισαγωγή στην εφαρμοσμένη γεωφυσική, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΖΗΤΗ

Παρουσιάσεις μαθήματος Η/Μ μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης, Α.Π.Θ.

Παρουσιάσεις μαθήματος Πετρολογία Ιζηματογενών Πετρομάτων, Α.Π.Θ.

Σταμπολίδης Α., (2020) Γεωφυσική έρευνα για τον χαρακτηρισμό αργιλικών σχηματισμών στην περιοχή πέριξ του λατομείου της ΚΕΒΕ, Έκθεση Αποτελεσμάτων

Τσιαλουκή Π.(2020),Γεωφυσική διερεύνηση των τοπικών εδαφικών συνθηκών σε σταθμό του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων στη Θεσσαλονίκη, Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη