

**ΔΡΑΣΗ ΕΘΝΙΚΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ
« ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ- ΚΡΗΠΙΣ»**



ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ
Έργο ΠΕΦΥΚΑ: Περιβάλλον και Φυσικές
Καταστροφές: Νέες μέθοδοι για τη μέτρηση και
βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και για
την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών

ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ Π3.10.3.2

Τίτλος: Τεχνική έκθεση των διαδικασιών που αναπτύχθηκαν και των αποτελεσμάτων των πειραμάτων με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας συμπεριλαμβανομένων των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών που προσδιορίστηκαν καθώς επίσης και συμβουλές / προτάσεις για την χρήση της μεθόδου στο ύπαιθρο.

Υπεύθυνος Φορέας/Ινστιτούτο: ΙΜΣ

Ονόματα συμμετεχόντων: Στέλλα Κίρκου, Νίκος Παπαδόπουλος

Ημερομηνία: 30/09/2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Υπουργείο Παιδείας & Θρησκευμάτων
Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογίας



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ & ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ
ΕΠΙΠ II



ΕΣΠΑ
2007-2013
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη

η περιφέρεια στο επίκεντρο της ανάπτυξης

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης - Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ), στο πλαίσιο του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα (ΕΠΑΝ II) και των Π.Ε.Π. Αττικής, Π.Ε.Π. Μακεδονίας - Θράκης



Geo at ReSeArch IMS-FORTH



Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	4
2	Σχεδιασμός και υλοποίηση υπαίθριου πεδίου δοκικών και ιδιοκατασκευής	5
3	Σχεδιασμός πρωτοκόλλων μέτρησης ηλεκτρικής τομογραφίας	13
4	Υλοποίηση πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών	24
5	Επεξεργασία πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων	30
5.1	Προετοιμασία δεδομένων για αντιστροφή	30
5.2	Αντιστροφή τομογραφικών δεδομένων	34
6	Αποτελέσματα επεξεργασίας πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων	37
6.1	Σύγκριση γεωηλεκτρικών μοντέλων αντιστροφής πλήρους και βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου	37
6.2	Εκτίμηση υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφικών σχηματισμών πεδίου δοκιμών	42
6.3	Διαχρονική παρακολούθηση ροής αγωγίμου υγρού σε δύο διαστάσεις	44
6.4	Διαχρονική παρακολούθηση ροής αγωγίμου υγρού σε τρεις διαστάσεις	51
7	Γενικά Συμπεράσματα	64
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	65



1 Εισαγωγή

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελεί σήμερα μία από τις πλέον αναγνωρισμένες τεχνολογίες εφαρμοσμένης γεωφυσικής για τον προσδιορισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους πραγματοποιώντας μετρήσεις είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε μέσα ή/και μεταξύ γεωτρήσεων πολλαπλασιάζοντας και συμπληρώνοντας την σημειακή πληροφορία που λαμβάνεται από τις γεωτρήσεις. Τα τελευταία χρόνια η συστηματική και διαχρονική παρακολούθηση της μεταβολής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (ή αγωγιμότητας) του υπεδάφους συνεισφέρει στον καθορισμό της μεταβολής των υπεδάφινων συνθηκών, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό δυνατό τον εντοπισμό γραμμών ροής μεταφοράς και μετανάστευσης ρυπαντών, προβλέποντας παράλληλα την έκταση της υπεδάφιας περιβαλλοντικής υποβάθμισης.

Για να μελετηθούν σε βάθος τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας για την διαχρονική παρακολούθηση της μόλυνσης που προκαλείται από την απόθεση αποβλήτων ελαιολιτριβίων ή συναφών ρυπαντών στο έδαφος και υπεδάφος δημιουργήθηκε ένα υπαίθριο πεδίο δοκιμών για την διεξαγωγή ελεγχόμενων πειραμάτων σε πραγματικές αλλά πλήρως επιβλεπόμενες και ελεγχόμενες συνθήκες. Το πεδίο αυτό δοκιμών κατασκευάστηκε σε μία υπαίθρια έκταση (~ 10 m²) στην περιοχή των εγκαταστάσεων του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας στο Ηράκλειο, καθώς εκεί διασφαλιζόταν συγκεκριμένες παροχές (π.χ. ηλεκτρικό ρεύμα, πρόσβαση σε ενσύρματη ή ασύρματη δικτύωση, προστασία, συνεχής παροχή νερού κλπ) οι οποίες θεωρούνται απαραίτητες για την επιτυχία των πειραμάτων.

Για την ολοκλήρωση των τομογραφικών μετρήσεων κατασκευάστηκε μία ιδιοκατασκευή με την οποία προσομοιώθηκαν τέσσερις κατακόρυφες και δύο οριζόντιες γεωτρήσεις χρησιμοποιώντας πλαστικές σωλήνες. Η ιδιοκατασκευή αυτή τοποθετήθηκε μέσα στο σκάμμα και εν συνεχεία σκεπάστηκε με το ίδιο υλικό που εξήλθε από το σκάμμα. Μεταξύ των κατακόρυφων και οριζόντιων γεωτρήσεων τοποθετήθηκε αδρόκοκκο υλικό (άμμος) με σκοπό την πλήρως ελεγχόμενη ροή του ρυπαντή σε υλικό με συγκεκριμένες φυσικές ιδιότητες και κοκκομετρική διαβάθμιση.

Η συγκεκριμένη αναφορά περιγράφει τα στάδια κατασκευής της ιδιοκατασκευής και του σκάμματος, τον σχεδιασμό, οργάνωση και ολοκλήρωση των πειραματικών διαχρονικών μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας καθώς και την επεξεργασία και ερμηνεία των τομογραφικών δεδομένων.

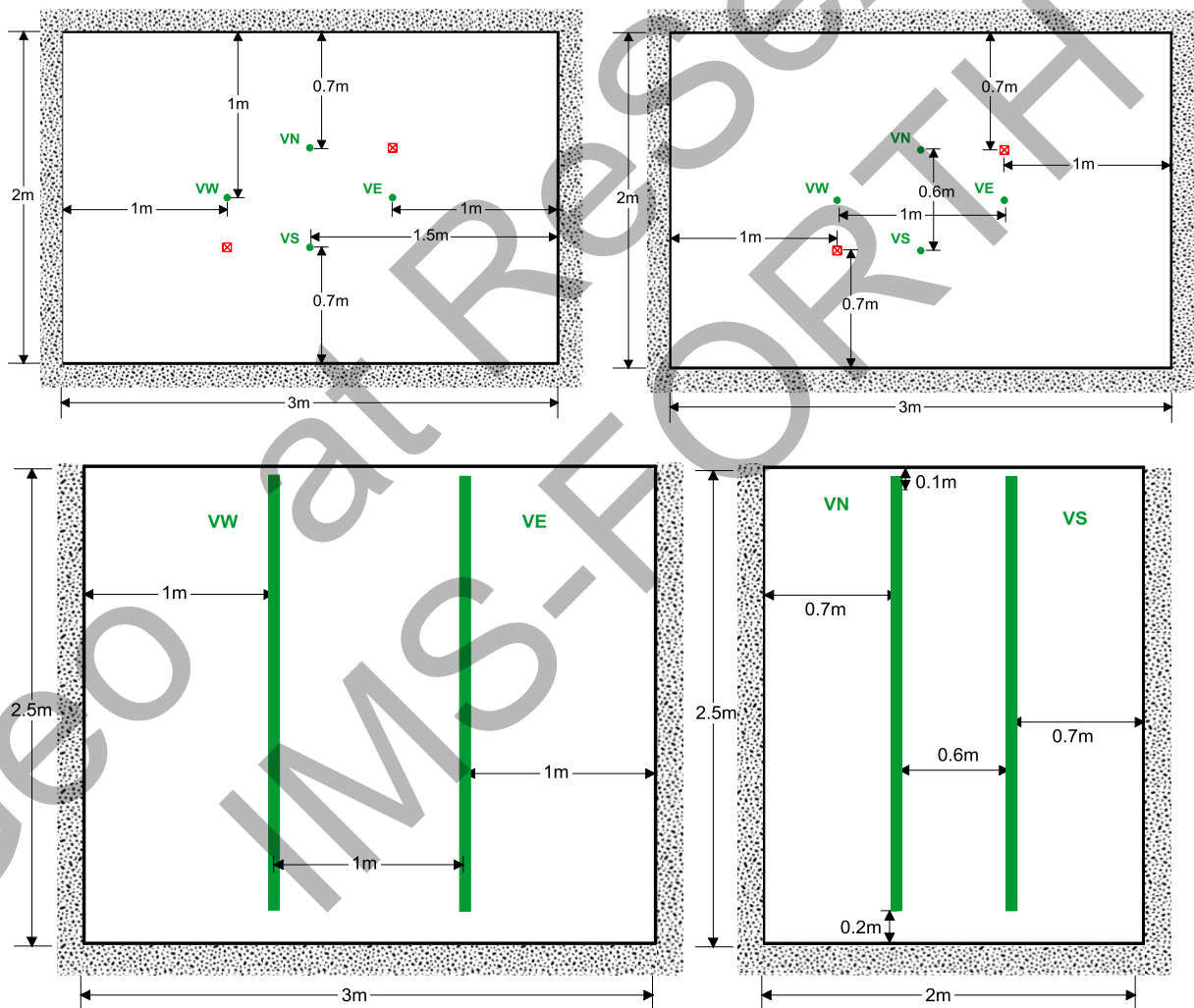
Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στους Δρ. Κλεάνθη Σιμυρδάνη μεταδιδακτορικό ερευνητή του ΙΜΣ-ΙΤΕ, Παναγιώτη Τσούρλο Καθηγητή Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του ΑΠΘ, Παντελή Σουπιό Καθηγητή Υδρογεωλογίας του ΤΕΙ Κρήτης και Στειακάκη Ε. Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης για την συνεισφορά τους. Ο Δρ. Κλεάνθης Σιμυρδάνης ολοκλήρωσε την κατασκευή της ιδιοκατασκευής που προσομοίωσε τις κατακόρυφες και οριζόντιες γεωτρήσεις και μετείχε ενεργά κατά την διάρκεια διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών. Η συνεισφορά του καθ. Παναγιώτη Τσούρλου εστιάστηκε στον σχεδιασμό των πρωτοκόλλων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας. Ο Καθ. Παντελής Σουπιός προσέφερε υδρογεωλογικές συμβουλές και εξοπλισμό (πλαστική δεξαμενή, πιεζόμετρο, μήτρες συλλογής εδαφικού υλικού για μετρήσεις υδρογεωλογικών παραμέτρων) για την υλοποίηση του πειράματος. Ο κ. Στειακάκης ανέλαβε τις εργαστηριακές μετρήσεις για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας των εδαφικών σχηματισμών.



