



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΦΛΩΡΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΚΑΠΕΤΗ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

**Παρακολούθηση της κατείσδυσης με γεωηλεκτρικές μεθόδους στον
αποκατεστημένο χώρο ταφής απορριμμάτων του Δερβενίου
Θεσσαλονίκης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2021



ΦΛΩΡΑ ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΚΑΠΕΤΗ

Πτυχιούχος Γεωλόγος

Παρακολούθηση της κατείσδυσης με γεωηλεκτρικές μεθόδους στον αποκατεστημένο
χώρο ταφής απορριμμάτων του Δερβενίου Θεσσαλονίκης

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος
Σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» με κλάδο ειδίκευσης την
Εφαρμοσμένη Γεωφυσική

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης:

21/07/2021

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Αναπληρωτής Καθηγητής Α.Π.Θ. Βαργεμέζης Γεώργιος, Επιβλέπων
Καθηγητής Α.Π.Θ. Τσούρλος Παναγιώτης, Μέλος Τριμελούς Επιτροπής
Καθηγητής Α.Π.Θ. Βουδούρης Κωνσταντίνος, Μέλος Τριμελούς Επιτροπής



Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Ν°

© Φλώρα Χριστίνα Καπέτη, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved.

Παρακολούθηση της κατείσδυσης με γεωηλεκτρικές μεθόδους στον αποκατεστημένο χώρο ταφής απορριμμάτων του Δερβενίου Θεσσαλονίκης

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.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή έχει ως αντικείμενο την εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων στον αποκατεστημένο χώρο ταφής απορριμμάτων Δερβενίου με στόχο τη διαχρονική παρακολούθηση της κατείσδυσης του νερού.

Συγκεκριμένα, ασχολείται με τη διερεύνηση της δυνατότητας κατείσδυσης των μετεωρικών κατακρημνισμάτων στο εδαφικό προστατευτικό κάλυμμα του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων και την περαιτέρω συμβολή στον εμπλουτισμό ή και δημιουργία ακόμα εκκρίματος. Για την διερεύνηση και απεικόνιση της τρέχουσας κατάστασης αποφασίστηκε η διεξαγωγή ενός πειράματος ελεύθερης κατείσδυσης του νερού με ελεγχόμενη ροή στο έδαφος και ταυτόχρονη εκτέλεση γεωφυσικών μετρήσεων. Για την εκτέλεση του πειράματος επιλέχθηκαν δύο θέσεις.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η ηλεκτρική τομογραφία (ERT). Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο και τρεις διαστάσεις. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ύστερα από την επεξεργασία τους με τα κατάλληλα λογισμικά δίνουν μοντέλα υπεδάφιας αντίστασης σε δύο, τρεις, και τέσσερις διαστάσεις.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδωσαν άμεσες απαντήσεις για την υδροπερατότητα του εδάφους και κατά πόσο το νερό που κατεισδύει αποτελεί μέρος των στραγγισμάτων που παρατηρήθηκαν στον ανατολικό πόδα του όγκου των απορριμμάτων.



ABSTRACT

Infiltration of rainwater is of major importance for old waste disposal sites where production of leakage is taking place even after reclamation. In this thesis an ERT monitoring case study which was part of a larger environmental monitoring project regarding the reclaimed Derveni Landfill situated at the NW outskirts of the city of Thessaloniki (N. Greece) is presented. Previous studies in the area showed that important amount of water, flows within the waste volume or as lateral groundwater flow or as direct infiltration of rainwater. Permeability measurements with Maag tests pointed out differential behavior of the top soil constructed during reclamation works. Thus, geophysical monitoring of resistivity changes during injection of known conductivity water in high resolution 2D and 3D resistivity investigation has been applied in two selected sites according permeability distribution map.

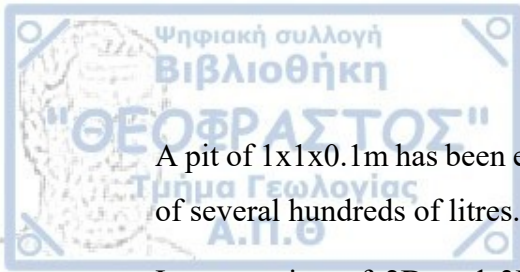
4D inversion of 2D and resistivity ratios between 3D data sets showed the flow paths of the injected salty water within the top soil up to the depth of almost one meter. At the same time increase of the resistivity has been observed deeper than one meter that cannot be easily explained. A possible explanation could be the biogas flow that is interrupted by the water cap of the injection.

Despite reclamation works, there is still leakage from the waste volume that is obvious on the surface near the foothills as well as in the nearby stream.

Previous studies showed as a possible continuous supply of water that is contaminated within the waste volume, the rainwater that infiltrates through the top soil of the area. Thus, permeability of the top soil has been examined since among reclamation works the construction of impermeable top soil was predicted.

Permeability distribution showed that top soil is semipermeable and inhomogeneous. Thus, two sites belonging to the extreme permeability measurements have been chosen for water injection along with geoelectrical monitoring, in order to investigate the infiltration and diffusion of water to the artificial top layers as well as the waste below the top soil.

In every site, arrays in the sense of two perpendicular to each other 2D ERT lines have been measured with 24 electrodes at intervals ranging from 0.5 to 1 m. Also, 3D electrodes arrays have been designed with 0.5 and 0.75m electrodes spacing.



A pit of 1x1x0.1m has been excavated and saline water has been put in a controlled rate of several hundreds of litres.

Interpretation of 2D and 3D monitoring data during salty water injection through surficial pit of 10cm depth showed that:

- The water body itself was detected as a conductive body as expected.
- Infiltration of the salty water to several decades of centimetres up to the depth of one meter has been detected.
- Down flow of the injected water showed preferential paths showing that top soil is not homogeneous and porosity and permeability varies in space.
- Increase of resistivity happens at the depth of one meter and it continues until the maximum depth of the investigation.

The later observation was not expected since the fluid used for the injection was conductive. A possible explanation of this increase could be given by the biogas that is trying to escape and it is stopped by the water body. Unfortunately, this could not be approved because of the lack of a gas measuring equipment. In any case, the increase of the resistivity is under further investigation.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα κ. Βαργεμέζη Γεώργιο, Αναπληρωτή Καθηγητή, για τις συμβουλές του, τη συνεχή καθοδήγηση του και την ουσιαστική βοήθεια του κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού και για την εξέλιξη και ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Παναγιώτη Τσούρλο, Καθηγητή Γεωφυσικής, για τις συμβουλές του, την συνεχή βοήθεια του και τις επιστημονικές του γνώσεις που με βοήθησαν σε όλη τη διαδρομή του μεταπτυχιακού και στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο, καθηγητή Υδρογεωλογίας, για τις πολύτιμες συμβουλές του και επισημάνσεις του στην εργασία μου και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νεραντζή Καζάκη, τους συμφοιτητές μου Ευτυχία, Κώστα και Θράσο για την πολύτιμη βοήθεια τους στην συλλογή των δεδομένων της διατριβής μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου που με στηρίζει σε κάθε επιλογή της ζωής μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Τριαντάφυλλο, την Άννα και τη Βιλελμίνη που μου στάθηκαν σαν οικογένεια όλα τα χρόνια των σπουδών μου.



Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο Εργασίας.....	10
1.2 Μεθοδολογία.....	11
1.3 Δομή Εργασίας.....	11

2. ΠΑΛΑΙΑ ΧΩΜΑΤΕΡΗ – ΕΡΓΟ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

2.1 Παραγωγή και διαχείριση στραγγισμάτων.....	13
2.2 Παραγωγή και διαχείριση βιοαερίου.....	14
2.3 Γεωφυσική έρευνα σε χώρους ταφής απορριμμάτων.....	15

3. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

3.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	17
3.2 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος – Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση.....	20
3.2.1 Διατάξεις ηλεκτροδίων.....	24
3.2.2 Βάθος διασκόπησης.....	27
3.2.3 Μέθοδοι έρευνας.....	29
3.3 Ερμηνεία των μετρήσεων.....	32
3.3.1 Ευθύ πρόβλημα.....	33
3.3.2 Αντίστροφο πρόβλημα.....	35
3.3.3 Ιακωβιανός Πίνακας.....	37

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

4.1 Παλαιά Χωματερή Δερβενίου.....	38
4.2 Ανάπλαση Παλαιάς Χωματερής Δερβενίου.....	39
4.3 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά.....	40
4.4 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά.....	42
4.5 Υδρογεωλογικές Συνθήκες.....	45
4.5.1 Εισαγωγή - Προβλήματα ρύπανσης.....	45
4.5.2 Υδρογεωλογικές - Υδροχημικές εργασίες.....	46
4.5.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο.....	49
4.5.4 Δοκιμή Maag/Δοκιμή μεταβλητού φορτίου.....	50
4.6 Γεωφυσικές Μετρήσεις – Προηγούμενες Μελέτες.....	55



5. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

5.1 Σχεδιασμός του πειράματος.....	60
5.2 Εξοπλισμός και μετρήσεις	61
5.3 Επεξεργασία δεδομένων	62
5.4 Πείραμα – Θέση Α.....	68
5.5 Πείραμα - Θέση Β	87

6. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	116
Βιβλιογραφία.....	117

Η επιστήμη της Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής αξιοποιεί, αναλύει και χρησιμοποιεί φυσικά φαινόμενα (βαρύτητα, μαγνητισμό, ηλεκτρισμό κ.α.) που παρατηρούνται στη Γη.

Η εφαρμογή της μέσα από ποικίλες μεθόδους περιλαμβάνει τη μέτρηση των φυσικών χαρακτηριστικών μεγεθών (πυκνότητα, μαγνητική επιδεκτικότητα, αγωγιμότητα ή ειδική ηλεκτρική αντίσταση) κοντά στην επιφάνεια της γης, μέσα σ' αυτή, καθώς και στον αέρα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνουν εικόνες του υπεδάφους που συσχετίζουν τις μετρήσεις των φυσικών παραμέτρων με τις ιδιότητες του και πως αυτό διαφοροποιείται σε διάφορες θέσεις, δίνοντας τις δομές ενδιαφέροντος για την κάθε έρευνα.

Οι γεωφυσικές μέθοδοι (Ηλεκτρική τομογραφία, φυσικό δυναμικό κ. α.) καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα πεδίων εφαρμογής συμμετέχοντας στη λύση προβλημάτων που αφορούν το περιβάλλον (υπόγειες διαρροές, γεωθερμικά πεδία), τα κοιτάσματα πετρελαίου ή φυσικού αερίου, τη κατασκευή τεχνικών έργων (γέφυρες, φράγματα), τη μεταλλευτική έρευνα (μεταλλοφορίες οικονομικού ενδιαφέροντος, ορυκτοί άνθρακες).

Τέλος, οι Γεωφυσικές Μέθοδοι πλεονεκτούν έναντι άλλων μεθόδων, διότι έχουν την ικανότητα να επεκτείνονται σε μεγάλες εκτάσεις του υπεδάφους γρήγορα δίνοντας άμεσα πληροφορίες για την περιοχή μελέτης, ενώ παράλληλα μειώνουν σημαντικά τις δαπάνες. Είναι ευέλικτες αφού για τη διερεύνηση του προβλήματος υπάρχει η δυνατότητα συνδυασμού των τεχνικών για αξιόπιστα αποτελέσματα.

1.1 Αντικείμενο Εργασίας

Η παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια γεωφυσικής έρευνας που έλαβε χώρα στην περιοχή του αποκατεστημένου χώρου ταφής απορριμμάτων (ΑΧΤΑ) Δερβενίου.

Ύστερα από την ολοκλήρωση του έργου αποκατάστασης του χώρου, διαπιστώθηκαν εκροές νερού στην περιοχή, εμπλουτισμένου με διασταλλάζοντα υγρά. Κρίθηκε

απαραίτητο να διερευνηθεί και να προσδιοριστεί η προέλευση των διασταλλαζόντων υγρών με τελικό σκοπό τον περιορισμό τους.

Η συγκεκριμένη διατριβή αποτελεί ένα μικρό μέρος των εργασιών που εκτελέστηκαν και ειδικότερα ασχολείται με την ποσότητα του νερού που κατεισδύει στο εδαφικό προστατευτικό κάλυμμα και τελικά καταλήγει στον όγκο των σκουπιδιών. Η μελέτη της ποσότητας του νερού που κατεισδύει πραγματοποιείται μέσω ενός πειράματος ελεύθερης κατείσδυσης νερού με στόχο τη διαχρονική παρακολούθηση της υδροπερατότητας του εδάφους με ταυτόχρονη εκτέλεση γεωφυσικών μετρήσεων.

1.2 Μεθοδολογία

Το πείραμα της ελεύθερης κατείσδυσης του νερού εκτελέστηκε σε δύο θέσεις στην περιοχή μελέτης. Η επιλογή των θέσεων έγινε βάση του χάρτη κατανομής της υδροπερατότητας όπως αυτή προέκυψε από τις δοκιμές υδροπερατότητας (Maag Test) που προηγήθηκαν.

Οι δύο θέσεις που παρουσίασαν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την διεξαγωγή του πειράματος είναι εκείνες που έδωσαν τις χαμηλότερες και υψηλότερες τιμές υδροπερατότητας.

Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας (ERT) και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε δύο και τρεις διαστάσεις. Οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες σχεδιάστηκαν σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο δίνοντας κάθε φορά την ίδια γεωηλεκτρική δομή ώστε να μελετηθεί αποκλειστικά η κατακόρυφη κίνηση του νερού κατά την επαναληπτική διαδικασία των μετρήσεων. Η αξιολόγηση των διαχρονικών δεδομένων έγινε μέσω της διαδικασίας της κοινής αντιστροφής των ανεξάρτητων γεωηλεκτρικών τομογραφιών με τη χρήση τετραδιάστατου κώδικα αντιστροφής. Οι μετρήσεις διήρκεσαν δύο ημέρες στην πρώτη θέση και τέσσερις στη δεύτερη θέση.

1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία δομείται από 6 κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά στην επιστήμη της Γεωφυσικής, στο αντικείμενο, τη μεθοδολογία και την δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρόποι διάθεσης των απορριμμάτων τις προηγούμενες δεκαετίες και η σύγχρονη τάση διαχείρισης αυτών. Περιγράφονται τα προβλήματα που προκλήθηκαν και υπάρχουν λόγω απουσίας λήψης μέτρων περιβαλλοντικής προστασίας, οι επιπτώσεις και οι τρόποι αντιμετώπισης αυτών. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στην επιστήμη της γεωφυσικής η οποία χρησιμοποιεί ως εργαλείο γεωφυσικές μεθόδους (πχ. Ηλεκτρική Τομογραφία) για τον εντοπισμό περιβαλλοντικών προβλημάτων (πχ. διασταλλάζοντα υγρά) συμβάλλοντας σημαντικά στην επίλυση τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα της περιοχής έρευνας, η γεωλογία, η γεωτεκτονική της περιοχής και οι υδρογεωλογικές συνθήκες. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών και οι λόγοι διεξαγωγής της παρούσας εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η εκτέλεση του πειράματος. Γίνεται αναλυτική αναφορά στην εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας, στην επεξεργασία των δεδομένων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα.

2 ΠΑΛΑΙΑ ΧΩΜΑΤΕΡΗ – ΕΡΓΟ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Τις προηγούμενες δεκαετίες η διάθεση των απορριμμάτων πραγματοποιούνταν αποκλειστικά σε χωματερές, περιοχές στις οποίες τα σκουπίδια απλά καλύπτονταν με χώμα για να γίνει η αποσύνθεση τους. Τα ελλιπή μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος οδήγησαν στην υποβάθμιση των περιοχών, στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων και των επιφανειακών νερών, στην εκπομπή αερίων, στη παραγωγή στραγγισμάτων, στην αλλοίωση του φυσικού τοπίου, στην εκδήλωση πυρκαγιών και άλλων φαινομένων.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και παράλληλα το ενδιαφέρον για την προστασία του περιβάλλοντος οδήγησαν στη σταδιακή χωροθέτηση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Στις παλαιές χωματερές για την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω φαινομένων που παράγονται, έγιναν έργα αποκατάστασης και ανάπλασης των περιοχών με τελικό σκοπό την ανάδειξη τους σε περιβαλλοντικά πάρκα. Ύστερα από τις εργασίες για την αποκατάσταση και ανάπλαση μίας παλαιάς χωματερής, δεν παύει να παρατηρείται σε ορισμένες περιπτώσεις η παραγωγή στραγγισμάτων και βιοαερίου. Τα επιβαρυνόμενα ύδατα και η εκπομπή του βιοαερίου προκαλούν δυσμενείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Στις παρακάτω ενότητες αναφέρονται συνοπτικά οι τρόποι παραγωγής και διαχείρισης των στραγγισμάτων και του βιοαερίου. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου τονίζεται η σημασία των γεωφυσικών μεθόδων στην αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων και συγκεκριμένα σε ότι αφορά τον εντοπισμό της προέλευσης των στραγγισμάτων που πραγματεύεται και η παρούσα εργασία.

2.1 Παραγωγή και διαχείριση στραγγισμάτων

Τα στραγγίσματα ή διασταλλάζοντα υγρά δημιουργούνται κατά την αποσύνθεση των σκουπιδιών όταν αυτά εμπλουτίζονται με νερό από τη φυσική υγρασία των απορριμμάτων και τη κατείδυση του βρόχινου νερού. Η παραγωγή του στραγγίσματος είναι αποτέλεσμα φυσικοχημικών διεργασιών και η σύστασή τους είναι τοξική.

Η διαχείριση των στραγγισμάτων περιλαμβάνει ένα σύστημα αποστράγγισης, συλλογής και διαχείρισης αυτών. Η επεξεργασία τους γίνεται ώστε να απαλλαγούν από τα μολυσματικά συστατικά και να είναι κατάλληλα για διάθεση σε εδαφικούς και υδάτινους αποδέκτες.



Σχήμα 2.1. Στραγγίσματα.

2.2 Παραγωγή και διαχείριση βιοαερίου

Το βιοαέριο παράγεται από την αναερόβια ζύμωση των οργανικών και βιοαποικοδομήσιμων υλικών των απορριμμάτων. Είναι μίγμα αερίων με κυρίαρχα το μεθάνιο και το διοξείδιο του άνθρακα. Το μεθάνιο CH_4 που είναι ελαφρύτερο του αέρα κινείται προς τα πάνω και φθάνοντας στην επιφάνεια ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, ενώ το CO_2 που είναι βαρύτερο του αέρα συσσωρεύεται στον πυθμένα του χώρου απόθεσης. Στην περίπτωση ΧΥΤΑ, όπου υπάρχει αδιαπέρατο κάλυμμα, το μεθάνιο μεταναστεύει πλευρικά. Η διαφυγή του προκαλεί δυσοσμία και είναι επικίνδυνο για έκρηξη και ανάφλεξη.

Για την διαχείριση του βιοαερίου κατασκευάζονται συλλεκτήριοι αγωγοί με τους οποίους το βιοαέριο μεταφέρεται στην επιφάνεια όπου καίγεται ή εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα μέσω βιοφίλτρων.

2.3 Γεωφυσική έρευνα σε χώρους ταφής απορριμμάτων

Η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων (ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές) σε χώρους ταφής απορριμμάτων (ΑΧΤΑ, ΧΥΤΑ) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα εντοπισμού των διασταλασσόντων υγρών (στραγγισμάτων) λόγω της πολύ υψηλής αγωγιμότητας (χαμηλής ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης) που παρουσιάζουν.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ανάλογα με τη δομή και τη σύσταση τους χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένο εύρος τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση ενός γεωλογικού σχηματισμού είναι το πορώδες του. Οι περισσότεροι σχηματισμοί θα παρουσίαζαν εξαιρετικά υψηλές τιμές ειδικών αντιστάσεων εάν δεν ήταν πορώδεις και οι πόροι τους πληρωμένοι με ρευστό. Η παρουσία αλάτων στην περιεκτικότητα του ρευστού πλήρωσης μειώνει την τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και ο βαθμός κορεσμού του υλικού επηρεάζει άμεσα την τιμή της.

Οι γεωλογικές διεργασίες (πχ. ρηγμάτωση) που εξελίσσονται διαμορφώνουν τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των πετρωμάτων. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των πετρωμάτων είναι η ηλικία τους, η παρουσία αργιλικών ορυκτών και η θερμοκρασία.

Μία από τις σχέσεις που συνδέει την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των υλικών με τις διάφορες παραμέτρους είναι η εμπειρική σχέση γνωστή και ως νόμος του Archie (1969). Η ειδική αντίσταση των γεωλογικών σχηματισμών εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό και τη γεωμετρία του πορώδους, τον βαθμό πλήρωσης του πορώδους με ρευστό και την ειδική αντίσταση του ρευστού.

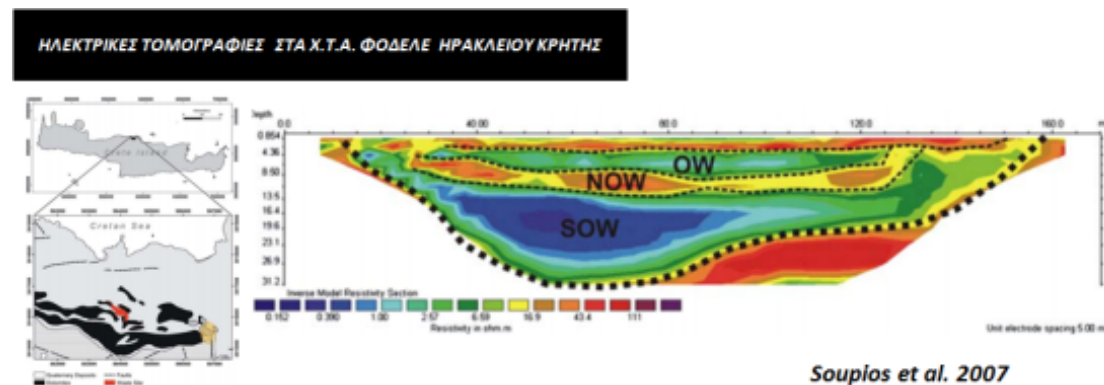
Η σχέση είναι:

$$\rho = \alpha \cdot \rho_v \cdot \phi^{-m}$$

Όπου,

- ρ , η ειδική αντίσταση του πετρώματος
- ρ_v , η ειδική αντίσταση του νερού των πόρων
- ϕ , το πορώδες (όγκος πόρων/ολικό όγκο)
- α , m , σταθερές

Οι πιο γνωστές μέθοδοι που εφαρμόζονται σε χώρους ΧΥΤΑ είναι η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ηλεκτρική τομογραφία), του φυσικού δυναμικού και της επαγόμενης πόλωσης. Στη συνέχεια ακολουθεί ένα παράδειγμα εφαρμογής της ηλεκτρικής τομογραφίας στον ΧΥΤΑ Φόδελε Ηρακλείου στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η γεωηλεκτρική τομή από τον ΧΥΤΑ Φόδελε Ηρακλείου (Soupios et al., 2007), όπως προέκυψε από την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας στον χώρο.



Σχήμα 2.2. Γεωηλεκτρική τομή από τον ΧΥΤΑ Φόδελε Ηρακλείου (Soupios et al., 2007).

Στην τομή αποτυπώνονται με διαφορετικά χρώματα περιοχές με διαφορετικές τιμές αντιστάσεων. Ειδικότερα, οι περιοχές υψηλών αντιστάσεων εμφανίζονται με θερμά χρώματα (κόκκινο) ενώ οι περιοχές χαμηλών αντιστάσεων με ψυχρά χρώματα (μπλε). Στην τομή η περιοχή των πολύ χαμηλών αντιστάσεων (σκούρο μπλε χρώμα) αντιστοιχεί σε απορρίμματα κορεσμένα με εκκρίματα. Η περιοχή που εμφανίζει πολύ υψηλές αντιστάσεις (κόκκινο χρώμα) αντιστοιχεί στο αντιστατικό γεωλογικό υπόβαθρο. Τέλος, διακρίνεται χαρακτηριστικά το κάτω όριο του ΧΥΤΑ στην επαφή του με το υπόβαθρο.

3 ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η μέθοδος της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ανήκει στις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης και βασίζεται σε μετρήσεις τεχνητών ηλεκτρικών πεδίων.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετράται η διαφορά δυναμικού, που προκαλείται από την εισαγωγή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος. Κύριος στόχος είναι ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Το ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των γεωλογικών σχηματισμών.

Η ηλεκτρική μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης έχει ευρεία εφαρμογή και συμβάλει σημαντικά στην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την υδρογεωλογία, τον εντοπισμό ρυπασμένων υπόγειων υδάτων, την τεχνική γεωλογία, την ανεύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε περιοχές κατασκευής τεχνητών φραγμάτων, την αρχαιομετρία, την αναζήτηση γεωθερμικών πεδίων κ.α.

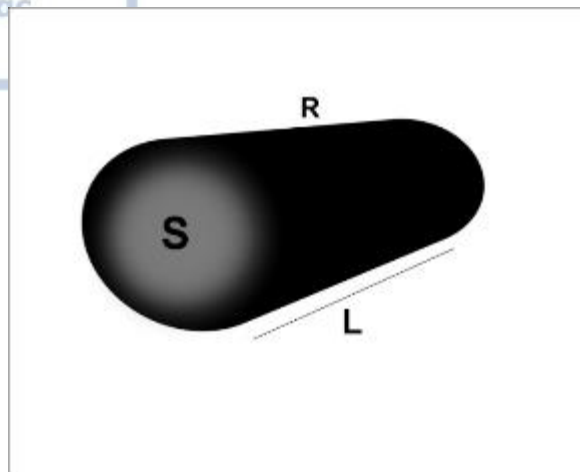
3.1 Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εκφράζει τη δυσκολία με την οποία ένας αγωγός συγκεκριμένων διαστάσεων άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (3-1)$$

όπου,

- ρ , η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ohm – m)
- R , η ωμική αντίσταση (ohm)
- S , το εμβαδόν της διατομής σε τετραγωνικά μέτρα (m²)
- L , το μήκος σε μέτρα (m)



Σχήμα 3.1. Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλίνδρου, ηλεκτρικής αντίστασης R , μήκους L και διατομής S .

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους εξαρτάται κυρίως από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα, το ρεύμα διαρρέει τα πετρώματα μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό των πόρων. Ειδικότερα, εξαρτάται από τις υδρογεωλογικές συνθήκες, το πορώδες των σχηματισμών, τη χημική σύσταση του νερού, την πίεση, τη θερμοκρασία.

Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές αντιστάσεων. Ωστόσο, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση παρουσιάζει διακυμάνσεις και μεταξύ των ίδιων γεωλογικών σχηματισμών. Για παράδειγμα τα συμπαγή πετρώματα έχουν σχετικά υψηλές έως πολύ υψηλές τιμές αντιστάσεων. Η διακύμανση της αντίστασης καθορίζεται και από τον βαθμό καταπόνησης του πετρώματος, δηλαδή εάν το πέτρωμα είναι αποσαθρωμένο και σε τι βαθμό. Ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση του υλικού είναι το νερό και σε τι ποσότητα περιέχεται στο πορώδες των σχηματισμών.

Τα ιζηματογενή πετρώματα έχουν μεγαλύτερο πορώδες και παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές έως πολύ χαμηλές αντιστάσεις. Στον Πίνακα I δίνονται οι τιμές των αντιστάσεων διαφόρων υλικών.

Πίνακας Ι. Αντιστάσεις διαφόρων υλικών (<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>)

ΥΛΙΚΟ	E. H. A (Ohm.m)
ΑΕΡΑΣ	∞
ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ	3×10^{-1}
ΓΑΛΗΝΙΤΗΣ	2×10^{-3}
ΧΑΛΑΖΙΑΣ	$4 \times 10^{10} - 2 \times 10^{14}$
ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	$1 \times 10^{12} - 1 \times 10^{13}$
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	$100 - 1 \times 10^{-6}$
ΓΑΒΡΟΣ	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^6$
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	$50 - 1 \times 10^7$
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	$1 - 1 \times 10^8$
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	$20 - 1 \times 10^3$
ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ	$100 - 10^4$
ΑΜΜΟΣ	$1 - 1000$
ΑΡΓΙΛΟΣ	$1 - 100$
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	$0.5 - 300$
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	0.2

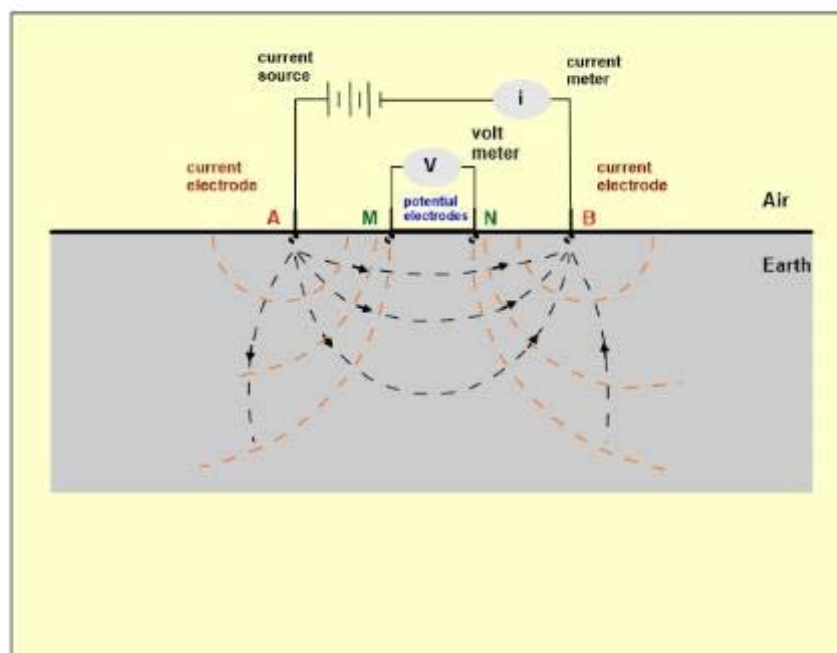
Κατά τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διαβιβάζεται συνεχές ρεύμα έντασης, I , στο υπέδαφος με τη χρήση δύο ηλεκτροδίων ρεύματος A, B . Μεταξύ των ηλεκτροδίων A, B δημιουργείται ροή ρεύματος και μετράται η διαφορά δυναμικού που παράγεται σε δύο άλλα ηλεκτρόδια δυναμικού M, N . Υπολογίζεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση, R .

$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} \quad (3-2)$$

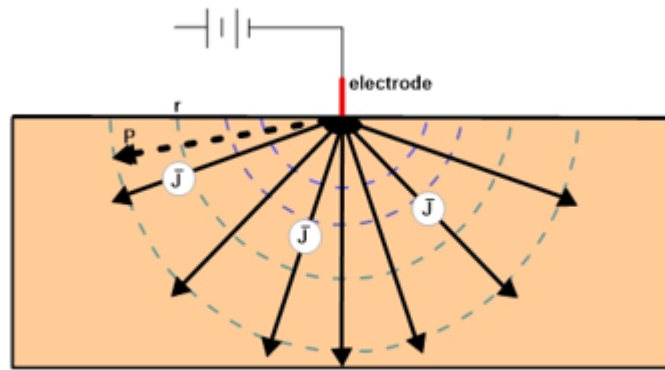
Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος εξαρτάται από την απόσταση των ηλεκτροδίων. Ισχύει ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης.

3.2 Ροή Ηλεκτρικού Ρεύματος – Φαινόμενη Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση

Η γη στην πραγματικότητα είναι ανομοιογενής και ανισότροπη. Έτσι, η ηλεκτρική αντίσταση που μετράται είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους και της γεωμετρίας της μέτρησης.



Σχήμα 3.2. Βασική διάταξη ηλεκτροδίων. (Τροποποίηση του σχήματος <http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>).



Σχήμα 3.3. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος. (Τροποποίηση του σχήματος <http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>).

Ωστόσο, για την κατανόηση της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος η γη θεωρείται ομογενής και ισότροπη. Τοποθετείται (Σχ 3.2) ηλεκτρόδιο (θετικός πόλος) στο έδαφος ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ρ , και το έδαφος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, έντασης I .

Η ένταση του ρεύματος, I , που διαρρέει την ισοδυναμική επιφάνεια, S , με ακτίνα, r , δίνεται από τη σχέση:

$$I = \int_s \mathbf{J} d\mathbf{S} \rightarrow J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (3-3)$$

Η πυκνότητα του ρεύματος στο εσωτερικό της γης ορίζεται από το νόμο του Ohm

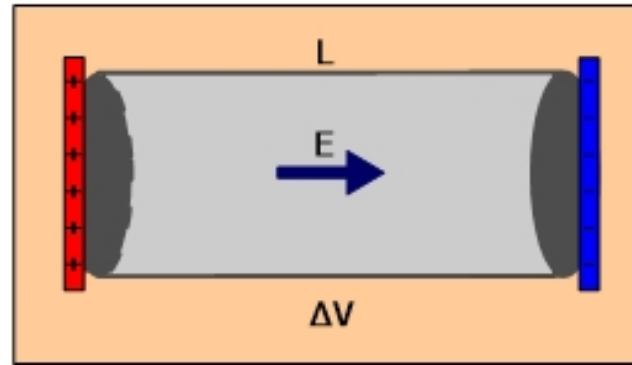
$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3-3)$$

όπου,

- J , η πυκνότητα του ρεύματος (Amp/m²)
- σ , η αγωγιμότητα (Siemens/m)
- E , η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και το δυναμικό V είναι συναρτήσεις της ακτινικής απόστασης, r , και συνδέονται με τη σχέση:

$$\vec{E} = - \frac{dV}{dr} \quad (3-4)$$



Σχήμα 3.4. Ένταση ηλεκτρικού πεδίου.

Από τις σχέσεις (3-3) και (3-4) προκύπτει:

$$J = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} \quad (3-5)$$

Το δυναμικό σε απόσταση r είναι:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3-6)$$

Για αρνητικό πόλο:

$$V = -\frac{\rho I}{2\pi r} \quad (3-7)$$

Όταν ο πόλος βρίσκεται μέσα στο ομογενές έδαφος η σχέση (3-6) μετατρέπεται ως εξής:

$$V = \pm \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (3-8)$$

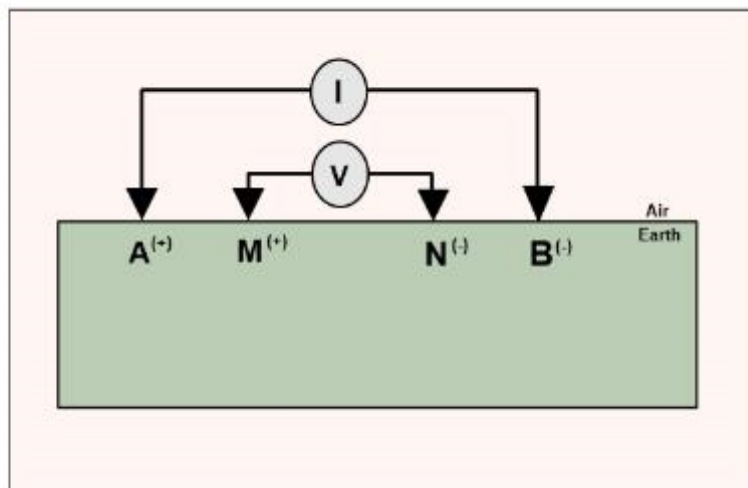
Η σχέση (3-7) ορίζει το δυναμικό στην περίπτωση σημειακής πηγής. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων απαιτείται διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων. Δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B μέσω των οποίων διαβιβάζεται ηλεκτρικό ρεύμα στο έδαφος και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού M, N από τα οποία μετράται η διαφορά δυναμικού V_{MN} .

Η μαθηματική έκφραση υπολογισμού της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων M, N είναι:

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \Rightarrow \rho = 2\pi \frac{R}{K} \quad (3-9)$$

όπου,

- AM, AN, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων M, N (δυναμικού) από τον (+) πόλο A
- BM, BN, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων M, N (δυναμικού) από τον (-) πόλο B
- R, η ηλεκτρική αντίσταση
- K, ο γεωμετρικός παράγοντας



Σχήμα 3.5. Βασική διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων. (Τροποποίηση του σχήματος <http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>).

Στην περίπτωση που το έδαφος θεωρείται ομογενές και ισότροπο, για κάθε διάταξη ηλεκτροδίων, όταν ο γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιαστεί με τη μετρούμενη αντίσταση, θα δώσει την τιμή της πραγματικής αντίστασης.

Σε πραγματικές συνθήκες, η γη είναι ανομοιογενής και ανισότροπη. Η τιμή της αντίστασης που υπολογίζεται δεν αντιστοιχεί στη πραγματική, αλλά σε μία φαινόμενη τιμή αντίστασης.

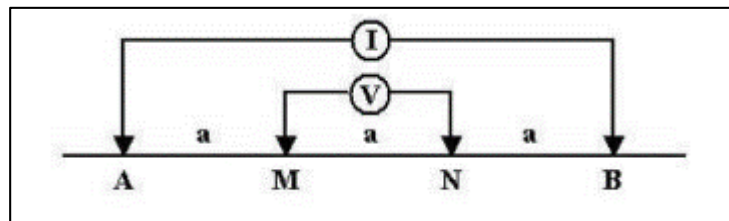
Ο όρος της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης εισάγεται και αντιπροσωπεύει την ειδική αντίσταση που θα είχε το υπέδαφος αν ήταν ομογενές. Η τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μεταβάλλεται κάθε φορά που αλλάζουν οι θέσεις των ηλεκτροδίων και οι μεταξύ τους αποστάσεις.

3.2.1 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται σε μία ευθεία με τον κατάλληλο συνδυασμό θέσης και απόστασης κάθε φορά. Οι πιο διαδεδομένες επιφανειακές διατάξεις ηλεκτροδίων είναι οι **Wenner**, **Schlumberger**, **Διπόλου – Διπόλου**, **Πόλου – Διπόλου**, **Πόλου – Πόλου**.

Αναλυτικότερα, στη διάταξη **Wenner** τα ηλεκτρόδια δυναμικού και ρεύματος τοποθετούνται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους ($AM=MN=NB=a$). Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

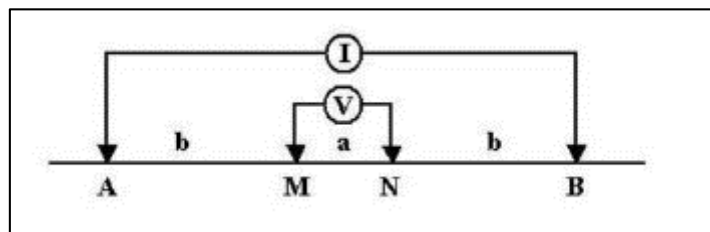
$$\rho_A = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (3-10)$$



Σχήμα 3.6. Διάταξη Wenner.

Στη διάταξη **Schlumberger** τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B είναι τοποθετημένα σε απόσταση μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού M, N. Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

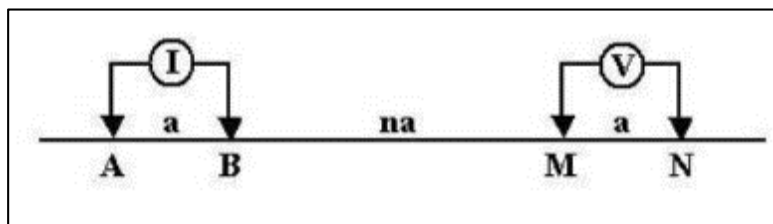
$$\rho_A = \pi \frac{b^2}{a} \frac{\Delta V}{I}, \alpha \ll b \quad (3-11)$$



Σχήμα 3.7. Διάταξη Schlumberger.

Στη Διάταξη **Διπόλου – Διπόλου** τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και τα ηλεκτρόδια δυναμικού M, N δημιουργούν δύο δίπολα που διατηρούν σταθερή απόσταση και ίση με a ($AB=MN=a$). Τα δίπολα απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με na . Η φαινόμενη αντίσταση είναι:

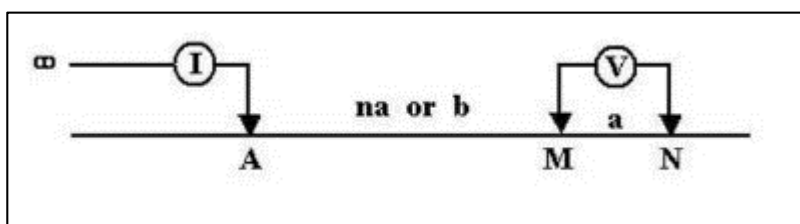
$$\rho_A = -\pi na(n+1)(n+2) \frac{\Delta V}{I} \quad (3-12)$$



Σχήμα 3.8. Διάταξη διπόλου – διπόλου.

Στη Διάταξη **Πόλου – Διπόλου** το ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος B βρίσκεται σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τα άλλα ηλεκτρόδια. Έτσι οι αποστάσεις BM, BN θεωρούνται πρακτικά άπειρες, η απόσταση MN είναι ίση με a και η απόσταση AM ίση με na . Η φαινόμενη αντίσταση ισούται με:

$$\rho_A = 2\pi na(n+1) \frac{\Delta V}{I} \quad (3-13)$$

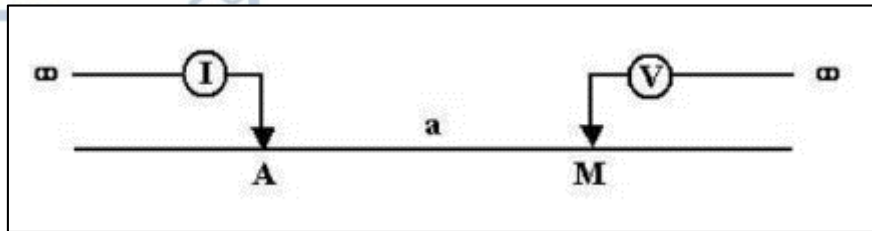


Σχήμα 3.9. Διάταξη πόλου- διπόλου.

Στη Διάταξη **Πόλου – Πόλου** ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος B τοποθετείται σε άπειρη απόσταση, όπως και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού N. Οι αποστάσεις BM, BN, AN θεωρούνται άπειρες και η απόσταση AM είναι ίση με a . Η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_A = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

(3-14)



Σχήμα 3.10. Διάταξη πόλου – πόλου.

Τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν την επιλογή της διάταξης είναι:

- Η ευαισθησία της διάταξης σε σχέση με τις κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές της αντίστασης του υπεδάφους.
- Ο λόγος της ισχύος του σήματος προς την ισχύ του θορύβου (S/N).

Η επιλογή της καταλληλότερης διάταξης εξαρτάται ακόμα από τη δυσκολία της έρευνας, το είδος των δομών ενδιαφέροντος, το βάθος διασκόπησης κ.α.

Στον Πίνακα II παρουσιάζονται οι διατάξεις των ηλεκτροδίων και η αξιολόγηση τους σε σχέση με τον λόγο S/N, τις πλευρικές και κατακόρυφες μεταβολές.

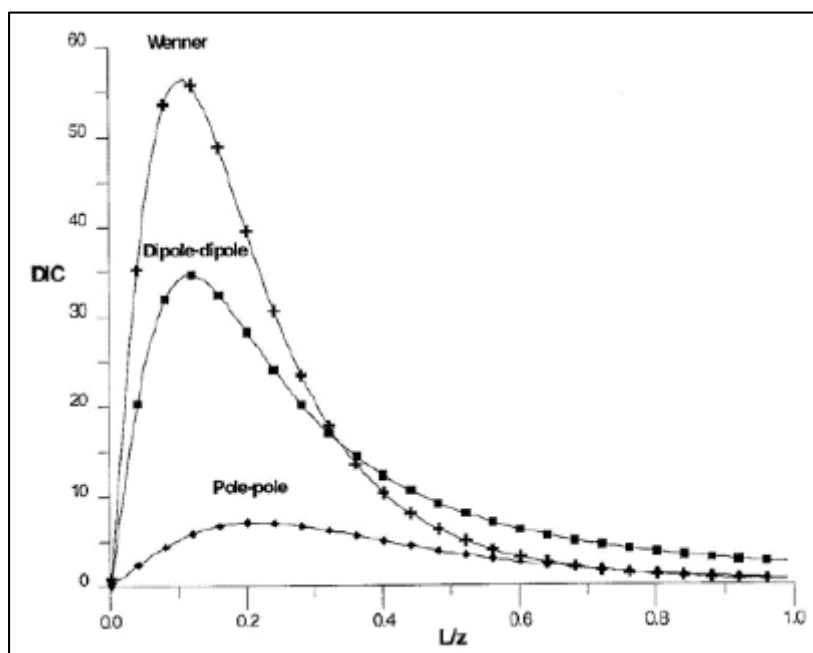
Πίνακας II. Πίνακας αξιολόγησης των διατάξεων (Ward, 1990).

ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	ΛΟΓΟΣ S/N	ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ	ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ
Wenner	1	4	1
Schlumberger	2	3	1
Dipole – Dipole	4	1	2
Pole – Dipole	3	2	2
1=ΒΕΛΤΙΣΤΗ 4=ΧΕΙΡΙΣΤΗ			

3.2.2 Βάθος διασκόπησης

Το βάθος διασκόπησης αποτυπώνει το μέγιστο βάθος για το οποίο μία διάταξη μπορεί να δώσει αξιόπιστα στοιχεία. Η δυσκολία στον καθορισμό του βάθους διασκόπησης έγκειται στην αρχική υπόθεση ότι η γη είναι ομογενής και ισότροπη καθώς και στις τιμές της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που δεν προέρχονται από ένα συγκεκριμένο βάθος.

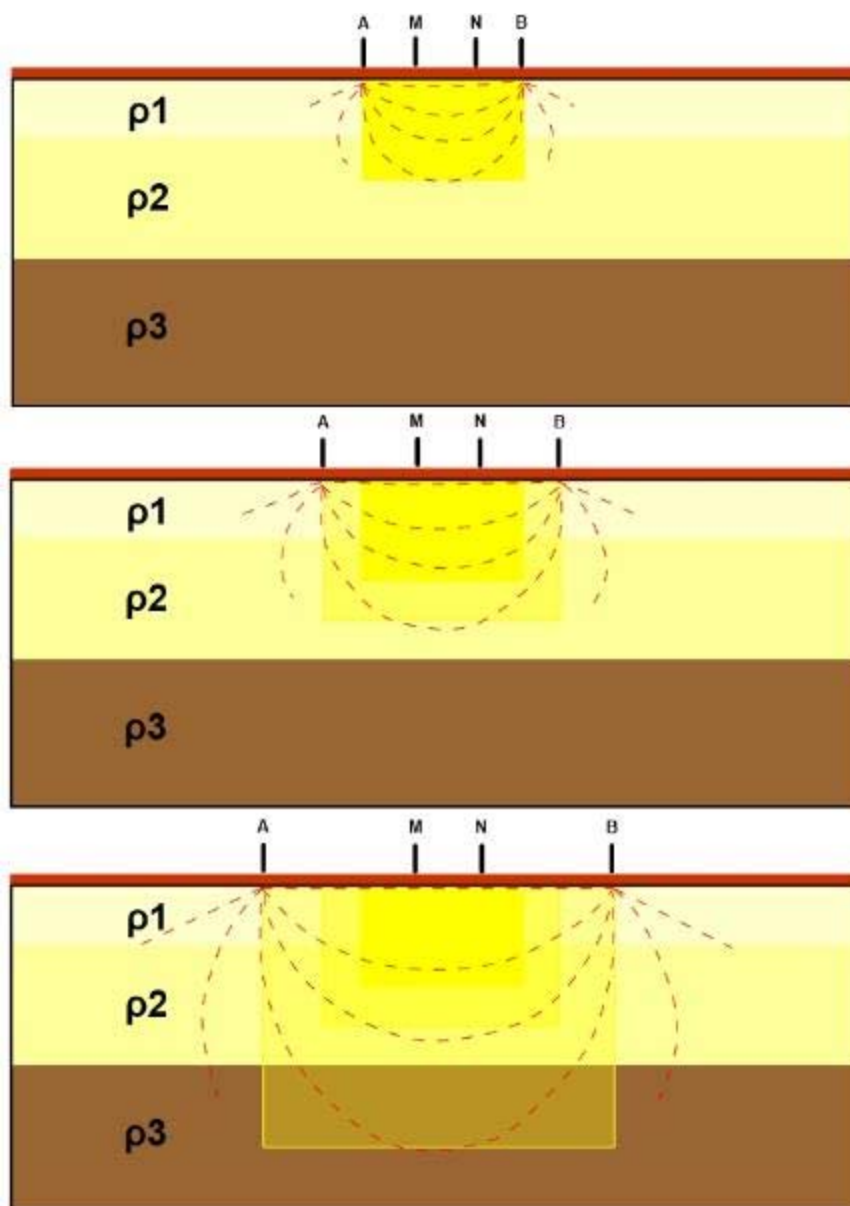
Ο υπολογισμός του βάθους διασκόπησης για την κάθε διάταξη γίνεται με τη χρήση καμπυλών DIC (Depth of Investigation Characteristic), οι οποίες απεικονίζουν την απόκριση ενός λεπτού οριζόντιου στρώματος μεταβαλλόμενου βάθους. Οι Roy & Apparao (1971) και Roy (1972) πρότειναν ότι το μέγιστο βάθος διασκόπησης είναι αυτό για το οποίο η καμπύλη DIC γίνεται μέγιστη. Ο Edwards (1977) πρότεινε ότι το μέγιστο βάθος διεύθυνσης προσδιορίζεται όταν η περιοχή που βρίσκεται κάτω από την καμπύλη DIC χωρίζεται σε δύο τμήματα ίσου εμβαδού.



Σχήμα 3.11. Καμπύλες DIC για τις διατάξεις Wenner, Διπόλου – Διπόλου και Πόλου – Πόλου. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι L και το βάθος διεύθυνσης του ρεύματος είναι z (Τσούρλος, 1995).

Το βάθος διασκόπησης εξαρτάται από την απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος και των ηλεκτροδίων δυναμικού. Στο Σχ. 3.12 η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος A , B αυξάνεται, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού M , N παραμένουν σταθερά. Παρατηρείται

ότι καθώς η απόσταση των ηλεκτροδίων μεγαλώνει, αντίστοιχα και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος αυξάνεται.



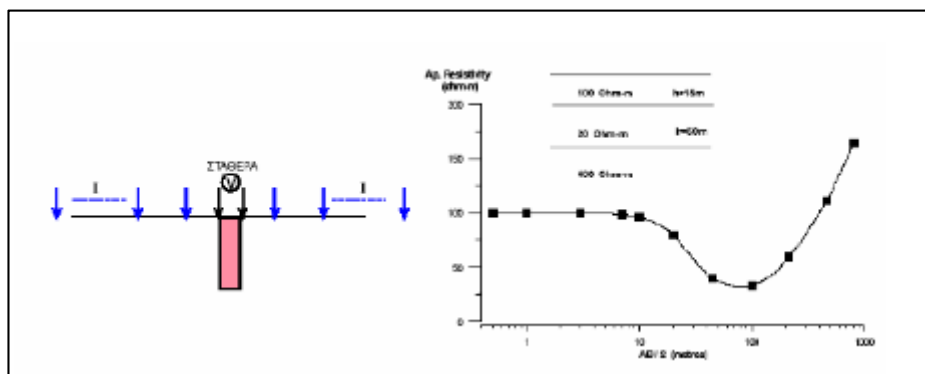
Σχήμα 3.12. Βάθος διασκόπησης για τη διάταξη Schlumberger. (Τροποποίηση του σχήματος <http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>).

3.2.3 Μέθοδοι έρευνας

Η συλλογή των δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης πραγματοποιείται με τη γεωηλεκτρική βυθοσκόπηση, την οριζοντιογραφία και την ηλεκτρική τομογραφία.

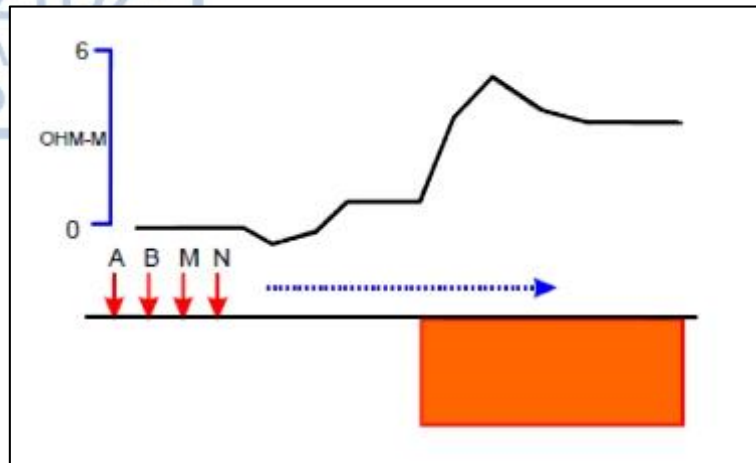
Βυθοσκόπηση. Στη μέθοδο της βυθοσκόπησης θεωρείται ότι η αντίσταση του υπεδάφους μεταβάλλεται μόνο με το βάθος. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου το κέντρο διάταξης των ηλεκτροδίων παραμένει σταθερό και η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται σταδιακά. Με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης.

Έτσι, καθορίζεται η κατακόρυφη κατανομή της ειδικής αντίστασης σε μία στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης. Η διάταξη που χρησιμοποιείται είναι η Schlumberger. Το κύριο πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων.



Σχήμα 3.13. Μέθοδος της βυθοσκόπησης.

Οριζοντιογραφία. Στη μέθοδο της οριζοντιογραφίας το βάθος είναι σταθερό και το ζητούμενο είναι οι πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης. Οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μία σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα. Έτσι, εντοπίζονται δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Χρησιμοποιούνται οι διατάξεις Wenner, Διπόλου – Διπόλου, Πόλου – Διπόλου. Το βασικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής είναι η έρευνα για τον εντοπισμό ρηγμάτων, φακών άμμου ή χαλικών και κενών. Ιδιαίτερα χρησιμοποιείται στην αρχαιομετρία.

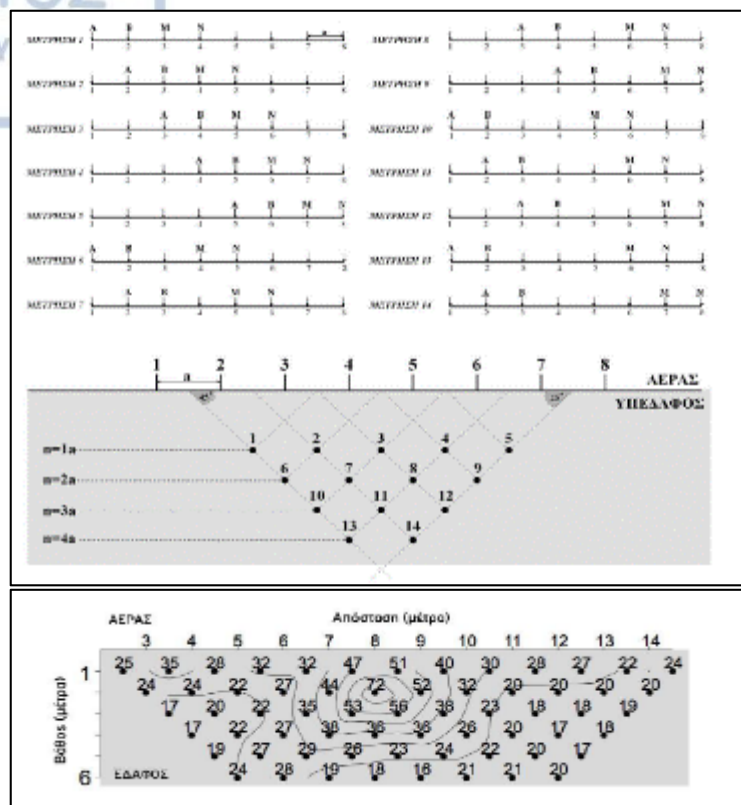


Σχήμα 3.14. Μέθοδος της οριζοντιογραφίας για τον εντοπισμό ρήγματος.
(<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp762e/>).

Ηλεκτρική Τομογραφία. Η παράλληλη μέτρηση και χαρτογράφηση των κατακόρυφων και πλευρικών μεταβολών της γεωηλεκτρικής αντίστασης εισάγει τον όρο της ηλεκτρικής τομογραφίας. Ουσιαστικά, η ηλεκτρική τομογραφία είναι ο συνδυασμός των μεθόδων της βυθοσκόπησης και της οριζοντιογραφίας. Παρέχει πληροφορίες τόσο για την πλευρική όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα λήψης μεγάλου αριθμού μετρήσεων. Η λήψη των μετρήσεων καθίσταται αποτελεσματικότερη και λιγότερο επίπονη με τη χρησιμοποίηση συστημάτων αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών.

Στο Σχ. 3.15 περιγράφεται η δισδιάστατη διασκόπηση με τη διάταξη διπόλου – διπόλου για 8 ηλεκτρόδια. Τα δεδομένα απεικονίζονται σε δύο διαστάσεις. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των διπόλων είναι $n=4$. Η τιμή της αντίστασης τοποθετείται στο σημείο τομής των δύο ευθειών. Ως αρχή των ευθειών θεωρείται το κέντρο των διπόλων AB και MN αντίστοιχα, σχηματίζοντας γωνία 45 μοιρών με το οριζόντιο επίπεδο.

Τα δεδομένα απεικονίζονται σαν κατακόρυφες τομές του εδάφους με τη μορφή καμπυλών ίσης φαινόμενης αντίστασης. Η απεικόνιση αυτή αποτελεί την αρχική ερμηνεία των αποτελεσμάτων με τη διαδικασία της ψευδοτομής.



Σχήμα 3.15. Μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου – διπόλου για 8 ηλεκτρόδια (Πάνω) (Τσούρλος, 1995). Ψευδοτομή με τη μορφή καμπυλών ίσης φαινόμενης αντίστασης (Κάτω) (Τσούρλος, 1995).

Στη μέθοδο της ψευδοτομής χρησιμοποιούνται οι τυπικές διατάξεις ηλεκτροδίων.

Η ηλεκτρική τομογραφία δεν περιορίζεται σ' αυτό και πλεονεκτεί στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς δεν υπάρχει όριο στην οριζόντια στρωματογραφία. Η ανάπτυξη λογισμικών για την επεξεργασία και ερμηνεία των μετρήσεων οδήγησε στην ταχύτατη διάδοση της ηλεκτρικής τομογραφίας. Η ηλεκτρική τομογραφία αναφέρεται σε μοντέλο υπεδάφους δύο διαστάσεων και επιπλέον είναι υλοποιήσιμη η διεξαγωγή τρισδιάστατων μετρήσεων στο ύπαιθρο, που δίνουν πληροφορίες για την κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στο χώρο.

Για την εκτέλεση τρισδιάστατων μετρήσεων απαιτείται η χρήση πολλών ηλεκτροδίων, τα οποία τοποθετούνται σε κάνναβο και πραγματοποιείται η λήψη μετρήσεων επιλέγοντας συνδυασμούς ηλεκτροδίων σε διευθύνσεις παράλληλα στους άξονες X, Y ή παράλληλα στον έναν από τους δύο άξονες. Η επεξεργασία των τρισδιάστατων δεδομένων που συλλέγονται πραγματοποιείται με τη χρήση αλγορίθμων τρισδιάστατης αντιστροφής.

Στα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη λήψη μετρήσεων σε δύο και τρεις διαστάσεις είναι δυνατό να εισαχθεί ο παράγοντας του χρόνου με σκοπό τη διαχρονική παρακολούθηση της εξέλιξης του υπό μελέτη φαινομένου. Η επεξεργασία τους γίνεται με τη διαδικασία της αντιστροφής τεσσάρων διαστάσεων. Ένα παράδειγμα 4D ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η εφαρμογή της στη παρακολούθηση της εξάπλωσης ενός ρύπου. Στη συγκεκριμένη εργασία η 4D ηλεκτρική τομογραφία εφαρμόζεται για τη διαχρονική παρακολούθηση της κατείσδυσης του νερού μέσω ενός πειράματος ελεύθερης κατείσδυσης που εκτελέστηκε και διερευνάται αν το νερό καταλήγει στον όγκο των σκουπιδιών και παράγει τα διασταλλάζοντα υγρά.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία της 4D αντιστροφής με τη χρήση λογισμικού προγράμματος.

3.3 Ερμηνεία των μετρήσεων

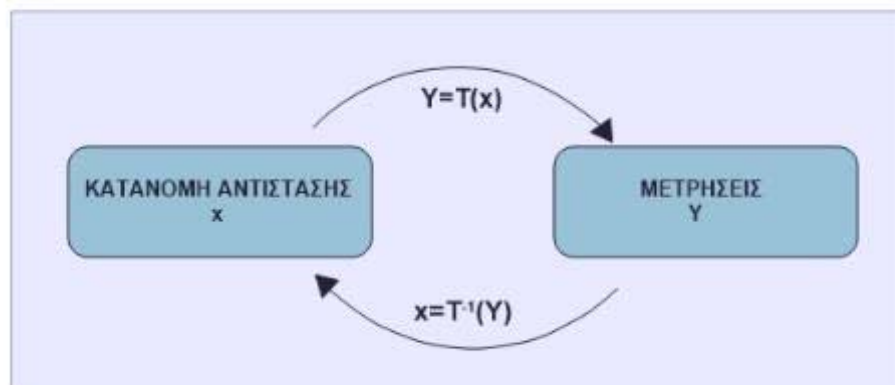
Η διαδικασία της αντιστροφής είναι η συνηθέστερη τεχνική που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της πραγματικής εικόνας της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Στόχος είναι να βρεθεί ένα μοντέλο ηλεκτρικών αντιστάσεων το οποίο θα προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης αντίστασης.

Σε πρώτο στάδιο είναι απαραίτητη η επίλυση του ευθέως προβλήματος, δηλαδή η εύρεση των συνθετικών φαινόμενων αντιστάσεων που προκαλεί μία γνωστή κατανομή αντιστάσεων του υπεδάφους. Αναλυτικότερα, έστω η μεταβλητή x δίνει την κατανομή των αντιστάσεων και η μεταβλητή Y είναι οι μετρήσεις του οργάνου. Η εύρεση του μετασχηματισμού T , που συνδέει την κατανομή των πραγματικών τιμών της αντίστασης x με τις μετρήσεις Y είναι η επίλυση του ευθέως προβλήματος.

$$Y = T(x) \quad (3-15)$$

Η εύρεση του αντίστροφου μετασχηματισμού T^{-1} που συνδέει τις γνωστές μετρήσεις Y με την άγνωστη κατανομή της αντίστασης x είναι η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος.

$$x = T^{-1}(Y) \quad (3-16)$$



Σχήμα 3.16. Επίλυση του ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος μέσω του μετασχηματισμού T και T^{-1} αντίστοιχα.

3.3.1 Ευθύ πρόβλημα

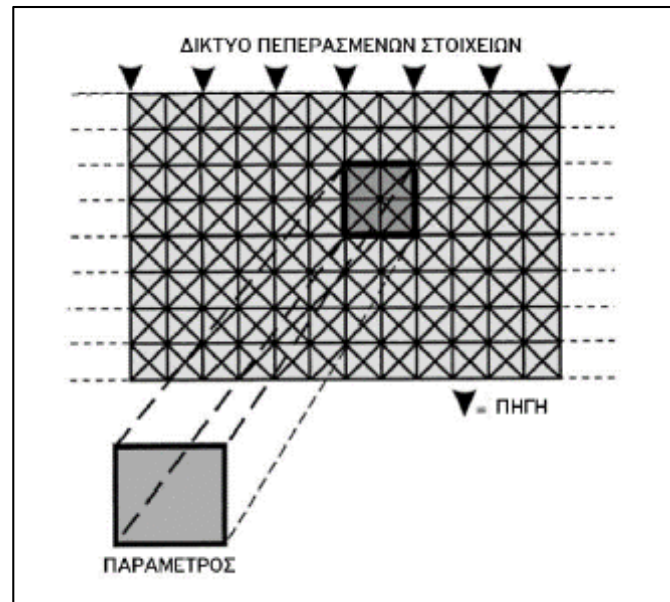
Η επίλυση του ευθέος προβλήματος υπολογίζει τις συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις που προκύπτουν, με γνωστή την κατανομή της πραγματικής αντίστασης ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου. Οι τρόποι υπολογισμού της φαινόμενης αντίστασης είναι οι αναλυτικές μέθοδοι και οι αριθμητικές μέθοδοι.

Αναλυτικές μέθοδοι. Οι αναλυτικές μέθοδοι επιλύουν μόνο απλές δομές, όπως σφαιρικές ή κυλινδρικές, και μόνο απλά μοντέλα, όπως δύο οριζόντιων ή κατακόρυφων στρωμάτων.

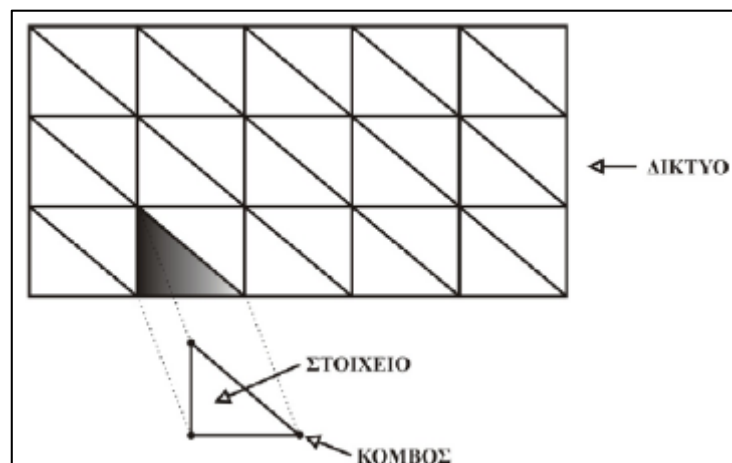
Αριθμητικές μέθοδοι. Οι αριθμητικές μέθοδοι επιλύουν σύνθετα προβλήματα με τη χρήση διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Οι αριθμητικές μέθοδοι χωρίζονται στις μεθόδους ολοκληρωτικών εξισώσεων και στις διαφορικές μεθόδους.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι διαφορικές μέθοδοι, οι οποίες χωρίζονται στις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών. Κατά την εφαρμογή τους το υπέδαφος υποδιαιρείται σε κελιά διαφορετικής αντίστασης. Σε κάθε ένα κελί η τιμή της αντίστασης θεωρείται σταθερή. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το υπέδαφος χωρίζεται σε τριγωνικά στοιχεία, ενώ η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιεί ορθογώνια κελιά.

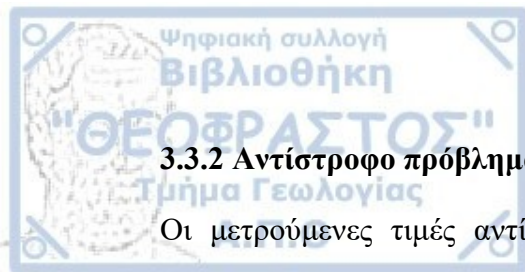
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να επιλύσει περιορισμένες δομές ακανόνιστου σχήματος, πολύ χρήσιμο σε περιπτώσεις τοπογραφικών ανωμαλιών, καθώς είναι εφικτή η απομάκρυνση του ψευδοθορύβου.



Σχήμα 3.17. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Τσούρλος, 1995).



Σχήμα 3.18. Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Διακριτοποίηση της περιοχής σε τριγωνικά στοιχεία (Τσούρλος, 1995).



3.3.2 Αντίστροφο πρόβλημα

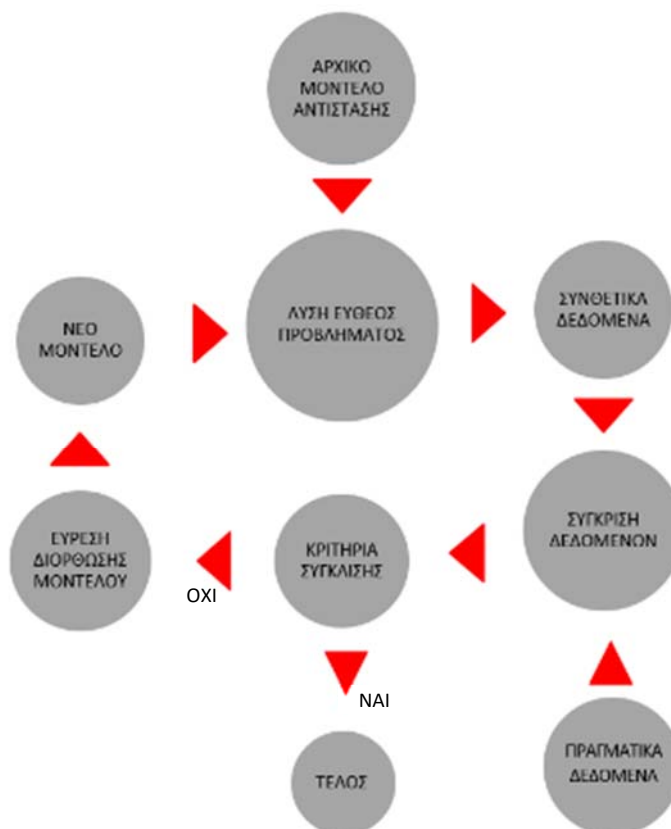
Οι μετρούμενες τιμές αντίστασης κατά τη διεξαγωγή μίας γεωφυσικής μελέτης αντιστοιχούν στις τιμές της φαινόμενης αντίστασης. Ο προσδιορισμός ενός μοντέλου κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης από τις μετρούμενες τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος.

Ορισμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος είναι η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Lines & Treitel, 1984), η μέθοδος των ιδιζουσών τιμών (Lanczos, 1960, Golub & Reinsh, 1970, Lawson & Hanson, 1974, Strang, 1998), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (Levenberg, 1944, Marquadt, 1963, Franklin, 1970) και η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής (Tikhonov, 1963, Tikhonov & Glasko, 1965, Constable et al., 1987, deGroot – Hedlin & Constable, 1990).

Η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος προϋποθέτει πρώτα τη λύση του ευθέος προβλήματος. Από την επίλυση του ευθέος προβλήματος προκύπτουν οι τιμές του δυναμικού και στη συνέχεια υπολογίζονται οι φαινόμενες αντιστάσεις. Το αντίστροφο πρόβλημα είναι μη – γραμμικό. Έτσι, το μοντέλο κατανομής των πραγματικών αντιστάσεων δε μπορεί να οριστεί με απευθείας αντιστροφή του μη – γραμμικού μετασχηματισμού. Ακολουθείται μία επαναληπτική διαδικασία επίλυσης και μετατροπής του προβλήματος σε γραμμικό.

Έστω ότι υπάρχει ένα αρχικό μοντέλο κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης και με βάση αυτό υπολογίζονται τα συνθετικά δεδομένα. Ακολουθείται μία επαναληπτική διαδικασία επίλυσης (επαναληπτικός αλγόριθμος αντιστροφής) κατά την οποία τα συνθετικά δεδομένα παρουσιάζουν μικρή απόκριση από τα πραγματικά δεδομένα.

Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αντιστροφής ξεκινάει με την υπόθεση ενός αρχικού μοντέλου x_0 (Σχ. 3.19). Το αρχικό μοντέλο x_0 βελτιώνεται μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας επίλυσης. Για μία επανάληψη λ , το μοντέλο της αντίστασης είναι x_λ . Υπολογίζονται λοιπόν μέσω του ευθέος προβλήματος οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις $T(x_\lambda)$ και ο Ιακωβιανός πίνακας J_λ . Επίσης, υπολογίζεται το διάνυσμα διόρθωσης του μοντέλου των αντιστάσεων και στη συνέχεια το βελτιωμένο μοντέλο (Νέο).



Σχήμα 3.19. Διάγραμμα ροής επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος.

Ο επαναληπτικός αλγόριθμος αντιστροφής τερματίζεται όταν ικανοποιούνται τα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού. Αυτά στηρίζονται στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα RMS μεταξύ των συνθετικών και πραγματικών δεδομένων, το οποίο υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη βελτίωσης του μοντέλου αντίστασης. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$\% \text{ RMS} = 100 \times \sqrt{\left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(d_i^{\text{obs}} - d_i^{\text{calc}})^2}{(d_i^{\text{obs}})^2} \right]} \quad (3-17)$$

όπου,

- m, ο αριθμός των μετρήσεων
- d_i^{obs} , η πραγματική φαινόμενη αντίσταση
- d_i^{calc} , η συνθετική φαινόμενη αντίσταση

Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν:

- ☑ Το σφάλμα μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων αυξάνεται (ύπαρξη θορύβου).
- ☑ Κατά την επαναληπτική διαδικασία επίλυσης η μεταβολή των σφαλμάτων είναι πολύ μικρή (<5%).
- ☑ Είναι γνωστά τα σφάλματα των δεδομένων και το σφάλμα που προκύπτει από την διαδικασία της αντιστροφής έχει μικρότερη τιμή από αυτά. Συνήθως, αυτό συμβαίνει γιατί στα δεδομένα υπάρχει θόρυβος και το μοντέλο προσπαθεί να το ερμηνεύσει.
- ☑ Ολοκληρώνεται ο προεπιλεγμένος μέγιστος αριθμός επανάληψης.

3.3.3 Ιακωβιανός Πίνακας

Για την επίλυση του μη – γραμμικού αντίστροφου προβλήματος είναι απαραίτητη η χρήση του Ιακωβιανού πίνακα ή πίνακα ευαισθησίας. Η σχέση που συνδέει τον ρυθμό μεταβολής των μετρούμενων φαινομένων αντιστάσεων ή δυναμικών με τη μεταβολή της αντίστασης μίας παραμέτρου εκφράζεται μέσω του Ιακωβιανού πίνακα.

Έστω ότι η γη χωρίζεται σε N παραμέτρους και η κάθε μία παράμετρος είναι δυνατό να έχει διαφορετική τιμή της αντίστασης, ρ_j , η οποία μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τις τιμές των αντιστάσεων των άλλων παραμέτρων, και M τα παρατηρούμενα δεδομένα που είναι οι φαινόμενες αντιστάσεις ρ_{ai} , τότε ο Ιακωβιανός πίνακας θα έχει διαστάσεις $M \times N$. Το κάθε στοιχείο i, j του J δίνεται από τη σχέση:

$$J_{ij} = \frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \rho_j} = - \frac{\partial \rho_{ai}}{\partial \sigma_j} = \frac{2\pi \partial V_i}{KI \partial \sigma_j} \quad (3-18)$$

- K , ο γεωμετρικός παράγοντας, γνωστή ποσότητα
- I , η ένταση του ρεύματος, γνωστή ποσότητα

Έτσι, ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής του δυναμικού προς τη μεταβολή της αγωγιμότητας, $\frac{\partial V_i}{\partial \sigma_j}$ υπολογίζει τον πίνακα ευαισθησίας. Ο πίνακας ευαισθησίας περιέχει στοιχεία για την ευαισθησία μίας διάταξης για όλο το χώρο και δίνει τις τιμές της ευαισθησίας των μετρήσεων για μία ορισμένη παράμετρο.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η παρούσα γεωφυσική έρευνα έλαβε χώρα στην περιοχή του αποκατεστημένου χώρου ταφής απορριμμάτων (ΑΧΤΑ) Δερβενίου. Ο ΑΧΤΑ Δερβενίου καταλαμβάνει έκταση 120 στρεμμάτων και απέχει 8,5 χιλιόμετρα από τη Θεσσαλονίκη.



Σχήμα 4.1. Η ευρύτερη περιοχή του ΑΧΤΑ Δερβενίου. Δορυφορική εικόνα (Google Earth).

4.1 Παλαιά Χωματερή Δερβενίου

Στο Δερβένι η περιοχή λειτούργησε ως ανεξέλεγκτη χωματερή τη χρονική περίοδο 1974 – 1984 και έκλεισε επίσημα το 1989. Μέχρι και το έτος 1988 εξακολουθούσαν να απορρίπτουν χωρίς άδεια περιορισμένη ποσότητα σκουπιδιών. Στη συνέχεια, τα σκουπίδια επικαλύφθηκαν. Ο όγκος των σκουπιδιών ανέρχεται στα 600.000 κυβικά μέτρα εκ των οποίων τα 30.000 κυβικά μέτρα περίπου βρίσκονται στα πρανή.

Την περίοδο λειτουργίας της χωματερής η απόθεση των απορριμμάτων πραγματοποιούνταν με απόρριψη στο πρανές του μετώπου της χωματερής. Η ανεπαρκής κάλυψη των απορριμμάτων με χώμα, είχε ως αποτέλεσμα το μικρό βαθμό συμπαγοποίησης τους. Τα πρανή εμφανίζονται απότομα και διαβρωμένα, ενώ δεν υπήρξε μέριμνα για τα διασταλλάζοντα υγρά και το παραγόμενο βιοαέριο.



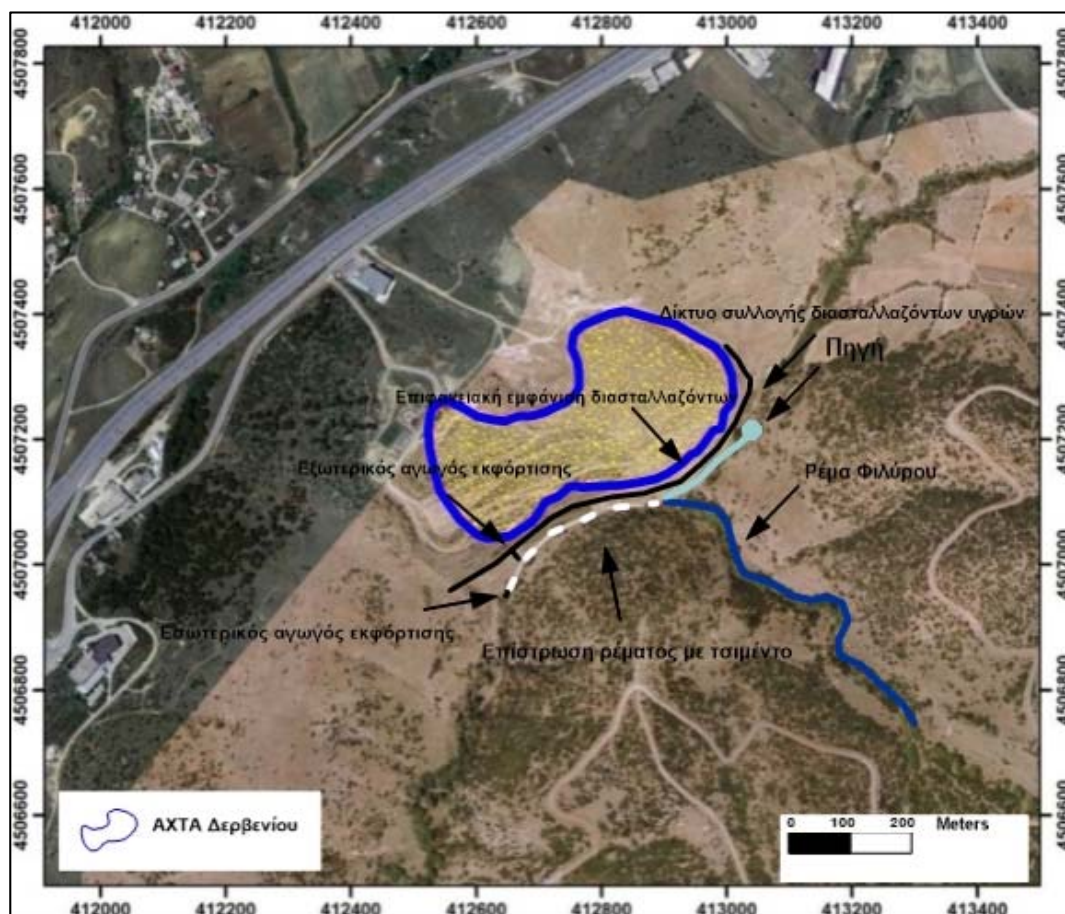
Σχήμα 4.2. Φωτογραφίες της αποκαταστημένης πρώην χωματερής Δερβενίου (Τάση και Βουμβουράκη, 2007).

4.2 Ανάπλαση Παλαιάς Χωματερής Δερβενίου

Ο αποκατεστημένος χώρος λειτούργησε το 2006. Πρωταρχικός στόχος του έργου αποκατάστασης ήταν ο έλεγχος του παραγόμενου βιοαερίου, των διασταλλαζόντων υγρών και άλλων φαινομένων. Δευτερεύων στόχος ήταν η ανάπλαση και η διαμόρφωση του χώρου σε περιβαλλοντικό πάρκο. Για την υλοποίηση του έργου αποκατάστασης της χωματερής έγιναν οι παρακάτω οι εργασίες:

- Κατασκευάστηκε στρώση εξομάλυνσης.
- Τοποθετήθηκε αργιλικός φραγμός πάχους 0.5 μέτρων και φίλτρο εκτόνωσης του βιοαερίου πάχους 0.5 μέτρων.
- Ο χώρος καλύφθηκε με εδαφικό υλικό και φυτική γη πάχους 1 μέτρου.
- Κατασκευάστηκαν φρεάτια εκτόνωσης του βιοαερίου.
- Δημιουργήθηκε δίκτυο συλλογής των διασταλλαζόντων υγρών.
- Διαμορφώθηκαν αναβαθμοί στα πρανή.
- Στη βάση των πρανών υλοποιήθηκαν έργα αντιστήριξης και προστασίας.
- Κατασκευάστηκε υδρευτικό και αρδευτικό δίκτυο.
- Πραγματοποιήθηκε καθαρισμός του υδατορέματος που βρίσκεται στο Νότιο όριο της παλαιάς χωματερής.
- Έγινε δενδροφύτευση στο πλατό και στα πρανή.
- Δημιουργήθηκαν χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων, γήπεδα, κτίριο διοίκησης, χώροι αναψυχής κ.α.

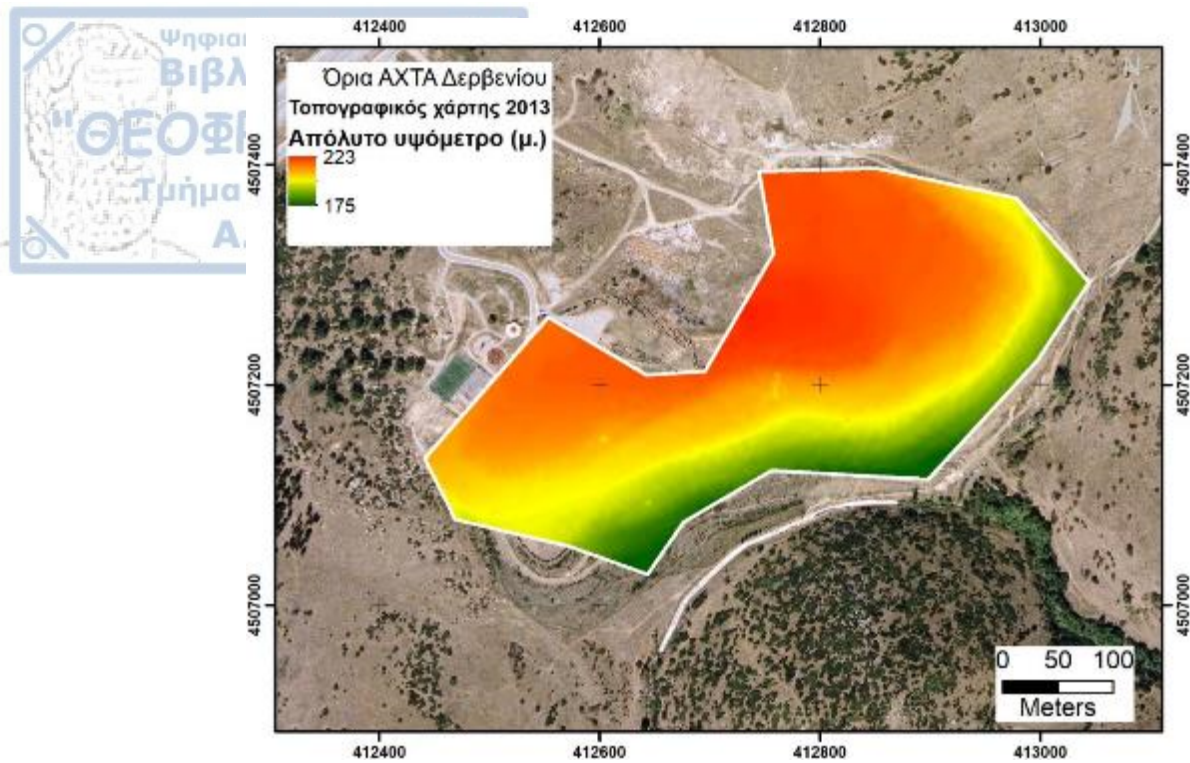
Η τελική επικάλυψη έχει ως σκοπό τον περιορισμό της κατείδυσης και ως εκ τούτου τη μείωση των διασταλλαζόντων υγρών. Η συλλογή, απομάκρυνση και επεξεργασία των διασταλλαζόντων υγρών είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία του ΑΧΤΑ Δερβενίου.



Σχήμα 4.3. Ο αποκατεστημένος χώρος ταφής απορριμμάτων Δερβενίου. Δορυφορική εικόνα του Κτηματολογίου Α.Ε. Δίκτυο ροής των διασταλλαζόντων υγρών με υπόβαθρο τη δορυφορική εικόνα. Μορφοποιημένη εικόνα (Τσούρλος κ.ά., 2013).

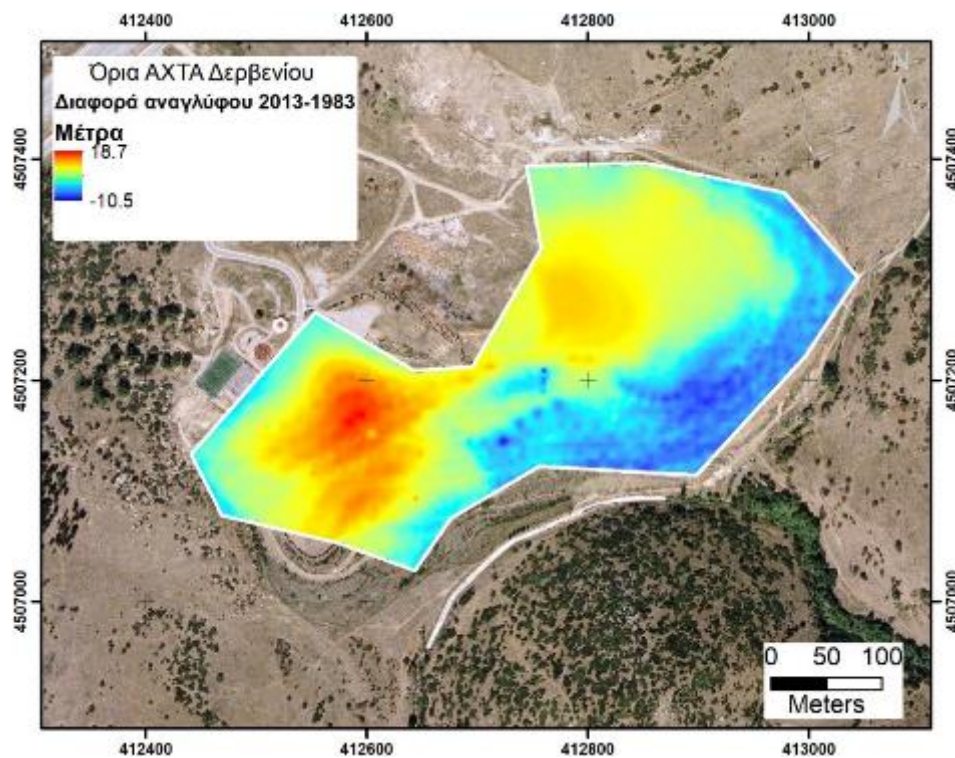
4.3 Μορφολογικά Χαρακτηριστικά

Στον τοπογραφικό χάρτη (Σχ. 4.4) αποτυπώνονται τα όρια του ΑΧΤΑ. Τα υψόμετρα στον χώρο του ΑΧΤΑ κυμαίνονται από 175 μέτρα έως 223 μέτρα. Στο Νότιο τμήμα του χώρου σημειώνεται το χαμηλότερο υψόμετρο.



Σχήμα 4.4. Τοπογραφικός Χάρτης. Μορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης.