2 Σχεδιασμός και υλοποίηση υπαίθριου πεδίου δοκιμών και ιδιοκατασκευής

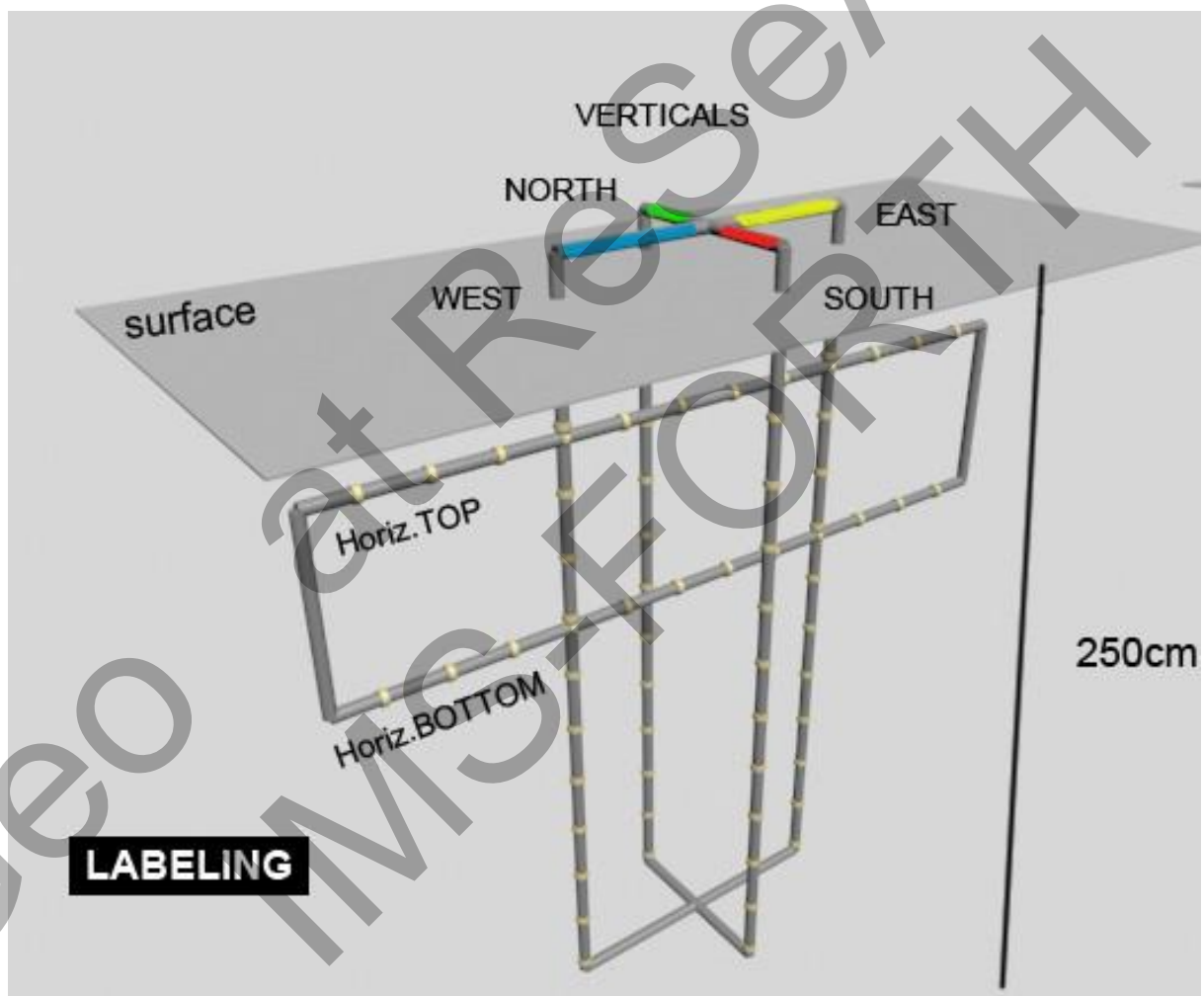
Ο σχεδιασμός, υλοποίηση και κατασκευή του υπαίθριου πεδίου δοκιμών αποσκοπούσε στην μελέτη της αποδοτικότητας της διαχρονικής ηλεκτρικής τομογραφίας στην χαρτογράφηση και παρακολούθηση ρυπαντών στο υπέδαφος. Το υπαίθριο πεδίο δοκιμών έχει το πλεονέκτημα της παρακολούθησης του φυσικού αυτού φαινομένου σε πλήρως πραγματικές αλλά συνάμα και ελεγχόμενες συνθήκες.

Το σκάμμα σχεδιάστηκε να έχει 3 μέτρα μήκος, 2 μέτρα πλάτος και 2.5 μέτρα βάθος. Η επιλογή των διαστάσεων βασίστηκε στην βέλτιστη δυνατή προσομοίωση ρεαλιστικών συνθηκών, διατηρώντας παράλληλα τις διαστάσεις σε τέτοια κλίμακα ώστε να μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά στο πλαίσιο των πειραματικών διαδικασιών. Μέσα στο σκάμμα σχεδιάστηκε να τοποθετηθούν συνολικά τέσσερις κατακόρυφες γεωτρήσεις οι οποίες τοποθετήθηκαν στις κορυφές ενός ρόμβου του οποίου όλες οι πλευρές ήταν ίσες με μήκος 0,58 μέτρα. Αντίστοιχα η απόσταση των κατακόρυφων (Vertical) γεωτρήσεων W-E και S-N ήταν αντίστοιχα 1 μέτρο και 0,6 μέτρα (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: (πάνω) Οριζόντιες κατόψεις του σκάμματος όπου φαίνονται οι θέσεις που τοποθετήθηκαν οι τέσσερις κατακόρυφες γεωτρήσεις. (κάτω) Κατακόρυφες τομές του σκάμματος (W-E & S-N) όπου φαίνονται οι θέσεις και οι αποστάσεις των κατακόρυφων γεωτρήσεων που τοποθετήθηκαν μέσα στο σκάμμα.

Για την κατασκευή της ιδιοκατασκευής χρησιμοποιήθηκαν συνολικά έξι πλαστικοί σωλήνες με διάμετρο $\Phi 30$ και μήκος 2,5 μέτρα η κάθε μία. Οι κατακόρυφες σωλήνες τοποθετήθηκαν, σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό, στις κορυφές ενός ρόμβου του οποίου όλες οι πλευρές είχαν μήκος 0,58 μέτρα. Με αυτό τον τρόπο η απόσταση των κατακόρυφων γεωτρήσεων West-East και South-North ήταν 1 μέτρο και 0,6 μέτρα αντίστοιχα. Για την προσομοίωση των οριζόντιων γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχα δύο οριζόντιες πλαστικές σωλήνες οι οποίες έτεμναν κάθετα τις δύο κατακόρυφες σωλήνες West-East και η μεταξύ τους απόσταση ήταν 0,6 μέτρα. Η στιβαρότητα και ευστάθεια της όλης κατασκευής επιτεύχθηκε με την χρήση ενός κεντρικού συνδέσμου στην κορυφή της κατασκευής από τον οποίο εξέρχονταν τέσσερις μικρότεροι σωλήνες που ενώνονταν με αντίστοιχους συνδέσμους στις τέσσερις κατακόρυφες σωλήνες. Η ίδια πρακτική χρησιμοποιήθηκε και για την σταθεροποίηση του κατώτατου τμήματος της κατασκευής. Όσον αφορά τις οριζόντιες σωλήνες αυτές ενώθηκαν μεταξύ τους με δύο σωλήνες στις δύο άκρες τους και εν τέλει στερεώθηκαν με αντίστοιχους συνδέσμους πάνω στις δύο κατακόρυφες West-East σωλήνες (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Τρισδιάστατη σχηματική αναπαράσταση της ιδιοκατασκευής που τοποθετήθηκε μέσα στο σκάμμα και χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση τεσσάρων κατακόρυφων και δύο οριζόντιων γεωτρήσεων.

Σε κάθε μία από τις έξι σωλήνες τοποθετήθηκαν 12 μεταλλικοί δακτύλιοι. Η απόσταση των δακτυλίων μεταξύ τους σε κάθε μία από τις σωλήνες ήταν 0,2 μέτρα (20cm). Σε όλες τις σωλήνες τοποθετήθηκαν συνολικά 72 μεταλλικοί δακτύλιοι. Οι δακτύλιοι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν για να στερεώσουν στα αντίστοιχα σημεία των σωλήνων την έξοδο του πολύκλωνου καλωδίου και να μεγιστοποιήσουν με τον τρόπο αυτό την ενεργή επιφάνεια

επαφής των ηλεκτροδίων ώστε να βελτιστοποιηθεί τελικά η επαφή τους με το έδαφος κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Σε κάθε σωλήνα ήταν δυνατή η τοποθέτηση 12 ηλεκτροδίων τα οποία μέσω των αντίστοιχων καλωδίων κατέληγαν σε 12 εξόδους (μπανάνες) που θα συνδέονταν με το όργανο μέτρησης της αντίστασης του υπεδάφους κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: (πάνω) Φωτογραφία της ιδιοκατασκευής με τις τέσσερις κατακόρυφες και τις δύο οριζόντιες σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των αντίστοιχων γεωτρήσεων. (κάτω) Όψη του μεταλλικού δακτυλίου που χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτρόδιο και την στερέωση της εξόδου του πολύκλωνου καλωδίου πάνω στην πλαστική σωλήνα.

Η διάνοιξη του σκάμματος έγινε σε μία περιοχή με διαστάσεις 3 x 2 μέτρα η οποία οροθετήθηκε στον περιβάλλον χώρο του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας στο Ηράκλειο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο μηχάνημα εκσκαφής το οποίο πραγματοποίησε την εκσκαφή και τοποθέτησε εδαφικό υλικό πλησίον του σκάμματος για την μετέπειτα πλήρωσή του (Σχήμα 4).



Σχήμα 4: Διαδικασία κατασκευής και διάνοιξης του σκάμματος σε μία περιοχή στις εγκαταστάσεις του ΙΤΕ στο Ηράκλειο.

Αφού ολοκληρώθηκε η διάνοιξη του σκάμματος μέχρι το επιθυμητό βάθος των 2,5 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους, τοποθετήθηκε στο κέντρο του σκάμματος η ιδιοκατασκευή. Για την σταθεροποίησή της κατά την διάρκεια της πλήρωσης του σκάμματος χρησιμοποιήθηκε μία μεταλλική σωλήνα η οποία διέσχισε το σκάμμα κατά μήκος και στο μέσον της δέθηκε το επάνω μέρος της ιδιοκατασκευής (Σχήμα 5).

Μετά την τοποθέτηση της ιδιοκατασκευής ξεκίνησε η διαδικασία πλήρωσης του σκάμματος με το εδαφικό υλικό το οποίο είχε αρχικά εξαχθεί από το σκάμμα κατά την διάνοιξη του. Ακολουθήθηκε μία συστηματική και ιδιαίτερα προσεκτική διαδικασία που αποσκοπούσε στην βέλτιστη συμπίκνωση του εδαφικού υλικού που θα πληρώσει το σκάμμα με τελικό στόχο την αποτελεσματικότερη επαφή των μεταλλικών δακτυλίων με το περιβάλλον υλικό. Το υλικό πλήρωσης τοποθετήθηκε σταδιακά σε στρώσεις πάχους των 20 εκατοστών. Κάθε εδαφική στρώση ευθυγραμμιζόταν χειρωνακτικά, πακτωνόταν με ειδικό μηχάνημα πάκτωσης και στη συνέχεια καταβρεχόταν μέχρι σε σημείο κορεσμού (Σχήμα 6).



Σχήμα 5: Τοποθέτηση της ιδιοκατασκευής που προσομοιώνει τις τέσσερις κατακόρυφες (W, E, S, N) και τις δύο οριζόντιες (HTop & HBottom) γεωτρήσεις μέσα στο σκάμμα. Στο πάνω μέρος της κατασκευής έχουν τοποθετηθεί οι έξοδοι (μπανάνες) των καλωδίων που συνδέονται αντίστοιχα με τους μεταλλικούς δακτυλίους σε όλες τις πλαστικές σωλήνες.



Σχήμα 6: Διαδικασίες πλήρωσης του σκάμματος με εδαφικό υλικό, ευθυγράμμισης της εδαφικής στρώσης και συμπύκνωσής του υλικού με δονητικό μηχάνημα. Μετά την συμπύκνωση η εδαφική στρώση καταβρεχόταν με νερό μέχρι να κορεστεί. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβανόταν σε εδαφικές στρώσεις των 20 cm.

Όταν το εδαφικό υλικό πλήρωσης έφτασε στο επίπεδο της κάτω οριζόντιας γεώτρησης (HBottom), τοποθετήθηκε μεταξύ των τεσσάρων κάθετων γεωτρήσεων και ανάμεσα στις δύο οριζόντιες γεωτρήσεις ένα πλαστικό κουτί. Οι διαστάσεις του κουτιού ήταν 80cm (μήκος), 40cm (πλάτος) και 40cm (ύψος). Το κουτί αυτό χρησιμοποιήθηκε ως καλούπι για την τοποθέτηση σε αυτό αδρόκοκκου υλικού (άμμος) μέσα στο οποίο θα μπορεί να ρέει ο ρύπος, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα ελεγχόμενο περιβάλλον ροής. Από το κουτί είχε αφαιρεθεί η κάτω επιφάνειά του ώστε να υπάρχει άμεση επαφή της αδρόκοκκης άμμου με το περιβάλλον υλικό (μάργα). Για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής συμπύκνωσης το εδαφικό υλικό στον πάτο του πλαστικού κουτιού κορέστηκε με νερό. Στην συνέχεια πληρώθηκε το πλαστικό κουτί με άμμο από την βάση του μέχρι το ύψος των 20 εκατοστών. Το κουτί χωρίστηκε σε δύο τμήματα με ένα διαχωριστικό το οποίο τοποθετήθηκε σε απόσταση 60cm από την πλευρά του κουτιού που ήταν πλησίον της γεώτρησης W. Το τμήμα του κουτιού με διαστάσεις 60cm (μήκος), 40cm (πλάτος) και 20cm (ύψος) πληρώθηκε με την αδρόκοκκη άμμο, ενώ το τμήμα με διαστάσεις 20cm (μήκος), 40cm (πλάτος) και 20cm (ύψος) πληρώθηκε με το μαργαϊκό τοπικό εδαφικό υλικό. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώθηκε μία πολυπλοκότητα της δομής στην οποία θα έρεε ο ρύπος. Δύο διαφανή πλαστικά σωληνάκια (αλφαδολάστιχα) τοποθετήθηκαν μέσα στο τμήμα της άμμου τα οποία εξέρχονταν από την περιοχή του σκάμματος. Το σωληνάκι 1 θα χρησιμοποιηθεί για την έκχυση του ρύπου στοχευμένα μέσα στην δομή που δημιουργήθηκε. Το σωληνάκι 2 χρησιμοποιήθηκε ως εφεδρικό και ως μέσο δημιουργίας ροής. Στο τέλος όλα τα πλαστικά τοιχώματα του κουτιού αφαιρέθηκαν τελείως από το σκάμμα ώστε να μην επηρεάσουν τις μετέπειτα πειραματικές μετρήσεις (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Διαδικασία τοποθέτησης του στόχου (αδρόκοκκη άμμος) ανάμεσα στις γεωτρήσεις του σκάμματος.

Στο επίπεδο της κάτω οριζόντιας γεώτρησης έγινε δειγματοληψία από δύο σημεία του σκάμματος από το μητρικό μαργαϊκό υλικό με δύο μεταλλικές μήτρες για την μέτρηση των υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων στο εργαστήριο. Επίσης συλλέχθηκε και δείγμα της αδρόκοκκης άμμου για τον ίδιο ακριβώς λόγο (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: (πάνω) Διαδικασία δειγματοληψίας του μητρικού εδαφικού υλικού με σκοπό την εργαστηριακή μέτρηση των υδρογεωλογικών του παραμέτρων. (κάτω) Άποψη της αδρόκοκκης άμμου που χρησιμοποιήθηκε για την μορφοποίηση το στόχου.

Στην συνέχεια ολοκληρώθηκε η πλήρωση του σκάμματος μέχρι την πλήρη επίχωσή του και την τελική διαμόρφωση του πεδίου δοκιμών όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.

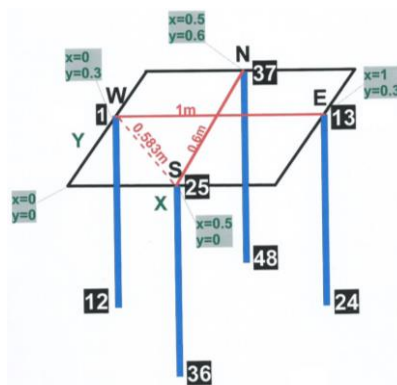


Σχήμα 9: Τελική διαμόρφωση του υπαίθριου πεδίου δοκιμών όπου διακρίνονται οι κορυφές των κατακόρυφων γεωτρήσεων W, E, S, N.

3 Σχεδιασμός πρωτοκόλλων μέτρησης ηλεκτρικής τομογραφίας

Ο σχεδιασμός των πρωτοκόλλων μέτρησης των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας βασίστηκε αρχικά στον καθορισμό ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων (Σχήμα 10) με βάση το οποίο τοποθετήθηκαν στο χώρο οι θέσεις των κατακόρυφων και οριζοντίων γεωτρήσεων καθώς και των ηλεκτροδίων που είχαν ενσωματωθεί σε αυτές. Για την απλοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού και υλοποίησης των πρωτοκόλλων μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν ανεξάρτητα συστήματα συντεταγμένων για τις κατακόρυφες και τις οριζόντιες γεωτρήσεις, δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο πείραμα οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκαν είτε μεταξύ των κατακόρυφων είτε μεταξύ των οριζοντίων γεωτρήσεων. Οι κατακόρυφες γεωτρήσεις τοποθετήθηκαν στις κορυφές ενός ρόμβου με πλευρά 0,58 μέτρα έτσι ώστε η οριζόντια απόσταση των γεωτρήσεων W-E και S-N να είναι 1 μέτρο και 0,6 μέτρα αντίστοιχα (Σχήμα 10).

Vertical Borehole	X (m)	Y (m)	Z (m)
W	0.0	0.3	0.0
S	0.5	0.0	0.0
N	0.5	0.6	0.0
E	1.0	0.3	0.0



Σχήμα 10: Θέση των κατακόρυφων γεωτρήσεων W, S, E, N του σκάμματος στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Σε κάθε γεώτρηση φαίνεται η αρίθμηση των ηλεκτροδίων που είχαν εγκατασταθεί.