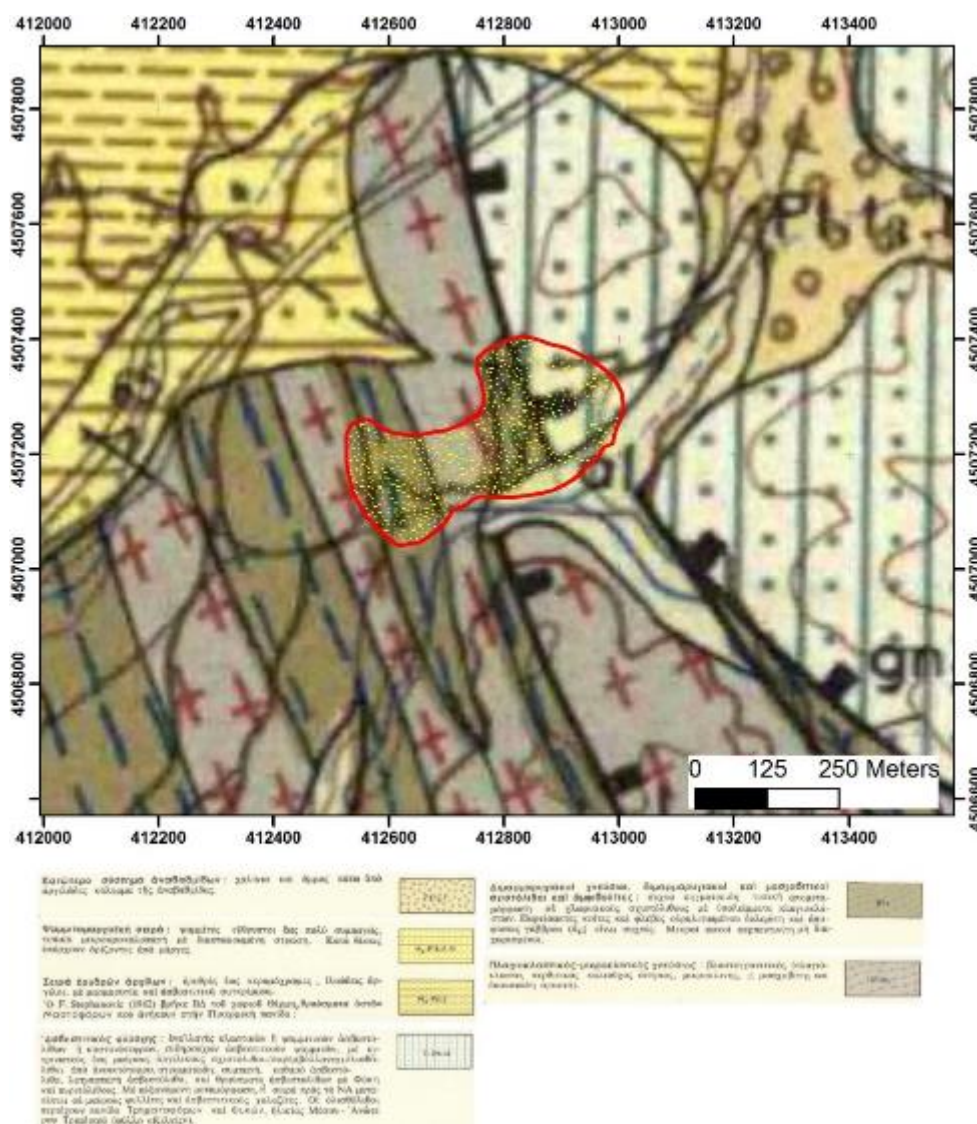
Στον παρακάτω χάρτη (Σχ. 4.5) παρουσιάζεται η διαφορά του αναγλύφου όπως αυτή διαμορφώνεται από τον όγκο των απορριμμάτων την περίοδο 1983-2013.



Σχήμα 4.5. Χάρτης διακύμανσης του όγκου των απορριμμάτων στον AXTA Δερβενίου.

Η τοποθεσία στην οποία βρίσκεται ο αποκατεστημένος χώρος ταφής απορριμμάτων Δερβενίου χαρακτηρίζεται περίπλοκη όσον αφορά τα γεωλογικά και γεωτεκτονικά στοιχεία. Η παρουσία πολλών γεωλογικών σχηματισμών, ρηγμάτων και επωθήσεων καθιστούν την περιοχή ιδιαίτερα πολύπλοκη.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο όριο της Σερβομακεδονικής και της Παιονίας ζώνης. Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι ο έντονος τεκτονισμός των πετρωμάτων. Στο νοτιοανατολικό τμήμα το υπόβαθρο συνίσταται κυρίως από σχιστόλιθους, γνεύσιους και αμφιβολίτες ηλικίας Παλαιοζωικής. Το βορειοδυτικό τμήμα χαρακτηρίζεται από την παρουσία ασβεστιτικού φλύσχη ηλικίας Τριαδικής – Μέσο Ιουρασικής.



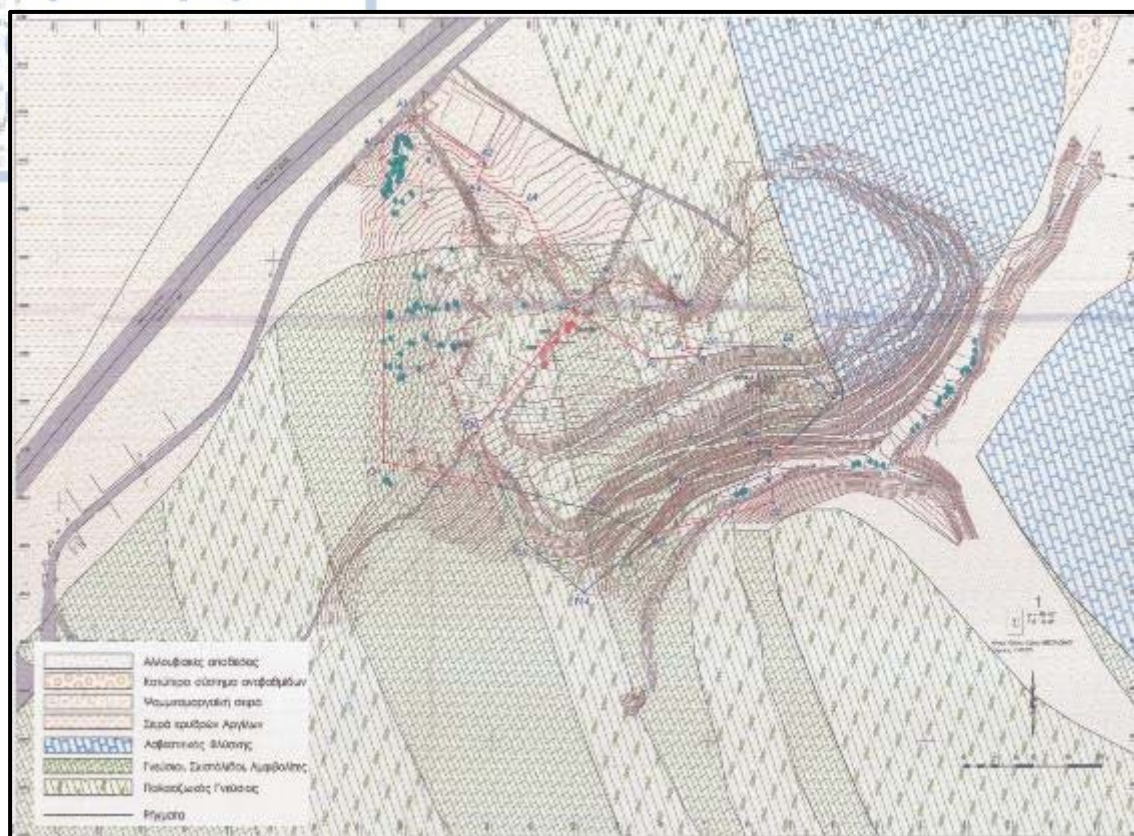
Σχήμα 4.6. Απόσπασμα γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, Κλ. 1:50.000 (Φύλλο ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ).



Σχήμα 4.7. Γνέσιος έντονα τεκτονισμένος. (Τσούρλος κ.ά., 2013).

Βορειοανατολικά της έκτασης εντοπίζονται νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Οι αποθέσεις αυτές από τις παλαιότερες προς τις νεότερες αποτελούνται από:

- Τη σειρά των ερυθρών αργίλων που συνίσταται από ερυθρές αργίλους, ιλυώδεις αργίλους με ασβεστιτικά συγκρίματα ηλικίας Ανώτερο Μειόκαινο – Κατώτερο Πλειόκαινο.
- Τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά που αποτελείται από ψαμμίτες (εύθρυπτους έως πολύ συμπαγείς), μάργες και άμμους ηλικίας Ανώτερο Μειόκαινο – Κατώτερο Πλειόκαινο.
- Ποτάμιες και χερσαίες αναβαθμίδες με άμμους, χαλίκια και αργίλους που χρονολογούνται στο Πλειστόκαινο.
- Αλλουβιακές αποθέσεις που συνίστανται από χαλίκια, κροκάλες, άμμο και αργίλους ηλικίας Ολοκαίνου.



Σχήμα 4.10. Γεωλογικός χάρτης στο χώρο του ΑΧΤΑ.

4.5 Υδρογεωλογικές Συνθήκες

4.5.1 Εισαγωγή - Προβλήματα ρύπανσης

Στις χωματερές όπου δε λαμβάνονται μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος, η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων προκαλεί δυσμενείς επιπτώσεις σε αυτό και κατ' επέκταση στην κοινωνία. Ακόμα και μετά το έργο αποκατάστασης του χώρου έχει παρατηρηθεί νερό εμπλουτισμένο με ρύπους. Τα απορρίμματα υποβαθμίζουν την ποιότητα των υδάτων, καθώς το νερό διέρχεται από αυτά, ρυπαίνεται και παράγει τα διασταλλάζοντα υγρά (στραγγίσματα).

Στην παλαιά χωματερή Δερβενίου μετά την ολοκλήρωση του έργου αποκατάστασης του χώρου διαπιστώθηκαν εκροές νερού από την περιοχή εμπλουτισμένου με διασταλλάζοντα υγρά.

Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητο να διερευνηθεί και να προσδιοριστεί η προέλευση των διασταλλαζόντων υγρών με σκοπό τον περιορισμό τους. Επιπλέον, η σύσταση τους είναι αναγκαίο να μελετηθεί ποιοτικά, ώστε να αξιολογηθούν σωστά οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον και να προταθούν τρόποι συλλογής και διαχείρισης αυτών. Η σύσταση των διασταλλαζόντων υγρών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες

όπως είναι η θερμοκρασία, οι κλιματολογικές συνθήκες, οι υδρογεωλογικές συνθήκες του εδάφους, το είδος των απορριμμάτων κ.α.

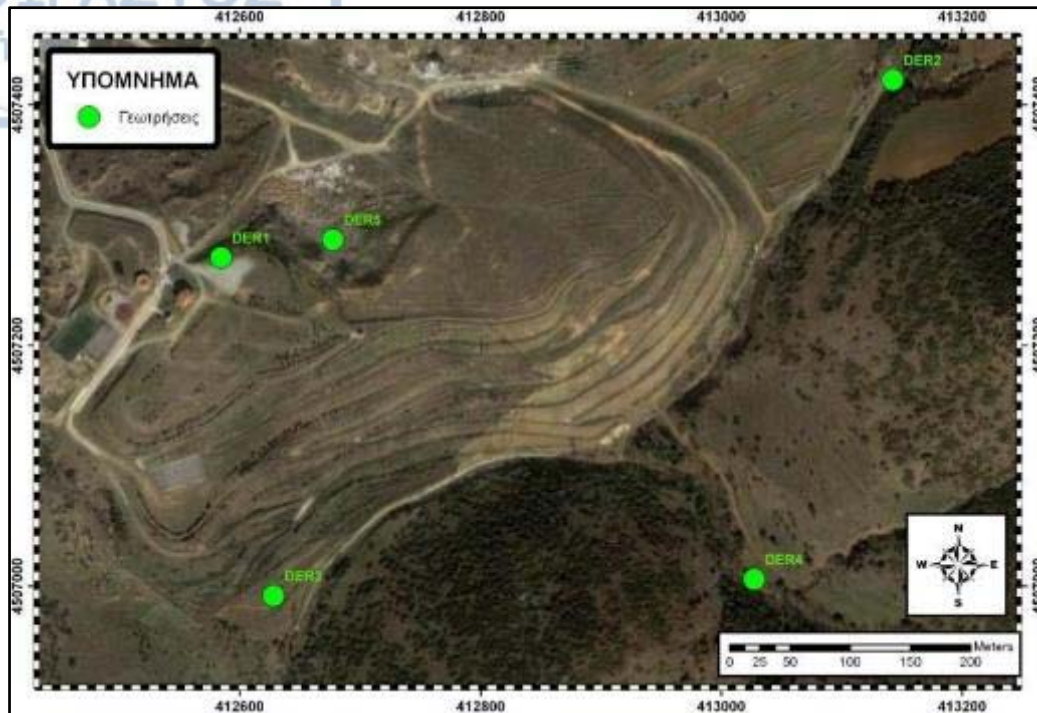
Για τον προσδιορισμό των συνθηκών και την αντιμετώπιση του προβλήματος υλοποιήθηκαν εργασίες μέσω των ερευνητικών προγραμμάτων που έλαβαν χώρα τις χρονικές περιόδους Δεκέμβριος 2012 – Ιανουάριος 2013, Ιούνιος 2013 – Οκτώβριος 2015. Οι εργασίες και τα σχετικά αποτελέσματα παρατίθενται στην παρακάτω ενότητα.

4.5.2 Υδρογεωλογικές - Υδροχημικές εργασίες

Οι υδρογεωλογικές και υδροχημικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στον ΑΧΤΑ Δερβενίου παρουσιάζονται εν συντομία παρακάτω:

- Έγινε απογραφή των γεωτρήσεων εντός και εκτός του ΑΧΤΑ.
- Μετρήθηκε η στάθμη των υπόγειων υδάτων στις γεωτρήσεις εντός και εκτός του χώρου (σε διάφορες χρονικές περιόδους και σε ορισμένες γεωτρήσεις).
- Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των φυσικοχημικών παραμέτρων στα υπόγεια και επιφανειακά νερά.
- Πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις στα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα, καθώς και στα διασταλλάζοντα υγρά.
- Ελήφθησαν μετρήσεις της παροχής στο ρέμα του Φιλύρου και στους αγωγούς που εκφορτίζουν τα διασταλλάζοντα υγρά.
- Πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αντλήσεις στις γεωτρήσεις DER1, DER5, και DER2.
- Εγκαταστάθηκε μετεωρολογικός σταθμός και καταγράφηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα.
- Έγιναν δοκιμές υδροπερατότητας σε επιλεγμένες θέσεις.

Δίκτυο Γεωτρήσεων. Στον αποκατεστημένο χώρο ταφής απορριμμάτων έχουν καταγραφεί 5 γεωτρήσεις (DER1, DER2, DER3, DER4, DER5, Σχ. 4.11). Η γεώτρηση **DER1** βρίσκεται μέσα στον ΑΧΤΑ. Έχει βάθος περίπου 200 μέτρα. Η γεώτρηση **DER2** βρίσκεται ΒΑ του ΑΧΤΑ εντός του χειμάρρου. Δεν υπάρχουν πληροφορίες για το βάθος της γεώτρησης. Η γεώτρηση **DER3** βρίσκεται στο Νότιο τμήμα του ΑΧΤΑ. Η γεώτρηση **DER4** τοποθετείται δίπλα στο ρέμα του Φιλύρου. Είναι ασωλήνωτη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η γεώτρηση **DER5** απέχει 100 μέτρα από τη γεώτρηση DER1 προς τα ανατολικά. Οι γεωτρήσεις μπορούν να αξιοποιηθούν για τον έλεγχο της διακύμανσης της στάθμης και της ποιότητας του υπόγειου νερού (Τσούρλος κ.ά., 2013).

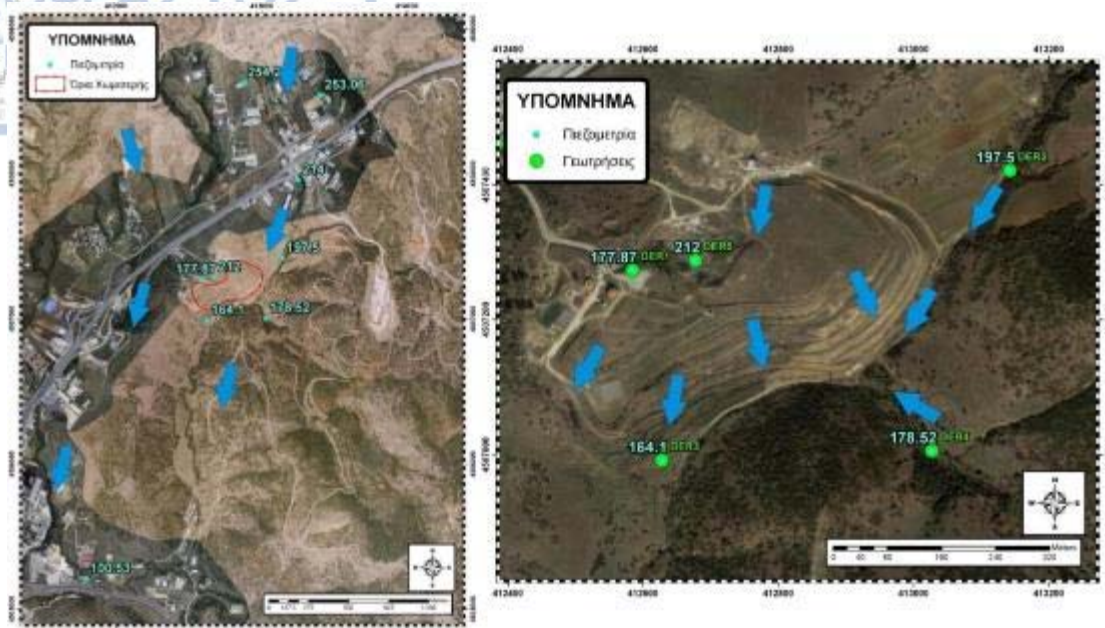


Σχήμα 4.11. Το δίκτυο γεωτρήσεων εντός του χώρου (Τσούρλος κ.ά., 2013).

Πέρα από το δίκτυο γεωτρήσεων του χώρου πραγματοποιήθηκε καταγραφή και των ιδιωτικών γεωτρήσεων της ευρύτερης ζώνης. Οι γεωτρήσεις αυτές συνδέονται με τις εργοστασιακές μονάδες της περιοχής. Λόγω της σχετικά μεγάλης απόστασης των γεωτρήσεων από τον ΑΧΤΑ και της μικρής παροχής τους δεν παρατηρήθηκε επιβάρυνση αυτών (Τσούρλος κ.ά., 2013).

Πιεζομετρία. Κατασκευάστηκαν πιεζομετρικοί χάρτες με τη ροή του υπόγειου νερού στον ΑΧΤΑ και γύρω από αυτόν. Μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού πραγματοποιήθηκαν και σε άλλες γεωτρήσεις ευρύτερα του χώρου. Η ροή του υπόγειου νερού στον ΑΧΤΑ χαρακτηρίζεται πολύπλοκη γιατί η ροή συγκλίνει από τα ΒΑ και ΒΔ στην επαφή του ασβεστιτικού φλύσχη με το γενέσιο.

Τη σύνθετη ροή δημιουργούν η παρουσία των ρηγμάτων και η διαφορά της περατότητας των γεωλογικών σχηματισμών. Η ροή στην περιοχή του ΑΧΤΑ είναι ΒΑ – ΝΔ, ενώ ευρύτερα στο ανατολικό τμήμα είναι ΒΑ – ΝΔ και στο δυτικό τμήμα ΒΒΑ – ΝΝΔ (Τσούρλος κ.ά., 2013).



Σχήμα 4.12. Πιεζομετρικός χάρτης στην ευρύτερη περιοχή (Αριστερά) και στην περιοχή μελέτης (Δεξιά) (Τσούρλος κ.ά., 2013).

Μετρήσεις Παροχής. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των παροχών του ρέματος και των δύο αγωγών εκφόρτισης των διασταλλάζοντων υγρών το Νοέμβριο του 2012 και τον Ιανουάριο του 2013. Οι μετρήσεις παροχής έδειξαν ότι το 13% της ποσότητας των υδάτων του ρέματος είναι τα επιβαρυμένα με διασταλλάζοντα υγρά που εκφορτίζονται στο ρέμα. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε περίοδο με μειωμένες βροχοπτώσεις (Νοέμβριος 2012).

Σε περίοδο βροχοπτώσεων (Ιανουάριος 2013) και ενώ παρατηρήθηκε αύξηση της παροχής του ρέματος, δεν παρατηρήθηκε και αντίστοιχη αύξηση της ποσότητας με τα επιβαρυμένα διασταλλάζοντα υγρά που εκφορτίζονται. Συμπεραίνεται ότι αναλογικά η ποσότητα των επιβαρυμένων με διασταλλάζοντα υγρών σε σχέση με την ολική ποσότητα των υδάτων του ρέματος μεταβάλλεται.

Ο αποκατεστημένος χώρος ταφής απορριμμάτων με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν διαπιστώνεται ότι τροφοδοτείται υπόγεια μέσω ανερχόμενων ρηγματογενών πηγών, οι οποίες καλύπτονται από τον ΑΧΤΑ.

Στη συνέχεια, οι μετρήσεις της παροχής στους αγωγούς και την πηγή ήταν δυνατό να εκτελεστούν σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Έτσι, το Μάιο του 2013 πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της παροχής στον εξωτερικό αγωγό. Ακολούθησαν

επαναληπτικές μετρήσεις τις περιόδους (Σεπτέμβριος του 2013, Μάιος & Σεπτέμβριος του 2014, Μάιος του 2015) με εμφανή μείωση της παροχής την ξηρή περίοδο (Σεπτέμβριος) και μέγιστη τιμή παροχής το Μάιο του 2015 ($3,6 \text{ m}^3/\text{h}$).

Η παροχή στον εσωτερικό αγωγό μετρήθηκε την περίοδο των μειωμένων βροχοπτώσεων (Σεπτέμβριος του 2013 & 2014). Η μέγιστη τιμή παροχής παρατηρήθηκε τον Σεπτέμβριο του 2013. Συμπερασματικά, οι κλιματικές μεταβολές επηρεάζουν άμεσα τις εκροές του ΑΧΤΑ και ενισχύεται η άποψη ότι εμπλουτίζεται από την κατείσδυση των κατακρημνισμάτων.

4.5.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Η κυκλοφορία και η κατανομή του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$P = E + R + I \quad (4-19)$$

όπου,

- P, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα
- E, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή
- R, η επιφανειακή απορροή
- I, η κατείσδυση

Τα **ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα** αναφέρονται σε όλες τις μορφές με τις οποίες το νερό φθάνει από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης.

Η **εξατμισοδιαπνοή** είναι η μεταφορά του νερού στην ατμόσφαιρα μέσω των διεργασιών της εξάτμισης και της διαπνοής. Εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, κυρίως όμως από τη θερμοκρασία και την υγρασία.

Η **επιφανειακή απορροή** είναι το μέρος των κατακρημνισμάτων το οποίο αφού πέσει στο έδαφος, ένα μέρος του κατακρατείται και το υπόλοιπο ρέει στο υδρόρευμα.

Η **κατείσδυση** αναφέρεται στο νερό που φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους και κατεisdύει στο έδαφος, κινούμενο προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς.

Η ποσότητα του νερού που κατεisdύει είναι σημαντικό να υπολογιστεί. Σ' αυτή συμπεριλαμβάνονται τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και η πιο ενδιαφέρουσα παράμετρος είναι η βροχόπτωση (το μεγαλύτερο ποσοστό των ατμοσφαιρικών

κατακρημνισμάτων). Όμοια, η θερμοκρασία αποτελεί βασικό παράγοντα για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου.

Η βροχόπτωση, η θερμοκρασία και ο συντελεστής κατείσδυσης υπολογίζουν τη ποσότητα του νερού που κατεisdύει στη μάζα των απορριμμάτων και τον όγκο των διασταλλαζόντων υγρών που παράγεται.

Η καταγραφή της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας έγινε σε ημερήσια και μηνιαία βάση. Ενδεικτικά, η μέγιστη μηνιαία βροχόπτωση παρατηρήθηκε τον Δεκέμβριο του 2014 και η ελάχιστη τον Μάιο του 2015. Επίσης, η χαμηλότερη μηνιαία θερμοκρασία σημειώθηκε τον Ιανουάριο του 2015 και η μέγιστη τον Αύγουστο του 2015.

Πίνακας III. Ύψος βροχής και μέση θερμοκρασία.

ΜΗΝΑΣ/ΕΤΟΣ	ΥΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ (mm)	ΜΗΝΑΣ/ΕΤΟΣ	ΜΕΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)
Δεκέμβριος 2014	254,7 (μέγιστη)	Αύγουστος 2015	26,2 (υψηλότερη)
Μάιος 2014	0 (ελάχιστη)	Ιανουάριος 2015	5,4 (χαμηλότερη)

Για τον προσδιορισμό των παραγόμενων διασταλλαζόντων υγρών υπολογίζεται και η εξατμισοδιαπνοή. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίστηκε σε προηγούμενη μελέτη (Τσούρλος, κ.ά.) για το έτος 2014 και ανέρχεται σε 63,4%. Ανάλογα, η ολική απορροή Q (επιφανειακή απορροή και κατείσδυση) είναι 36,6%.

4.5.4 Δοκιμή Maag/Δοκιμή μεταβλητού φορτίου

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζεται ο συντελεστής υδροπερατότητας ή υδραυλικής αγωγιμότητας των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών. Κατά τη δοκιμή αυτή παροχετεύεται νερό στη γεώτρηση και μετρίεται ο χρόνος που χρειάζεται για να κατέβει η νέα στάθμη που δημιουργήθηκε σε μία πιο χαμηλή θέση. Ο συντελεστής υδροπερατότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{s}{c \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (4-20)$$

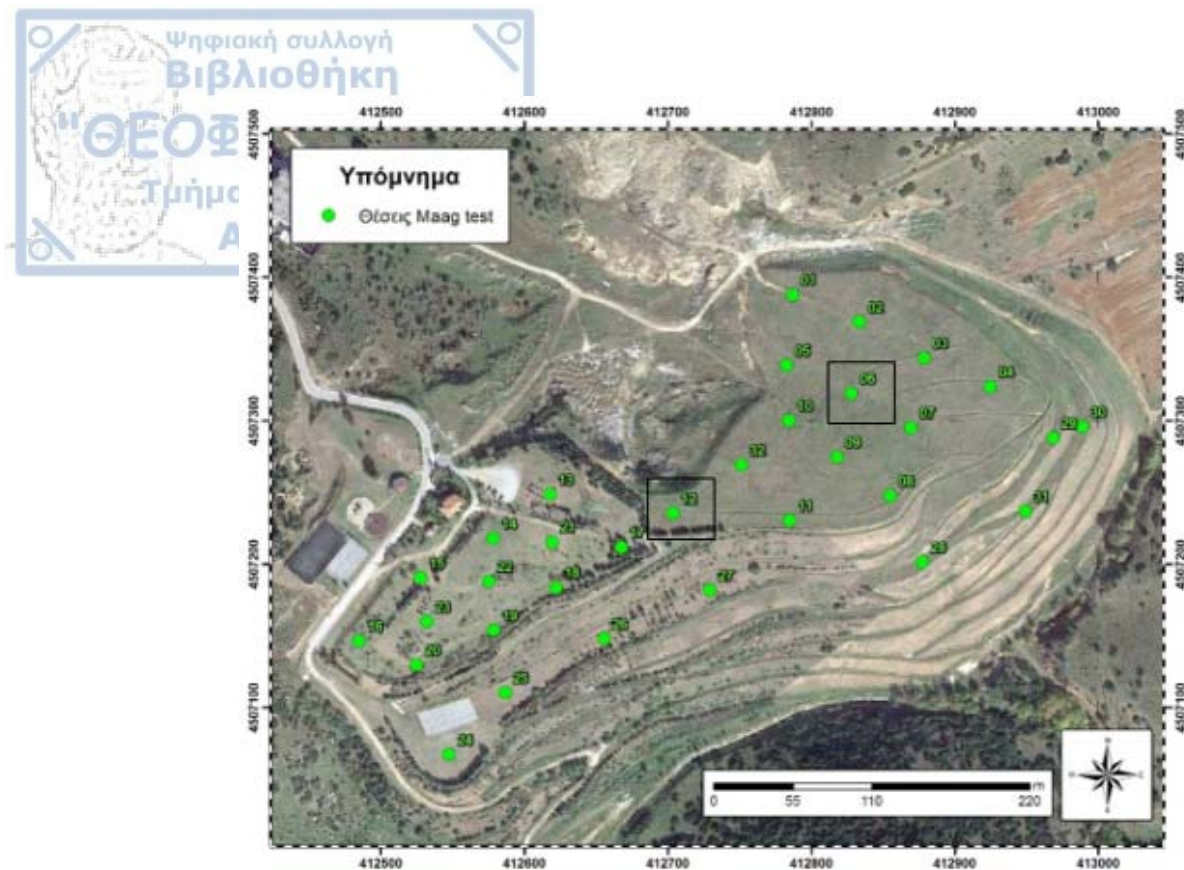
- k , Ο συντελεστής υδροπερατότητας (cm/sec)
- s , Η διατομή της στήλης του νερού μέσα στη γεώτρηση
- t , Ο χρόνος πτώσης της στάθμης του νερού (sec)
- h_1 , Η αρχική στάθμη του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (cm)
- h_2 , Η τελική στάθμη του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (cm)
- c , Συντελεστής που εξαρτάται από τη μορφή του δοκιμαζόμενου τμήματος

Υπολογίζοντας το συντελεστή υδροπερατότητας των επιφανειακών στρωμάτων στο χώρο του ΑΧΤΑ εκτιμάται η συμβολή των κατακρημνισμάτων στην ποσότητα του νερού που εισέρχεται στον όγκο των απορριμμάτων.

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών επιλέχθηκαν 32 θέσεις (Σχ. 4.14) και ανοίχτηκαν οπές βάθους 30 εκατοστών. Σε δύο θέσεις (θέση 6 και θέση 12) το βάθος της οπής έφτασε τα 60 εκατοστά. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε πλαστικός σωλήνας και απομονώθηκαν τα πρώτα 30 εκατοστά. Για την εκτέλεση της δοκιμής εισήχθη νερό στο σωλήνα και χρονομετρήθηκε η πτώση της στάθμης.



Σχήμα 4.13. Διάνοιξη οπής με σπαστό τρυπάνι. Ασωλήνωτη οπή. Οπή πληρωμένη με νερό.

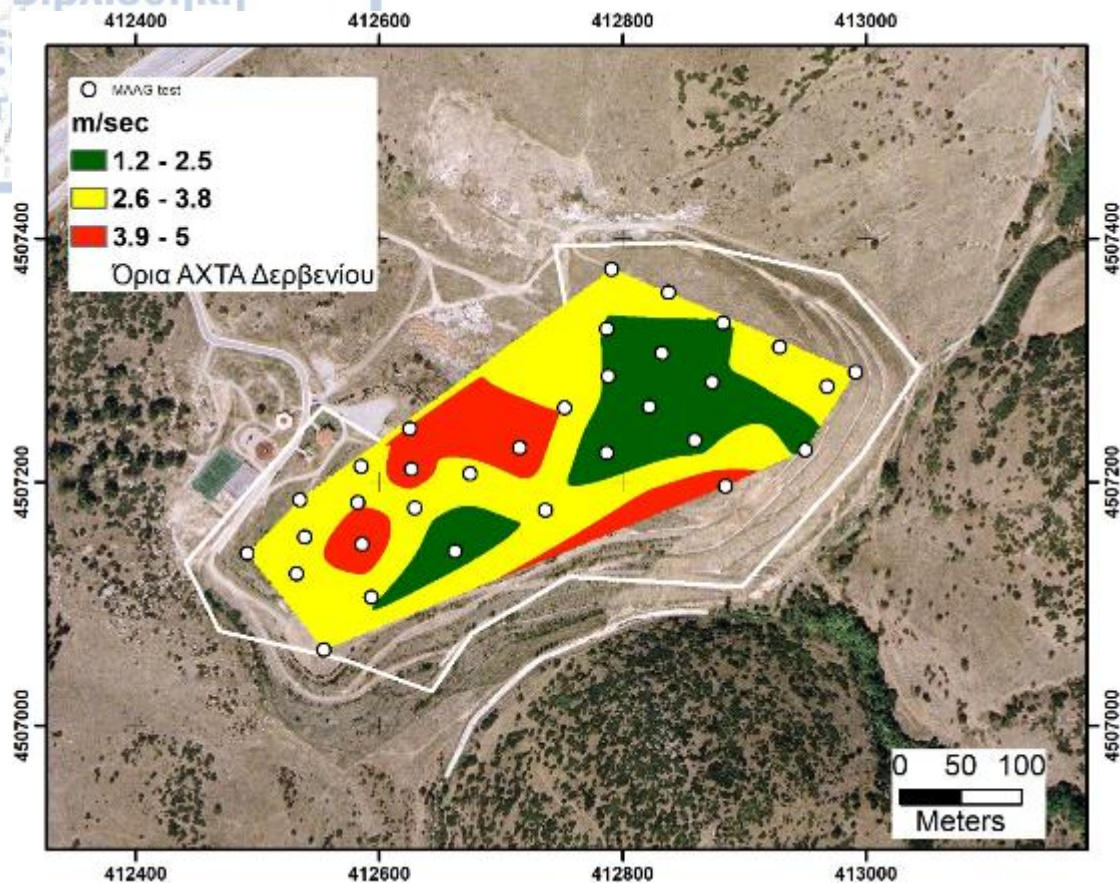


Σχήμα 4.14. Θέσεις Maag test. (Βαργεμέζης κ.ά., 2015).

Η υδραυλική αγωγιμότητα που υπολογίστηκε αφορά τα πρώτα 30 cm του εδαφικού καλύμματος (σε δύο θέσεις φθάνει μέχρι τα 60 cm). Η υδραυλική αγωγιμότητα στο εδαφικό κάλυμμα του ΑΧΤΑ κυμαίνεται από $5,06\text{E-}05$ έως $1,18\text{E-}05$ m/s με μέση τιμή $2,98\text{E-}05$ m/s. Το εύρος των τιμών χαρακτηρίζει εδάφη μέσης υδροπερατότητας (Καλλέργης 1999). Στο στρώμα μεταξύ 30 και 60 εκατοστών οι τιμές είναι παρόμοιες. Διαπιστώνεται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα μεταβάλλεται στην έκταση του ΑΧΤΑ και η στεγανοποίηση του χώρου δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική.

Πίνακας IV. Αποτελέσματα δοκιμών Maag/Μεταβλητού φορτίου.

Θέση	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/s) 0-30 cm	Υδραυλική Αγωγιμότητα (m/s) 30-60 cm
1	2,98E-05	-
2	2,75E-05	-
3	2,88E-05	-
4	2,41E-05	-
5	2,31E-05	-
6	1,92E-05	5,58E-05
7	2,40E-05	-
8	1,50E-05	-
9	1,91E-05	-
10	2,28E-05	-
11	1,18E-05	-
12	3,64E-05	5,14E-05
13	4,89E-05	-
14	4,16E-05	-
15	3,09E-05	-
16	2,74E-05	-
17	3,04E-05	-
18	3,09E-05	-
19	3,09E-05	-
20	5,06E-05	-
21	3,61E-05	-
22	4,46E-05	-
23	3,66E-05	-
24	2,87E-05	-
25	2,87E-05	-
26	2,80E-05	-
27	1,26E-05	-
28	2,97E-05	-
29	4,96E-05	-
30	2,91E-05	-
31	3,43E-05	-
32	2,08E-05	-
Μέγιστο	5,06E-05	-
Ελάχιστο	1,18E-05	-
Μέση τιμή	2,98E-05	5,36E-05



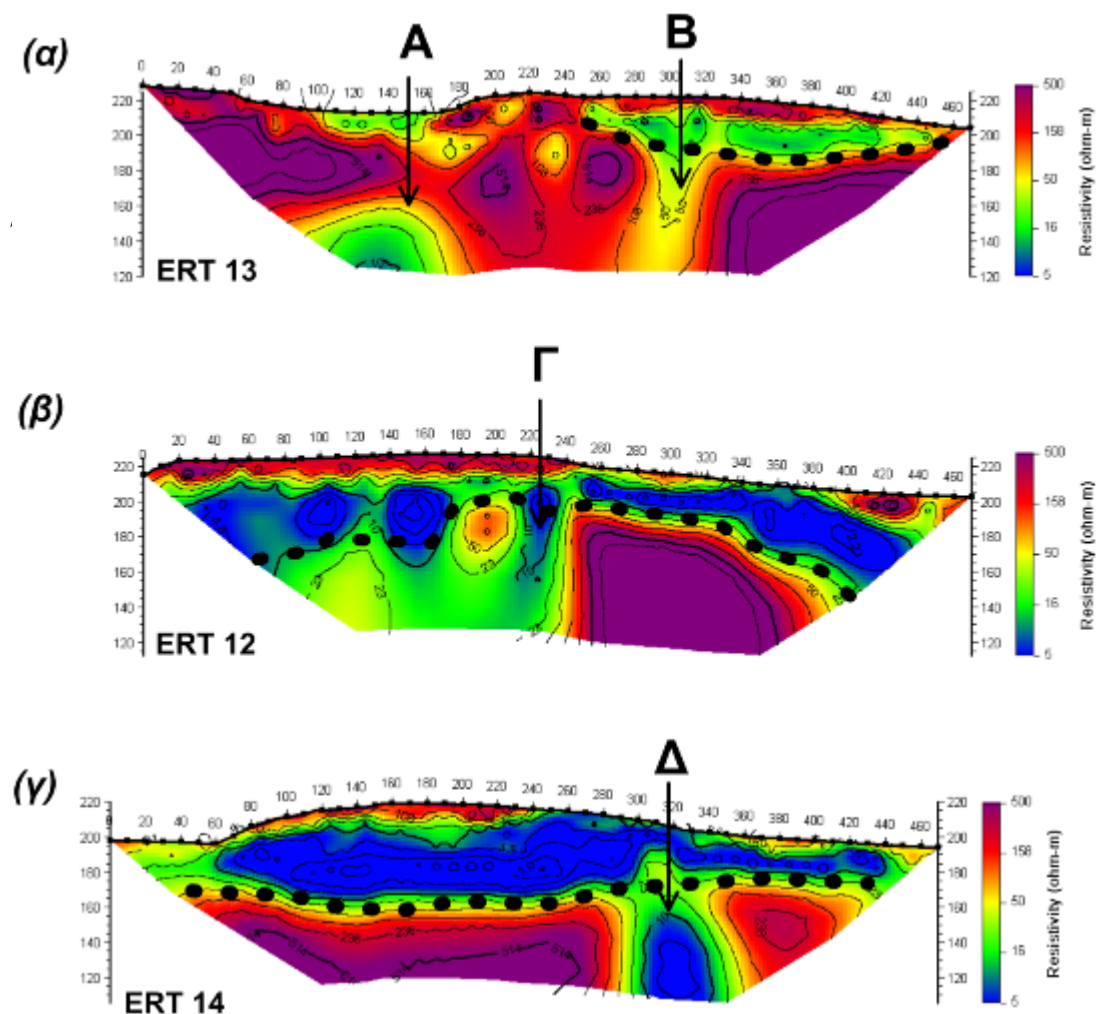
Σχήμα 4.15. Η κατανομή της υδραυλικής αγωγιμότητας στον χώρο του ΑΧΤΑ. (Βαργεμέζης κ.ά., 2015).

Συμπερασματικά, η υδροπερατότητα του εδαφικού καλύμματος χαρακτηρίζεται μέτρια έως υψηλή, γεγονός που επιτρέπει την κατεισδυση των κατακρημνισμάτων σ' αυτό. Ο αργιλικός φραγμός και το φίλτρο αποστράγγισης εμποδίζουν μόνο ένα μέρος του νερού των κατακρημνισμάτων να μην κατεισχύσει στα απορρίμματα.

4.6 Γεωφυσικές Μετρήσεις – Προηγούμενες Μελέτες

Στις ερευνητικές εργασίες που προηγήθηκαν, διεξήχθησαν γεωφυσικές μετρήσεις με τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας με στόχο τη διερεύνηση της γεωλογικής και τεκτονικής δομής του υπεδάφους, τη χαρτογράφηση ζωνών διάρρηξης και τον εντοπισμό πιθανόν θέσεων διαρροής των διασταλαζόντων υγρών με σκοπό τον περιορισμό τους. Στις περιοχές που υπήρχε επιφανειακή εκφόρτιση στραγγιδίων πραγματοποιήθηκαν πυκνές μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με τη μέθοδο του φυσικού δυναμικού για συνδυαστική ερμηνεία των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

Στο Σχ. 4.16 παρουσιάζονται ενδεικτικά 3 τομογραφίες από προηγούμενη μελέτη και απεικονίζουν την κυρίως περιοχή του ΑΧΤΑ. Το μεγαλύτερο τμήμα των παρακάτω τομογραφιών περνάει πάνω από τον όγκο των απορριμμάτων. Οι 3 τομογραφίες είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ.



Σχήμα 4.16. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους (με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου) η οποία προέκυψε από την αντιστροφή των μετρήσεων της τομογραφίας (α) ERT 13, (β) ERT 12 και (γ) ERT 14.

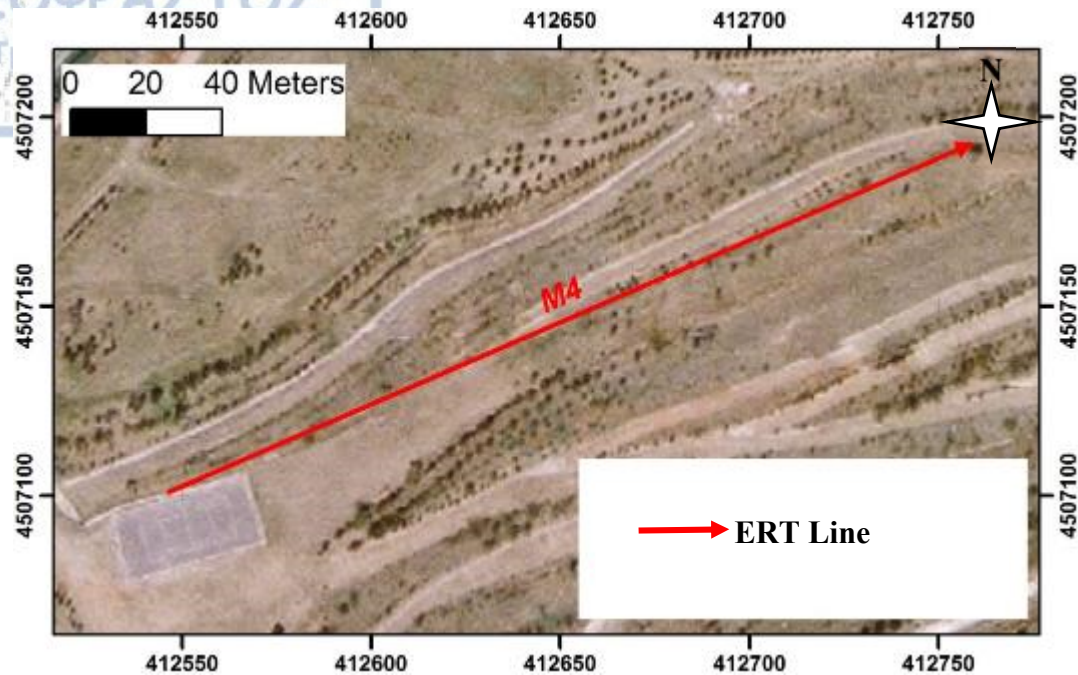
Στη τομή ERT13 (Σχ. 4.16α) εμφανίζεται το υπόβαθρο με υψηλές τιμές αντίστασης. Στα 240m και μετά είναι ο χώρος του AXTA. Επιφανειακά εντοπίζεται το στρώμα των υλικών επικάλυψης (σχετικά υψηλές τιμές αντίστασης) ενώ βαθύτερα το όριο των απορριμμάτων με το υπόβαθρο (μαύρη γραμμή στο Σχ. 4.16α). Στην τομή σε δύο περιοχές η αντίσταση του υποβάθρου μειώνεται. Αυτές αντιστοιχούν σε ζώνες διάρρηξης (σημεία Α, Β στο Σχ. 4.16α).

Η τομή ERT12 (Σχ. 4.16β) διέρχεται από τα απορρίμματα. Μέχρι τα 220m το επιφανειακό στρώμα των υλικών επικάλυψης έχει πάχος που κυμαίνεται από 5 έως 10 μέτρα, ενώ στη συνέχεια το πάχος του μειώνεται. Κάτω από το επιφανειακό στρώμα βρίσκεται το στρώμα των απορριμμάτων και βαθύτερα εντοπίζεται το όριο των απορριμμάτων με το υπόβαθρο (μαύρη γραμμή στο Σχ. 4.16β). Στην τομή στα 220m περίπου εμφανίζεται μια περιοχή όπου παρατηρείται απότομη πλευρική μεταβολή των αντιστάσεων του υποβάθρου (ρήγμα) και αντιστοιχεί σε ζώνη διάρρηξης (σημείο Γ στο Σχ. 4.16β).