Σε κάθε μία από τις κατακόρυφες γεωτρήσεις τοποθετήθηκαν 12 ηλεκτρόδια σε απόσταση 0,2 μέτρα μεταξύ τους. Σε κάθε γεώτρηση το πιο ρηχό και βαθύ ηλεκτρόδιο βρισκόταν σε βάθος 0,1 και 2,3 μέτρα αντίστοιχα από την επιφάνεια του εδάφους (Πίνακας 1, Σχήμα 11).

Electrode	X (m)	Y (m)	Z (m)	Brh
1	0.0	0.3	-0.1	W
2	0.0	0.3	-0.3	W
3	0.0	0.3	-0.5	W
4	0.0	0.3	-0.7	W
5	0.0	0.3	-0.9	W
6	0.0	0.3	-1.1	W
7	0.0	0.3	-1.3	W
8	0.0	0.3	-1.5	W
9	0.0	0.3	-1.7	W
10	0.0	0.3	-1.9	W
11	0.0	0.3	-2.1	W
12	0.0	0.3	-2.3	W
13	1.0	0.3	-0.1	E
14	1.0	0.3	-0.3	E
15	1.0	0.3	-0.5	E
16	1.0	0.3	-0.7	E
17	1.0	0.3	-0.9	E
18	1.0	0.3	-1.1	E
19	1.0	0.3	-1.3	E
20	1.0	0.3	-1.5	E
21	1.0	0.3	-1.7	E
22	1.0	0.3	-1.9	E
23	1.0	0.3	-2.1	E
24	1.0	0.3	-2.3	E
25	0.5	0.0	-0.1	S
26	0.5	0.0	-0.3	S
27	0.5	0.0	-0.5	S
28	0.5	0.0	-0.7	S
29	0.5	0.0	-0.9	S
30	0.5	0.0	-1.1	S
31	0.5	0.0	-1.3	S
32	0.5	0.0	-1.5	S
33	0.5	0.0	-1.7	S
34	0.5	0.0	-1.9	S
35	0.5	0.0	-2.1	S
36	0.5	0.0	-2.3	S
37	0.5	0.6	-0.1	N
38	0.5	0.6	-0.3	N
39	0.5	0.6	-0.5	N
40	0.5	0.6	-0.7	N
41	0.5	0.6	-0.9	N
42	0.5	0.6	-1.1	N
43	0.5	0.6	-1.3	N
44	0.5	0.6	-1.5	N
45	0.5	0.6	-1.7	N
46	0.5	0.6	-1.9	N
47	0.5	0.6	-2.1	N
48	0.5	0.6	-2.3	N

Πίνακας 1: Συντεταγμένες (X, Y, Z) των συνολικά 48 ηλεκτροδίων τα οποία τοποθετήθηκαν στις τέσσερις κατακόρυφες (W, E, S, N) γεωτρήσεις.

Στις δύο οριζόντιες γεωτρήσεις τοποθετήθηκαν επίσης 12 ηλεκτρόδια σε κάθε γεώτρηση σε απόσταση 0,2 μέτρα μεταξύ τους. Η μία οριζόντια γεώτρηση τοποθετήθηκε σε βάθος 0,35 από την επιφάνεια του εδάφους και η δεύτερη σε βάθος 0,95 μέτρα. Με τον τρόπο αυτό η απόσταση μεταξύ των δύο οριζοντίων γεωτρήσεων ήταν 0,6 μέτρα (Πίνακας 2).

Electrode	X (m)	Y (m)	Z (m)	Brh
1	0.0	0.0	-0.35	Htop
2	0.2	0.0	-0.35	Htop
3	0.4	0.0	-0.35	Htop
4	0.6	0.0	-0.35	Htop
5	0.8	0.0	-0.35	Htop
6	1.0	0.0	-0.35	Htop
7	1.2	0.0	-0.35	Htop
8	1.4	0.0	-0.35	Htop
9	1.6	0.0	-0.35	Htop
10	1.8	0.0	-0.35	Htop
11	2.0	0.0	-0.35	Htop
12	2.2	0.0	-0.35	Htop
13	0.0	0.0	-0.95	Hbottom
14	0.2	0.0	-0.95	Hbottom
15	0.4	0.0	-0.95	Hbottom
16	0.6	0.0	-0.95	Hbottom
17	0.8	0.0	-0.95	Hbottom
18	1.0	0.0	-0.95	Hbottom
19	1.2	0.0	-0.95	Hbottom
20	1.4	0.0	-0.95	Hbottom
21	1.6	0.0	-0.95	Hbottom
22	1.8	0.0	-0.95	Hbottom
23	2.0	0.0	-0.95	Hbottom
24	2.2	0.0	-0.95	Hbottom

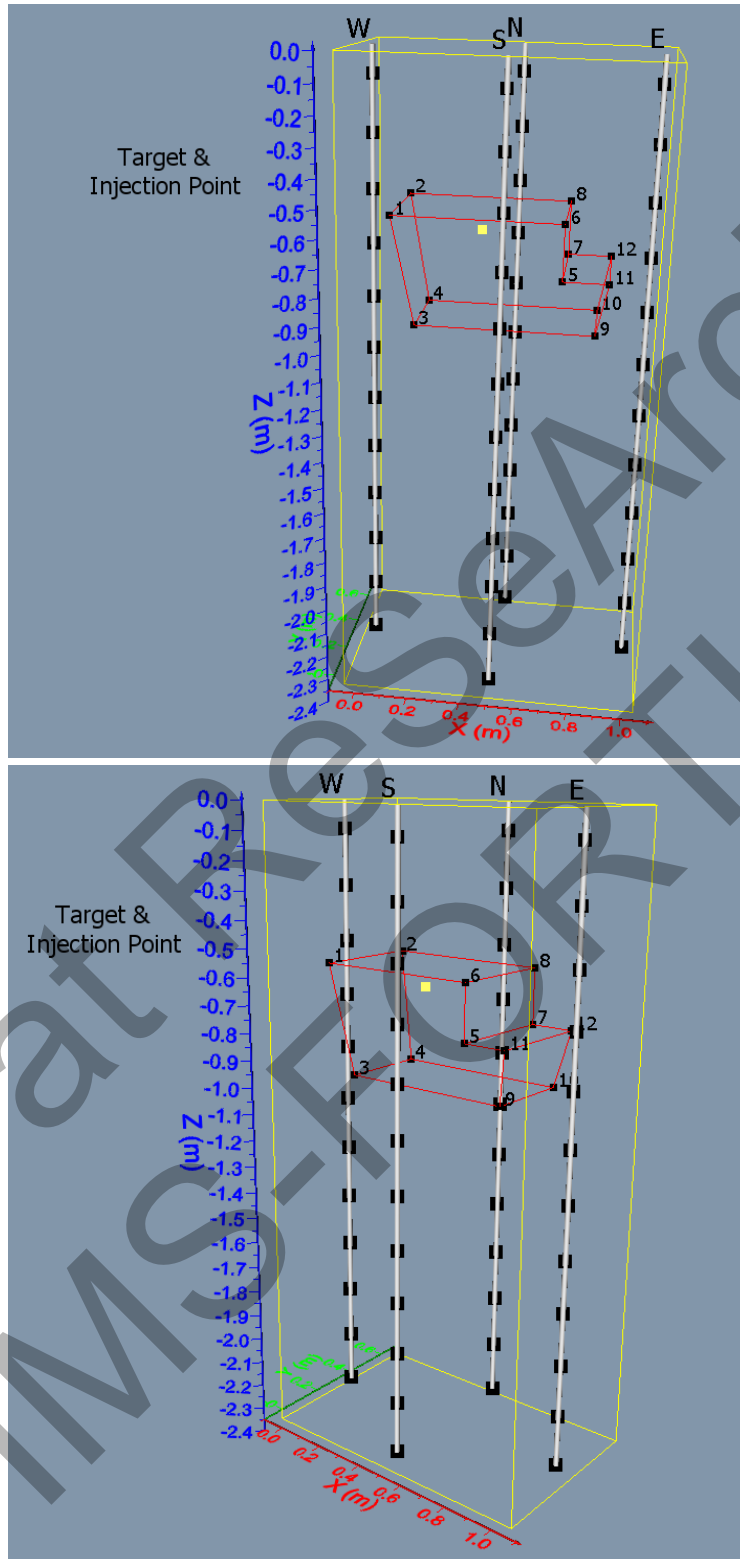
Πίνακας 2: Συντεταγμένες (X, Y, Z) των συνολικά 24 ηλεκτροδίων τα οποία τοποθετήθηκαν στις δύο οριζόντιες (Htop, Hbottom) γεωτρήσεις.

Το πλαστικό κουτί που χρησιμοποιήθηκε για την οριοθέτηση του στόχου (άμμος) μέσα στο σκάμμα δεν είχε τέλειο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο σχήμα. Για τον λόγο αυτό μετρήθηκαν ακριβώς οι διαστάσεις τόσο στη βάση όσο και στην κορυφή του, καθώς και οι αποστάσεις του κουτιού από τις γεωτρήσεις (Σχήμα 11). Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι συντεταγμένες των κορυφών του παραλληλεπίπεδου που χρησιμοποιήθηκε για την εισαγωγή του αμμούχου στόχου στο σκάμμα.

Corner	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0.1	0.1	-0.55
2	0.1	0.5	-0.55
3	0.18	0.14	-0.95
4	0.18	0.46	-0.95
5	0.7	0.1	-0.75
6	0.7	0.1	-0.55
7	0.7	0.5	-0.75
8	0.7	0.5	-0.55
9	0.82	0.14	-0.95
10	0.82	0.46	-0.95
11	0.86	0.1	-0.75
12	0.86	0.5	-0.75

Πίνακας 3: Συντεταγμένες των κορυφών του παραλληλεπίπεδου που χρησιμοποιήθηκε ως στόχος μέσα στο σκάμμα κατά την διάρκεια του πειράματος.





Σχήμα 11: Χωροθέτηση με βάση ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων των τεσσάρων κατακόρυφων γεωτρήσεων (γκρι κύλινδροι), των ηλεκτροδίων σε κάθε γεώτρηση (μαύρα τετράγωνα) και του στόχου με την μορφή σκαλοπατιού, όπως τοποθετήθηκαν μέσα στο σκάμμα. Το κίτρινο τετράγωνο δείχνει το σημείο ($X=0.4, Y=0.27, Z=-0.62$) που ξεκίνησε η ροή του ρύπου μέσα στο στόχο.

Στην συνέχεια ο σχεδιασμός και κατασκευή των πρωτοκόλλων έγινε με την βοήθεια της εφαρμογής Optcros (Tsourlos 2014) που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Το πρόγραμμα παράγει ένα πλήρες πακέτο μετρήσεων με διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων (bipole-bipole, pole-tripole, gradient) μεταξύ δύο κατακόρυφων γεωτρήσεων. Επίσης το πρόγραμμα μπορεί να εξάγει από το αρχικό πλήρες σετ δεδομένων ένα υποσύνολο μετρήσεων που δύναται να αναπαραγάγουν ένα βέλτιστο γεωηλεκτρικό μοντέλο του υπεδάφους. Η διαδικασία επιλογής των βέλτιστων αυτών μετρήσεων στηρίζεται στον πίνακα ευαισθησίας (ή Ιακωβιανός πίνακας) σύμφωνα με την διαδικασία βελτιστοποίησης που προτάθηκε από τους Athanasiou (2009). Ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα στηρίζεται τις μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφονται στο εγχειρίδιο «Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys By Dr. M.H.Loke Copyright (1996-2015), σελ. 27-30» με τις αντίστοιχες μετατροπές που έγιναν για τη περίπτωση μετρήσεων σε γεωτρήσεις.

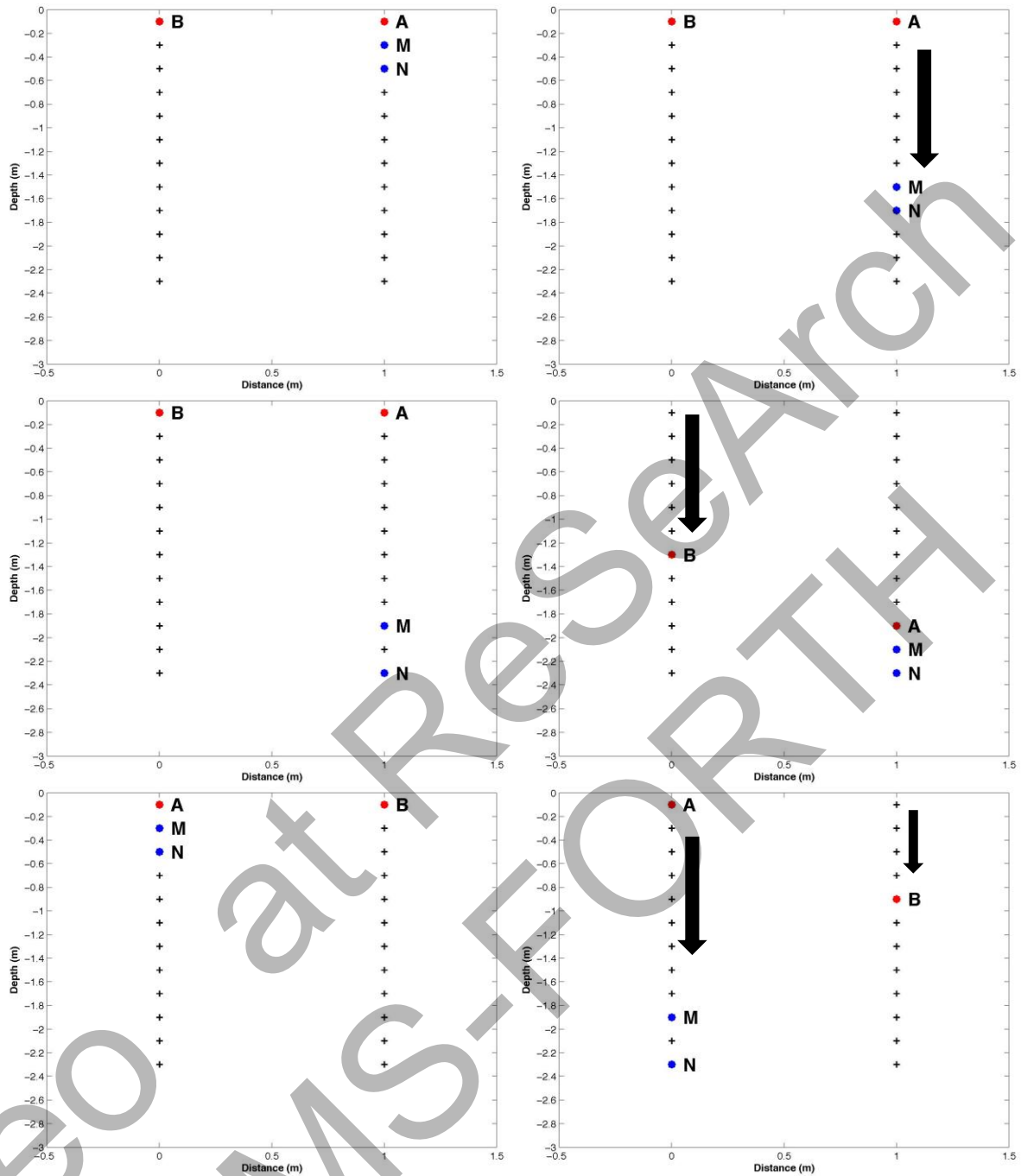
Το πρόγραμμα Optcros ζητάει στην αρχή από τον χρήστη κάποιες παραμέτρους όπως η απόσταση μεταξύ των δύο κατακόρυφων γεωτρήσεων, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων στις γεωτρήσεις και το βάθος που βρίσκεται το πρώτο ηλεκτρόδιο της γεώτρησης κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Στη συνέχεια με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου μέτρησης της αντίστασης (μέγιστη τάση, ακρίβεια μέτρησης δυναμικού) και των αναμενόμενων εδαφικών συνθηκών (μέγιστη αντίσταση επαφής, μέση ελάχιστη ειδική ηλεκτρική αντίσταση υπεδάφους) υπολογίζεται η οριακή τιμή του γεωμετρικού παράγοντα που θα χρησιμοποιηθεί ως κατώφλι φιλτραρίσματος μικρών τιμών γεωμετρικού παράγοντα, οι οποίες αντιστοιχούν σε μετρήσεις επιδεκτικές στην μόλυνσή τους με θόρυβο.

Η διάταξη pole-tripole περιελάμβανε μετρήσεις χρησιμοποιώντας τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων B-AMN και AMN-B. Το ηλεκτρόδιο ρεύματος B βρισκόταν αρχικά στην πρώτη γεώτρηση και τα A, M, N ηλεκτρόδια κινούνταν κατακόρυφα στην δεύτερη γεώτρηση. Στη συνέχεια έγινε εναλλαγή των θέσεων των ηλεκτροδίων B και AMN αντίστοιχα στις δύο γεωτρήσεις. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου ρεύματος A και του διπόλου δυναμικού MN ήταν $6a$ ($a=0.2m$, ελάχιστη απόσταση ηλεκτροδίων). Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού MN παρέμεινε σταθερή και ίση με $1a$ όταν η απόσταση A-MN ήταν μικρότερη του $6a$. Για αποστάσεις του A-MN μεγαλύτερη του $6a$, διπλασιαζόταν και η απόσταση του διπόλου δυναμικού σε $2a$, για να αυξηθεί με αυτόν τον τρόπο ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Για κάθε μία θέση του ηλεκτροδίου B (και στις δύο γεωτρήσεις) λαμβάνονταν οι αντίστοιχες μετρήσεις που αντιστοιχούσαν στις θέσεις των AMN με βάση τους προηγούμενους συνδυασμούς. Εν συνεχεία μετακινούνταν το ηλεκτρόδιο B κατά $1a$ και συνεχιζόταν η όλη διαδικασία μέχρι την συλλεχθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων (Σχήμα 12).