Στην τομή ERT14 (Σχ. 4.16γ) εντοπίζεται ο χώρος του AXTA στα 60m. Το στρώμα των απορριμμάτων εμφανίζεται με πολύ χαμηλές τιμές αντίστασης. Κάτω από το στρώμα των απορριμμάτων εντοπίζεται το αντιστατικό υπόβαθρο. Στα 320m της τομογραφίας εμφανίζεται χαρακτηριστική ζώνη διάρρηξης (σημείο Δ στο Σχ. 4.16γ).

Σε συνέχεια των ερευνητικών εργασιών πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές μετρήσεις με στόχο τη διερεύνηση της συμμετοχής της άμεσης κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην παραγωγή στραγγισμάτων.

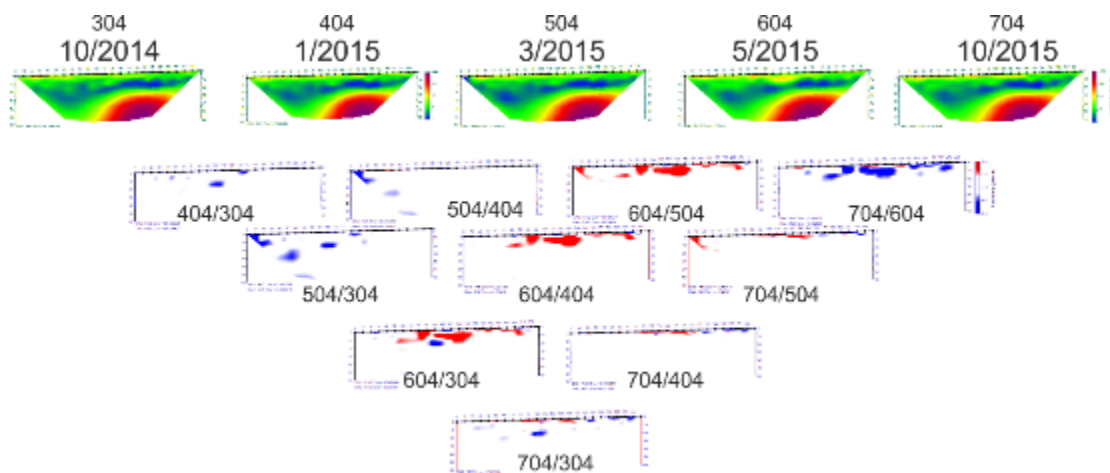
Εκτελέστηκαν γεωηλεκτρικές τομογραφίες σε επιλεγμένες θέσεις και σε διαφορετικές εποχές του έτους έτσι ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά του όγκου των απορριμμάτων σε σχέση με τα βροχομετρικά δεδομένα. Στο Σχ. 4.17 παρουσιάζεται ενδεικτικά η τομογραφία M4.



Σχήμα 4.17. Θέση τομογραφίας M4 στον AXTA Δερβενίου.

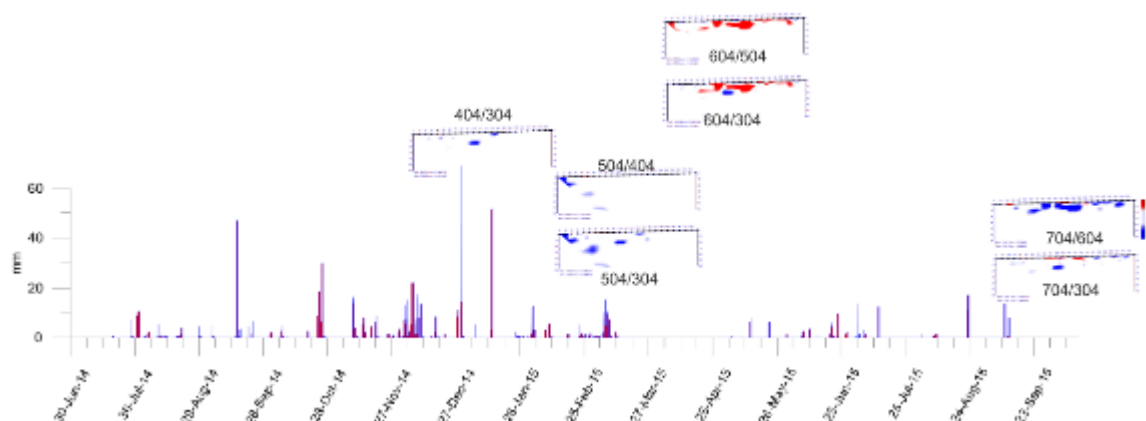
Η τομογραφία M4 βρίσκεται στο κέντρο του AXTA (κοντά στο γήπεδο του τένις). Στην τομογραφία M4 πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διαχρονικές μετρήσεις σε διαφορετικές περιόδους. Στα Σχ. 4.18 και 4.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαχρονικής αντιστροφής των δεδομένων που καταγράφηκαν την περίοδο Οκτώβριος 2014 - Οκτώβριος 2015.

Στις τομογραφίες του Σχ. 4.18 διακρίνεται η παρουσία ενός ρήγματος με διεύθυνση B-N.



Σχήμα 4.18. 4D αντιστροφή διαχρονικών γεωηλεκτρικών δεδομένων για την τομογραφία M4.

Στο Σχ. 4.19 παρουσιάζεται το ύψος της βροχόπτωσης και οι μεταβολές της αντίστασης του υπεδάφους όπως καταγράφηκαν τη χρονική περίοδο Οκτώβριος 2014 – Οκτώβριος 2015.



Σχήμα 4.19. Ύψος βροχόπτωσης και μεταβολές γεωηλεκτρικών δομών σε αντίστοιχα χρονικά διαστήματα.

Από τον Οκτώβριο του 2014 μέχρι και τον Ιανουάριο του 2015 όπως παρατηρείται δεν σημειώνονται μεταβολές της αντίστασης.

Στην επόμενη μέτρηση (Μάρτιος 2015) σημειώνεται μείωση της αντίστασης σε ορισμένες θέσεις.

Τον Μάρτιο και τον Απρίλιο δεν παρατηρούνται βροχοπτώσεις. Είναι εμφανής η αύξηση της αντίστασης τον μήνα Μάιο.

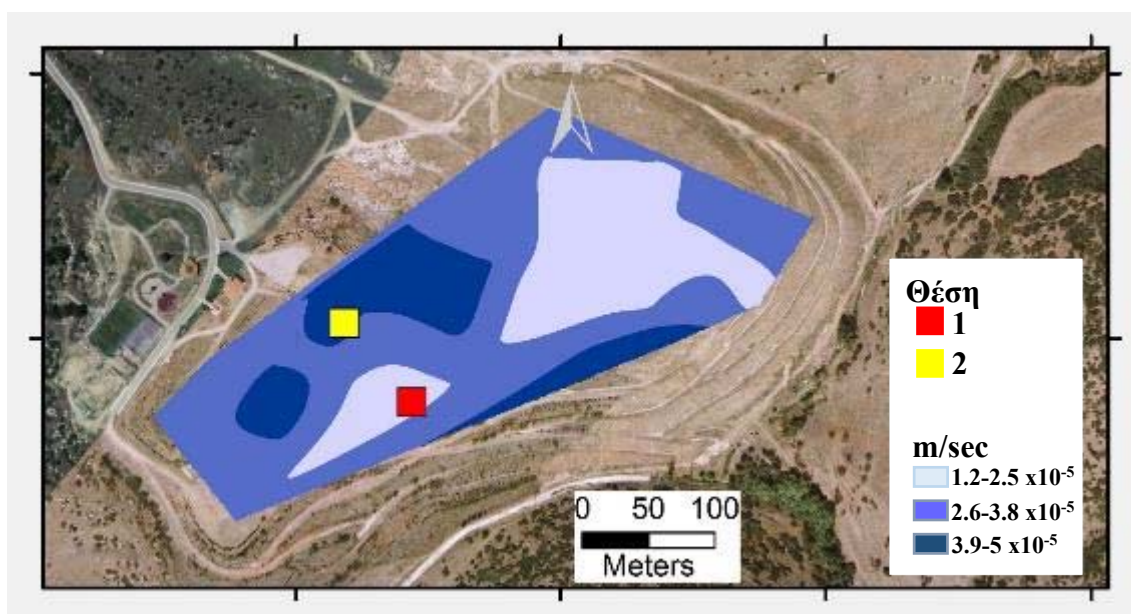
Στη μέτρηση του Οκτωβρίου 2015 η γεωηλεκτρική δομή επανήλθε στην αρχική κατάσταση του Οκτωβρίου 2014.

Είναι σημαντικό να μελετηθεί και η ποσότητα του νερού που κατεισδύει σε μεγαλύτερα βάθη και τελικά εισέρχεται στον όγκο των σκουπιδιών για τη συνολική εκτίμηση της ροής του νερού στην περιοχή μελέτης. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε η διεξαγωγή ενός πειράματος ελεύθερης κατείσδυσης νερού σε δύο θέσεις του χώρου με στόχο τη διαχρονική παρακολούθηση της υδροπερατότητας του εδάφους με ταυτόχρονη πραγματοποίηση γεωφυσικών μετρήσεων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στο πείραμα αυτό και στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υλοποίησης του, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαχρονικής παρακολούθησης και η ερμηνεία τους.

5. ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ-ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΕΙΔΙΚΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Η διεξαγωγή του πειράματος ελεύθερης κατείσδυσης στοχεύει στη μελέτη της ροής του νερού στο εδαφικό προστατευτικό κάλυμμα του χώρου απόθεσης των απορριμμάτων. Παρατηρώντας τη συμπεριφορά και τον ρυθμό κατείσδυσης του νερού κατά την εκτέλεση του πειράματος προκύπτουν άμεσα συμπεράσματα για την πορεία των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και αν αυτά συμμετέχουν στον εμπλουτισμό ή και στη δημιουργία εκκρίματος. Το πείραμα έλαβε χώρα σε δύο θέσεις στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 5. 1. Χάρτης κατανομής της υδροπερατότητας (Μέθοδος Maag).

Η επιλογή των θέσεων έγινε βάση του χάρτη κατανομής της υδροπερατότητας του εδάφους, όπως προέκυψε με τη μέθοδο Maag. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται η κατανομή της υδροπερατότητας του εδαφικού καλύμματος. Παρατηρείται ότι η υδροπερατότητα του εδαφικού καλύμματος στο μεγαλύτερο εύρος της χαρακτηρίζεται μέτρια, ενώ σε ορισμένες θέσεις εμφανίζει υψηλές και χαμηλές τιμές. Οι θέσεις που δίνουν ακραίες τιμές παρουσιάζουν και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την εκτέλεση του πειράματος.

Επιλέχθηκαν οι παραπάνω δύο θέσεις όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 5.1. Η πρώτη θέση τοποθετείται κεντρικά του χώρου (κόκκινο πλαίσιο) και η δεύτερη θέση βρίσκεται βορειότερα (κίτρινο πλαίσιο). Στην πρώτη θέση το εδαφικό κάλυμμα χαρακτηρίζεται από χαμηλή υδροπερατότητα σε αντίθεση με τη δεύτερη θέση που εμφανίζει υψηλές τιμές υδροπερατότητας.

5.1 Σχεδιασμός του πειράματος

Ο σχεδιασμός του πειράματος στις δυο θέσεις περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες:

- Δημιουργία σκάμματος διαστάσεων 1 m x 1 m και βάθους περίπου 10 cm.
- Τοποθέτηση ξύλινων σανιδιών στο σκάμμα δημιουργώντας ένα πλαίσιο και εμποδίζοντας τις πλευρικές απώλειες κατά την διοχέτευση του νερού.
- Οι γεωηλεκτρικές τομογραφίες θα πραγματοποιηθούν σε συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο δίνοντας την ίδια γεωηλεκτρική δομή ώστε να μελετηθεί αποκλειστικά η κατακόρυφη κατείσδυση του νερού κατά την επαναληπτική διαδικασία των μετρήσεων.
- Αποφασίστηκε για την καλύτερη δυνατή απεικόνιση των συνθηκών και της μελέτης της ροής του νερού η διεξαγωγή μετρήσεων σε δύο, τρεις και τέσσερις διαστάσεις στο χώρο. Σε μία σταθερή γεωλογική δομή ο μόνος παράγοντας που μπορεί να μεταβληθεί είναι η συμπεριφορά του νερού που εξαρτάται από τις υδρογεωλογικές και υδραυλικές παραμέτρους των σχηματισμών. Η τετραδιάστατη λοιπόν αντιστροφή των δεδομένων και η δημιουργία 4D μοντέλων υπεδάφιας αντίστασης θα δείξει τις μικρομεταβολές.
- Στη καθεμία θέση χαράχθηκαν δύο τομές κάθετα μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα σταυρό για τη λήψη 2D μετρήσεων. Χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια για κάθε τομή.
- Για τις 3D μετρήσεις δημιουργήθηκε κάνναβος χρησιμοποιώντας 48 ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετήθηκαν στο χώρο με απόσταση 0,5 m μεταξύ τους στη θέση 1 και 0,75 m στη θέση 2.
- Οι τετραδιάστατες εικόνες προκύπτουν ύστερα από την επεξεργασία των δεδομένων των δισδιάστατων μετρήσεων με το κατάλληλο λογισμικό και την εισαγωγή του χρόνου και της ημερομηνίας σε αυτά.





Σχήμα 5. 3. Δημιουργία κανάβου για τη λήψη 3D μετρήσεων στη θέση Α.

5.2 Εξοπλισμός και μετρήσεις

Για την πραγματοποίηση των γεωφυσικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL Pro της εταιρίας Iris Instruments. Είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο πολυκάναλο όργανο καταγραφής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Η διαδικασία αρχίζει με την εισαγωγή ενός αρχείου – πρωτόκολλο που έχει δημιουργηθεί και ορίζει τις μετρήσεις που θα ληφθούν καθώς επίσης τις παραμέτρους της λειτουργίας του. Το SYSCAL Pro επιτρέπει τη λήψη και αποθήκευση μεγάλου αριθμού δεδομένων. Επιπλέον, διαθέτει εσωτερικές και εξωτερικές μπαταρίες. Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν πολυκάναλα καλώδια και ηλεκτρόδια ατσαλιού.

Πίνακας V. Χαρακτηριστικά SYSCAL Pro

SYSCAL Pro

Χαρακτηριστικά:

Μέγιστη τάση: 800V (switch mode)

Μέγιστη τάση: 1000V (manual mode)

Μέγιστο ρεύμα: 2.5A

Μέγιστη ισχύς: 250W



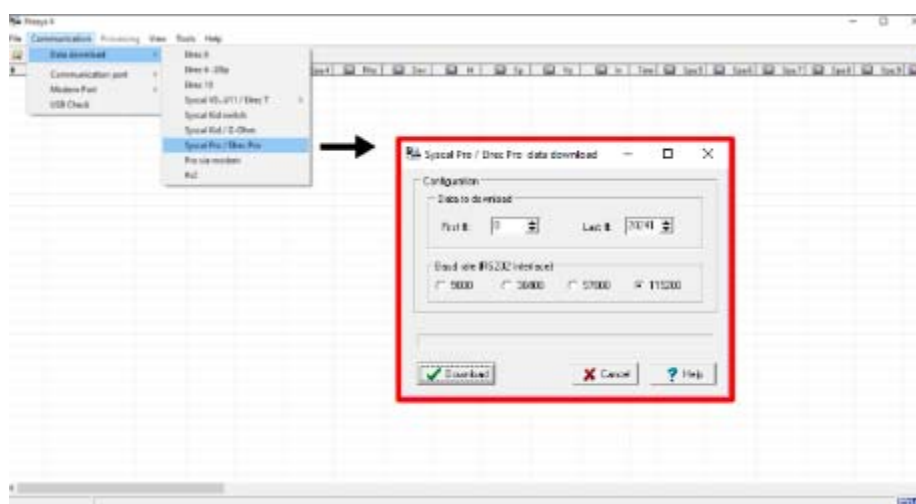
Σχήμα 5. 4. Όργανο μέτρησης SYSCAL Pro
(<http://www.iris-instruments.com/syscal-pro.html>).



Σχήμα 5. 5. Ηλεκτρόδια και πολυκάναλα καλώδια.

5.3 Επεξεργασία δεδομένων

Ύστερα από την ολοκλήρωση της συλλογής των δεδομένων στην ύπαιθρο ακολουθεί η επεξεργασία τους. Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η μεταφορά των δεδομένων στον υπολογιστή μέσω του λογισμικού προγράμματος Prosys II της εταιρίας IRIS instruments. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σ' ένα αρχείο BIN. Η σωστή επεξεργασία των δεδομένων απαιτεί τον διαχωρισμό του αρχείου σε επιμέρους αρχεία. Με την επιλογή split in files προκύπτουν τα νέα αρχεία που περιέχουν πληροφορίες για κάθε μέτρηση ξεχωριστά.

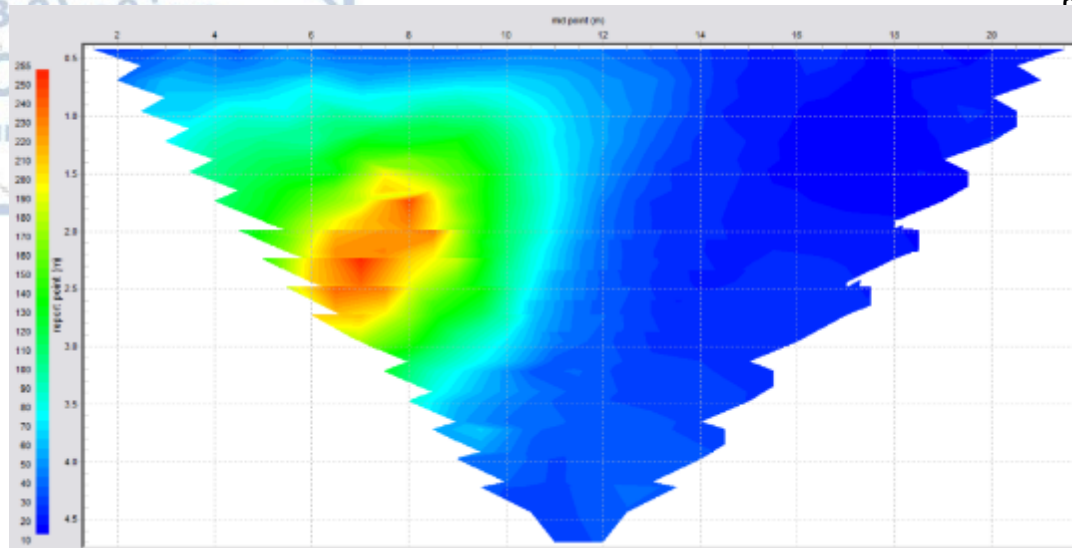


Σχήμα 5. 6. Διαδικασία μεταφοράς των δεδομένων από το όργανο μέτρησης στον υπολογιστή με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος Prosys II της εταιρίας IRIS instruments.



A scatter plot showing the relationship between 'Height (cm)' on the y-axis (ranging from 1 to 5) and 'Weight (kg)' on the x-axis (ranging from 1 to 100). The plot contains numerous blue data points. Two points are highlighted with yellow circles and labeled as 'Ακραίες Τιμές' (Outliers) in red text. An arrow points to the first outlier at approximately (15, 2.2), and the second outlier is at approximately (18, 2.5). The rest of the data points form a dense cluster between 20-80 kg and 1.5-4.5 cm height.

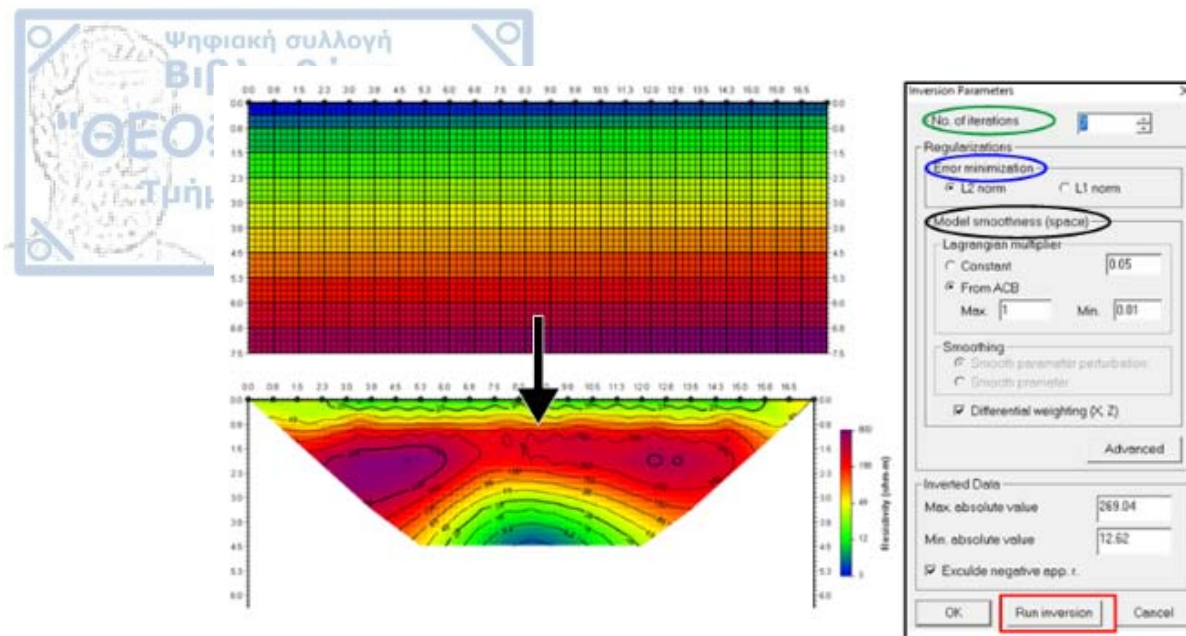
Σχήμα 5. 8. Απομάκρυνση ακραίων τιμών. Πρόγραμμα Prosys II.



Σχήμα 5. 9. Ψευδοτομή των δεδομένων. Πρόγραμμα Prosys II.

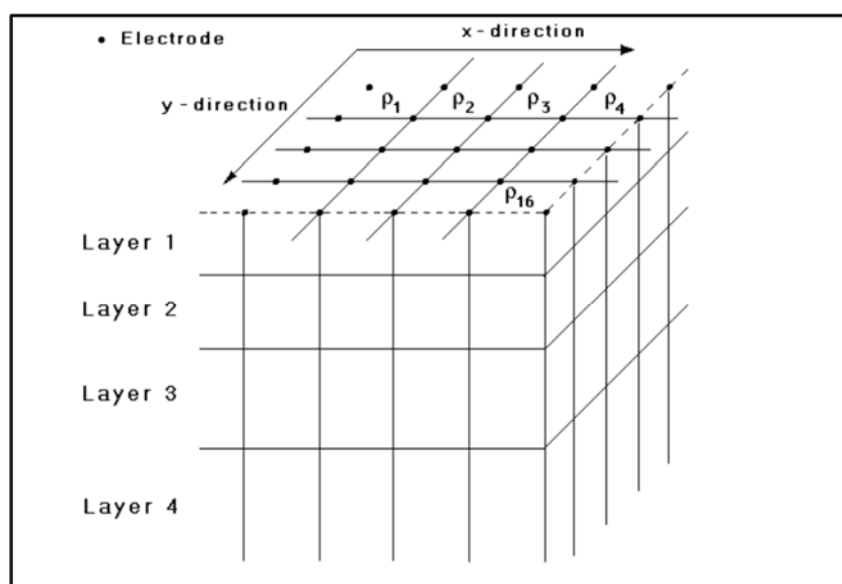
Τα φιλτραρισμένα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα DC_2DPRO (Jung Ho Kim, 2010). Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί αλγόριθμο που εκτελεί κανονικοποιημένη μη γραμμική δισδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων με τη μέθοδο του Occam (constable, 1987). Για την επίλυση του ευθέος προβλήματος, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί επαναληπτικά τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Πριν από την επαναληπτική διαδικασία της αντιστροφής ορίζεται ένα αρχικό μοντέλο υπεδάφους, το οποίο διαιρείται σε μικρότερες περιοχές, δημιουργώντας ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Σχ. 5.11). Στη συνέχεια, καθορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου και το πρόγραμμα εκτελεί την αντιστροφή (Σχ. 5.11). Κατά την διαδικασία της αντιστροφής γίνεται προσπάθεια αποτύπωσης των πραγματικών αντιστάσεων. Ακολουθούν αρκετές επαναλήψεις, όπου απομακρύνονται τιμές με βάση το επί τοις εκατό σφάλμα μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων. Όταν το επί τοις εκατό σφάλμα μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων είναι μικρό και δεν μεταβάλλεται κατά την αντιστροφή, τότε η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται και το μοντέλο που προκύπτει είναι το επιθυμητό (Σχ. 5.11).



Σχήμα 5. 11. Αρχικό μοντέλο πριν τη διαδικασία της αντιστροφής (Πάνω αριστερά). Τελικό μοντέλο ύστερα από την επεξεργασία (Κάτω αριστερά). Οι παράμετροι της αντιστροφής (Δεξιά). Πρόγραμμα DC_2DPRO (Jung Ho Kim, 2010).

Δεδομένου ότι οι γεωλογικές δομές στη φύση έχουν τρισδιάστατη μορφή, μία τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων της έρευνας θα δώσει μία πλησιέστερη στην πραγματικότητα εικόνα. Για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων υπεδάφιας αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RES3DINV της Geotomo software. Το λογισμικό εκτελεί τρισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το υπέδαφος διαιρείται σε διάφορα στρώματα και κάθε στρώμα υποδιαιρείται σε ορθογώνια κελιά (Σχ. 5.12). Το πρόγραμμα προσπαθεί να προσδιορίσει την αντίσταση στο μοντέλο αντιστροφής που αναπαράγει όσο το δυνατόν πιο κοντά στη φαινόμενη αντίσταση του πεδίου έρευνας.

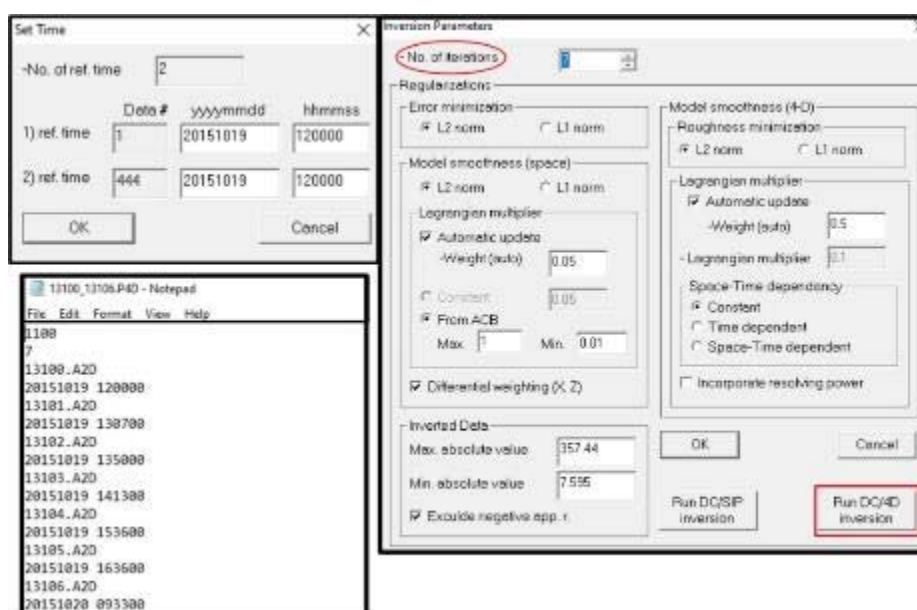


Σχήμα 5. 12. Μοντέλο 3D αντιστροφής.

Όπως έχει γίνει ήδη αναφορά σε προηγούμενα κεφάλαια σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διαχρονική παρακολούθηση της κατείσδυσης του νερού. Για την 4D αντιστροφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα 2D αρχεία των μετρήσεων. Ακολούθησε η εισαγωγή του χρόνου και της ημερομηνίας σ' αυτά για κάθε τομογραφία ξεχωριστά.

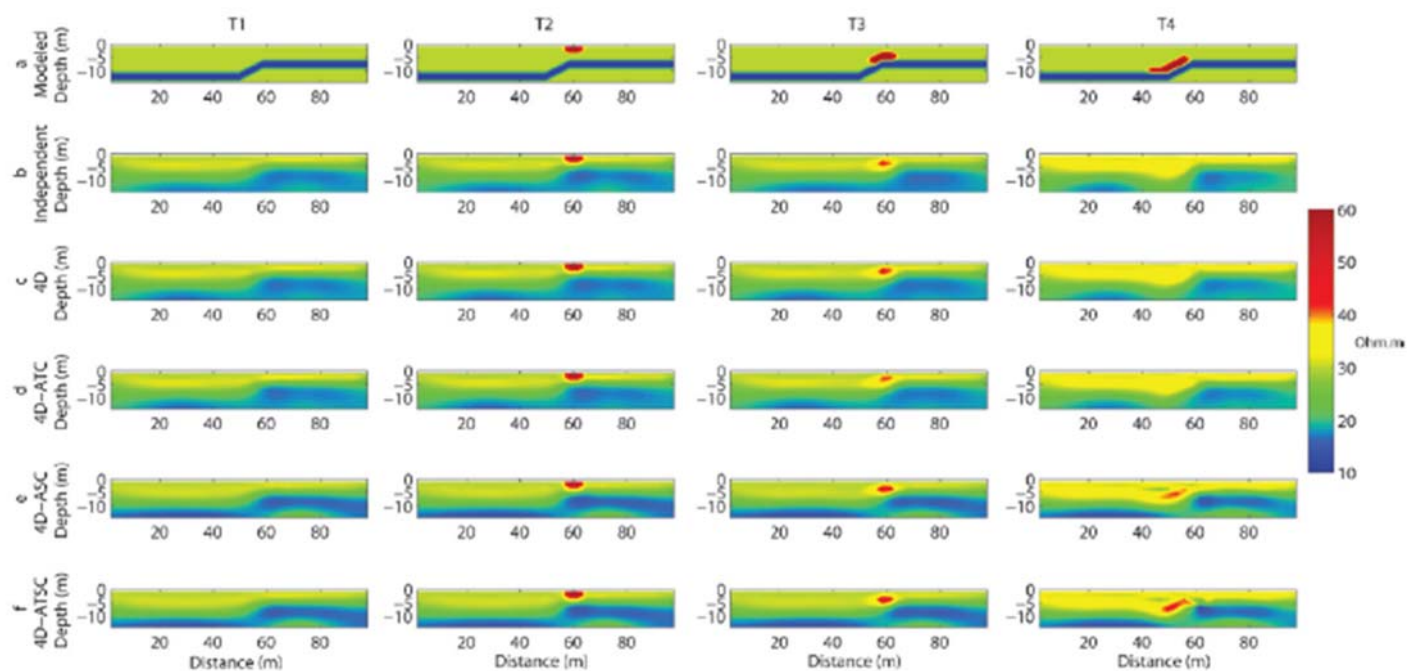
Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα αρχείο p4d, το οποίο περιλαμβάνει το πλήθος των τομογραφιών, τους χρόνους και την ημερομηνία που μετρήθηκαν οι τομογραφίες. Το νέο αρχείο εισάγεται στο πρόγραμμα DC_2DPRO και στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της τετραδιάστατης αντιστροφής. Οι τομογραφίες επεξεργάζονται ταυτόχρονα και στο τέλος της διαδικασίας προκύπτει το επιθυμητό διαχρονικό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, μέσω του προγράμματος DRAW 4D, εξάγονται τα αποτελέσματα και οι τομογραφίες αποτυπώνονται για κάθε χρονική στιγμή.

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία, παρακάτω στο Σχ. 5.13 περιγράφεται η τετραδιάστατη αντιστροφή δεδομένων ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Αναλυτικότερα, πάνω αριστερά συμπληρώνεται το πεδίο με την ημερομηνία και το χρόνο εκτέλεσης της μέτρησης για κάθε τομογραφία με σταθερή την ημερομηνία και την ώρα. Αφού τροποποιηθούν όλες οι τομογραφίες δημιουργείται το αρχείο p4d. Όπως παρατηρείται στο Σχ. 5.13 κάτω αριστερά το σύνολο των τομογραφιών είναι 7, οι μετρήσεις έγιναν σε δύο ημέρες και η κάθε μετρούμενη γραμμή διαφέρει περίπου μία ώρα από την επόμενη. Δεξιά απεικονίζονται οι παράμετροι της 4D αντιστροφής.



Σχήμα 5. 13. 4D Αντιστροφή δεδομένων. Πρόγραμμα DC_2DPRO

Στο Σχ. 5.14 δίνεται ένα παράδειγμα 4D αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων.

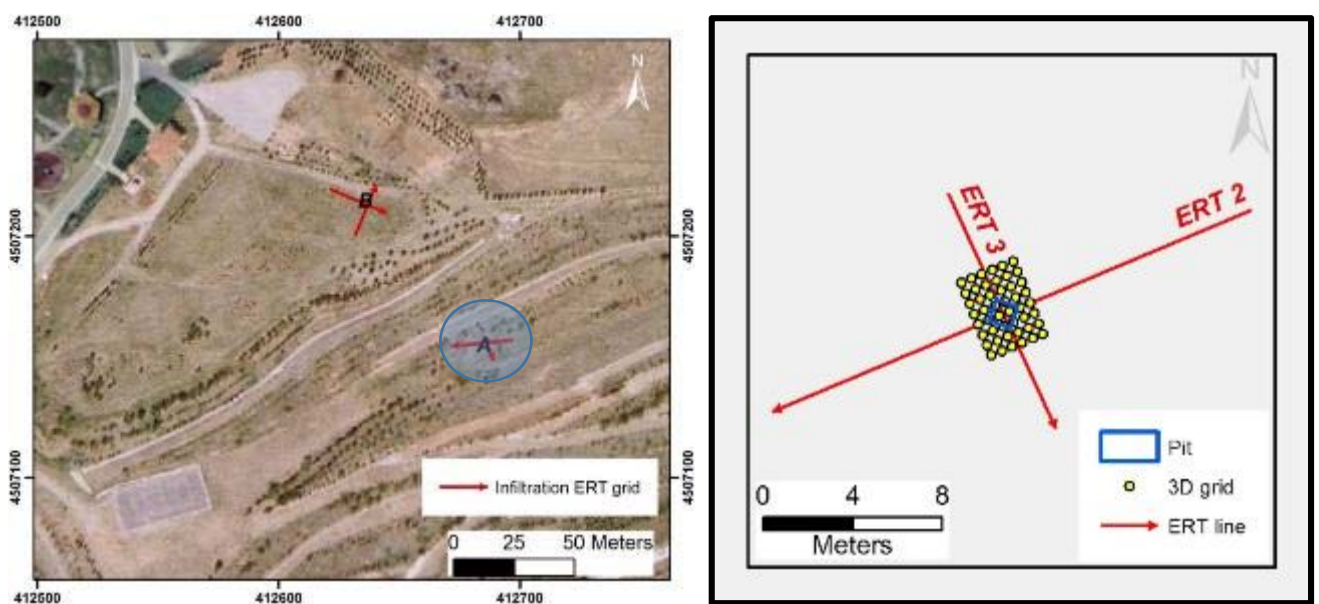


Σχήμα 5. 14. Αποτελέσματα 4D αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων.

5.4 Πείραμα – Θέση Α

Η τοποθεσία Α βρίσκεται κεντρικά του χώρου κοντά στο γήπεδο του τένις. Η υδροπερατότητα στην περιοχή χαρακτηρίζεται χαμηλή. Το πείραμα διήρκεσε δύο ημέρες (19 και 20 Οκτωβρίου του 2015). Για τη λήψη δισδιάστατων μετρήσεων σχεδιάστηκαν δύο τομές ERT2 και ERT3 κάθετα μεταξύ τους. Χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια για τη καθεμία τα οποία τοποθετήθηκαν σε απόσταση ανά 1 m και 0,5 m αντίστοιχα.

Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένας κάνναβος (grid) χρησιμοποιώντας 48 ηλεκτρόδια. Η μεταξύ τους απόσταση είναι 0,5 m. Μ' αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων, η δημιουργία δηλαδή 3D μοντέλων υπεδάφιας αντίστασης. Στο Σχ. 5. 15 απεικονίζεται η περιοχή έρευνας Α (αριστερά), το σκάμμα, οι τομές και ο κάνναβος όπως σχεδιάστηκαν (δεξιά).



Σχήμα 5. 15. Περιοχή έρευνας Α (αριστερά). Σχεδιασμός του πειράματος (δεξιά).

Οι τομογραφίες είναι σταθερές στο χώρο δίνοντας την ίδια γεωηλεκτρική δομή. Στόχος είναι να μελετηθεί διαχρονικά η κατακόρυφη κίνηση του νερού κατά την επαναληπτική διαδικασία των μετρήσεων έτσι ώστε να γίνει συσχέτιση της υφιστάμενης κατάστασης με την άμεση κατείσδυση των μετεωρικών κατακρημνισμάτων.

Για τις μετρήσεις επιλέχθηκαν δύο διατάξεις: η διπόλου – διπόλου (dipole-dipole) και η multiple gradient (optimized). Η διπόλου-διπόλου διάταξη έχει πολύ καλή διακριτική ικανότητα αλλά υστερεί κάποιες φορές στο σήμα. Η multiple gradient (optimized)

χρησιμοποιεί ένα βέλτιστο πρωτόκολλο το οποίο επιλέγει την καλύτερη δυνατή πληροφορία με τον ελάχιστο εφικτό αριθμό μετρήσεων.

Η πρώτη μέτρηση διεξήχθη σε στεγνό έδαφος και σε χρόνο t_0 . Ο χρόνος t_0 ορίστηκε ως το σημείο αναφοράς των μετρήσεων. Έτσι για χρόνο t_0 οι δύο γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας ERT2 και ERT3 μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τις δύο διατάξεις. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και για την τρισδιάστατη τομογραφία με τη διάταξη πόλου-πόλου.

Χρησιμοποιώντας ένα δοχείο χωρητικότητας 20 λίτρων ξεκίνησε το πείραμα. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα παροχετευόταν νερό στο σκάμμα. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν με σταθερή επανάληψη χρόνου (ανά μία ώρα περίπου). Συνολικά την πρώτη ημέρα 19/10/2015 εκτελέστηκαν δέκα μετρήσεις για κάθε 2D τομογραφία και 5 μετρήσεις για την 3D τομογραφία. Την επόμενη ημέρα 20/10/2015, αφού το έδαφος παρέμεινε στεγνό καθ' όλη τη διάρκεια από την τελευταία μέτρηση πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις για κάθε 2D τομογραφία και μία μέτρηση 3D.



Σχήμα 5. 16. Περιοχή Α. Προετοιμασία για την εκτέλεση του πειράματος.

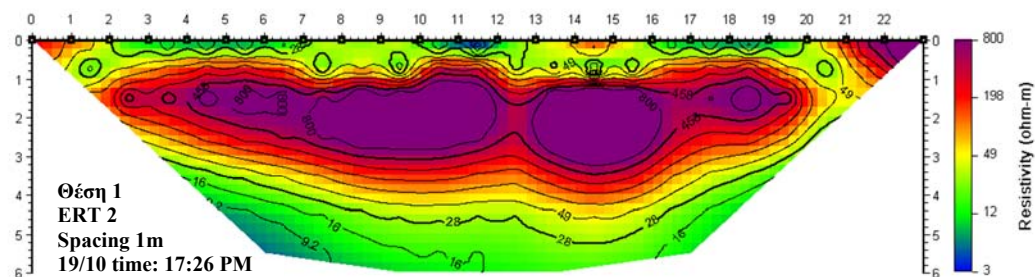
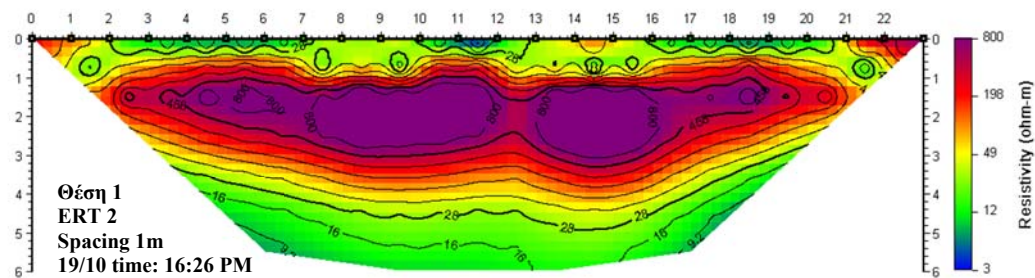
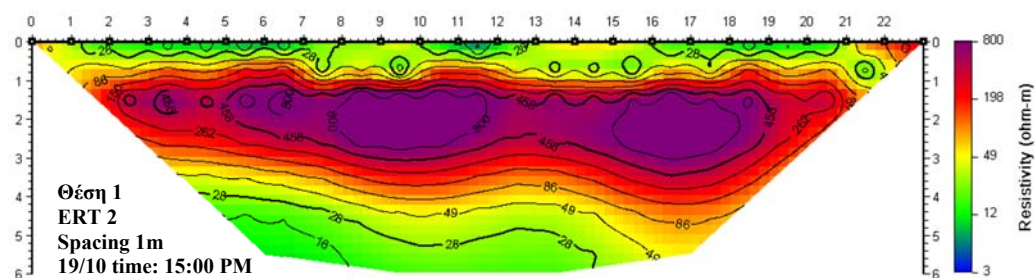
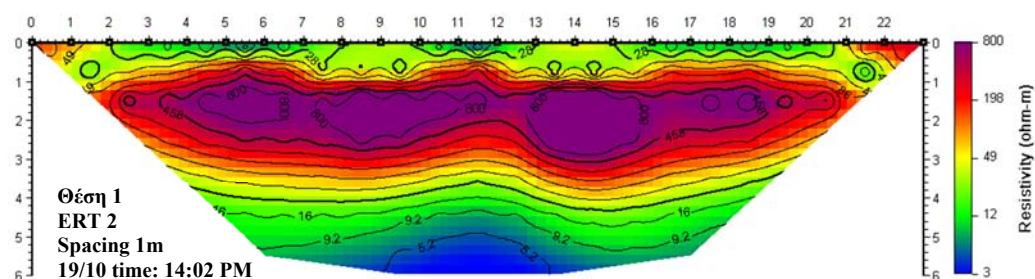
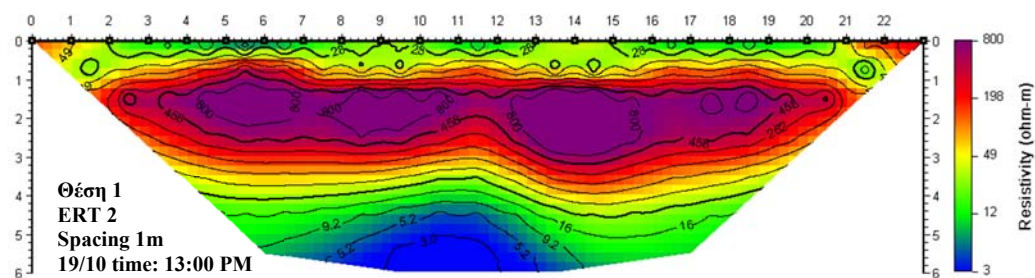
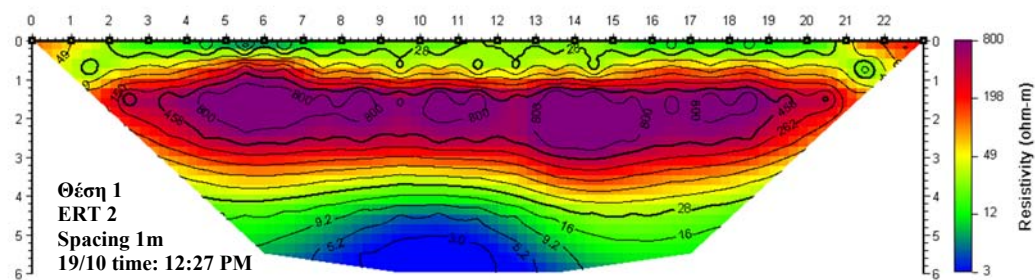


Σχήμα 5. 17. Τροφοδοσία νερού στο σκάμμα και ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων σε δύο διαστάσεις (Θέση Α).