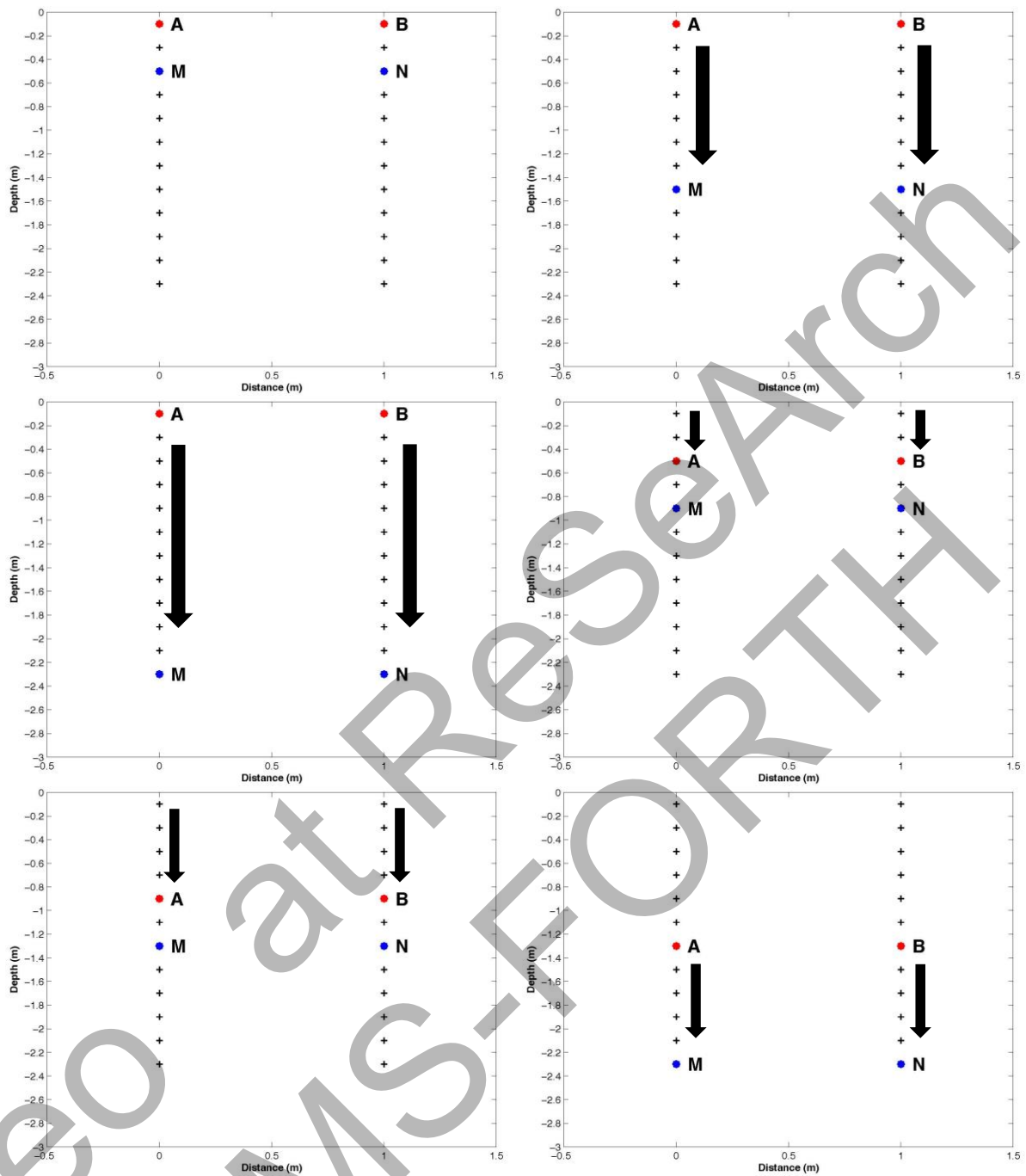
Στη διάταξη bipole-bipole τα ηλεκτρόδια A, M και B, N βρίσκονται αντίστοιχα σε διαφορετικές γεωτρήσεις. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων A-M και B-N ήταν ίση με $10a$. Για κάθε θέση των ηλεκτροδίων ρεύματος A, B που βρισκόταν στο ίδιο βάθος και στις δύο γεωτρήσεις λαμβάνονταν οι μετρήσεις που αντιστοιχούσαν στην συνεχή μετακίνηση των ηλεκτροδίων M, N κατακόρυφα μέσα στις γεωτρήσεις με βήμα $1a$. Κατόπιν τα ηλεκτρόδια ρεύματος A, B μετακινούνταν ταυτόχρονα και στις δύο γεωτρήσεις κατά $1a$ και συνεχιζόταν η ίδια διαδικασία (Σχήμα 13).

Εκτός από τις διατάξεις που αντιστοιχούσαν σε ηλεκτρόδια που βρισκόταν ταυτόχρονα και στις δύο γεωτρήσεις (cross-hole) συλλέχθηκαν και μετρήσεις με όλα τα ηλεκτρόδια να βρίσκονται σε μία κάθε φορά γεώτρηση (in-hole). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η διάταξη gradient (Σχήμα 14).

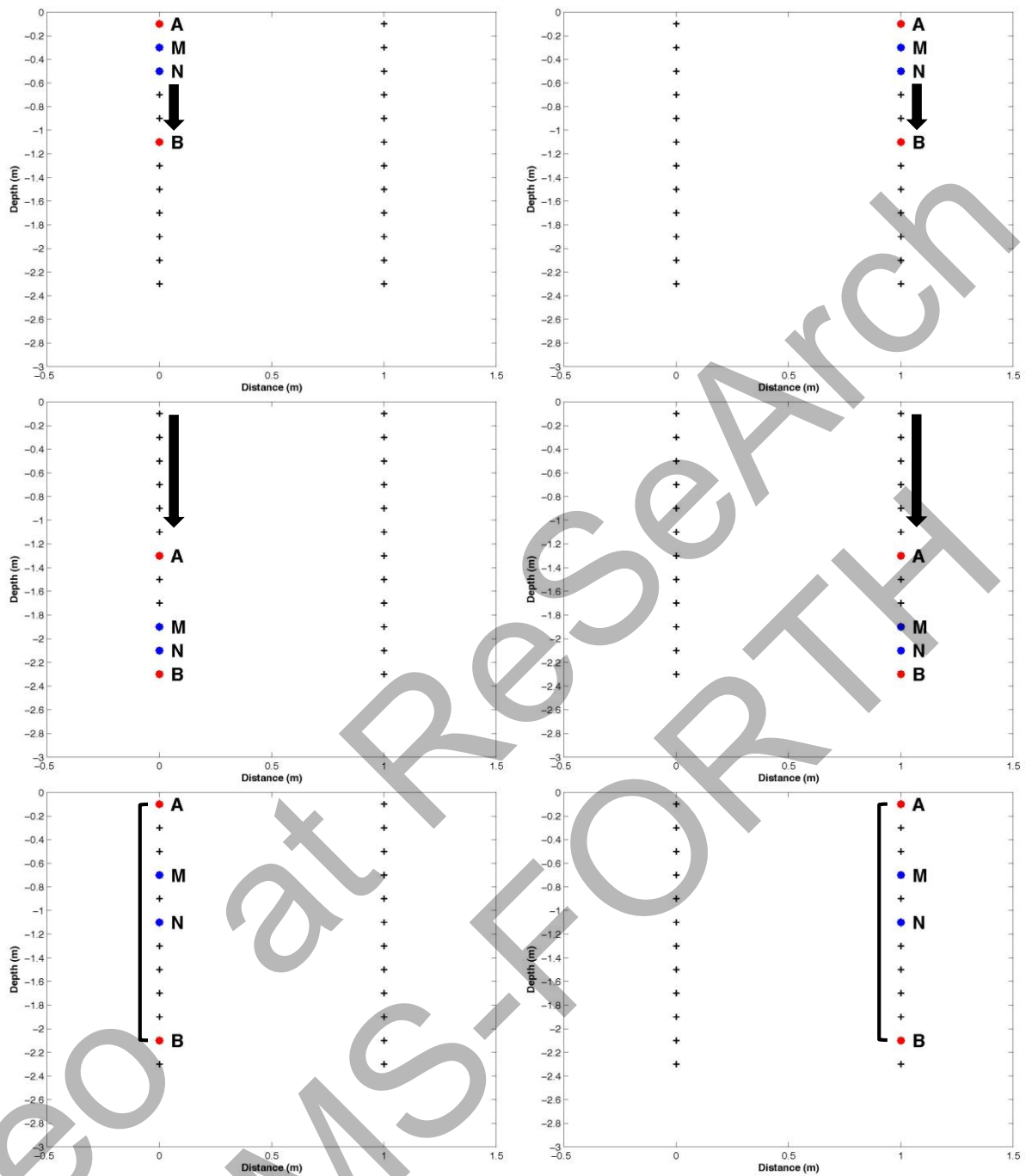




Σχήμα 12: Ενδεικτικές θέσεις των ηλεκτροδίων στις δύο γεωτρήσεις για την συλλογή των τομογραφικών δεδομένων pole-tripole (B-AMN & AMN-B). Σε κάθε περίπτωση το ηλεκτρόδιο ρεύματος B βρισκόταν μόνο του σε μία από τις δύο γεωτρήσεις και το τρίπολο AMN στην αντίθετη γεώτρηση αντίστοιχα.



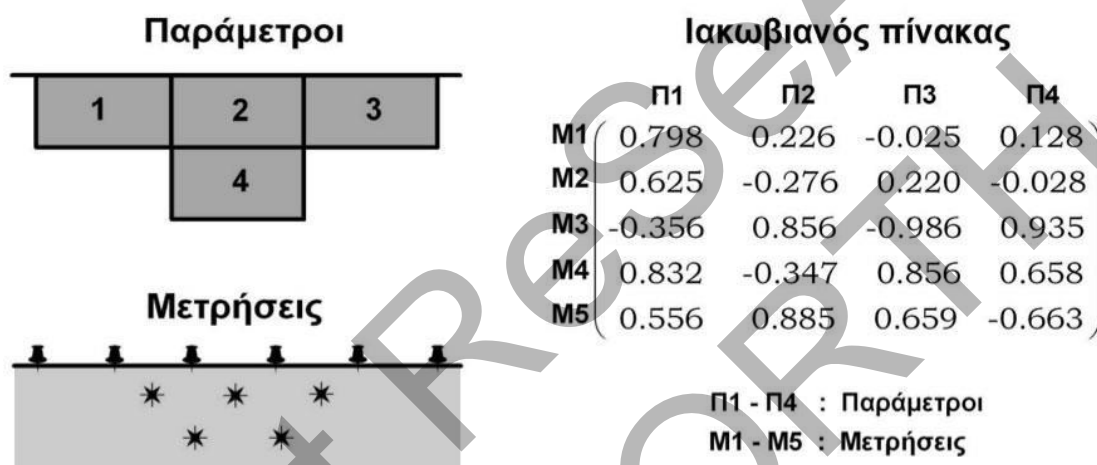
Σχήμα 13: Ενδεικτικές θέσεις των ηλεκτροδίων στις δύο γεωτρήσεις για την συλλογή των τομογραφικών δεδομένων Βίρpole-βίρpole (AM-BN).