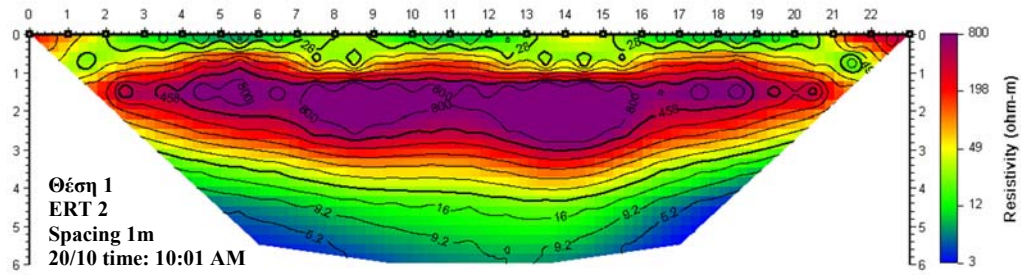


Σχήμα 5. 18. Λήψη μετρήσεων σε τρεις διαστάσεις (Θέση Α).

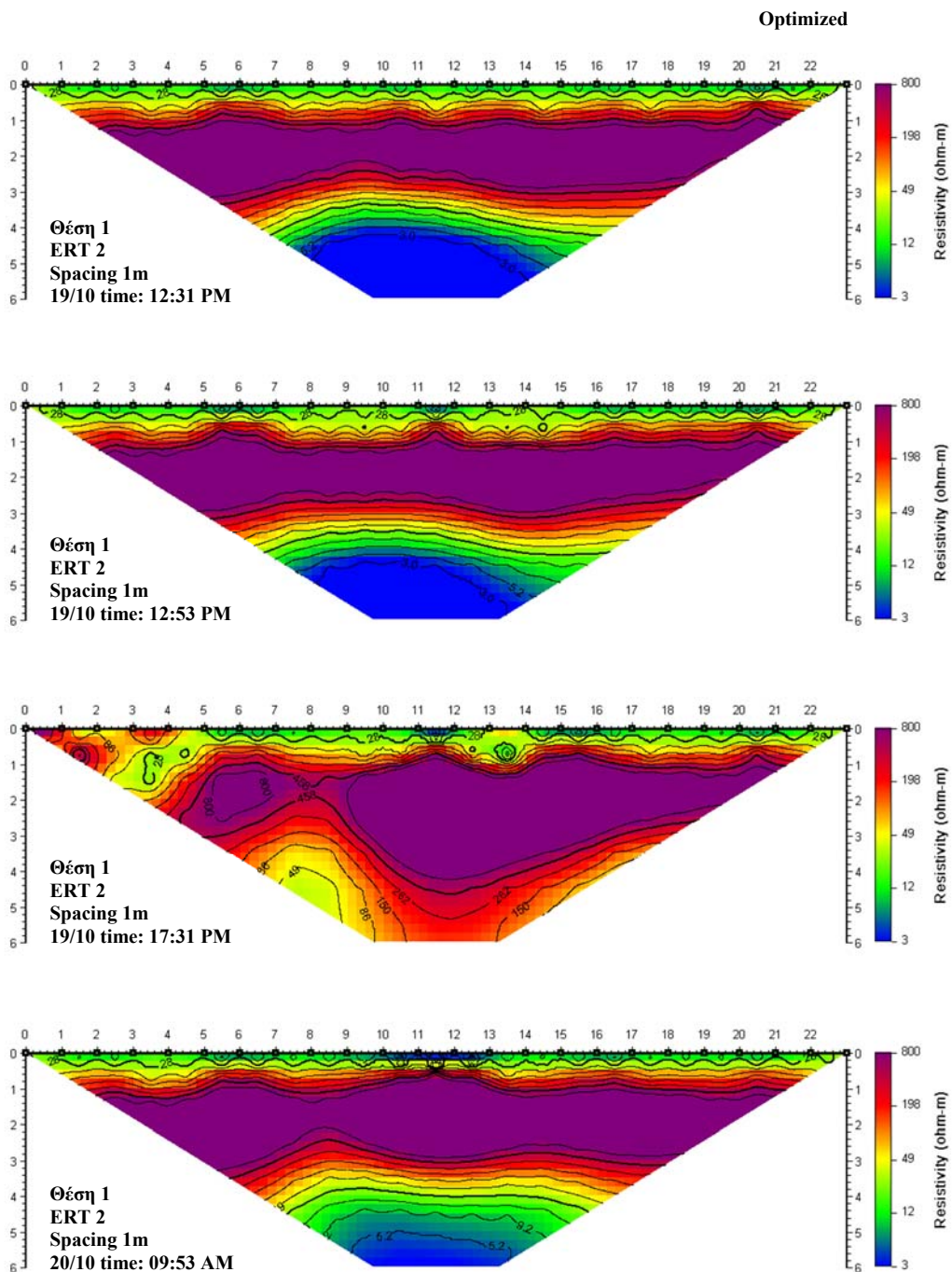
Μετά τη λήψη των μετρήσεων ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.3. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα σε τομογραφίες δύο, τριών και τεσσάρων διαστάσεων. Οι τομογραφίες δίνουν πληροφορίες για την αντίσταση του υπεδάφους. Απεικονίζονται με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου, με τα θερμά (κόκκινα χρώματα) να δίνουν υψηλές τιμές αντίστασης και τα ψυχρά (μπλε χρώματα) χαμηλές τιμές αντίστασης. Στα Σχήματα 5.19 έως 5.25 παρουσιάζονται οι τομογραφίες ERT2 και ERT3 και για τις δύο διατάξεις όπως προέκυψαν από την δισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές σε διάστημα δύο ημερών.



Σχήμα 5. 19. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την πρώτη ημέρα του πειράματος.



Σχήμα 5. 20. Τομογραφία ERT2 για τη διάταξη διπόλου-διπόλου τη δεύτερη μέρα του πειράματος.



Σχήμα 5. 21. Τομογραφία ERT2 Optimized.

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με την επιλογή των δύο διατάξεων έδωσαν παρόμοια εικόνα υπεδάφιας αντίστασης και για τις δύο τομογραφίες.

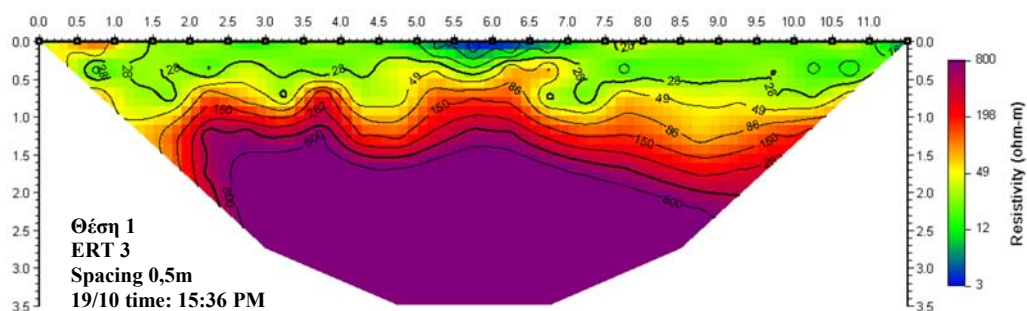
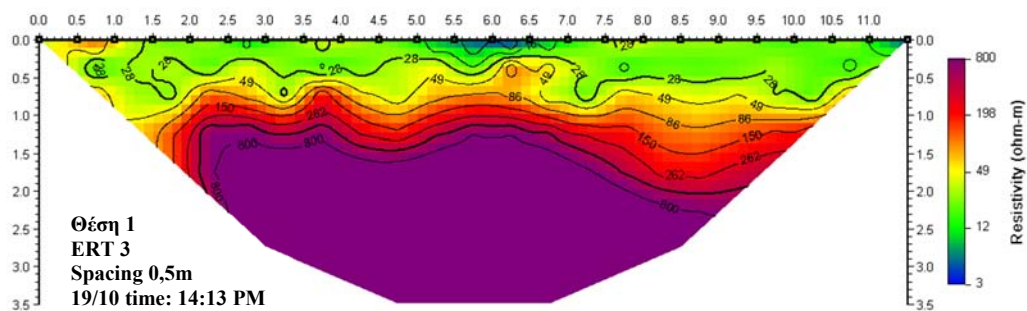
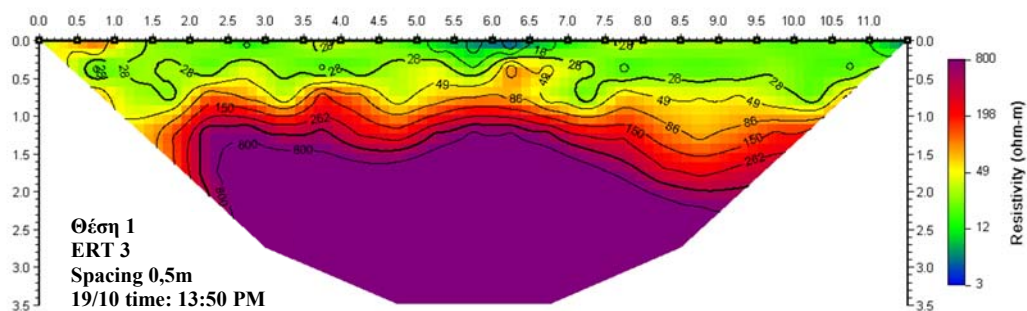
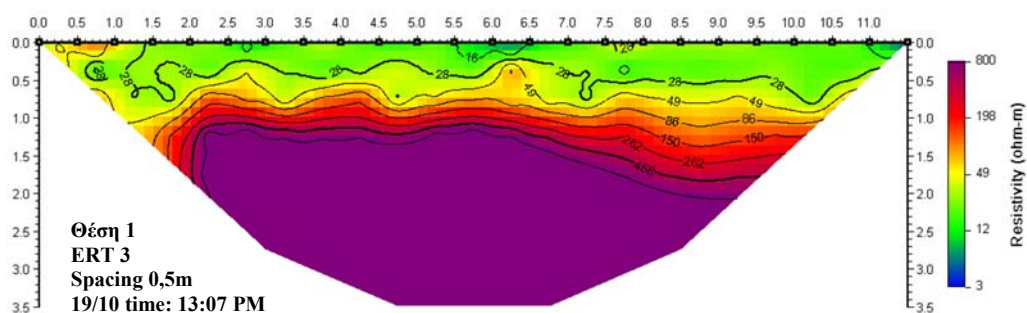
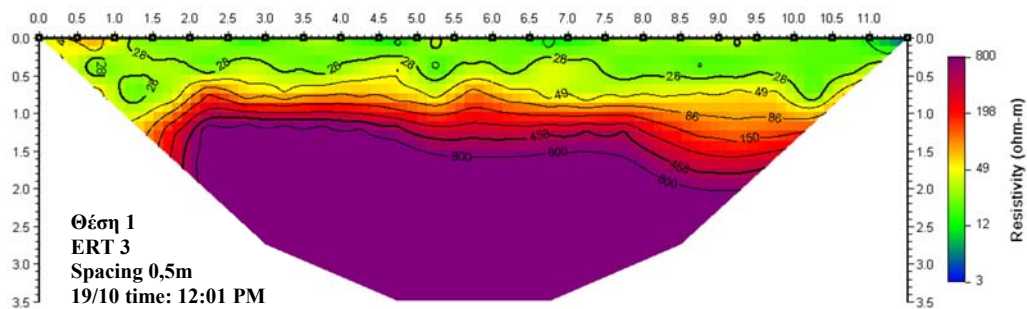
Όπως παρατηρείται σε όλο το μήκος της τομής ERT2 το επιφανειακό στρώμα επικάλυψης πάχους 1 m εμφανίζει σχετικά χαμηλές τιμές αντίστασης. Στα έντεκα μέτρα κατά μήκος της τομής εντοπίζεται η θέση του σκάμματος. Κάτω από το εδαφικό κάλυμμα μέχρι και το βάθος 3 m παρατηρείται σημαντική αύξηση της αντίστασης που αντιστοιχεί στην ακόρεστη ζώνη των απορριμμάτων. Κάτω από την ζώνη αυτή σημειώνεται μείωση της αντίστασης που αντιστοιχεί πιθανόν στην κορεσμένη ζώνη.

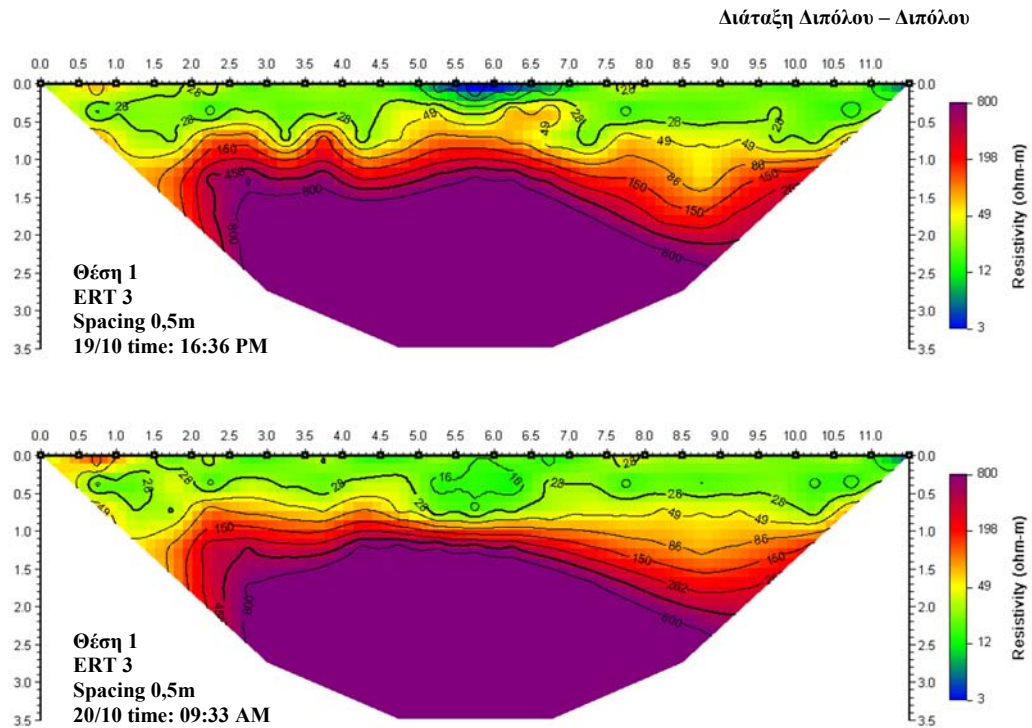
Η πρώτη μέτρηση για την τομογραφία ERT2 με τη διάταξη διπόλου-διπόλου πραγματοποιήθηκε σε χρόνο $t_0=12:27$ και με τη διάταξη multi gradient σε χρόνο $t_0=12:31$ σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Στη συνέχεια, ακολούθησαν μετρήσεις ανά μία ώρα περίπου. Οι μετρήσεις έγιναν με ταυτόχρονη τροφοδοσία νερού στο σκάμμα.

Διαπιστώνεται ότι στην περιοχή όπου βρίσκεται το σκάμμα η τιμή της αντίστασης μειώνεται (μπλε λεπτή αγωγήμη στρώση). Αυτό οφείλεται στην παρουσία του νερού καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Κάτω ακριβώς από τη θέση του σκάμματος παρατηρείται μικρή αύξηση της αντίστασης σε όλες τις καταγραφές. Δημιουργείται μία αναθόλωση της αντιστατικής δομής. Η αύξηση της αντίστασης είναι απροσδόκητη καθώς η αγωγιμότητα του νερού που χρησιμοποιήθηκε ήταν μεγάλη (2000-2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Η αύξηση της αντίστασης μπορεί να ερμηνευθεί είτε ως τεχνούργημα (artifact), αποτέλεσμα που δημιουργήθηκε κατά τη διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων και δυσκολεύει την ερμηνεία του είτε να οφείλεται στο ενδεχόμενο συγκέντρωσης βιοαερίου κάτω από την περιοχή των χαμηλών αντιστάσεων εξαιτίας αδυναμίας διαφυγής του λόγω της πλήρωσης των κενών των πόρων με νερό. Την επόμενη ημέρα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για να διαπιστωθούν αλλαγές μετά την παύση της τροφοδοσίας.

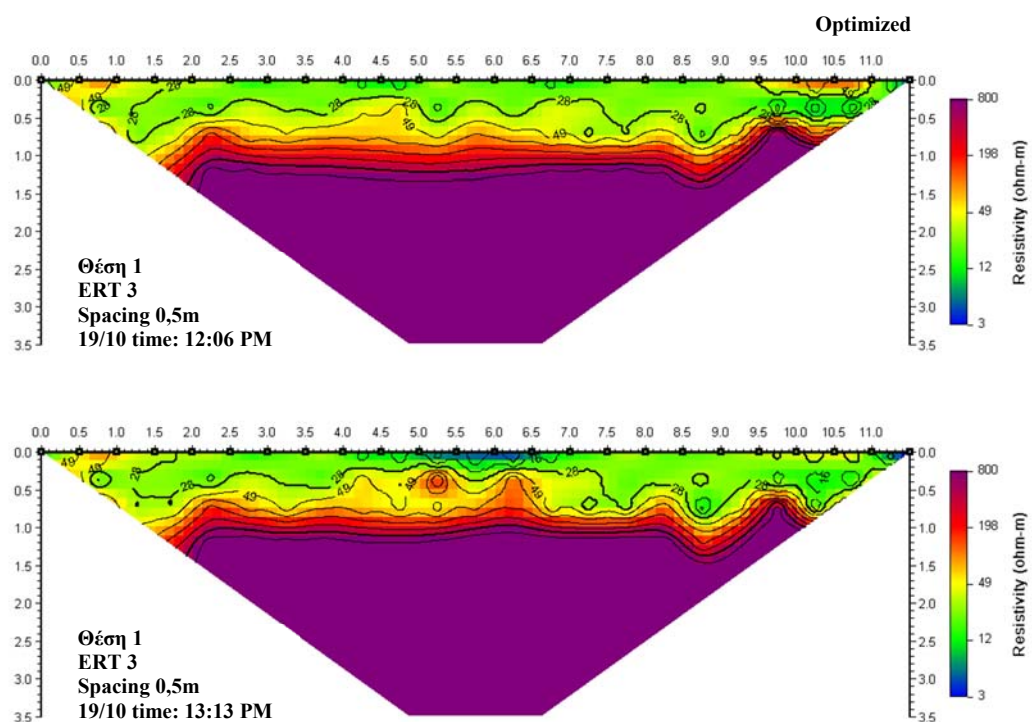
Ανάλογη εικόνα παρουσιάζει και η τομογραφία ERT3 η οποία τοποθετείται στο χώρο κάθετα στην τομογραφία ERT2. Το βάθος διασκόπησης της ERT3 είναι 3m και φθάνει μέχρι και την ακόρεστη ζώνη των απορριμμάτων.

Διάταξη Διπόλου – Διπόλου



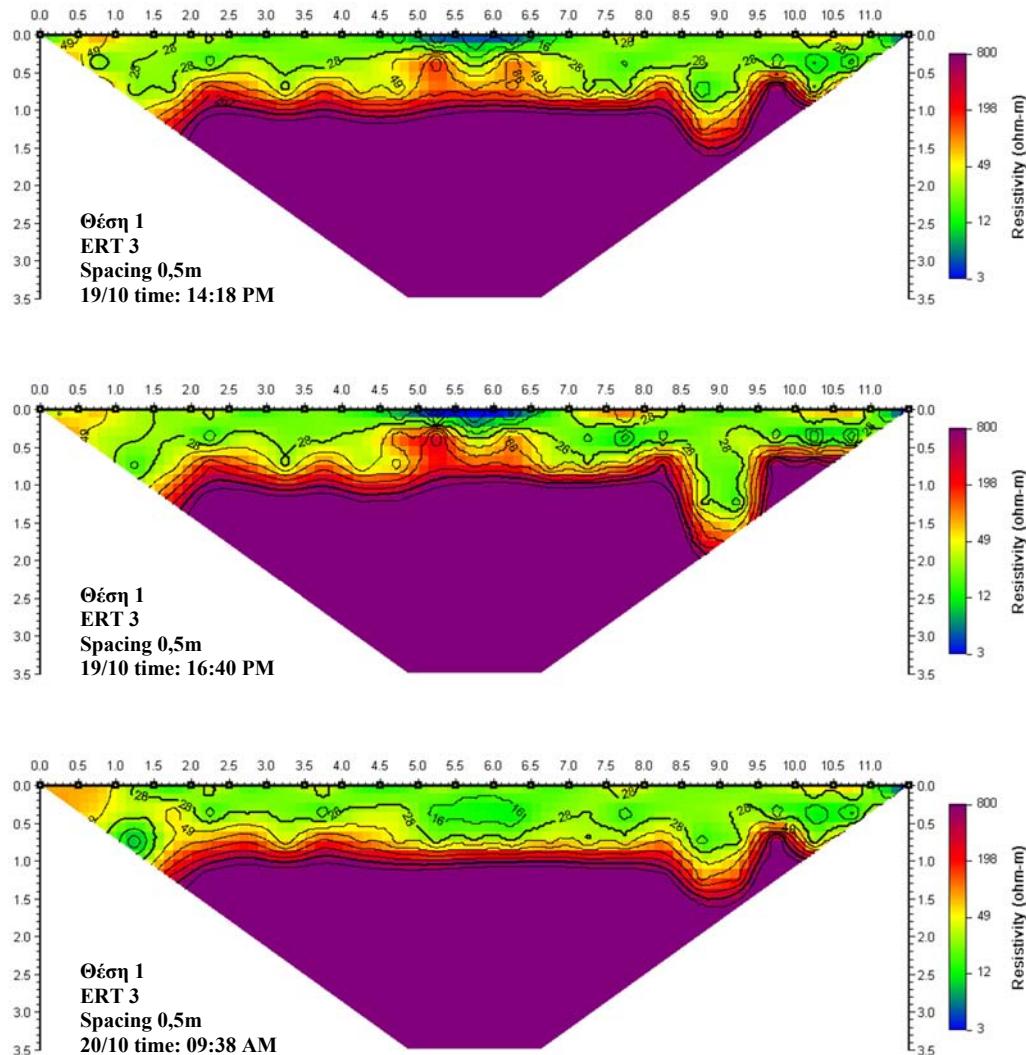


Σχήμα 5. 23. Τομογραφία ERT 3 την πρώτη ημέρα του πειράματος (τελευταία μέτρηση) και την δεύτερη ημέρα.



Σχήμα 5. 24. Τομογραφία ERT 3 Optimized.

Optimized

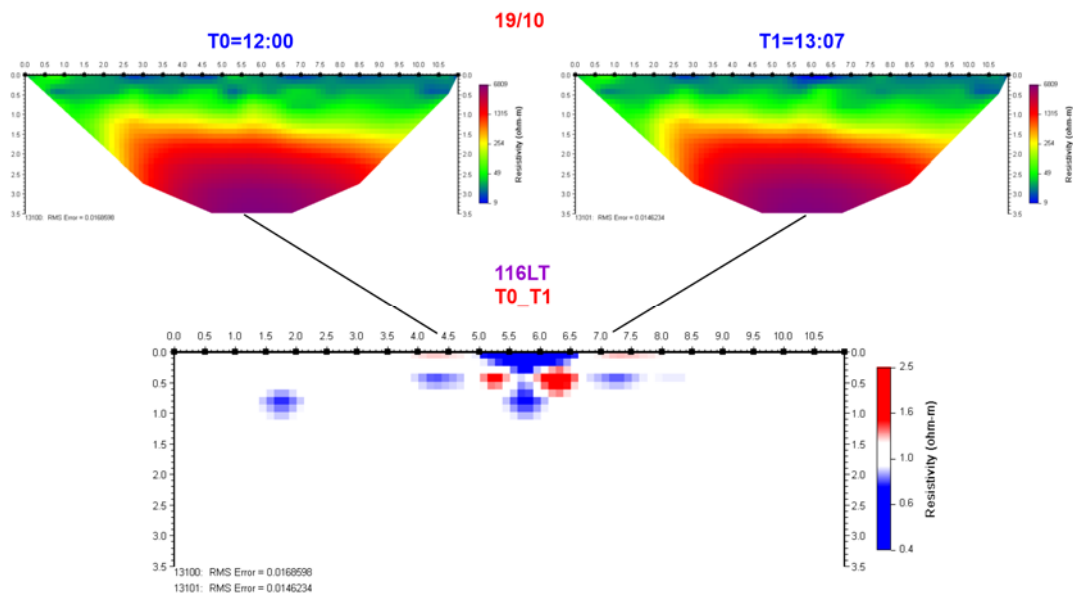


Σχήμα 5. 25. Τομογραφία ERT 3 Optimized (συνέχεια των μετρήσεων).

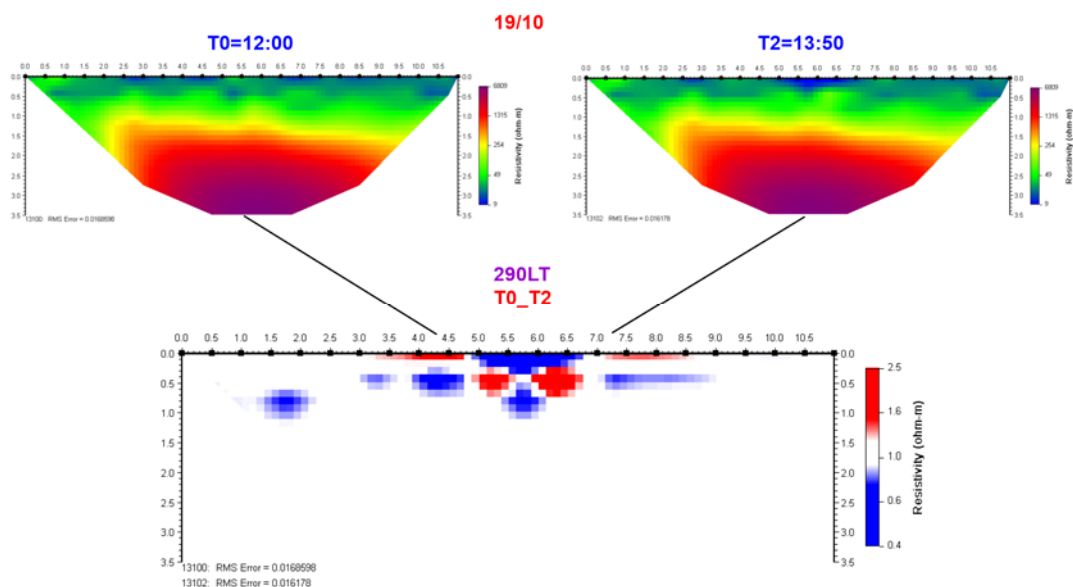
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 4D αντιστροφής των δεδομένων για την διάταξη διπόλου – διπόλου. Επιλέχθηκαν τα δεδομένα αυτής της διάταξης καθότι στη δισδιάστατη αντιστροφή δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στα δύο μοντέλα των διατάξεων και επιπλέον με τη διάταξη διπόλου – διπόλου πραγματοποιήθηκαν περισσότερες μετρήσεις.

Στα Σχήματα 5.26 έως 5.31 παρουσιάζονται ενδεικτικά για την τομογραφία ERT3 σε σχέση με την αρχική μέτρηση (σε στεγνό έδαφος) τα αποτελέσματα της αντιστροφής

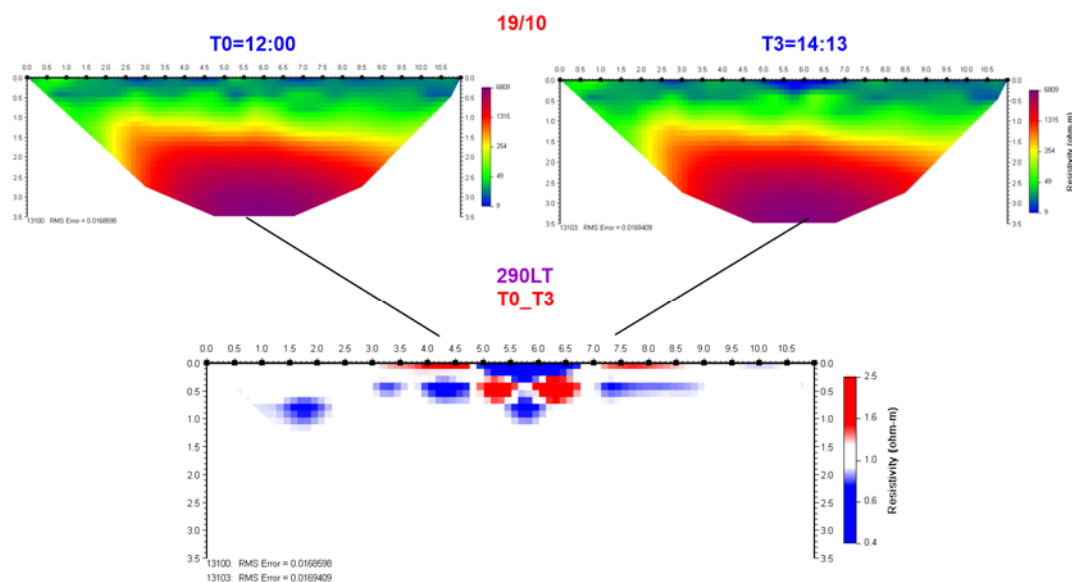
των γεωηλεκτρικών δεδομένων όπως προέκυψαν με τη χρήση τετραδιάστατου κώδικα. Με τη διαχρονική παρακολούθηση επιδιώκεται να βρεθεί η αλλαγή των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων (μεταβολή αντίστασης) μεταξύ των χρονικών φάσεων. Έτσι, στα παρακάτω σχήματα δίνονται ανά ζεύγη οι 2D τομογραφίες που μετρήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους και αποτυπώνονται μόνο οι διαχρονικές μεταβολές της αντίστασης ως αποτέλεσμα της 4D αντιστροφής. Διακρίνεται σε όλες τις τομογραφίες η μπλε γραμμική ανωμαλία που δείχνει τη μείωση της αντίστασης λόγω της κίνησης του νερού και εμφανίζεται στα πρώτα δέκα εκατοστά της επιφάνειας στη θέση του σκάμματος. Μείωση της αντίστασης παρατηρείται και πλευρικά του σκάμματος. Στη θέση ακριβώς κάτω από το σκάμμα αυξάνεται η αντίσταση όπως παρατηρήθηκε και σχολιάστηκε παραπάνω.



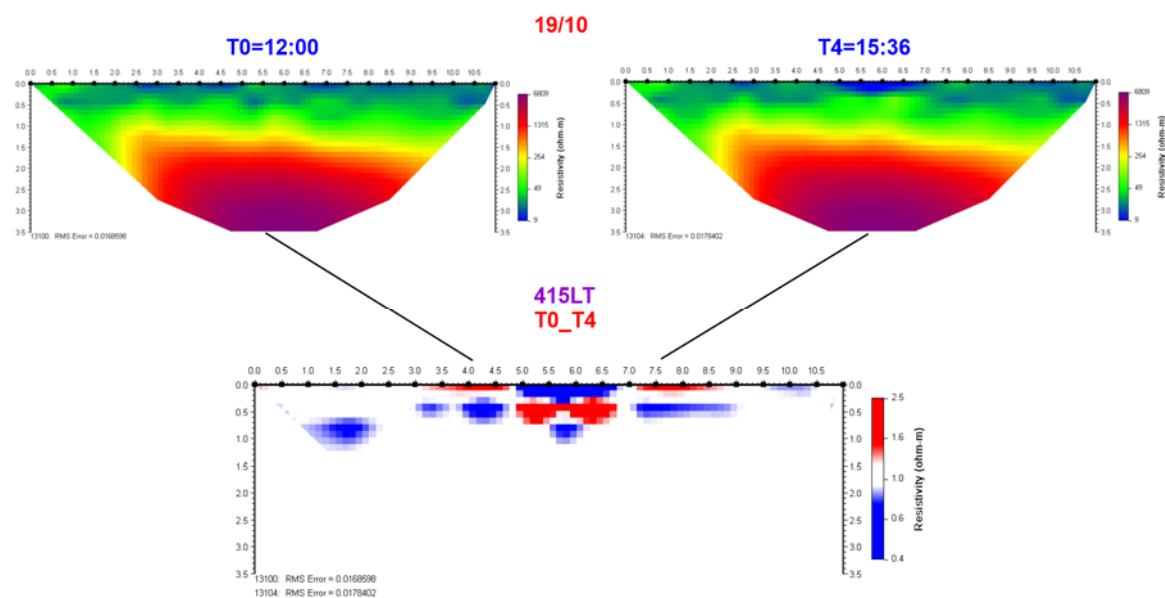
Σχήμα 5. 26. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 1, ERT3.



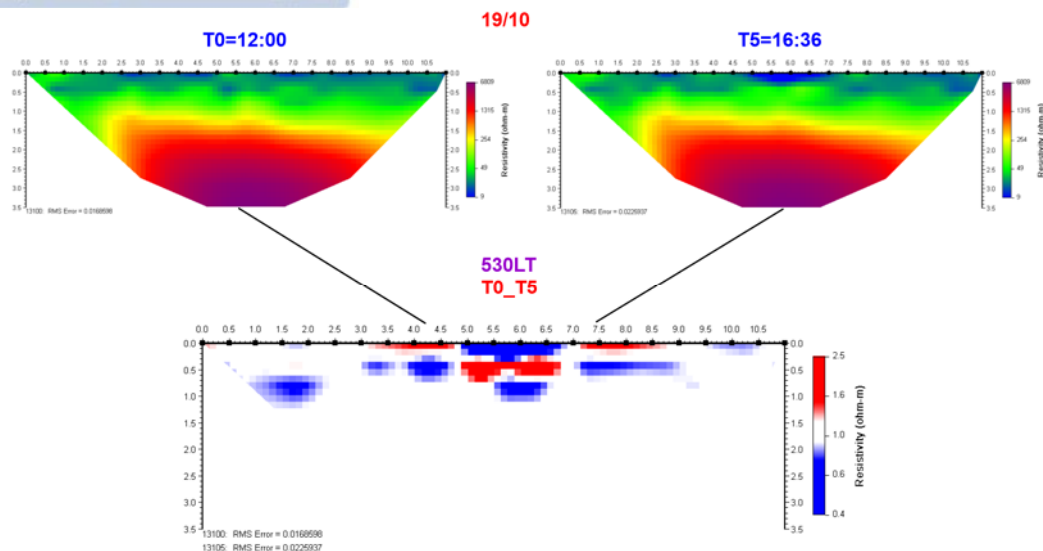
Ψηφιακή βιβλιοθήκη Θεόφραστος – Τμήμα Γεωλογίας – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Σχήμα 5. 27. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 1, ERT3.



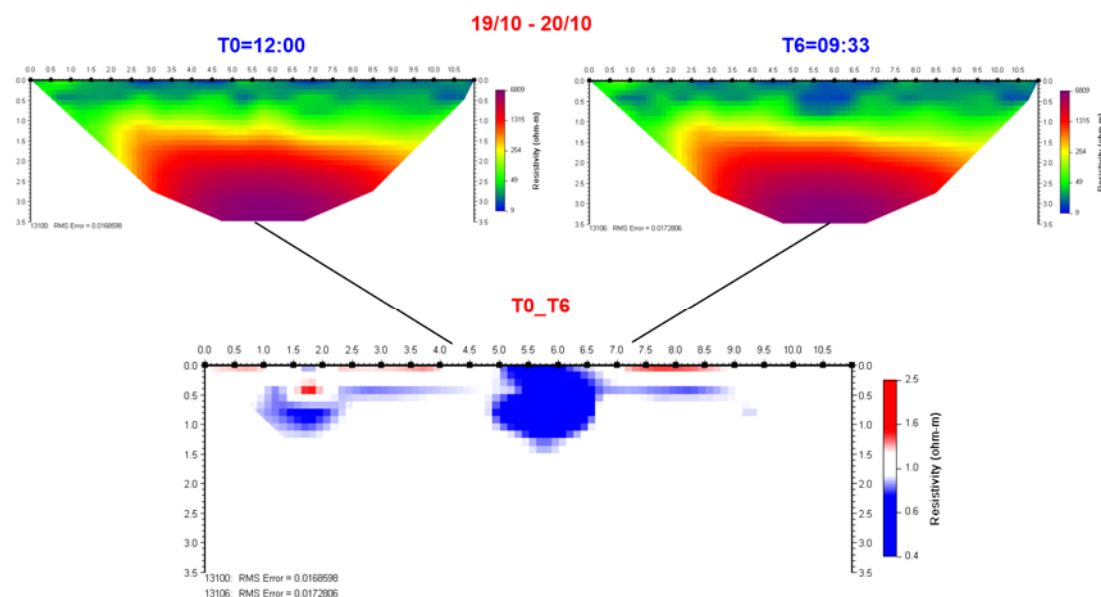
Σχήμα 5. 28. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 1, ERT3.



Σχήμα 5. 29. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 1, ERT3.



Σχήμα 5. 30. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 1, ERT3.



Σχήμα 5. 31. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 1, ERT3.

Την δεύτερη ημέρα του πειράματος και ύστερα από την παύση της τροφοδοσίας του σκάμματος με νερό, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου μετρήσεις. Στο Σχήμα 5.31 παρατηρείται κάτω από τη θέση του σκάμματος τοπική κατείσδυση του νερού σε βάθος 1,5 m.

Στα Σχήματα 5.32 και 5.33 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την 4D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων για τις δύο τομογραφίες ERT2 και ERT3, σημειώνονται μόνο οι μεταβολές της αντίστασης στις χρονικές στιγμές που έγιναν οι μετρήσεις και η ποσότητα του νερού που τροφοδότησε το σκάμμα.

Στο Σχ. 5.32 είναι εμφανείς οι δύο ζώνες των αντιστάσεων που δημιουργούνται. Επιφανειακά εμφανίζεται η μπλε γραμμική ανωμαλία (μείωση της αντίστασης λόγω της κίνησης του νερού) που δείχνει τη θέση του σκάμματος και κάτω από αυτό παρατηρείται η κόκκινη περιοχή αυξημένης αντίστασης. Μέχρι και τη τελευταία μέτρηση της πρώτης ημέρας στο σκάμμα κατείδυσαν 620 λίτρα νερού.

Στο Σχ. 5.33 οι μεταβολές των αντιστάσεων συγκριτικά με την τομογραφία ERT2 είναι πιο έντονες. Παρατηρούνται οι δύο ζώνες των αντιστάσεων, ενώ στην τελευταία μέτρηση του πειράματος τη δεύτερη ημέρα παρατηρήθηκε σε όλες τις τομογραφίες η κατείσδυση του νερού σε βάθος περίπου 1,5 m.

Συμπερασματικά, στη θέση Α το έδαφος είναι πρακτικά αδιαπέρατο και δεν αναμένεται κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στον όγκο των απορριμμάτων με αποτέλεσμα την τροφοδοσία του.

Time: 12:27

13:00

19/10

14:02

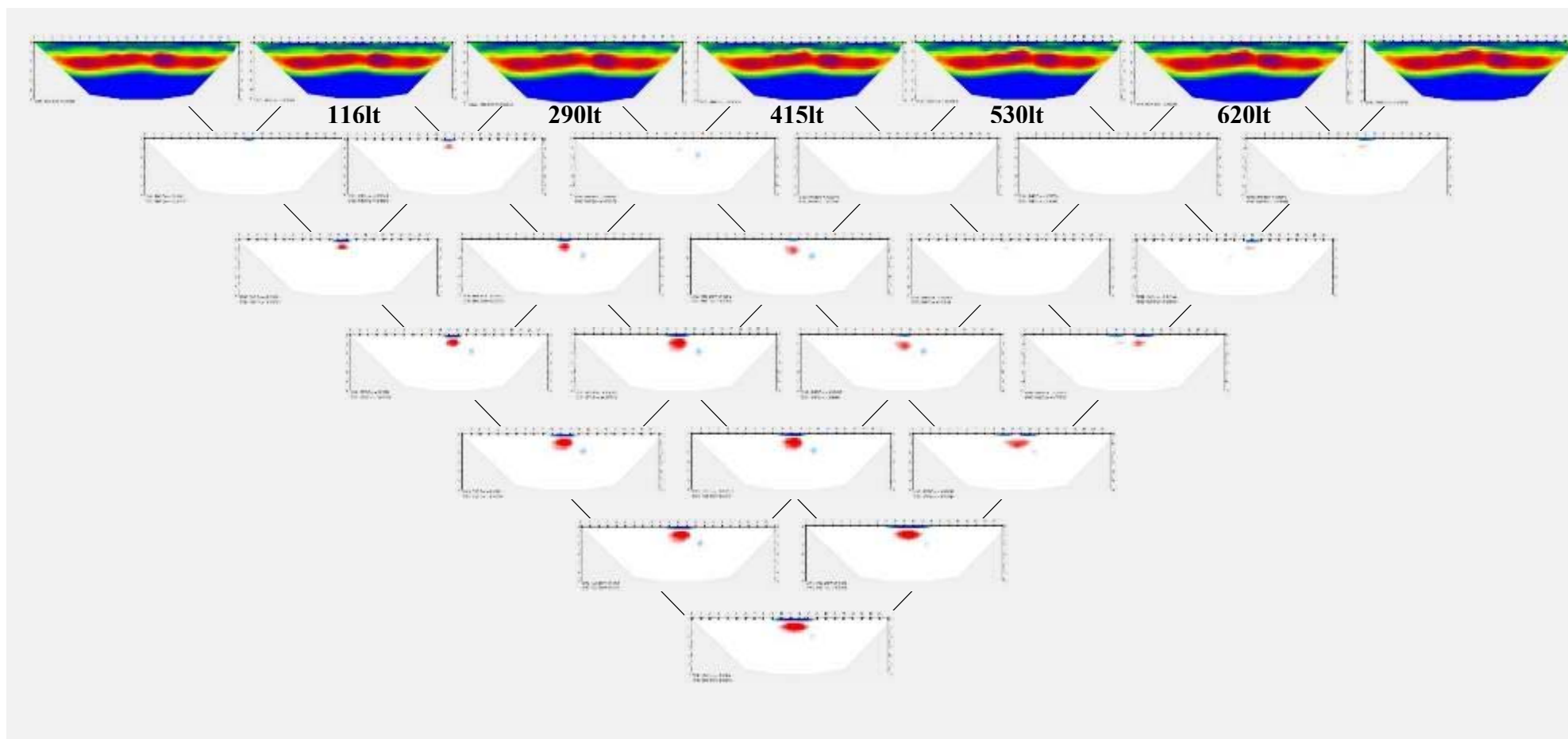
15:00

16:26

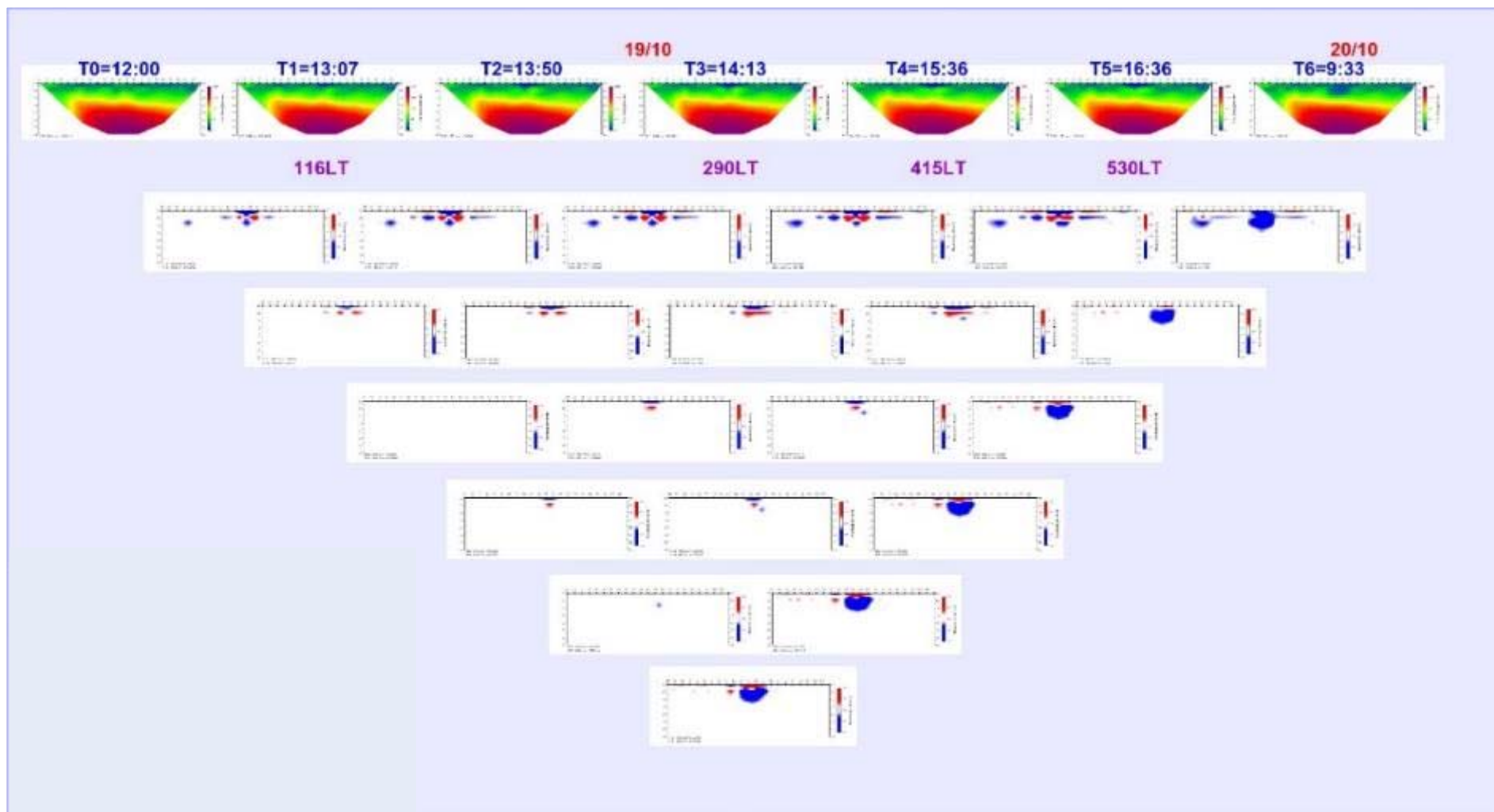
17:26

20/10

10:01



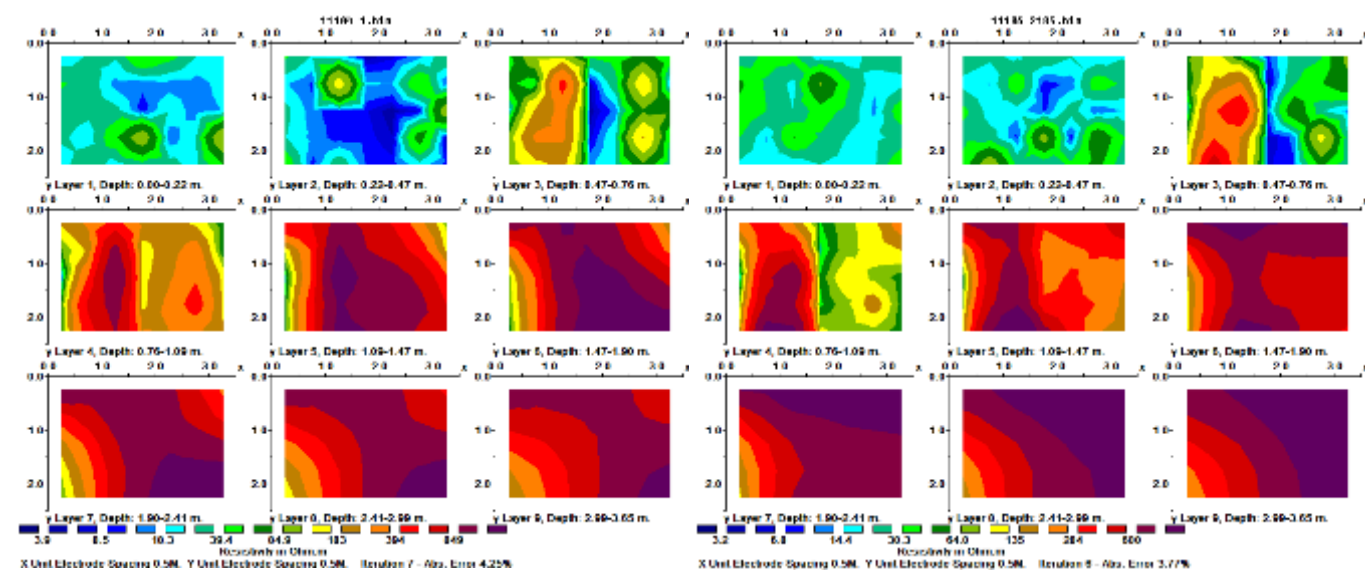
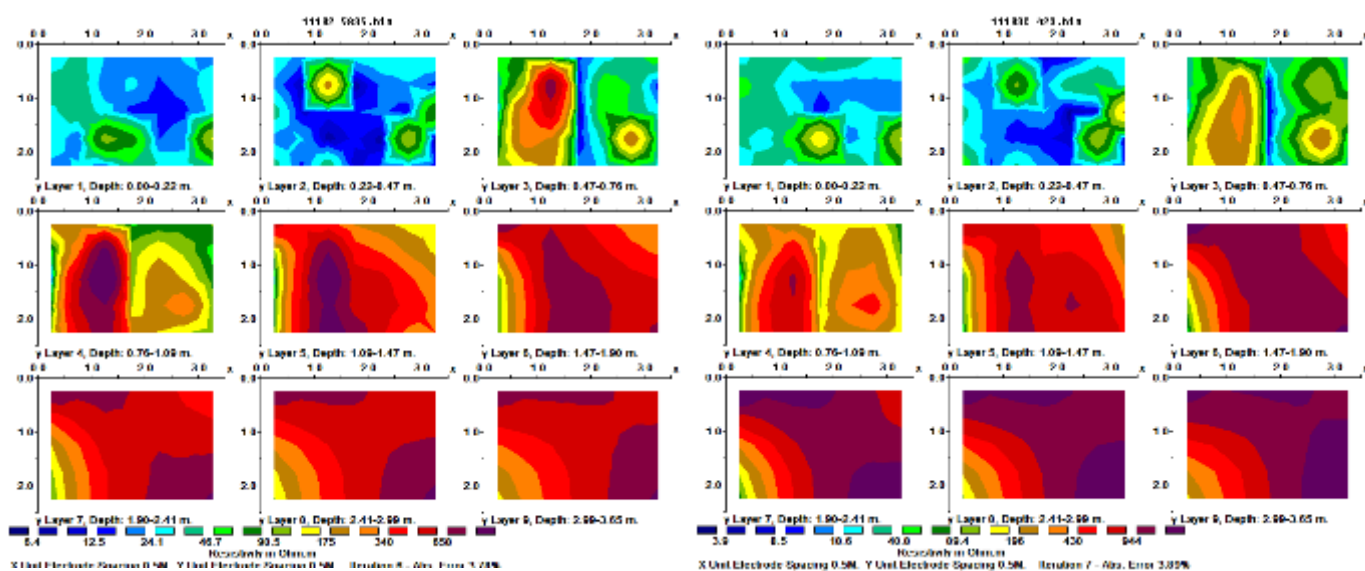
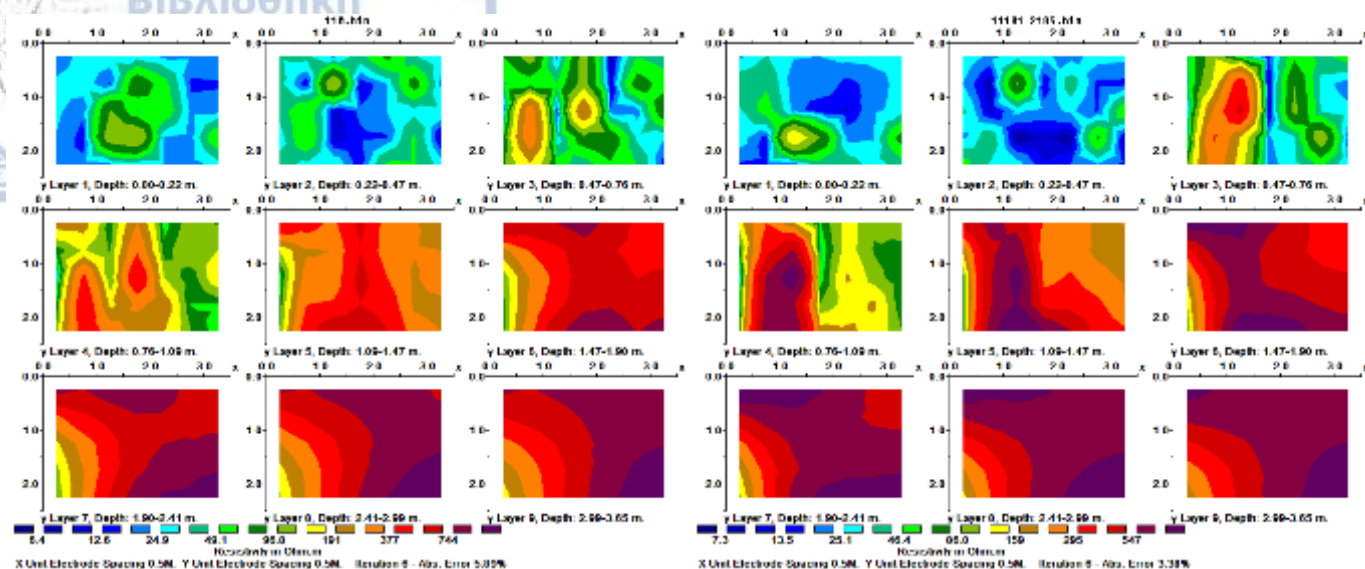
Σχήμα 5. 32. 4D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων για την τομογραφία ERT 2.



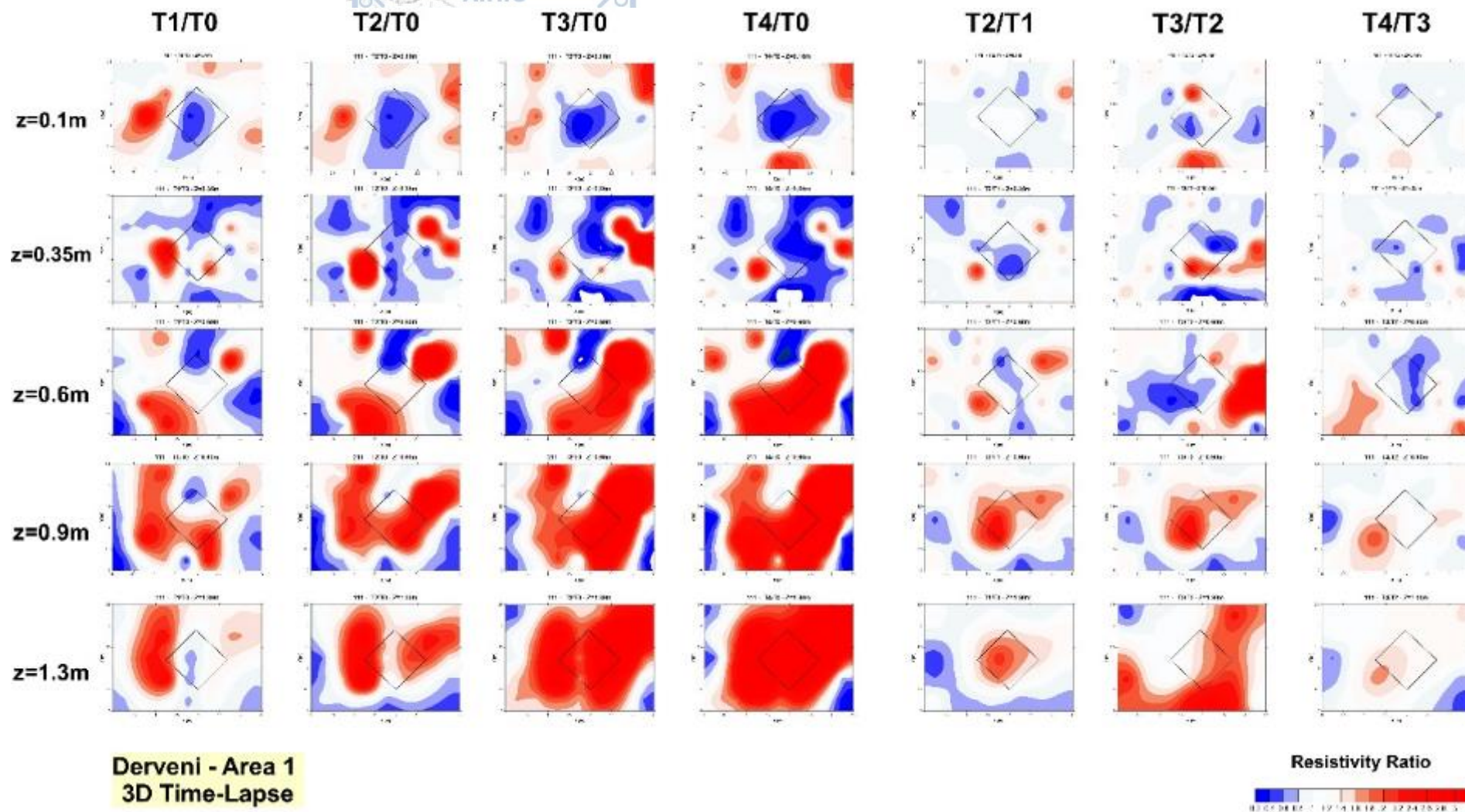
Σχήμα 5. 33. 4D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων για την τομογραφία ERT 3.

Στο σχήμα 5.34 παρατίθενται τα αποτελέσματα των αντιστροφών που υλοποιήθηκαν με την τρισδιάστατη αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε οριζόντιες τομές (φέτες) και φθάνουν μέχρι το βάθος των 3,5 περίπου μέτρων. Όπως παρατηρείται και εδώ σε όλες τις μετρήσεις η γεωλογική δομή παραμένει σταθερή και καταγράφονται οι μεταβολές της αντίστασης λόγω της κίνησης του νερού. Επιφανειακά εντοπίζεται το εδαφικό προστατευτικό κάλυμμα και κάτω από αυτό η ακόρεστη ζώνη των απορριμμάτων. Στα πρώτα εκατοστά του εδάφους παρατηρείται μείωση της αντίστασης μετά την έναρξη του πειράματος και μετά το βάθος των 0,50 μέτρων η αντίσταση αυξάνεται.

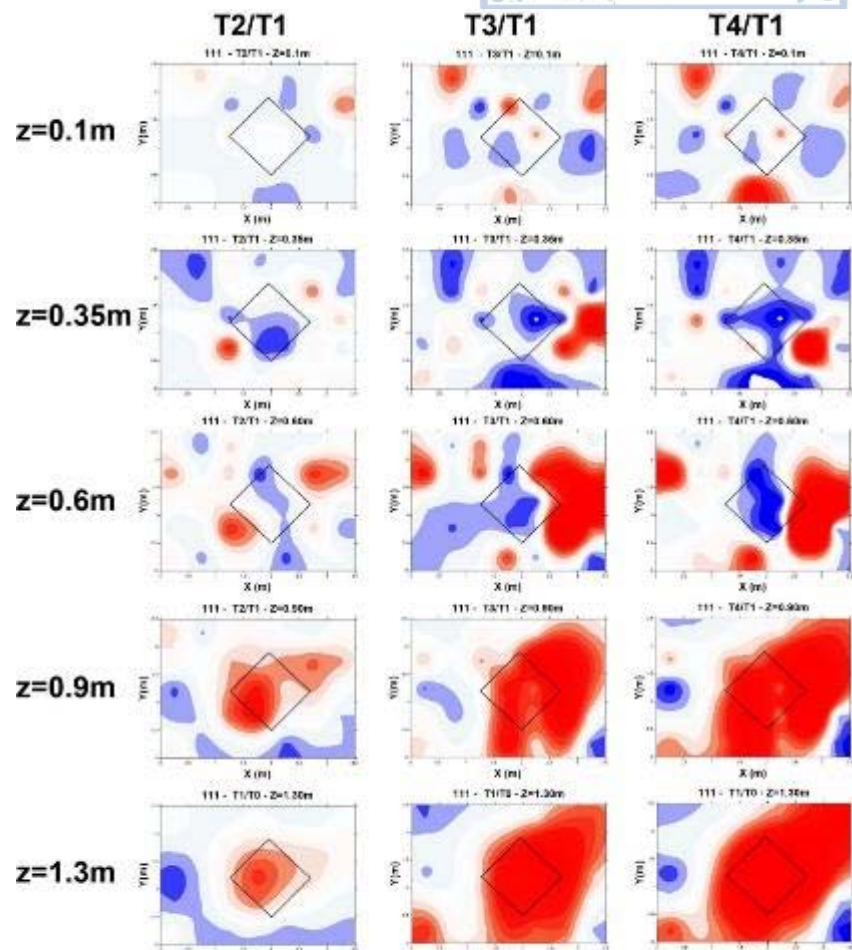
Στα Σχήματα 5.35 και 5.36 υπολογίστηκε ο λόγος των αντιστάσεων για διάφορες χρονικές φάσεις, σε διάφορα βάθη (τελικό βάθος $z=1,30$ m). Στα πρώτα 35 εκατοστά παρατηρείται σε όλες τις χρονικές φάσεις μείωση της αντίστασης στη θέση του σκάμματος και πλευρικά αυτού. Από το βάθος των 60 εκατοστών η αντίσταση αυξάνεται μέχρι και το τελικό βάθος.



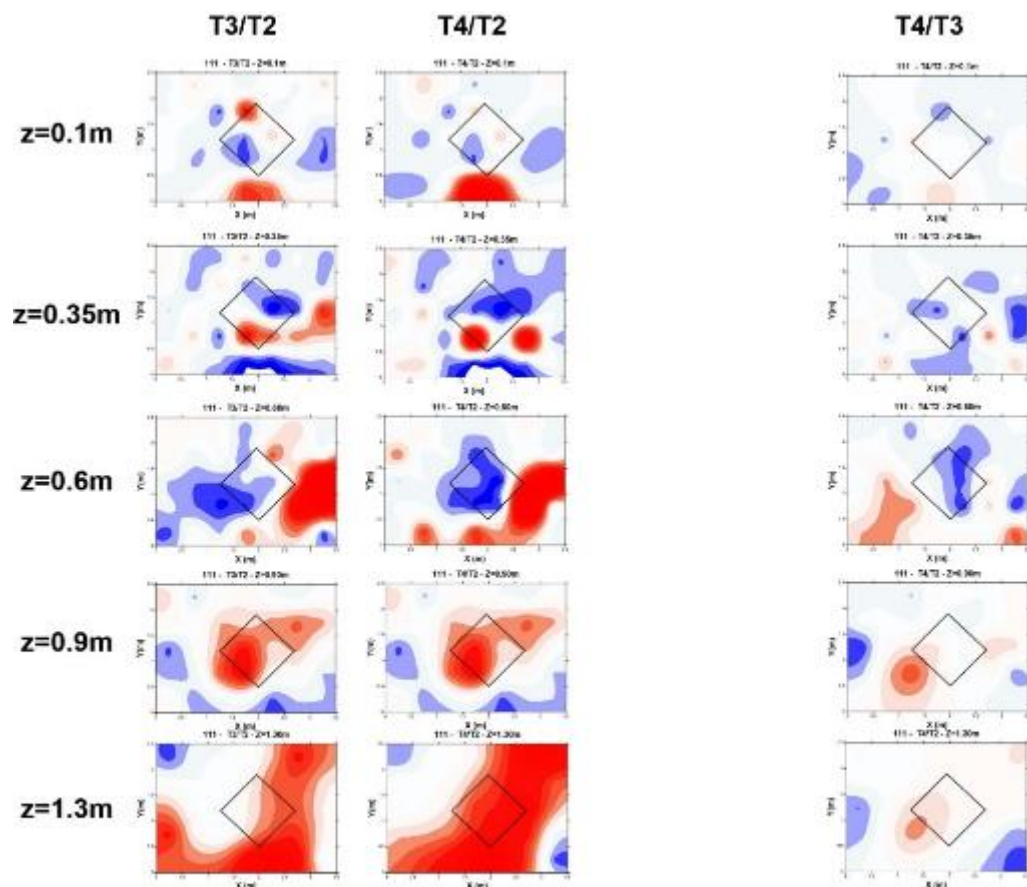
Σχήμα 5. 34. 3D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



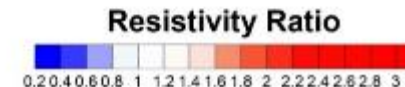
Σχήμα 5. 35. 3D διαχρονική μεταβολή των αντιστάσεων.



Derveni - Area 1
3D Time-Lapse



Derveni - Area 1
3D Time-Lapse

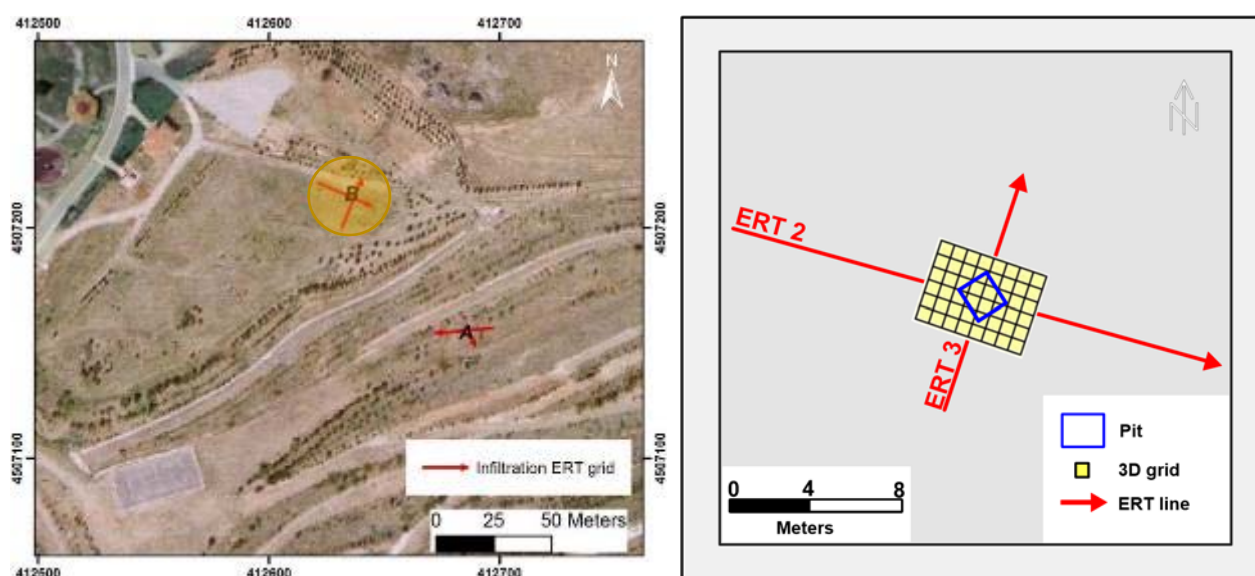


Σχήμα 5. 36. 3D διαχρονική μεταβολή των αντιστάσεων.

5.5 Πείραμα - Θέση Β

Η τοποθεσία Β βρίσκεται ΒΔ του χώρου. Το έδαφος χαρακτηρίζεται από υψηλή υδροπερατότητα. Το πείραμα διήρκεσε 4 ημέρες και ξεκίνησε στις 20 Οκτωβρίου του 2015. Ομοίως με τη πρώτη θέση σχεδιάστηκαν δύο τομές ERT2 και ERT3 κάθετα μεταξύ τους για τη λήψη δισδιάστατων μετρήσεων. Χρησιμοποιήθηκαν 24 ηλεκτρόδια για τη καθεμία και τοποθετήθηκαν ανά 1 m και 0,75 m αντίστοιχα.

Επίσης, δημιουργήθηκε ένας κάνναβος (grid) χρησιμοποιώντας 48 ηλεκτρόδια για τη λήψη τρισδιάστατων μετρήσεων. Η μεταξύ τους απόσταση είναι 0,75 m. Στο Σχ. 5. 37 απεικονίζεται η περιοχή έρευνας Β (αριστερά), το σκάμμα, οι τομές και ο κάνναβος όπως σχεδιάστηκαν στη θέση Β (δεξιά).



Σχήμα 5. 37. Περιοχή έρευνας Β (αριστερά). Σχεδιασμός του πειράματος (δεξιά).

Όπως και στη θέση Α η πρώτη μέτρηση διεξήχθη σε στεγνό έδαφος και σε χρόνο t_0 . Χρησιμοποιώντας το ίδιο δοχείο χωρητικότητας 20 λίτρων ξεκίνησε το πείραμα με ελεγχόμενη ροή. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα παροχετεύονταν νερό στο σκάμμα. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν με σταθερή επανάληψη χρόνου (ανά μία ώρα περίπου) όσο αυτό ήταν εφικτό. Συνολικά την πρώτη ημέρα 20/10/2015 εκτελέστηκαν 9 μετρήσεις για κάθε 2D τομογραφία και με τις δύο διατάξεις και 5 μετρήσεις για την 3D τομογραφία. Την επόμενη ημέρα 21/10/2015 πραγματοποιήθηκαν 12 μετρήσεις για την ERT3, 17 για την ERT2 και 5 μετρήσεις για την 3D τομογραφία.

Την τρίτη ημέρα 22/10/2015 του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μόνο η γραμμή ERT2 και ελήφθησαν 10 μετρήσεις, ενώ την 4η ημέρα 23/10/2015 συγκεντρώθηκαν δεδομένα τεσσάρων μετρήσεων για την ίδια τομή.



Σχήμα 5. 38. Περιοχή Β. Προετοιμασία για την εκτέλεση του πειράματος.

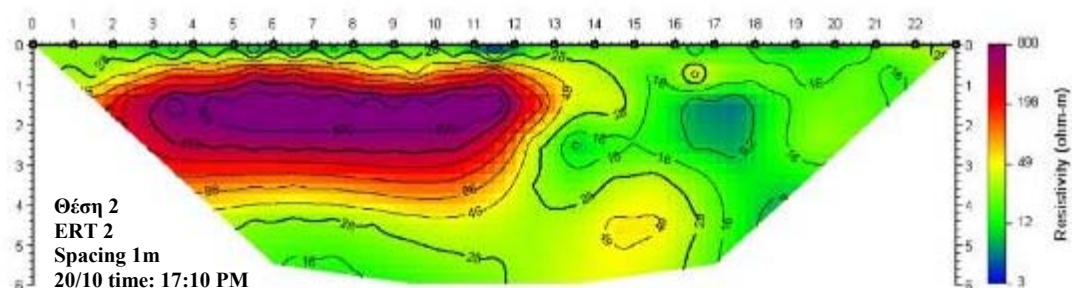
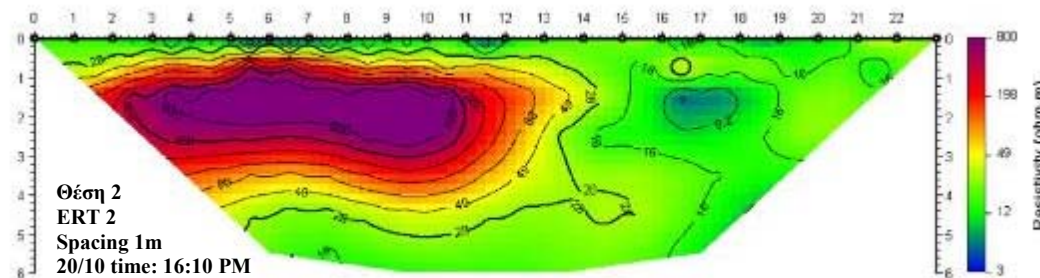
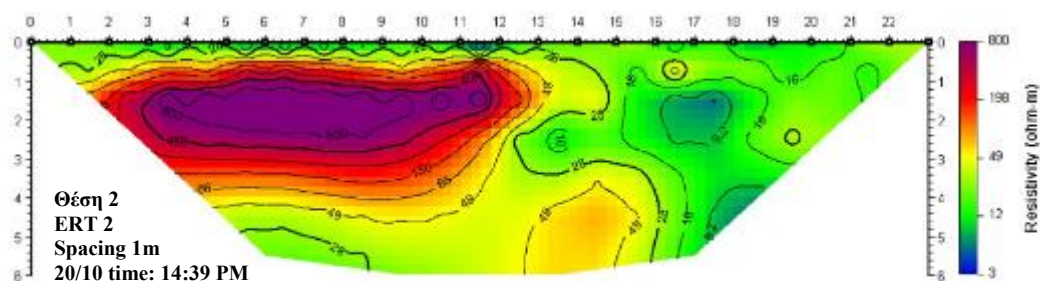
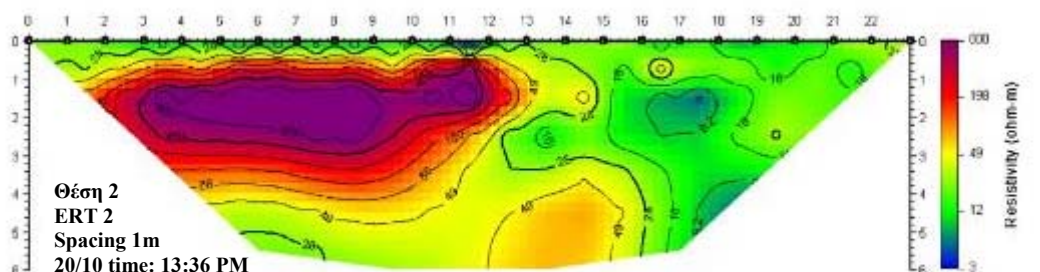
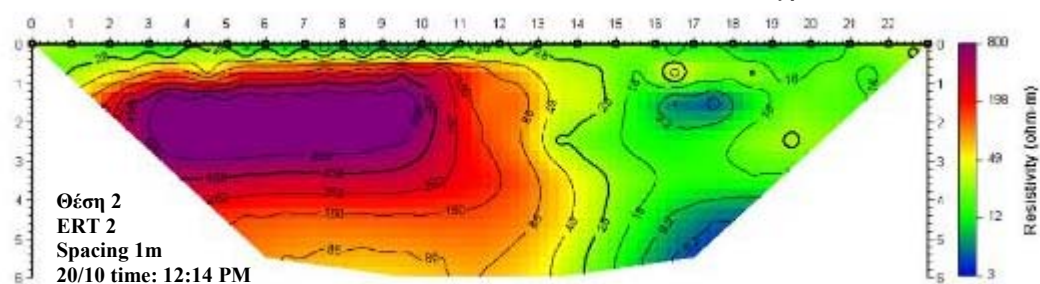


Σχήμα 5. 39. Μέτρηση αγωγιμότητας του νερού πριν από την έναρξη του πειράματος.

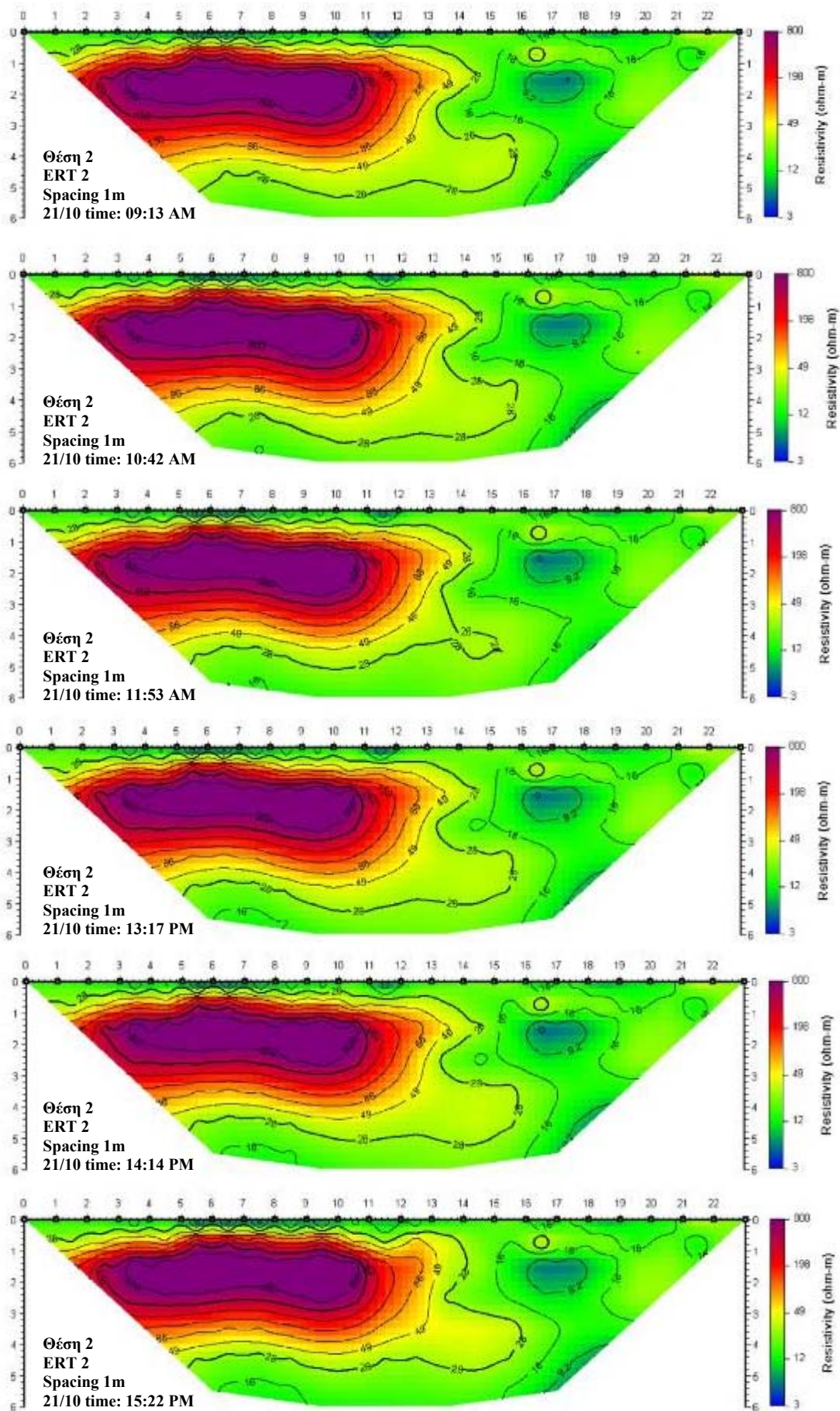


Σχήμα 5. 40. Τροφοδοσία νερού στο σκάμμα και ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων σε δύο διαστάσεις (Θέση Β).

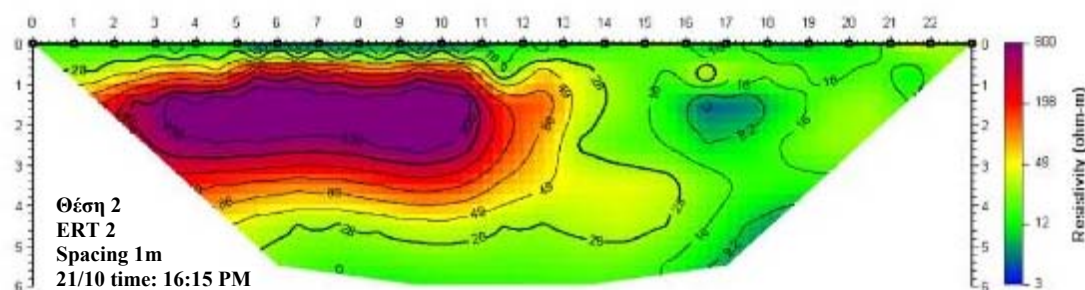
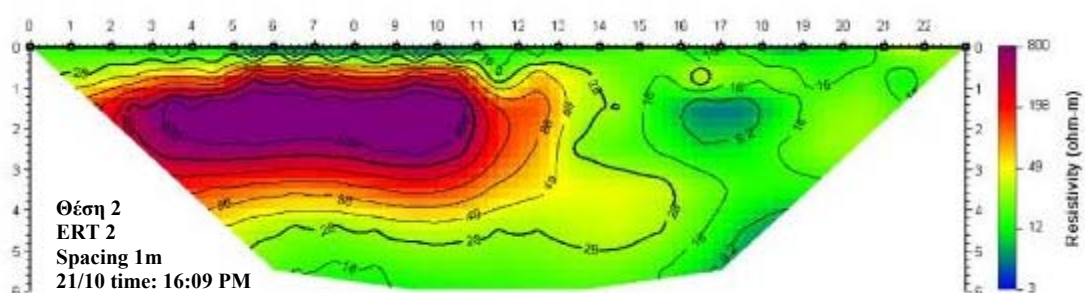
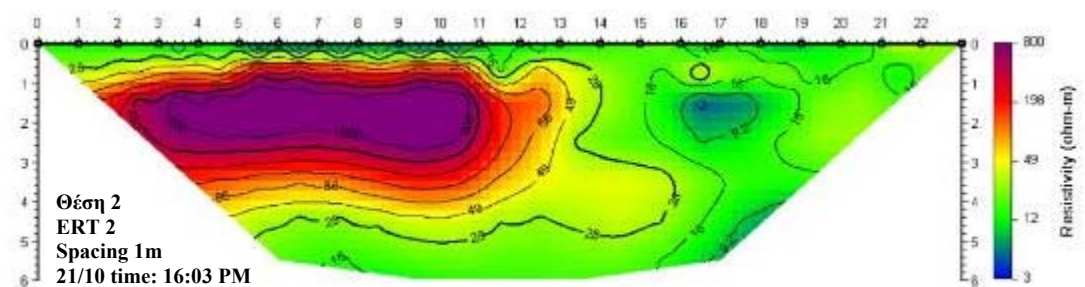
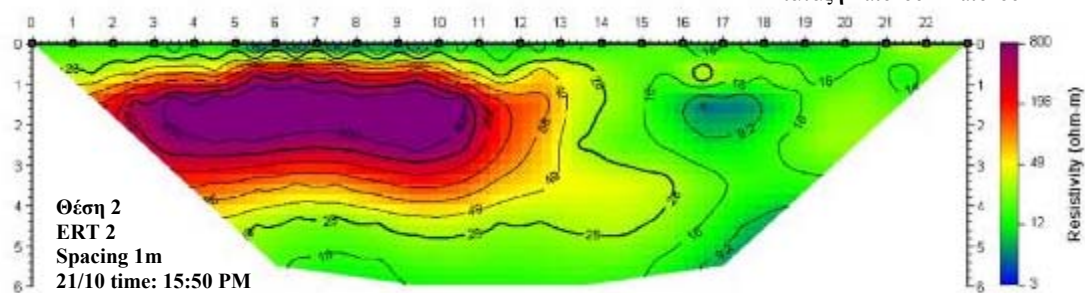
Μετά τη λήψη των μετρήσεων ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα σε τομογραφίες δύο, τριών και τεσσάρων διαστάσεων. Οι τομογραφίες δίνουν πληροφορίες για την αντίσταση του εδάφους. Απεικονίζονται με χρωματική κλίμακα ουράνιου τόξου, με τα θερμά (κόκκινα χρώματα) να δίνουν υψηλές τιμές αντίστασης και τα ψυχρά (μπλε χρώματα) χαμηλές τιμές αντίστασης. Στα Σχήματα 5.41 έως 5.53 παρουσιάζονται οι τομογραφίες ERT2 και ERT3 όπως προέκυψαν από την δισδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές σε διάστημα 4 ημερών.



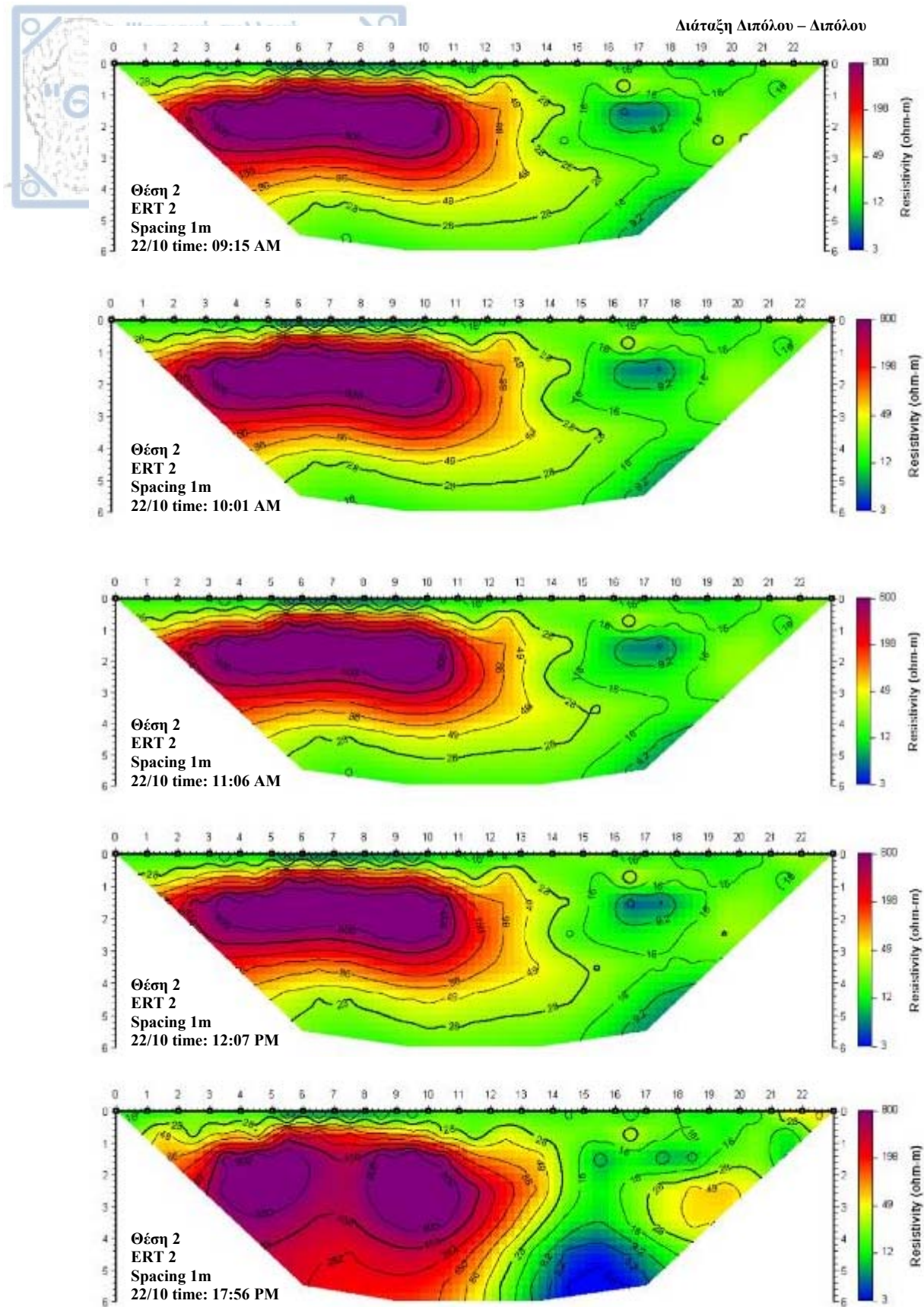
Σχήμα 5. 41. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την πρώτη ημέρα του πειράματος.



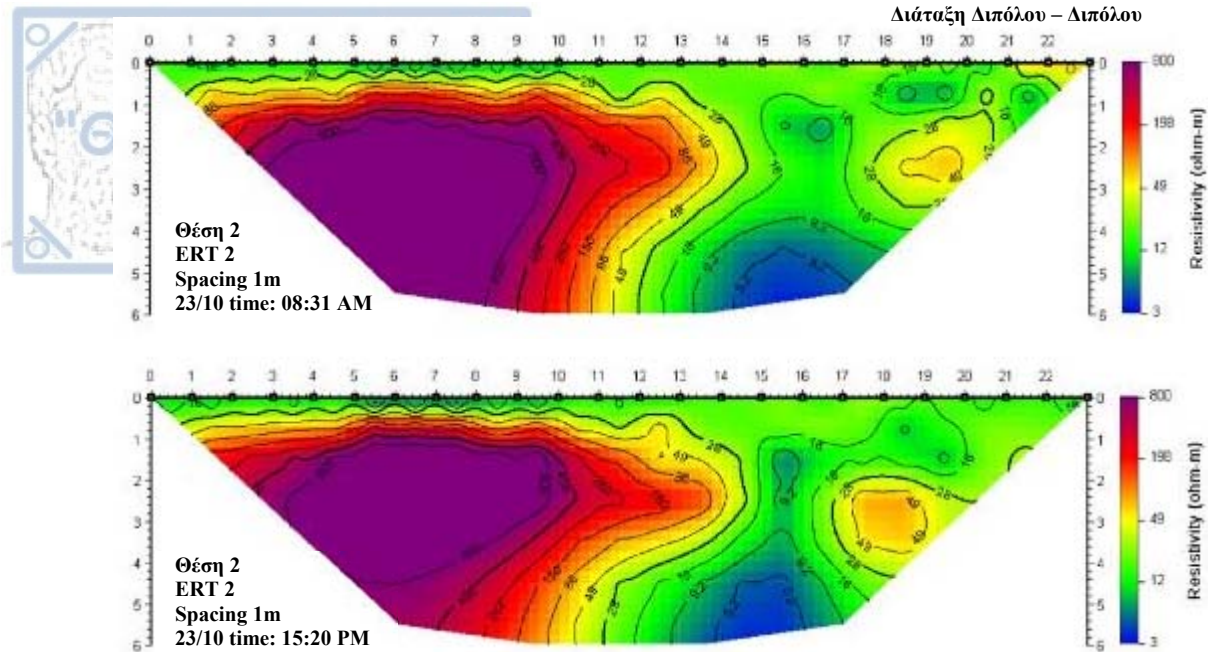
Σχήμα 5. 42. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την δεύτερη ημέρα του πειράματος.