Σχήμα 14: Ενδεικτικές θέσεις των ηλεκτροδίων στις δύο γεωτρήσεις για την συλλογή των τομογραφικών δεδομένων gradien (AMBN) σε κάθε μία γεωτρήση (in-hole).

Το σύνολο των διατάξεων pole-tripole, bipole-bipole και gradient αποτέλεσε το αρχικό και ολοκληρωμένο σετ δεδομένων από το οποίο προήλθε το βέλτιστο πρωτόκολλο μέτρησης σύμφωνα με την τεχνική του Ιακωβιανού. Η τεχνική βασίζεται στην επιλογή εκείνων των μετρήσεων που έχουν την μεγαλύτερη απόλυτη τιμή ευαισθησίας όσον αφορά στις παραμέτρους που διακρίτοποιείται το υπέδαφος. Για παράδειγμα στην πιο απλή περίπτωση ενός συστήματος που αποτελείται από 5 μετρήσεις και 4 παραμέτρους ο Ιακωβιανός πίνακας για την περίπτωση ομογενούς γης φαίνεται στο Σχήμα 15.

Αρχικά για κάθε παράμετρο επιλέγεται εκείνη η μέτρηση η οποία εμφανίζει τη μεγαλύτερη απόλυτη τιμή ευαισθησίας σε σχέση με τη συγκεκριμένη παράμετρο. Σε περίπτωση που μία μέτρηση έχει ήδη επιλεγεί ως η βέλτιστη για μία άλλη παράμετρο τότε για τη νέα παράμετρο επιλέγεται η μέτρηση εκείνη που εμφανίζει την αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή ευαισθησίας. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής το «βέλτιστο» πρωτόκολλο θα περιλαμβάνει τόσες μετρήσεις όσες είναι και οι παράμετροι του υπεδάφους.



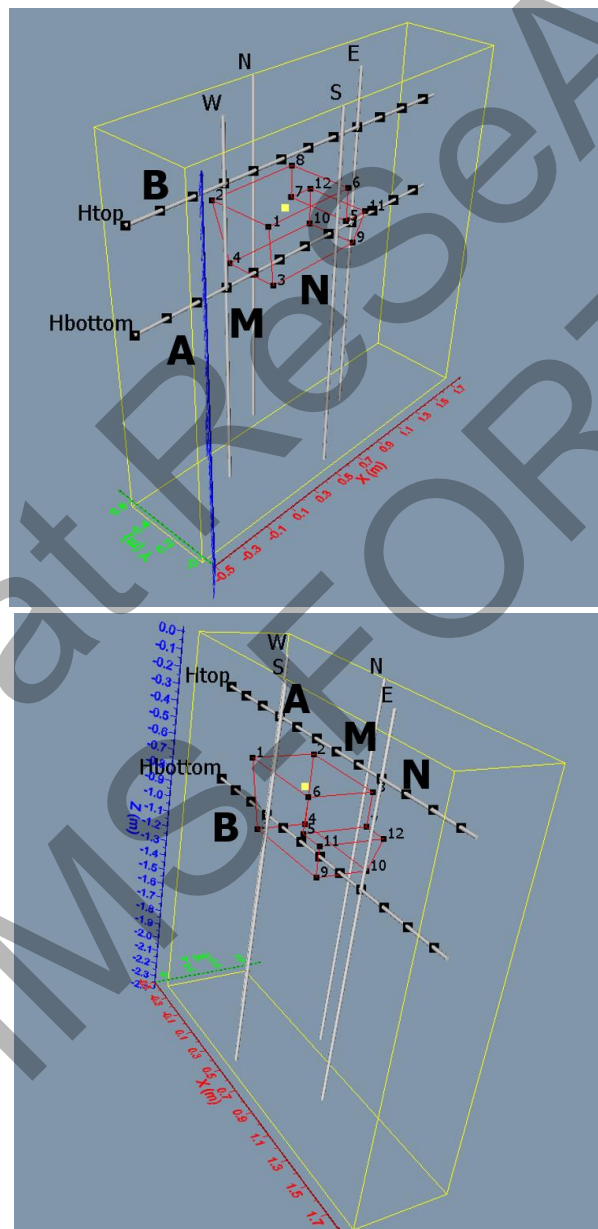
Σχήμα 15: Υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα για ομογενή γη που έχει χωριστεί σε τέσσερις παραμέτρους στην περίπτωση που έχουν συλλεχθεί 5 επιφανειακές τομογραφικές μετρήσεις (Αθανασίου 2007).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την παράμετρο Π1 η μέτρηση που έχει την μέγιστη απόλυτη τιμή ευαισθησίας είναι η M4. Για την παράμετρο Π2 επιλέγεται η μέτρηση M5 και για την παράμετρο Π3 η μέτρηση M3. Για την παράμετρο Π4 τη μέγιστη τιμή ευαισθησίας έχει η μέτρηση M3 η οποία όμως έχει ήδη επιλεγεί ως καλύτερη μέτρηση για την παράμετρο Π3. Αναζητείται έτσι η μέτρηση με την αμέσως επόμενη καλύτερη τιμή ευαισθησίας που είναι η M5. Ομοίως αυτή η μέτρηση έχει επιλεγεί όπως και η M4 οπότε για την παράμετρο Π4 καταλήγουμε στο να επιλέξουμε τη μέτρηση M1. Με αυτόν τον τρόπο οι συνδυασμοί ηλεκτροδίων που θα επιλεγθούν θα είναι τόσες όσες και οι παράμετροι του μοντέλου. Η επανάληψη της ίδιας διαδικασίας θα προσθέσει μετρήσεις στο «βέλτιστο» πρωτόκολλο αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την διακριτική ικανότητα των τελικών τομογραφικών εικόνων.

Η συλλογή των τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε επίπεδα που ορίζονταν κάθε φορά από δύο γεωτρήσεις. Με αυτό τον τρόπο ορίστηκαν έξι επίπεδα τα οποία κωδικοποιήθηκαν ανάλογα με τα ονόματα του ζεύγους των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνταν κάθε φορά και ήταν τα εξής: WS, WE, WN, SE, SN, EN (Σχήμα 10 & Σχήμα 11). Το πλήρες σετ δεδομένων μεταξύ δύο γεωτρήσεων, που περιελάμβανε όλους τους συνδυασμούς pole-tripole, bipole-bipole και gradient όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα Ortcros, αριθμούσε συνολικά 1608 μετρήσεις. Αντίστοιχα το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο μετρήσεων μετά την εφαρμογή της τεχνικής του Ιακωβιανού αποτελούσε ένα υποσύνολο του αρχικού σετ με 507 μετρήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη την χωρική κατανομή των κατακόρυφων γεωτρήσεων και την αρίθμηση όλων των ηλεκτροδίων που ήταν εγκατεστημένα (Σχήμα 10)

σε αυτές δημιουργήθηκε ένα πλήρες (full) και ένα βελτιστοποιημένο (optimized) πρωτόκολλο διατάξεων τα οποία θα χρησιμοποιούνταν για την καταγραφή της χωρικής μεταβολής της αντίστασης του υπεδάφους σε τρεις διαστάσεις. Το πλήρες (full) τρισδιάστατο πρωτόκολλο περιείχε συνολικά 9648 μετρήσεις, δηλαδή πάνω από τρεις φορές παραπάνω μετρήσεις από το βελτιστοποιημένο (optimized) το οποίο αποτελούνταν από 3042 διαφορετικές μετρήσεις.

Η διάταξη role-tripole χρησιμοποιήθηκε επίσης για την συλλογή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των δύο οριζόντιων γεωτρήσεων. Συλλέχθηκαν τα δεδομένα που αντιστοιχούσαν στις συνδεσμολογία B-AMN και AMN-B. Στην πρώτη περίπτωση το ηλεκτρόδιο B βρισκόταν στην πάνω γεώτρηση (Htop) και τα ηλεκτρόδια AMN στην κάτω (Hbottom) ενώ στην δεύτερη περίπτωση έγινε εναλλαγή της διάταξης, όπου το B ηλεκτρόδιο μεταφέρθηκε στην κάτω γεώτρηση και τα AMN στην πάνω (Σχήμα 16).



Σχήμα 16: Χωροθέτηση των δύο οριζόντιων γεωτρήσεων σχέση με τις κατακόρυφες γεωτρήσεις και τον στόχο μέσα στο σκάμμα. Τα A, B, M, N δείχνουν τις θέσεις των ηλεκτροδίων στις δύο γεωτρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την συλλογή των τομογραφικών δεδομένων με την διάταξη role-tripole.