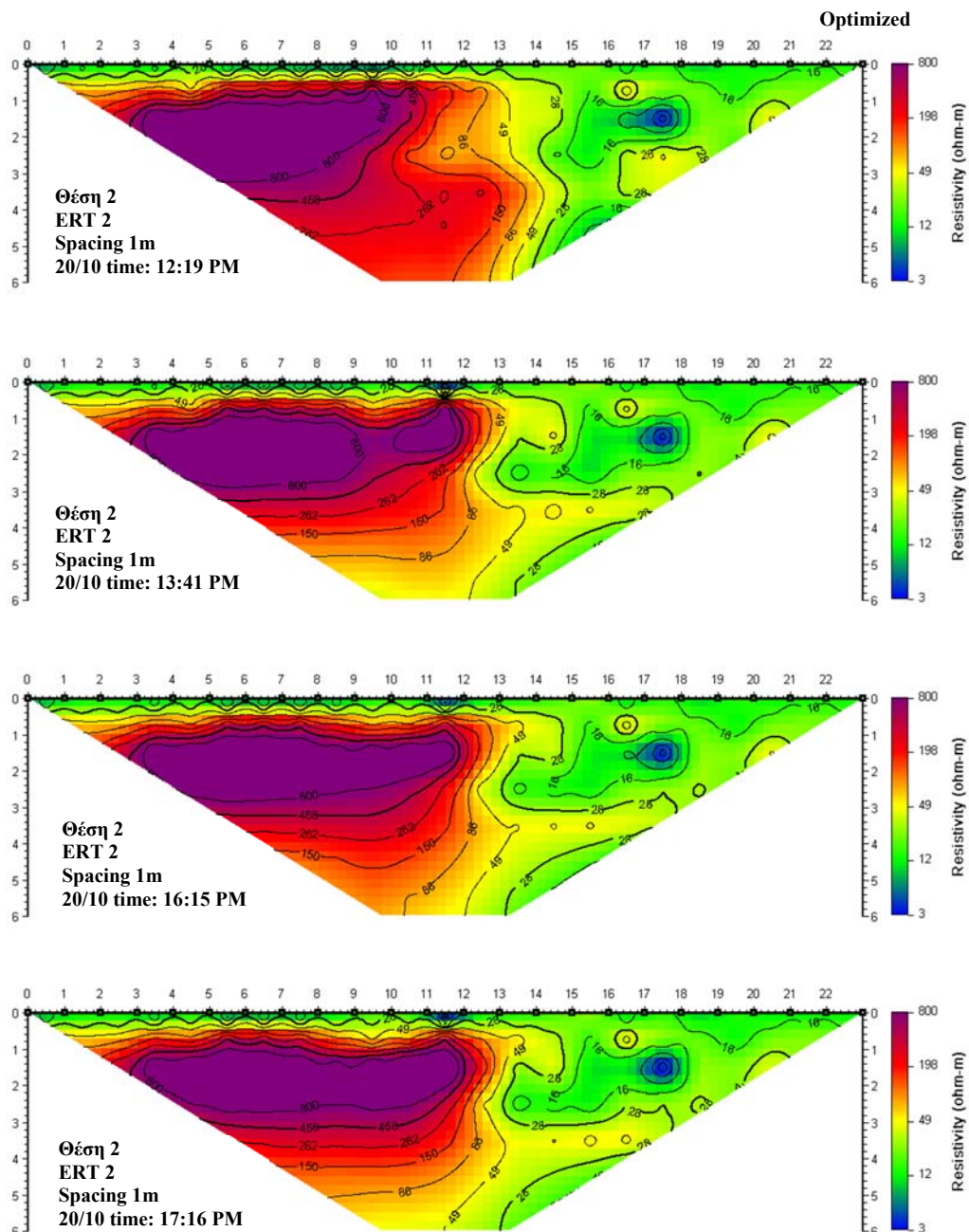
Σχήμα 5. 43. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την δεύτερη ημέρα του πειράματος.



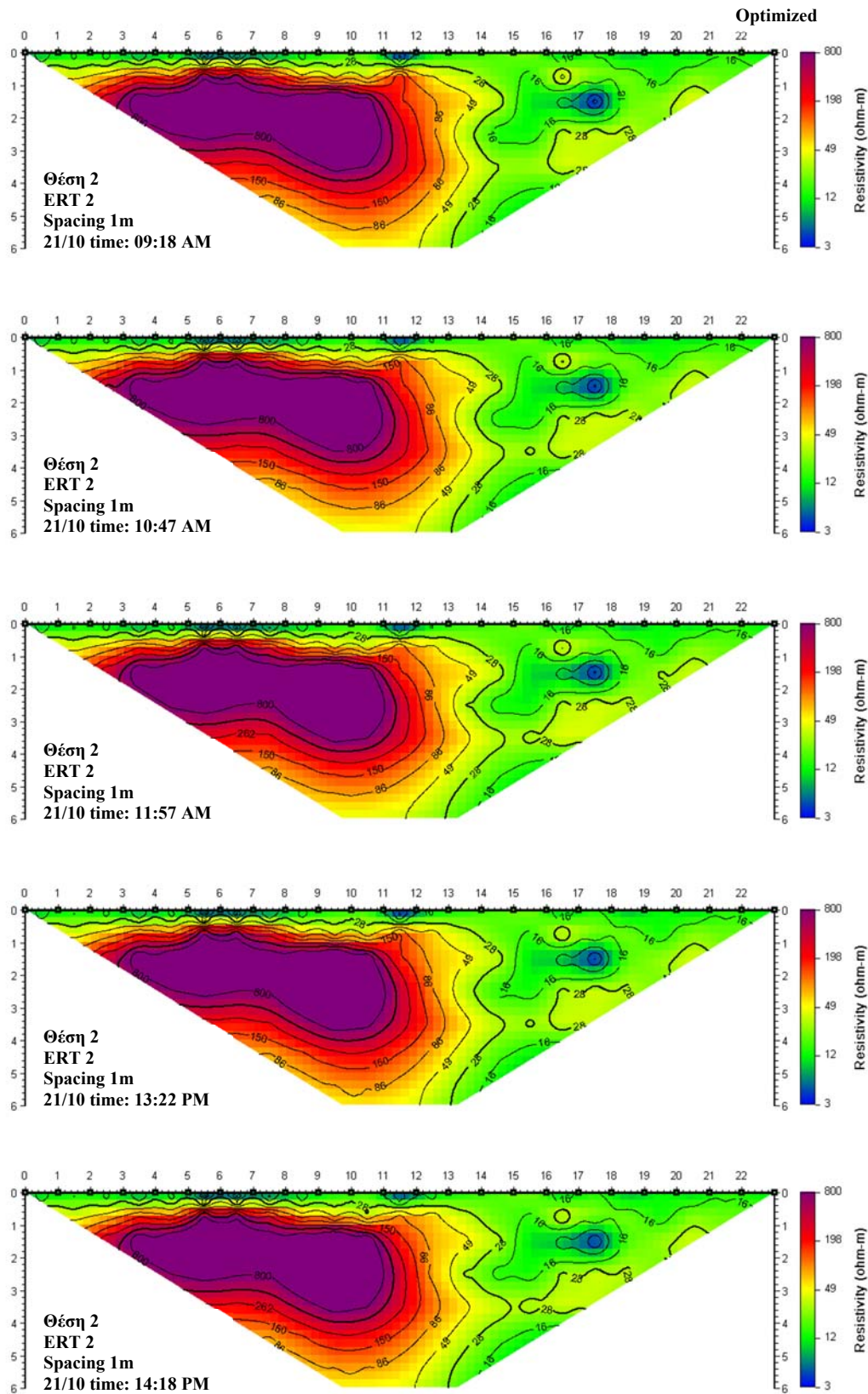
Σχήμα 5. 44. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την τρίτη ημέρα του πειράματος.



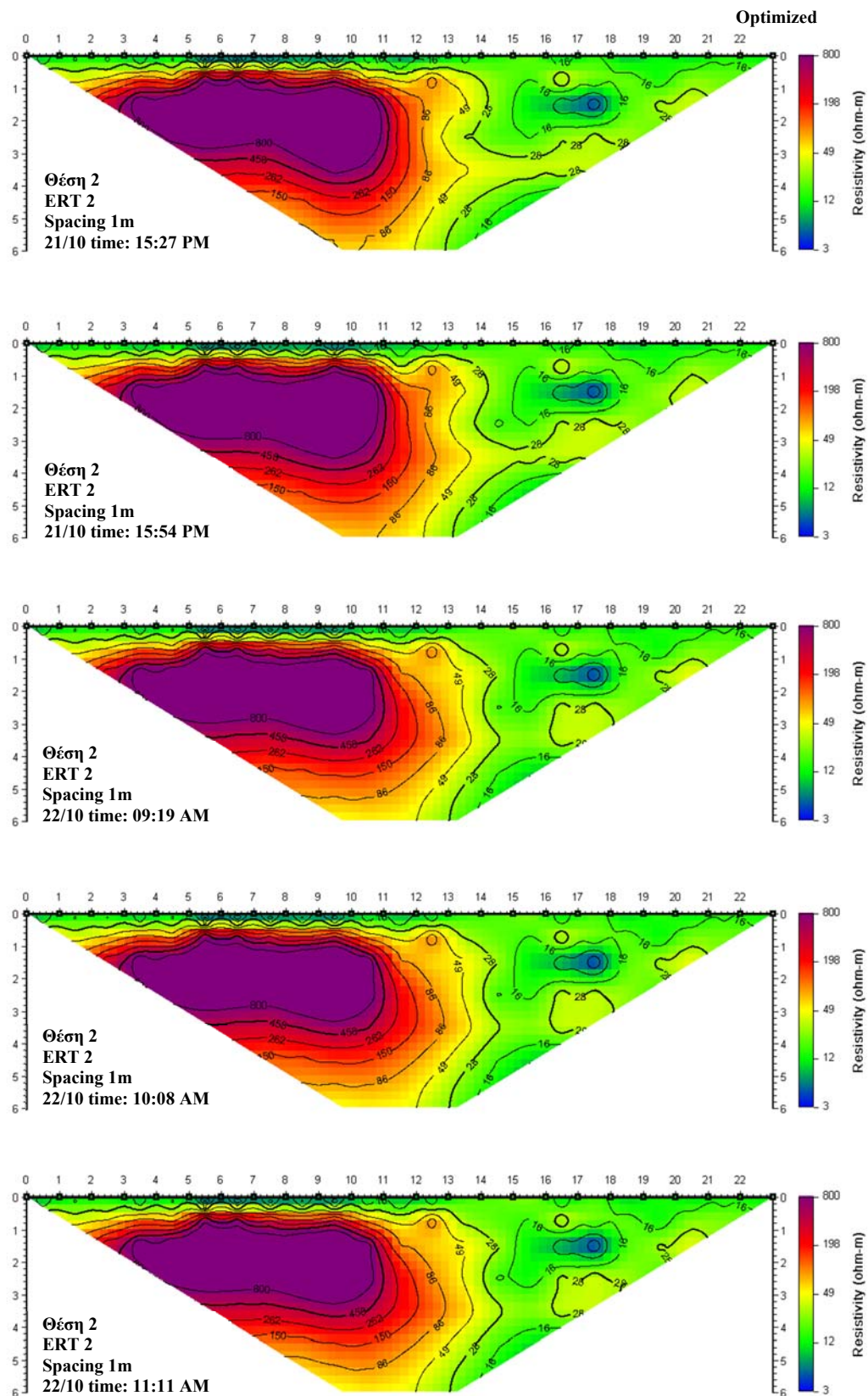
Σχήμα 5. 45. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την τέταρτη ημέρα του πειράματος.



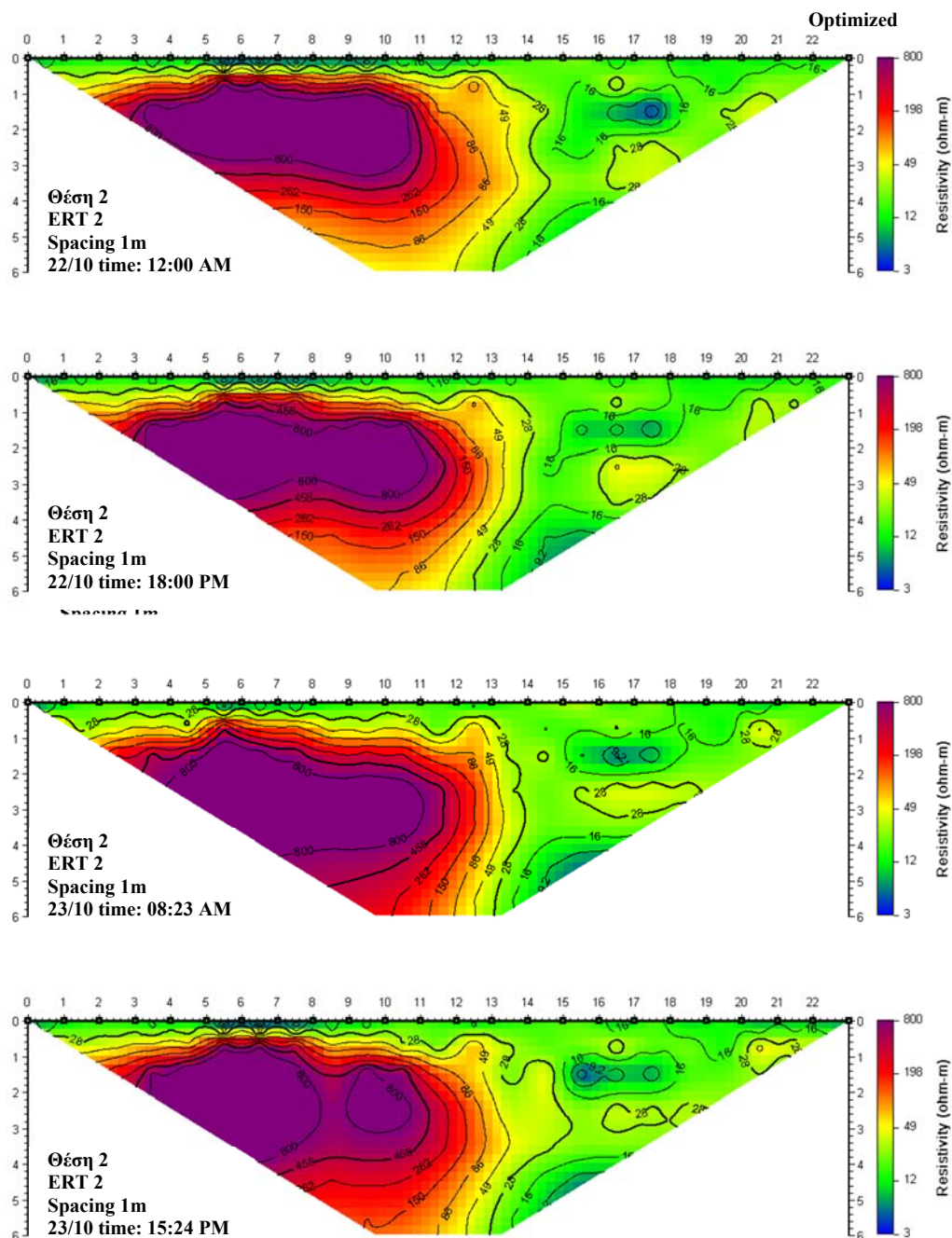
Σχήμα 5. 46. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 τη πρώτη ημέρα του πειράματος: σαλονίκης (optimized).



Σχήμα 5. 47. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 τη δεύτερη ημέρα του πειράματος (optimized).



Σχήμα 5. 48. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την τρίτη ημέρα του πειράματος (optimized).



Σχήμα 5. 49. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 2 την τρίτη και τέταρτη ημέρα του πειράματος (optimized).

Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε χρόνο $t_0=12:14$ με τη διάταξη διπόλου – διπόλου και $t_0=12:19$ με τη διάταξη multiple gradient σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Στη συνέχεια, ακολούθησαν μετρήσεις ανά μία ώρα περίπου. Οι μετρήσεις έγιναν με ταυτόχρονη τροφοδοσία νερού στο σκάμμα.

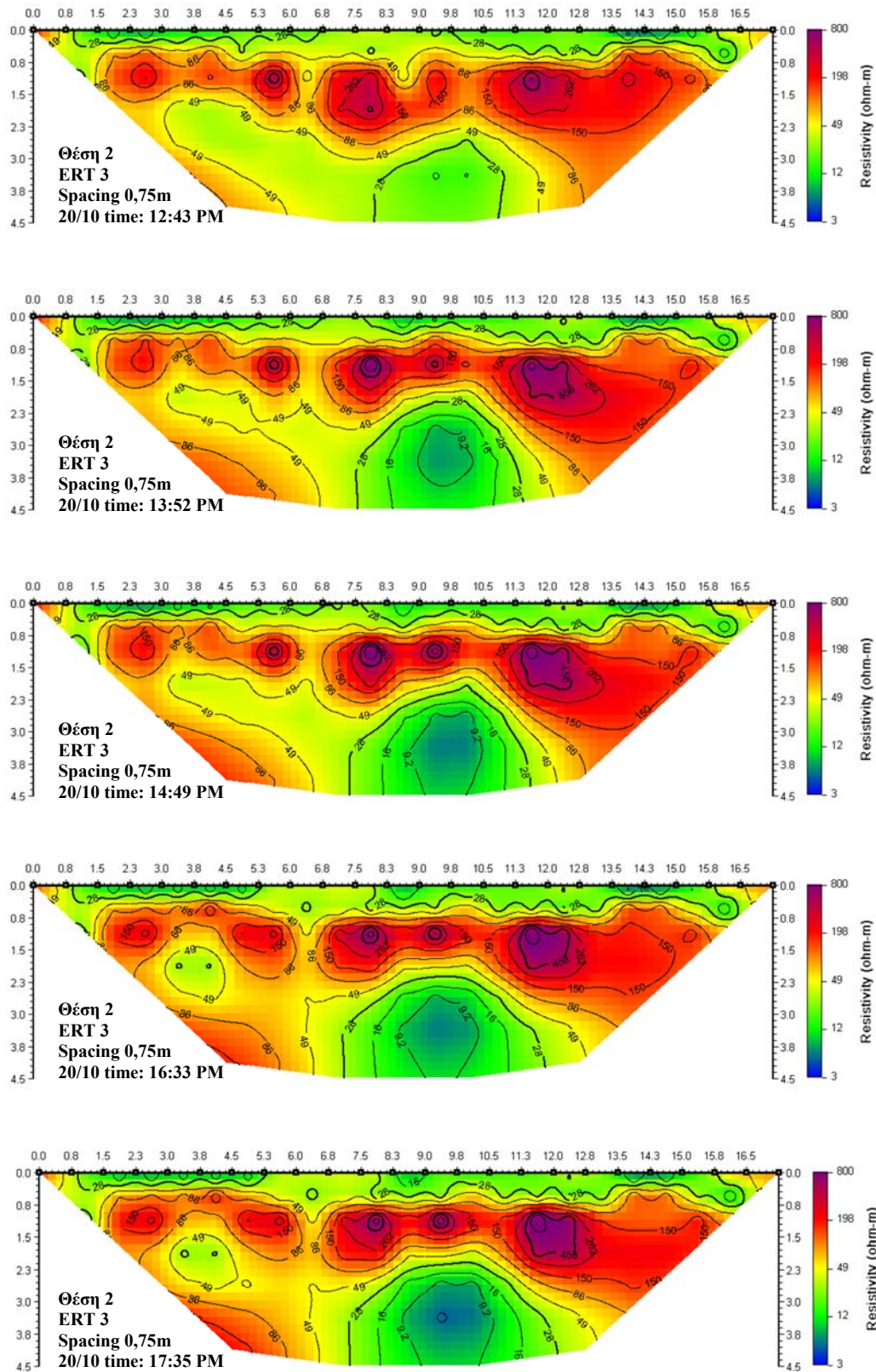
Στην τομή ERT2 και για τις δύο διατάξεις Σχ. 5.41 έως 5.49 επιφανειακά μέχρι και το βάθος των 0,80 μέτρων σε όλο το μήκος της τομής σημειώνονται σχετικά χαμηλές τιμές αντίστασης που αντιστοιχούν στο αργιλικό εδαφικό κάλυμμα. Κατά μήκος της τομής μέχρι και τα δώδεκα μέτρα και σε βάθος ενός μέτρου περίπου παρατηρείται απότομη αύξηση της αντίστασης. Η τομογραφία διέρχεται από τον όγκο των απορριμμάτων και πιθανόν οι υψηλές τιμές αντίστασης να αποδίδονται στην ακόρεστη ζώνη αυτών η οποία διακόπτεται απότομα, πλευρικά με ασυνέχεια που εντοπίζεται στα δώδεκα περίπου μέτρα κατά μήκος της τομής. Στην περιοχή των χαμηλών αντιστάσεων πιθανόν συναντάται η κορεσμένη ζώνη των απορριμμάτων.

Επιφανειακά στα έντεκα μέτρα και για ένα μέτρο μετά την έναρξη του πειράματος παρατηρείται η μπλε λεπτή αγωγίμη στρώση που οφείλεται στη παρουσία του νερού και δείχνει τη θέση του σκάμματος.

Στα δεκαέξι μέτρα κατά μήκος της τομής και σε βάθος περίπου δύο μέτρων η αντίσταση φαίνεται να μειώνεται ως ένδειξη πιθανής κατείσδυσης του νερού. Η ίδια εικόνα παρατηρείται και στα 14 με 16 μέτρα της τομογραφίας και σε βάθος περίπου έξι μέτρων.

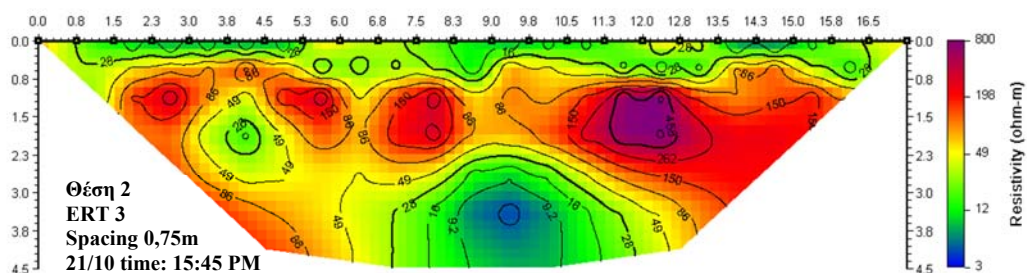
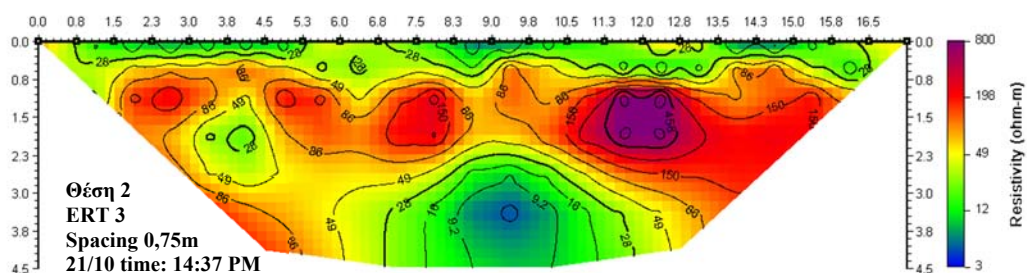
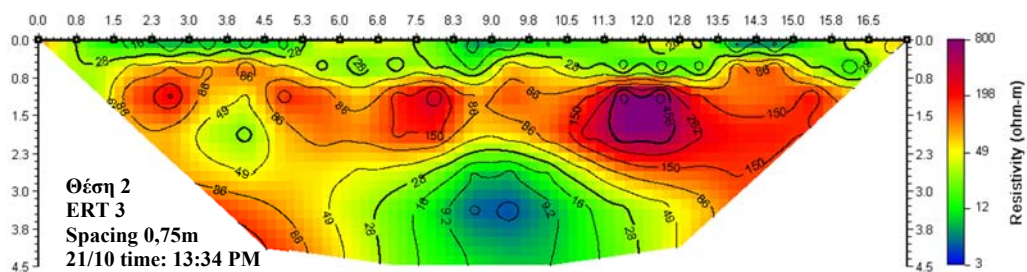
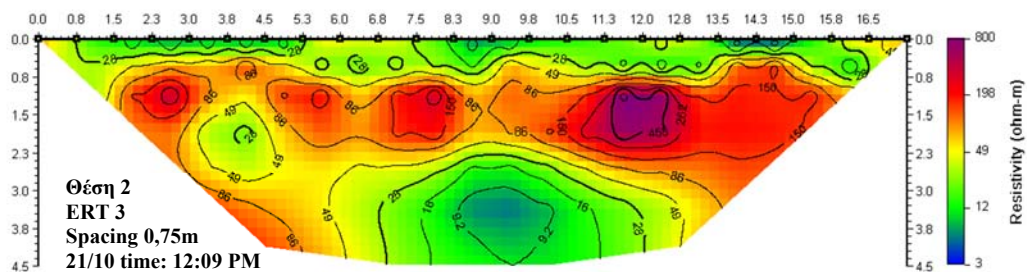
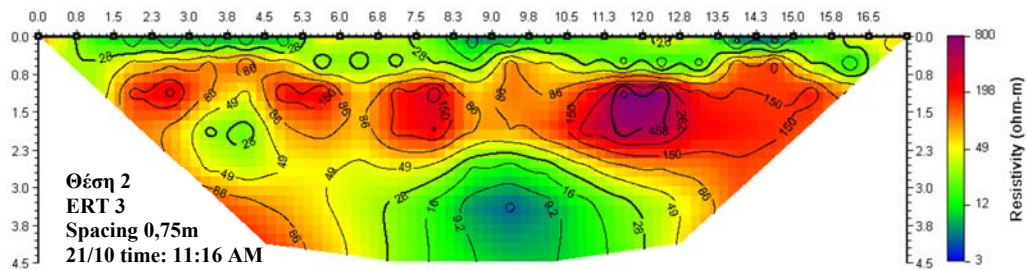
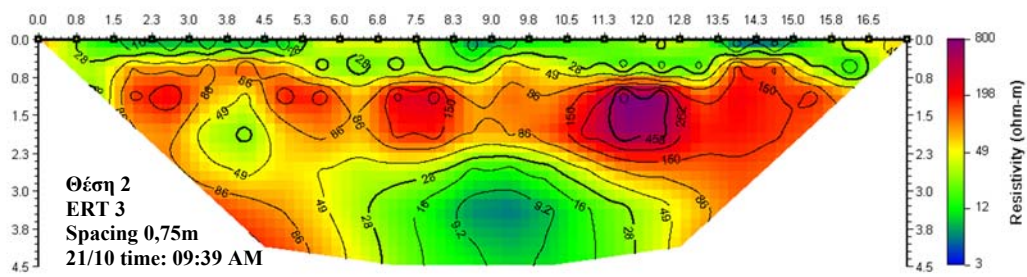
Στην τομή ERT3 και με τις δύο διατάξεις (Σχ. 5.50 έως 5.53) πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τις δύο πρώτες ημέρες του πειράματος. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε χρόνο $t_0=12:43$ με τη διάταξη διπόλου – διπόλου και $t_0=12:48$ με τη διάταξη multiple gradient σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Στη συνέχεια, ακολούθησαν μετρήσεις ανά μία ώρα περίπου. Οι μετρήσεις έγιναν με ταυτόχρονη τροφοδοσία νερού στο σκάμμα.

Στα πρώτα 0,80 m συναντάται το εδαφικό προστατευτικό κάλυμμα. Στη συνέχεια, η ζώνη των υψηλών αντιστάσεων αντιστοιχεί στην ακόρεστη ζώνη των απορριμμάτων. Η ζώνη αυτή παρουσιάζει ανομοιογένεια με την εμφάνιση ασυνεχειών κατά μήκος της. Στα 8,30 μέτρα και σε βάθος δέκα εκατοστών βρίσκεται το σκάμμα όπου μετά την έναρξη του πειράματος η αντίσταση μειώνεται λόγω της παρουσίας του νερού. Στα 9,0 μέτρα περίπου και μόνο στην τομογραφία που μετρήθηκε με τη διάταξη διπόλου – διπόλου, σε βάθος κάτω των 2,5 μέτρων καταγράφεται μείωση της αντίστασης ως πιθανή κατείσδυση του νερού.

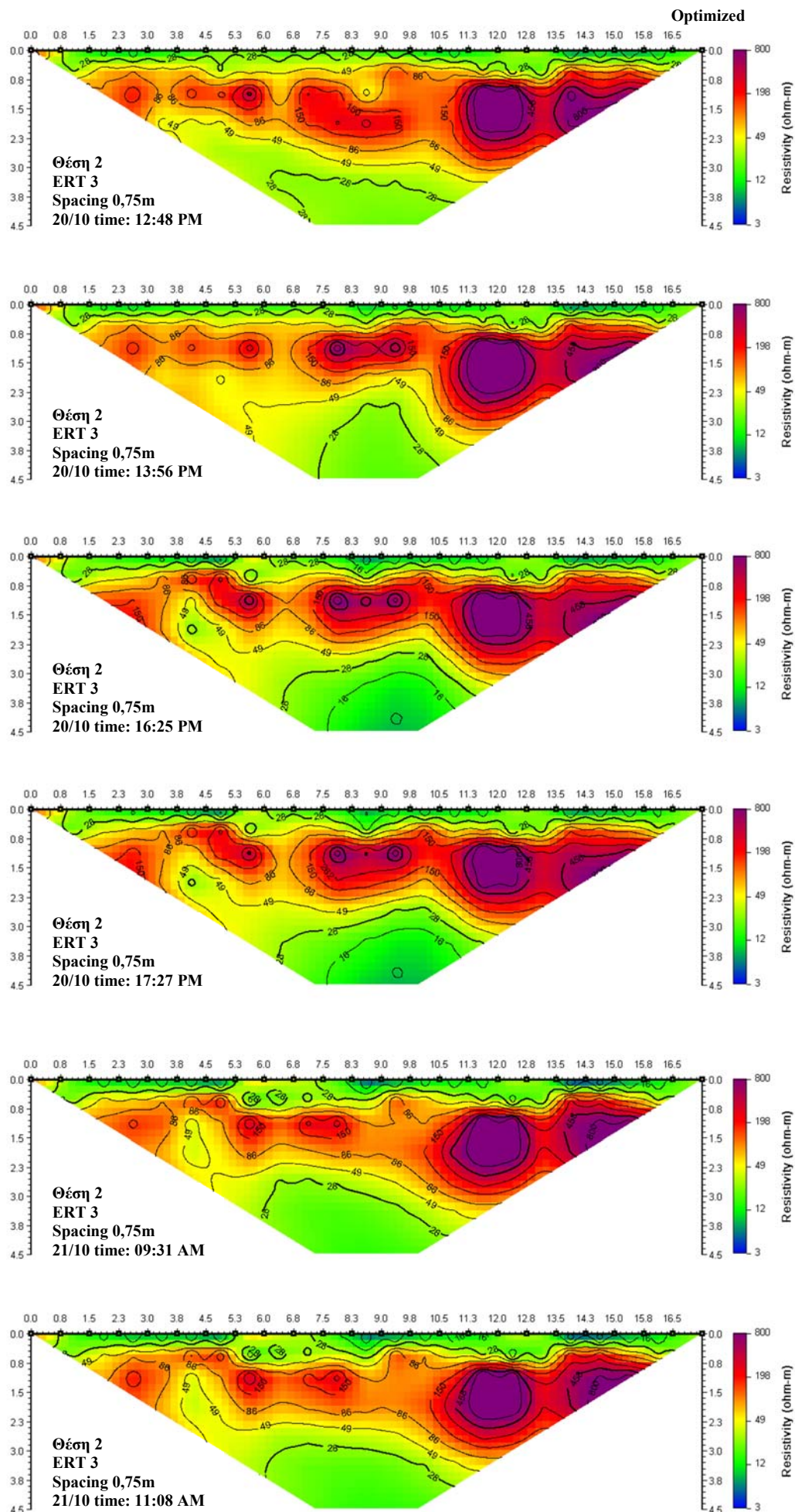


Σχήμα 5. 50. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 3 την πρώτη ημέρα του πειράματος.

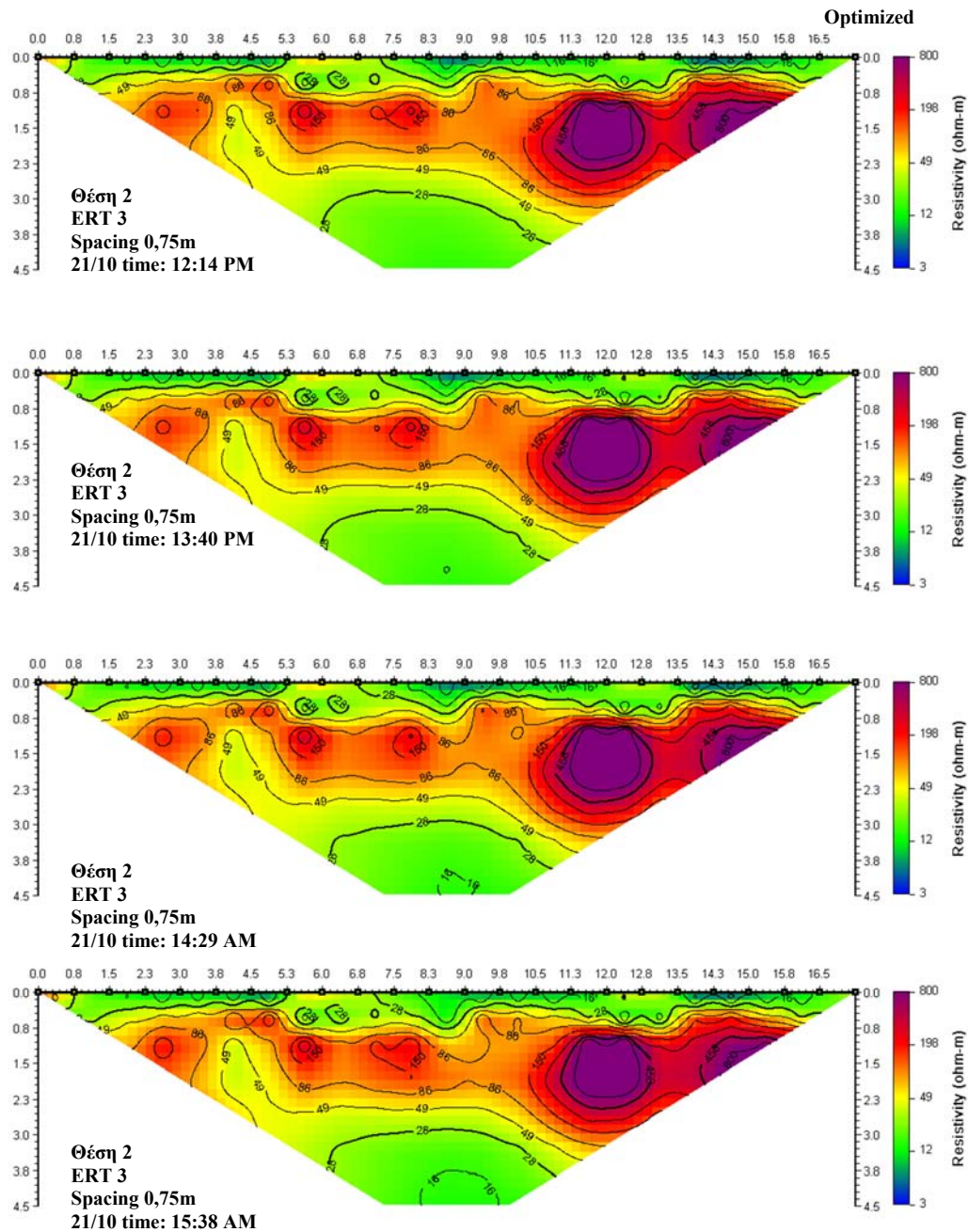
Διάταξη Διπόλου – Διπόλου



Σχήμα 5. 51. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 3 την δεύτερη ημέρα του πειράματος.



Σχήμα 5. 52. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 3 την πρώτη ημέρα του πειράματος (optimized).



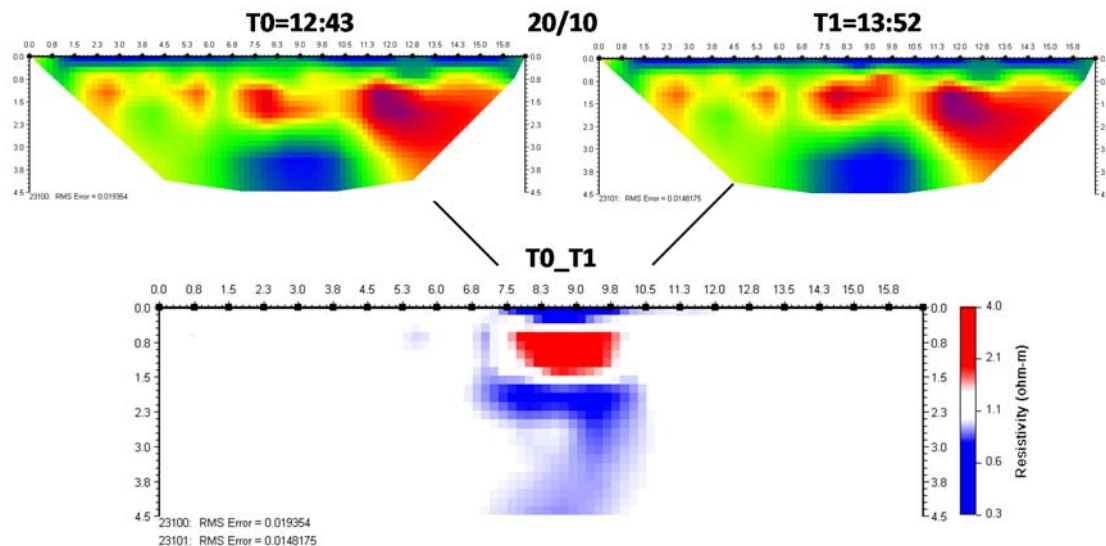
Σχήμα 5. 53. Εικόνες των αντιστάσεων του υπεδάφους. Τομογραφία ERT 3 την δεύτερη ημέρα του πειράματος (optimized).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 4D αντιστροφής των δεδομένων για την διάταξη διπόλου – διπόλου. Στα Σχήματα 5.54 έως 5.59 παρουσιάζονται ενδεικτικά για την τομογραφία ERT3 σε σχέση με την αρχική μέτρηση (σε στεγνό έδαφος) τα αποτελέσματα της αντιστροφής των γεωηλεκτρικών δεδομένων όπως προέκυψαν με τη χρήση τετραδιάστατου κώδικα.

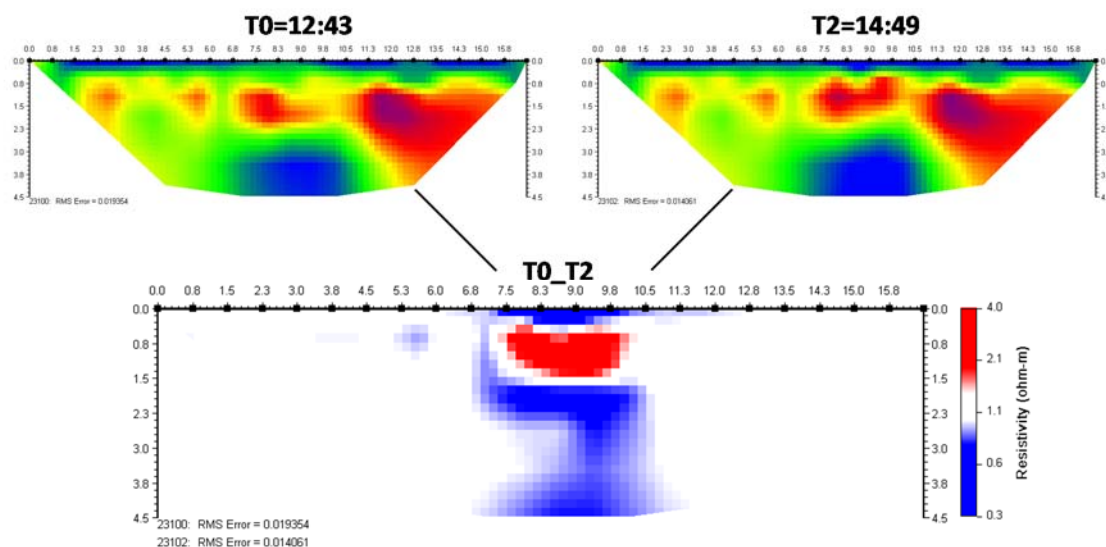
Με τη διαχρονική παρακολούθηση επιδιώκεται να βρεθεί η αλλαγή των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων (μεταβολή αντίστασης) μεταξύ των χρονικών φάσεων. Έτσι,

στα παρακάτω σχήματα δίνονται ανά ζεύγη οι 2D τομογραφίες που μετρήθηκαν σε διαφορετικούς χρόνους και αποτυπώνονται μόνο οι διαχρονικές μεταβολές της αντίστασης ως αποτέλεσμα της 4D αντιστροφής. Διακρίνεται σε όλες τις τομογραφίες η μπλε γραμμική ανωμαλία που δείχνει τη μείωση της αντίστασης λόγω της κίνησης του νερού και εμφανίζεται στα πρώτα δέκα εκατοστά της επιφάνειας στη θέση του σκάμματος. Στη θέση ακριβώς κάτω από το σκάμμα παρατηρείται η περιοχή των υψηλών αντιστάσεων.

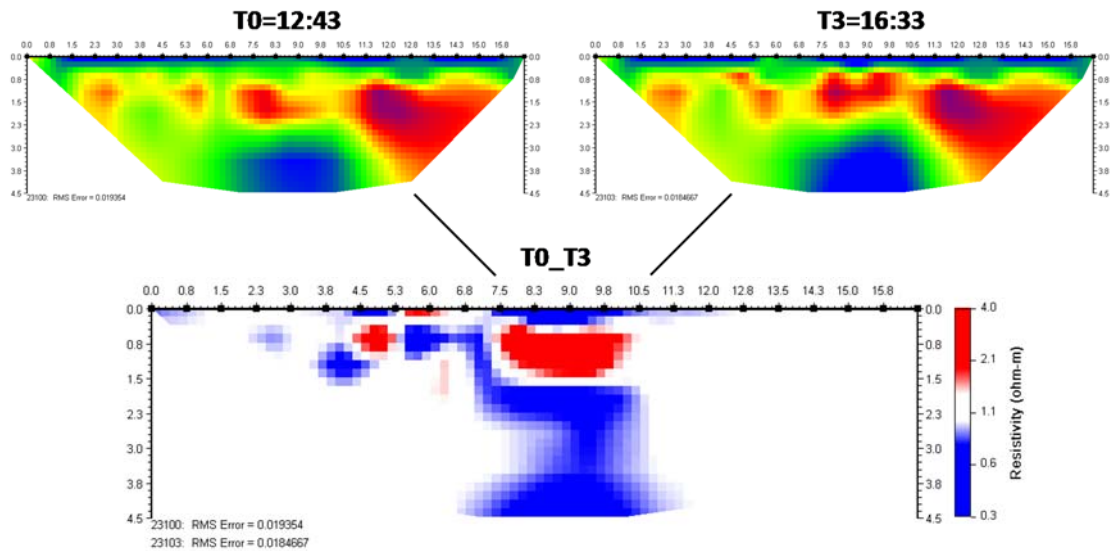
Από το βάθος των δύο μέτρων περίπου και κάτω είναι εμφανής η μείωση της αντίστασης και παρατηρήθηκε σε όλες τις καταγραφές. Τη δεύτερη ημέρα του πειράματος σημειώθηκε βροχόπτωση καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων και παρατηρήθηκε επιπλέον μείωση της αντίστασης επιφανειακά κατά μήκος της τομογραφίας.



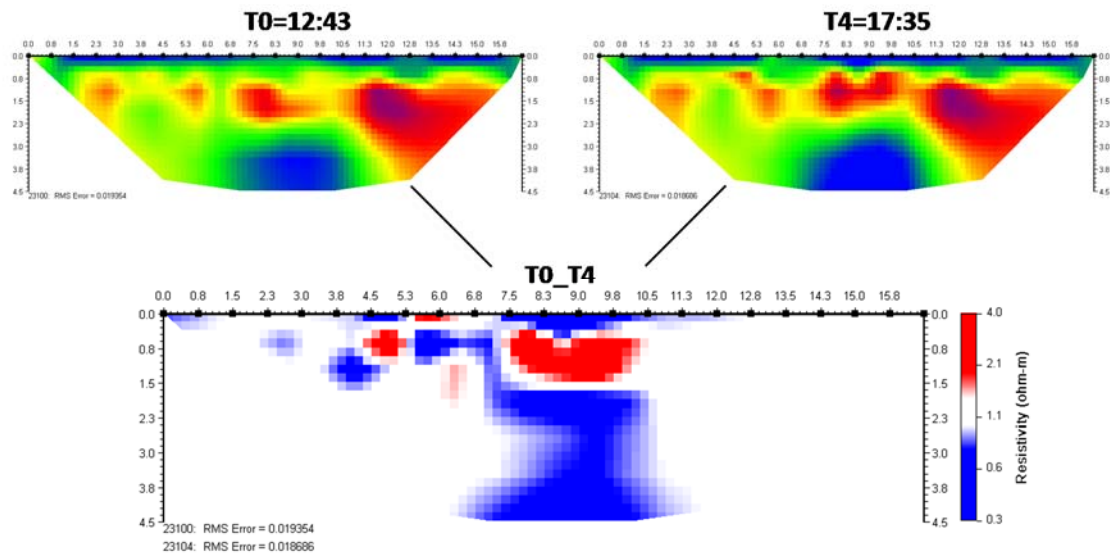
Σχήμα 5. 54. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 2, ERT3.



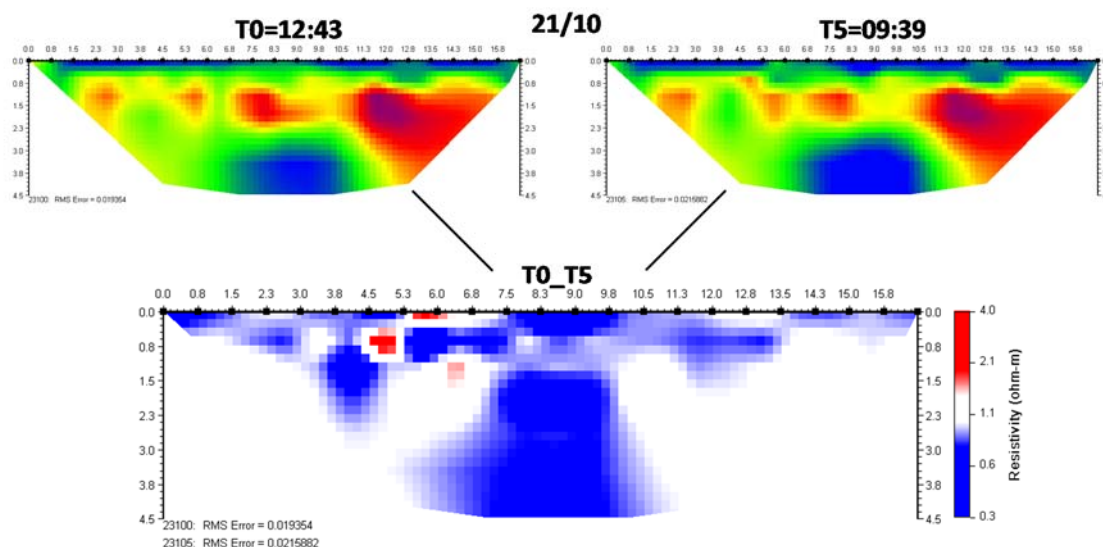
Σχήμα 5. 55. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 2, ERT3.



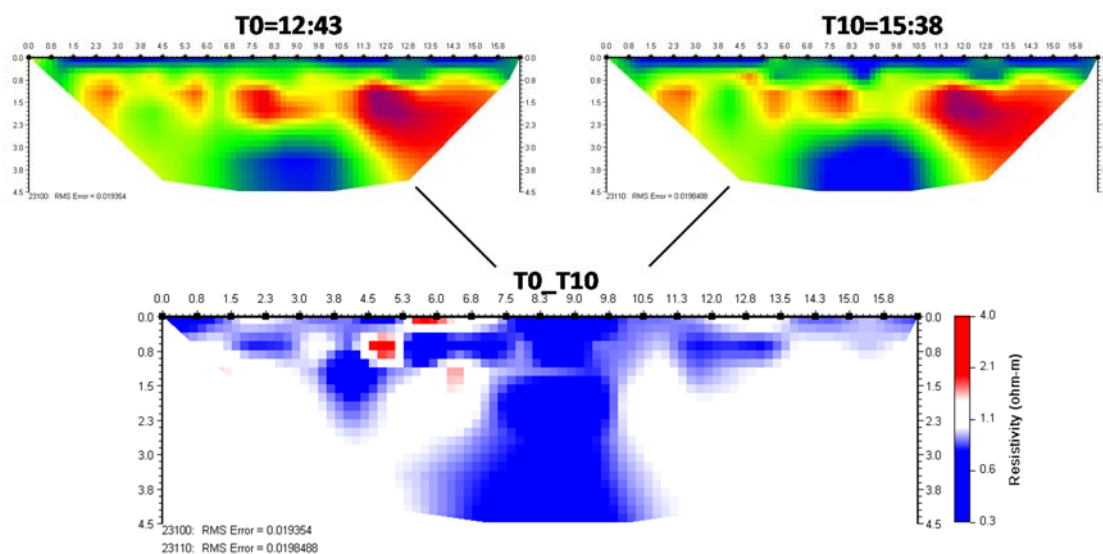
Σχήμα 5. 56. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 2, ERT3.



Σχήμα 5. 57. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 2, ERT3.



Σχήμα 5. 58. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 2, ERT3.

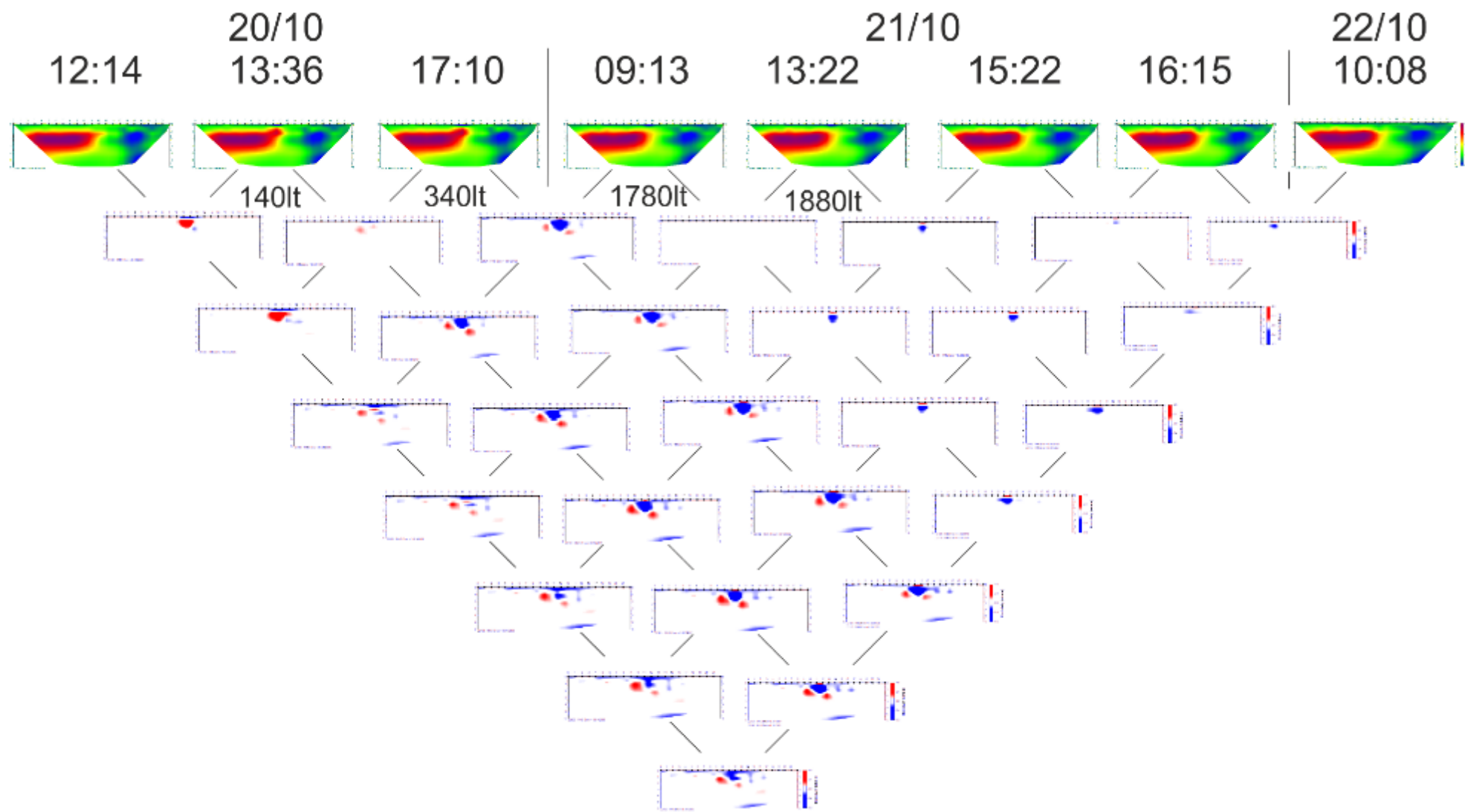


Σχήμα 5. 59. Διαχρονική μεταβολή της αντίστασης ως προς την πρώτη μέτρηση T_0 (T_0 =σημείο αναφοράς). Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιήθηκε σε στεγνό έδαφος πριν την έναρξη του πειράματος. Θέση 2, ERT3.

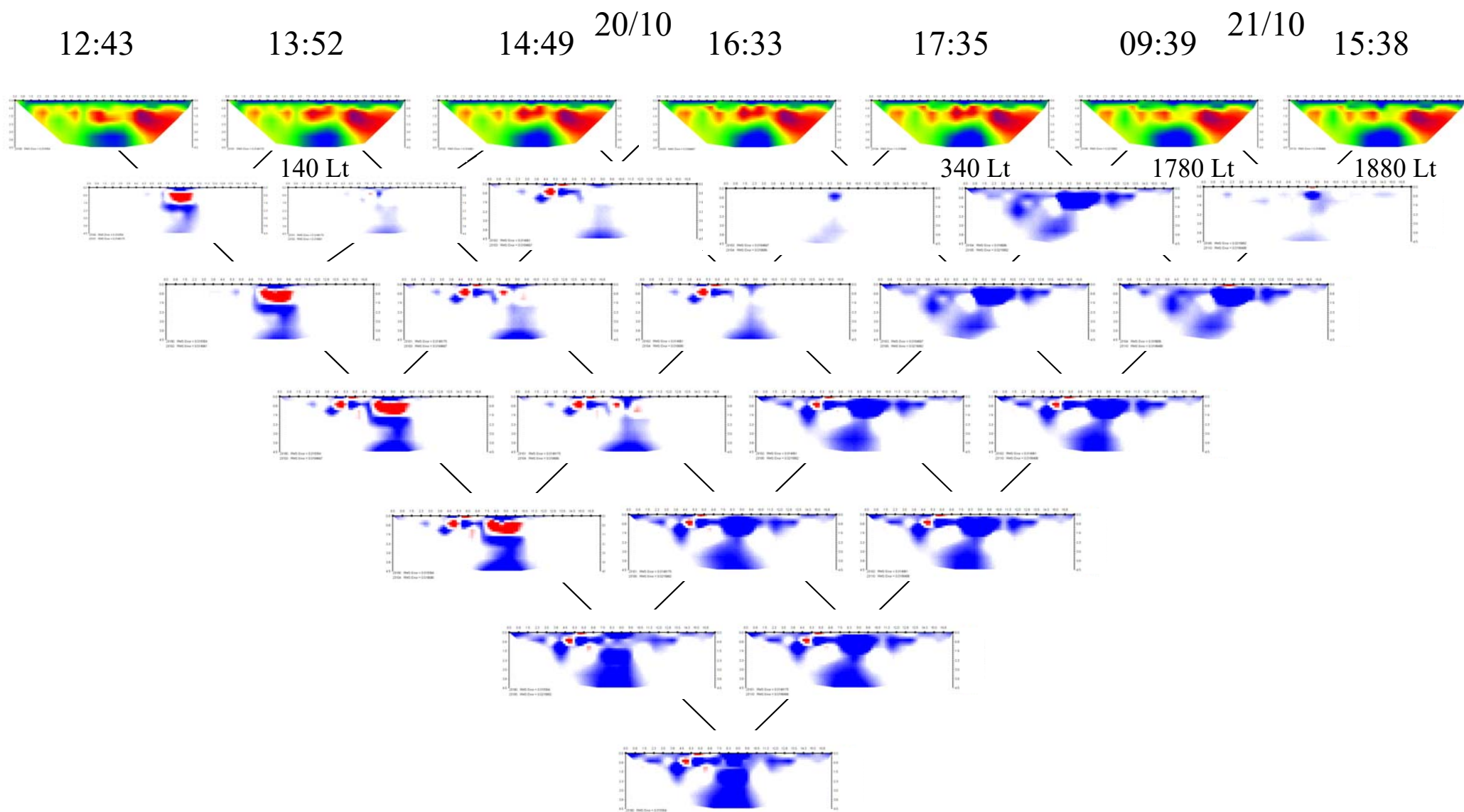
Στα Σχήματα 5.60 και 5.61 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την 4D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων για τις δύο τομογραφίες ERT2 και ERT3, σημειώνονται μόνο οι μεταβολές της αντίστασης τις χρονικές στιγμές που έγιναν οι μετρήσεις και η ποσότητα του νερού που κατείσδυσε στο σκάμμα.

Στο σύνολο των τομογραφιών παρατηρείται η λεπτή αγώγιμη στρώση που οφείλεται στη παρουσία του νερού. Κάτω από τη θέση της αγώγιμης στρώσης καταγράφεται αύξηση της αντίστασης όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα της θέσης Α.

Όσο αυξάνεται η ποσότητα του νερού που εισπνέζεται (2000 lt) στο σκάμμα παρατηρείται σε κάποιες περιοχές μείωση της αντίστασης σε βάθη που κυμαίνονται από 2 m έως 6 m στην τομογραφία ERT2 και από 2 m έως 4,50 m στην τομογραφία ERT3. Η μείωση της αντίστασης στα βάθη αυτή υποδεικνύει πιθανή ζώνη κατείσδυσης του νερού.

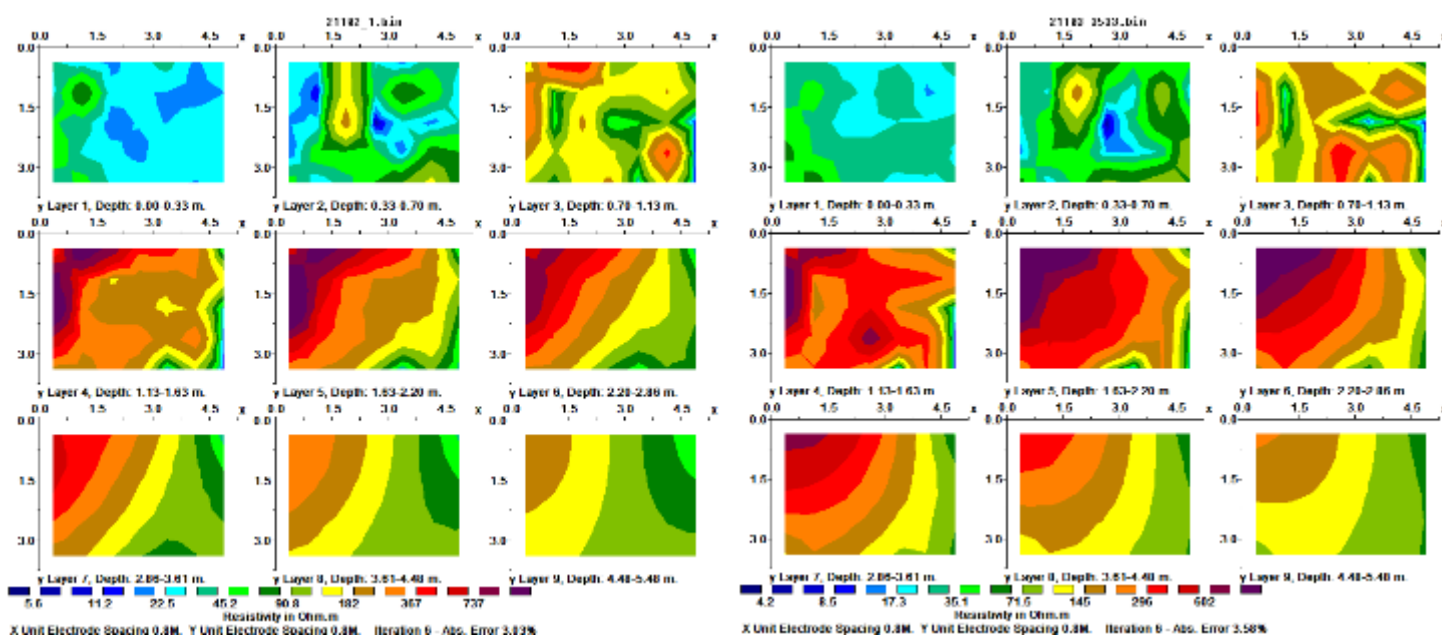
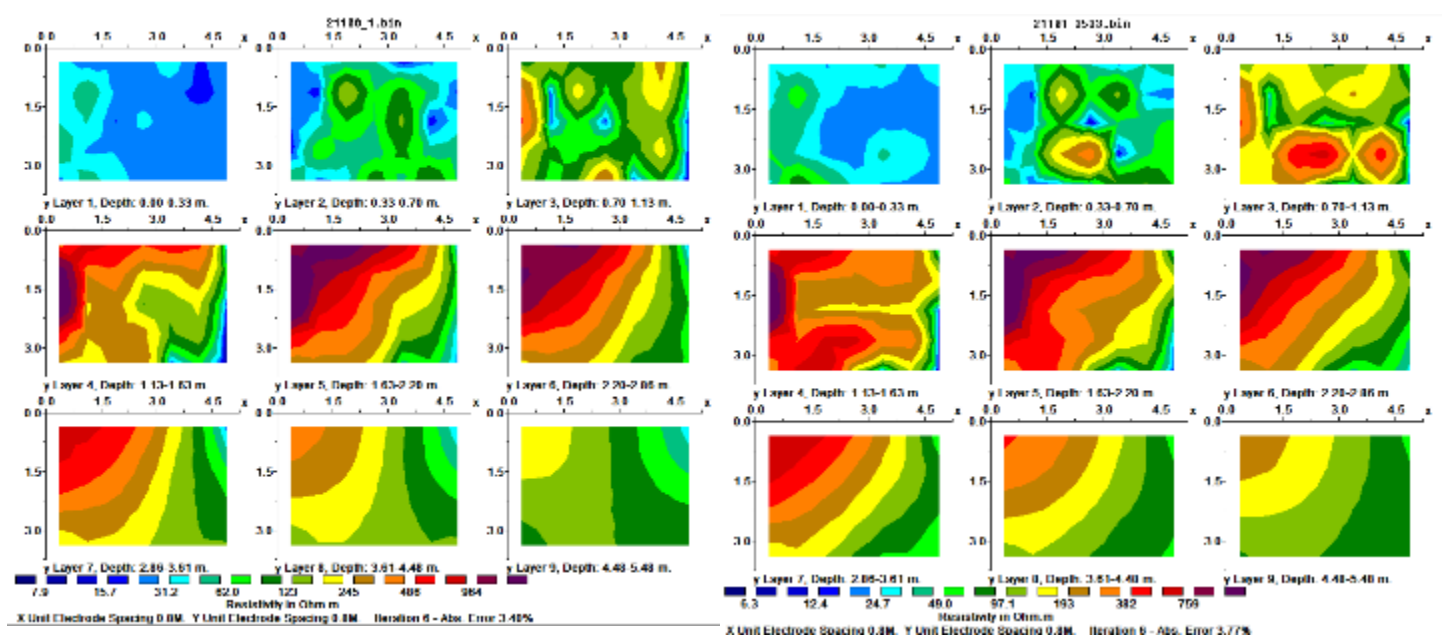


Σχήμα 5.60. 4D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων για την τομογραφία ERT 2.

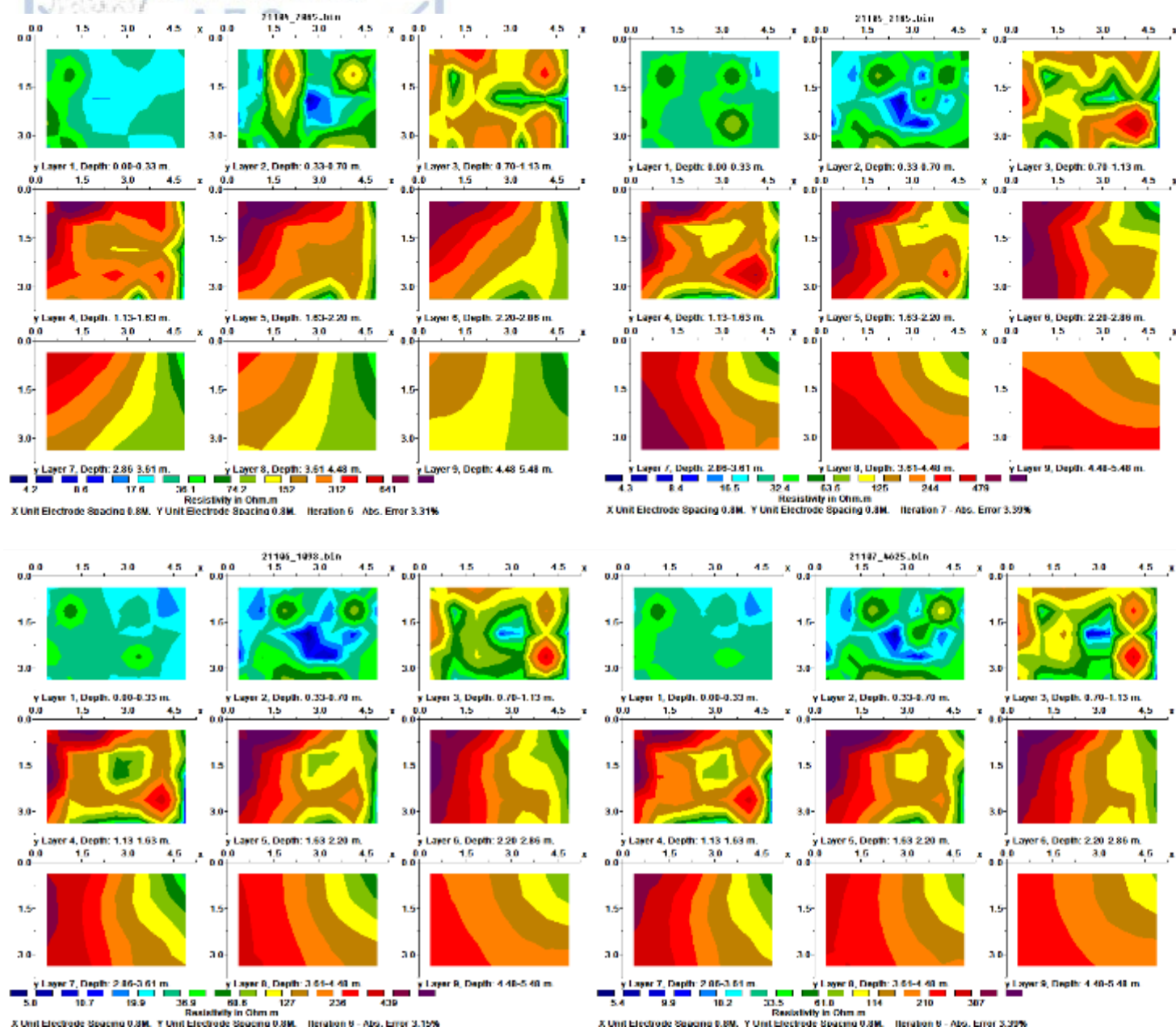


Σχήμα 5.61. 4D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων για την τομογραφία ERT 3.

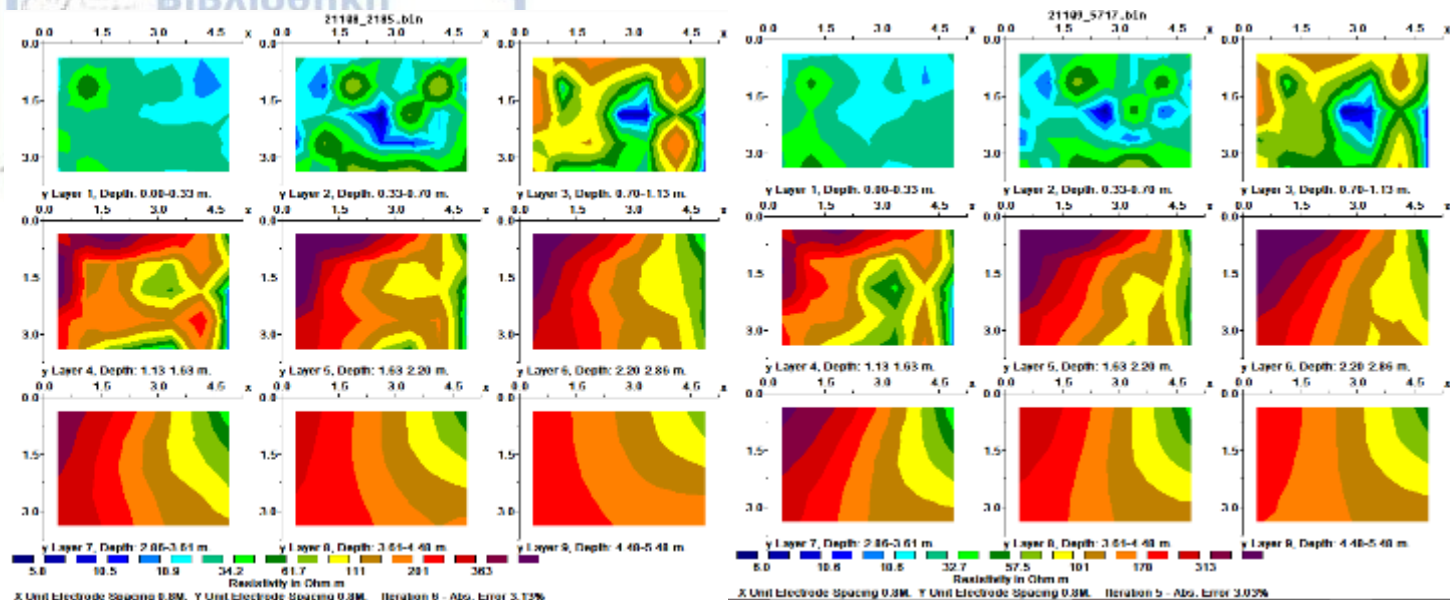
Στα Σχήμα 5.62 και 5.63 παρατίθενται τα αποτελέσματα των αντιστροφών που υλοποιήθηκαν με την τρισδιάστατη αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε οριζόντιες τομές (φέτες) και φθάνουν μέχρι το βάθος των 5,0 περίπου μέτρων. Ανάλογη εικόνα παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την τρισδιάστατη αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων. Όπως παρατηρείται στα πρώτα εκατοστά του εδαφικού καλύμματος η αντίσταση μειώνεται στις διάφορες χρονικές φάσεις. Κάτω από το βάθος του ενός μέτρου εντοπίζεται η ακόρεστη ζώνη των απορριμμάτων που δίνει υψηλές τιμές αντίστασης και η πλευρική ασυνέχεια (μείωση της αντίστασης) που δείχνει τη πιθανή κορεσμένη ζώνη.



Σχήμα 5.62. 3D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



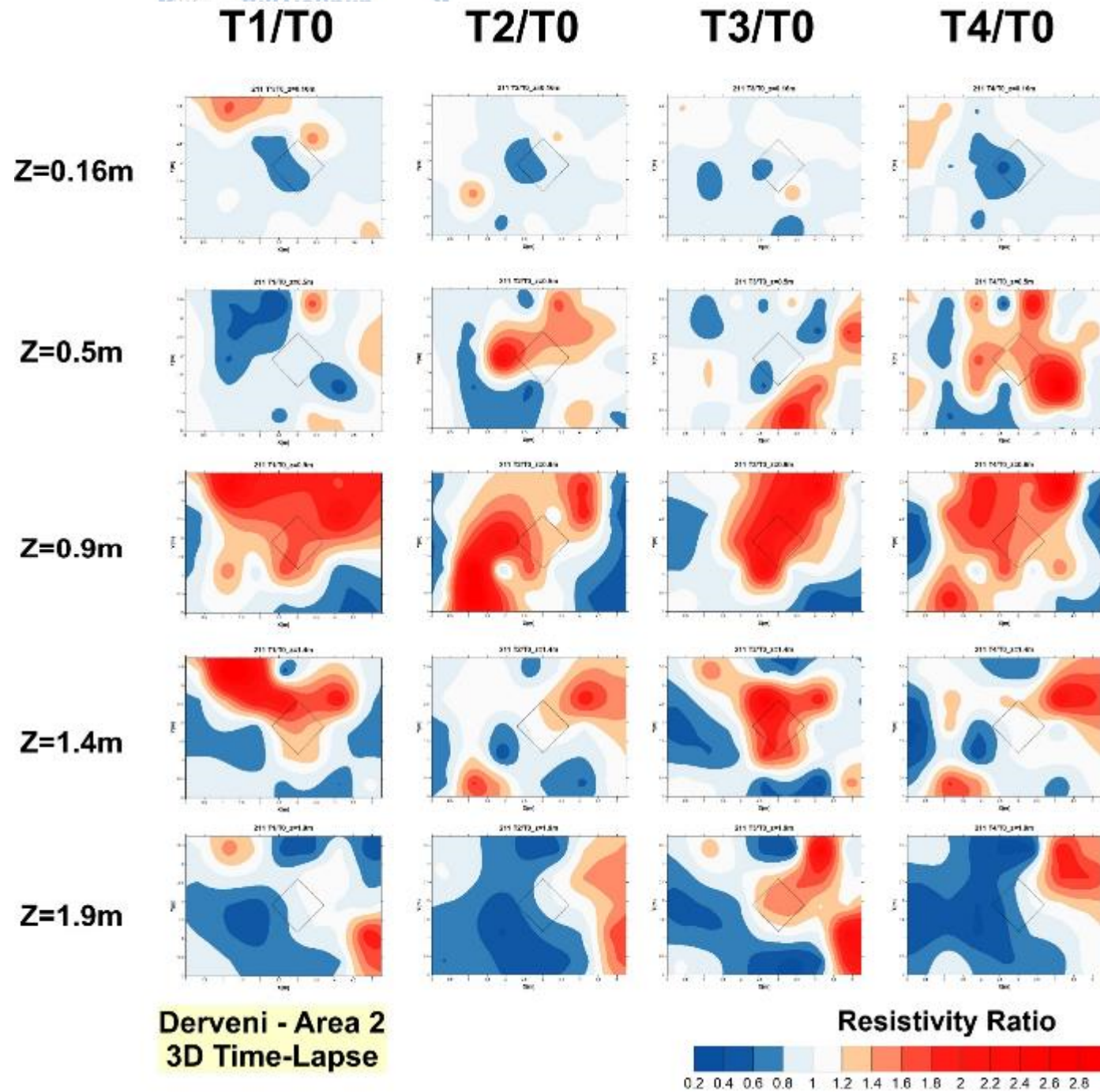
Σχήμα 5.63. 3D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων.



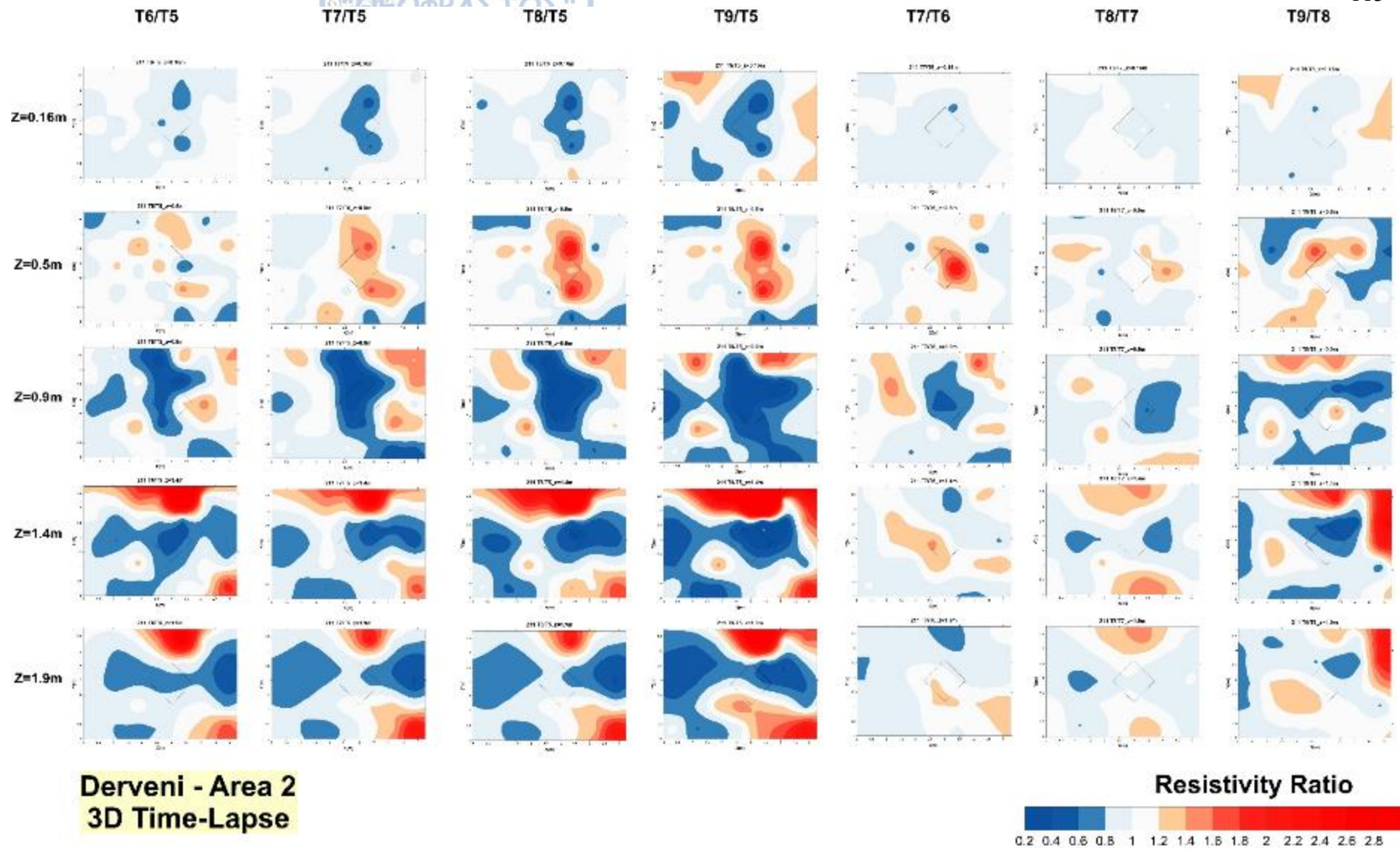
Σχήμα 5.64. 3D αντιστροφή των γεωηλεκτρικών δεδομένων.

Στα Σχήματα 5.65 και 5.66 υπολογίστηκε ο λόγος των αντιστάσεων για διάφορες χρονικές φάσεις, σε διάφορα βάθη (τελικό βάθος $z=1,90$ m). Στα πρώτα 0,20 m παρατηρείται μείωση της αντίστασης που καταγράφεται και πλευρικά της θέσης του σκάμματος. Από το βάθος 0,50 m μέχρι και το βάθος 1,40 m παρατηρείται αύξηση της αντίστασης.

Από το βάθος 1,40 m μέχρι και το βάθος περίπου των 2,0 m η αντίσταση φαίνεται να μειώνεται ως ένδειξη πιθανής κατείσδυσης του νερού.



Σχήμα 5.65. 3D Διαχρονική μεταβολή των αντιστάσεων.



Σχήμα 5.66. 3D Διαχρονική μεταβολή των αντιστάσεων.

6. ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Στην περιοχή του ΑΧΤΑ Δερβενίου μετά την ολοκλήρωση των εργασιών αποκατάστασής του, παρατηρήθηκαν εκροές νερού επιβαρυμένες με διασταλλάζοντα υγρά (εκκρίματα). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού κρίθηκε απαραίτητος ο εντοπισμός των πηγών προέλευσης των διασταλλαζόντων υγρών προκειμένου να περιοριστεί το φαινόμενο.

Ένα βασικό ερώτημα που προκύπτει και αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι κατά πόσο συμμετέχουν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα στην παραγωγή των εκκριμάτων.

Για να διερευνηθεί η συμμετοχή των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στη τροφοδοσία του όγκου των απορριμμάτων πραγματοποιήθηκαν αρχικά στον χώρο του ΑΧΤΑ 32 δοκιμές Maag για τον προσδιορισμό του συντελεστή υδροπερατότητας. Οι δοκιμές αυτές οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι η υδροπερατότητα στην περιοχή χαρακτηρίζεται μέτρια έως υψηλή με διακυμάνσεις σε ορισμένες θέσεις.

Στη συνέχεια, με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών Maag αποφασίστηκε η διεξαγωγή ενός πειράματος ελεύθερης κατείσδυσης με ελεγχόμενη ροή νερού και ταυτόχρονη πραγματοποίηση γεωφυσικών μετρήσεων με σκοπό τη διαχρονική παρακολούθηση της υδροπερατότητας του εδαφικού καλύμματος.

Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν δύο θέσεις σύμφωνα με τον χάρτη κατανομής της υδροπερατότητας. Η πρώτη θέση τοποθετήθηκε στο κεντρικό τμήμα του ΑΧΤΑ όπου το έδαφος παρουσιάζει χαμηλή υδροπερατότητα ενώ η δεύτερη θέση τοποθετήθηκε στο βορειοδυτικό του τμήμα στο οποίο το εδαφικό κάλυμμα εμφανίζει υψηλές τιμές υδροπερατότητας.

Στην περιοχή μελέτης και στις δύο παραπάνω θέσεις πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές μετρήσεις με τη μέθοδο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διεξήχθησαν μετρήσεις σε δύο, τρεις και τέσσερις διαστάσεις. Μετά το πέρας των εργασιών και την επεξεργασία των δεδομένων συμπεραίνονται τα παρακάτω:

- Στην πρώτη θέση δεν παρατηρήθηκε κατείσδυση του νερού και συνεπώς ο επιφανειακός σχηματισμός είναι πρακτικά αδιαπέρατος.
- Η παρατήρηση της αύξησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή κάτω από τη θέση του σκάμματος αποδίδεται είτε σε artifact λόγω της διαδικασίας αντιστροφής των γεωηλεκτρικών δεδομένων είτε στο ενδεχόμενο συγκέντρωσης βιοαερίου κάτω από την περιοχή των χαμηλών αντιστάσεων εξαιτίας αδυναμίας διαφυγής του λόγω της πλήρωσης των κενών των πόρων με νερό.
- Στη δεύτερη θέση παρατηρήθηκε η δυνατότητα κατείσδυσης του νερού σε βάθος τουλάχιστον δύο μέτρων.
- Στην τομογραφία ERT2 παρατηρήθηκε σε κάποιο σημείο μείωση της αντίστασης και σε μεγαλύτερο βάθος περίπου των έξι μέτρων.
- Στην τομογραφία ERT3 παρατηρήθηκε μείωση της αντίστασης και σε μεγαλύτερο βάθος περίπου των 4,5 μέτρων.
- Όμοια με τη πρώτη θέση σημειώθηκε αύξηση της αντίστασης στην περιοχή κάτω από τη θέση του σκάμματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών μετρήσεων επιβεβαίωσαν την εικόνα του AXTA σε σχέση με την υδροπερατότητα του εδαφικού καλύμματος όπως προέκυψε από τις δοκιμές Maag.
- Διαπιστώνεται ότι η στεγανοποίηση του χώρου δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική σε όλη την έκταση του AXTA με αποτέλεσμα να επιτρέπει μέρος των κατακρημνισμάτων να κατεισδύσει στον όγκο των απορριμμάτων.
- Οι πληροφορίες που δίνουν οι δοκιμές υδροπερατότητας αφορούν συγκεκριμένα τοπικά σημεία στο χώρο. Οι γεωφυσικές μετρήσεις παρέχουν πληροφορίες σε μεγαλύτερη έκταση. Έτσι αναδεικνύεται η σημασία της συνδυαστικής εφαρμογής της άμεσης και έμμεσης παρατήρησης για μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της υφιστάμενης κατάστασης.

Μελλοντική Έρευνα

Η συγκεκριμένη εργασία αποτελεί ένας μέρος της έρευνας και συνεπώς υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω διερεύνηση και ανάλυση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχής μελέτης. Προτείνεται λοιπόν:

Πραγματοποίηση γεωφυσικών μετρήσεων και σε άλλες θέσεις στον χώρο του ΑΧΤΑ όπως υποδεικνύονται στον χάρτη κατανομής της υδροπερατότητας για διερεύνηση πιθανής κατείσδυσης του νερού. Με αυτό τον τρόπο θα καθοριστούν τα τμήματα του ΑΧΤΑ που αναμένεται η κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και θα απομονωθούν.

Για τη πιθανή συσχέτιση του βιοαερίου με την αύξηση της αντίστασης που παρατηρήθηκε από τις γεωφυσικές μετρήσεις και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προτείνεται η πραγματοποίηση μετρήσεων πεδίου ώστε να διερευνηθεί και να εκτιμηθεί η παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου στο χώρο με τελικό σκοπό την διαχείριση και αξιοποίηση του.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βουδούρης, Κ., (2009): Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Δημόπουλος, Γ., (2008): Τεχνική Γεωλογία. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Κυριακίδη.
- Καλλέργης, Γ., (1999): Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία. 2η έκδοση, τόμος Α, Τ.Ε.Ε., Αθήνα.
- Τσούρλος Π., (2013): Γεωφυσική έρευνα στον χώρο του Αναπλασμένου Χώρου Ταφής Απορριμμάτων Δερβενίου. Έκθεση αποτελεσμάτων ερευνητικού έργου ΕΛΚΕ ΑΠΘ, Σύνδεσμος ΟΤΑ Νομού Θεσσαλονίκης.
- Τσούρλος Π., Βαργεμέζης Γ., Φίκος Ι και Δερέκας Ν., (2012): Διερεύνηση του ΧΥΤΑ Ιωαννίνων για πιθανές διαρροές εκκρίματος στο υπέδαφος με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Έκθεση αποτελεσμάτων ερευνητικού έργου ΕΛΚΕ ΑΠΘ
- Αθανασίου Ε., (2009): Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βέλτιστη στρατηγική μέτρησης και αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2009.
- Παπαζάχος Β.Κ., (1996): Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Σιμυρδάνης Κ., (2013): Ανάπτυξη τομογραφιών γεωφυσικών τεχνικών για τη μελέτη γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Καραούλης Μ., (2009): Ανάπτυξη αλγορίθμων αντιστροφής διαχρονικών γεωηλεκτρικών δεδομένων. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωφυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Loke M.H., 2004: Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys
- Kim J – H., (2010): DC_2DPro – 2D Inversion of ERT data. User's Manual, KIGAM, Korea.
- Tsourlos, P., Szymanski, J., Dittmer, J. and Tsokas, G., (1993): The use of back- projection for fast inversion of 2 – D resistivity data. Proceedings of the 2nd congress of the Greek Geophysical Union, Florina, Greece, 5 – 7 ay, 1, 71 – 81.
- Lais M. Trento, P. Tsourlos, J.I. Gerhard., (2020): Time-lapse electrical resistivity tomography mapping of DNAPL remediation at a STAR field site.
- Zhody, A., (1989): A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. Geophysics, 54, 245 – 253.
- Karaoulis M.C., Kim J.-H., Tsourlos ,P.I., (2009): 4D Active Time Constrained Resistivity Inversion. Near Surface 2009.
- Karaoulis M.C., Kim J.-H., Tsourlos ,P.I., Revil. A, (2012): 4D time-lapse ERT inversion: introducing combined time and space constraints



Πηγές από το διαδίκτυο

<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp432e/>

<http://www.geo.auth.gr/courses/ggp/ggp432e/>

<http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>