Τα πρωτόκολλα των μετρήσεων με την μορφή ascii txt αρχείων εισήχθησαν στο πρόγραμμα OptPro (Iris Instruments) το οποίο αναδιατάσσει την σειρά των μετρήσεων με τέτοιο τρόπο ώστε για ένα ζευγάρι ηλεκτροδίων ρεύματος (A, B) να μπορεί να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού μέχρι σε δέκα το πολύ δίπολα δυναμικού (M, N). Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση των διαφορετικών μετρήσεων κατά αύξουσα σειρά με βάση την αρίθμηση των ηλεκτροδίων και την εισαγωγή κάποιων επιπλέον μετρήσεων στο πρωτόκολλο (garfillers). Στο Σχήμα 17α φαίνεται το πρωτόκολλο των μετρήσεων μεταξύ δύο κατακόρυφων γεωτρήσεων όπως αυτό δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα OptCros. Στο πρώτο τμήμα του αρχείου αποτυπώνονται ο αριθμός και οι συντεταγμένες (X, Y, Z) των ηλεκτροδίων που έχουν τοποθετηθεί στις δύο γεωτρήσεις. Το δεύτερο τμήμα του αρχείου περιλαμβάνει τον αύξαν αριθμό των μετρήσεων και τον συνδυασμό των τεσσάρων ηλεκτροδίων που θα χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Το Σχήμα 17β είναι το τελικό πρωτόκολλο το οποίο προήλθε μετά την εφαρμογή του OptPro, στο οποίο μπορεί να διακριθεί η αναδιάταξη των μετρήσεων κατά αύξουσα σειρά με βάση την αρίθμηση των ηλεκτροδίων με τέτοιο τρόπο ώστε για παράδειγμα, για το ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος A-B: 1-15 (μέτρηση 12) να μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα με μία εισαγωγή ρεύματος οι διαφορές δυναμικού από 10 διαφορετικά δίπολα δυναμικού MN (μετρήσεις 12 έως 21). Τελικά στο όργανο φορτώθηκε το αρχείο του Σχήμα 17β, το οποίο εκμεταλλεύεται πλήρως τις δυνατότητές του ελαχιστοποιώντας το χρόνο συλλογής των μετρήσεων, το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό στην παρακολούθηση ροής ρύπων στο υπέδαφος.

```

# X Y Z
1 0.000 0.000 -0.100
2 0.000 0.000 -0.300
3 0.000 0.000 -0.500
4 0.000 0.000 -0.700
5 0.000 0.000 -0.900
6 0.000 0.000 -1.100
7 0.000 0.000 -1.300
8 0.000 0.000 -1.500
9 0.000 0.000 -1.700
10 0.000 0.000 -1.900
11 0.000 0.000 -2.100
12 0.000 0.000 -2.300
13 1.000 0.000 -0.100
14 1.000 0.000 -0.300
15 1.000 0.000 -0.500
16 1.000 0.000 -0.700
17 1.000 0.000 -0.900
18 1.000 0.000 -1.100
19 1.000 0.000 -1.300
20 1.000 0.000 -1.500
21 1.000 0.000 -1.700
22 1.000 0.000 -1.900
23 1.000 0.000 -2.100
24 1.000 0.000 -2.300

# A B M N
1 13 1 14 15
2 13 1 15 16
3 13 1 16 17
4 14 1 15 16
5 14 1 16 17
6 15 1 16 17
7 15 1 17 18
8 16 1 17 18
9 16 1 23 24
10 17 1 18 19
11 17 1 23 24
12 18 1 19 20
13 19 1 20 21
14 20 1 21 22
15 21 1 22 23
16 22 1 23 24
17 13 2 14 15
18 13 2 15 16
19 13 2 22 24
20 14 2 15 16
21 14 2 16 17
22 15 2 16 17
23 15 2 17 18
24 16 2 17 18
25 17 2 18 19
26 18 2 19 20
27 19 2 20 21
28 20 2 21 22

```

```

# X Y Z
1 0.000 0.000 -0.100
2 0.000 0.000 -0.300
3 0.000 0.000 -0.500
4 0.000 0.000 -0.700
5 0.000 0.000 -0.900
6 0.000 0.000 -1.100
7 0.000 0.000 -1.300
8 0.000 0.000 -1.500
9 0.000 0.000 -1.700
10 0.000 0.000 -1.900
11 0.000 0.000 -2.100
12 0.000 0.000 -2.300
13 1.000 0.000 -0.100
14 1.000 0.000 -0.300
15 1.000 0.000 -0.500
16 1.000 0.000 -0.700
17 1.000 0.000 -0.900
18 1.000 0.000 -1.100
19 1.000 0.000 -1.300
20 1.000 0.000 -1.500
21 1.000 0.000 -1.700
22 1.000 0.000 -1.900
23 1.000 0.000 -2.100
24 1.000 0.000 -2.300

# A B M N
1 1 6 2 3
2 1 11 2 4
3 1 13 3 2
4 1 13 2 14
5 1 13 14 15
6 1 13 15 16
7 1 13 16 17
8 1 14 2 3
9 1 14 3 15
10 1 14 15 16
11 1 14 16 17
12 1 15 2 3
13 1 15 3 5
14 1 15 5 6
15 1 15 6 10
16 1 15 10 12
17 1 15 12 13
18 1 15 13 14
19 1 15 14 16
20 1 15 16 17
21 1 15 17 18
22 1 16 2 3
23 1 16 3 6
24 1 16 6 7
25 1 16 7 8
26 1 16 8 9
27 1 16 9 11
28 1 16 11 10

```

Σχήμα 17: Δείγματα αρχείων των πρωτοκόλλων τα οποία προήλθαν από το πρόγραμμα OptCros (α) και το OptPro (β).

4 Υλοποίηση πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων στο πεδίο δοκιμών

Για την συλλογή των γεωηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το δεκακάναλο όργανο SYSCAL Pro μαζί με τον πολυπλέκτη SWITCH Pro 96 της εταιρείας IRIS Instruments. Το όργανο είναι πλήρως αυτοματοποιημένο, με αυτονομία και αρκετή εσωτερική μνήμη ώστε να είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων. Στο όργανο μπορούν να συνδεθούν ταυτόχρονα μέχρι 96 ηλεκτρόδια. Η αυτόματη πραγματοποίηση των μετρήσεων της αντίστασης του υπεδάφους ελέγχεται από τον πολυπλέκτη, που συνδέεται στο όργανο μέτρησης της αντίστασης μέσω ενός καλωδίου. Η σύνδεση των καλωδίων που εξέρχονταν από τις γεωτρήσεις που ήταν θαμμένες μέσα στο σκάμμα του πεδίου δοκιμών έγινε με την χρήση δύο ηλεκτρονικών πολυπλεκτικών κουτιών, τα οποία στη συνέχεια συνδέθηκαν στο SWITCH Pro 96. Η συνεχής παρακολούθηση και αποθήκευση των δεδομένων κατά την διάρκεια του πειράματος επιτεύχθηκε με την χρήση ενός toughbook το οποίο συνδέθηκε στο SYSCAL Pro (Σχήμα 18).



Σχήμα 18: (πάνω) Σύνδεση του Syscal Pro με το Switch Pro, το Toughbook, την μπαταρία και τη γεννήτρια για την συλλογή των τομογραφικών δεδομένων. (κάτω) Τα κουτιά που κατασκευάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση των καλωδίων των γεωτρήσεων με το Switch Pro και το Syscal Pro.

Στο όργανο μέτρησης της αντίστασης φορτώθηκαν τα πρωτόκολλα που αντιστοιχούσαν στο πλήρες (full) και βελτιστοποιημένο (optimized) πακέτο των μετρήσεων μεταξύ των γεωτρήσεων W-E, S-N και στο τρισδιάστατο αρχείο που συμπεριλάμβανε τις μετρήσεις από τους συνδυασμούς όλων των κατακόρυφων γεωτρήσεων. Επίσης φορτώθηκε και το πρωτόκολλο για την πραγματοποίηση των μετρήσεων μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων.

Πριν από την έναρξη των πειραματικών μετρήσεων έπρεπε να εκτιμηθεί κατά προσέγγιση η ποσότητα του αγώγιμου υγρού το οποίο θα πλήρωνε τον αμμούχο στόχο μέσα στο σκάμμα. Ο όγκος της άμμου ήταν 115 λίτρα, οπότε με ένα εκτιμώμενο ενεργό πορώδες της άμμου (Σχήμα 8) περίπου 24%-26%, προκύπτει ότι θα χρειαζόνταν περίπου 30 λίτρα αγώγιμου υλικού (ρύπου) για τον κορεσμό του στόχου. Με βάση αυτά τα δεδομένα καθορίστηκε η ροή του αγώγιμου υγρού από την δεξαμενή προς τον στόχο (μέσω ενός αλφαδολάστιχου) στα 75 ml/min, οπότε με την παροχή αυτή εκτιμήθηκε ότι στόχος θα κορεστεί σε 8,5 ώρες από την έναρξη του πειράματος.



Σχήμα 19: Ένδειξη του αγωγιμόμετρου (YSI Pro 1030) σχετικά με την μέτρηση της αγωγιμότητας του αγώγιμου «ρύπου». Τοποθέτηση του αγώγιμου χρωματισμένου υγρού μέσα στην δεξαμενή. Καθορισμός της παροχής του υγρού στα 75 ml/min.

Ο αγώγιμος ρύπος προσομοιώθηκε με την διάλυση περίπου 450 γραμμαρίων αλατιού σε 45 λίτρα νερού βρύσης, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο ένα υδάτινο διάλυμα με αγωγιμότητα 20,1 mS/cm ή 0,5 Ohm-m ($\text{mS/cm} = 10/A \text{ Ohm-m}$, όπου A η μέτρηση σε mS/cm). Μέσα στο αλατούχο αγώγιμο υγρό διαλύθηκαν 5 μικρά κουτάκια από έγχρωμο υλικό ζαχαροπλαστικής προσδίδοντας στο διάλυμα έντονο κόκκινο χρώμα. Το διάλυμα εν συνεχεία πλήρωσε μία μικρή δεξαμενή η οποία τοποθετήθηκε πάνω σε μία βάση σε ύψος περίπου 1,5 μέτρο από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 19).

Στο Σχήμα 20 φαίνεται η πλήρης επιτόπια διάταξη των οργάνων μέτρησης της αντίστασης και της δεξαμενής που χρησιμοποιήθηκε για την διοχέτευση του αγώγιμου υγρού μέσα στον αμμούχο στόχο του σκάμματος κατά την διάρκεια του πειράματος διαχρονικής παρακολούθησης της ροής του ρύπου μέσα στο υπέδαφος του υπαίθριου πεδίο δοκιμών.



Σχήμα 20: Λεπτομέρεια από την πραγματοποίηση των διαχρονικών πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων στο υπαίθριο πεδίο δοκιμών. Στις δύο κάτω φωτογραφίες φαίνεται η ροή του αγώγιμου υγρού από την δεξαμενή στο υπέδαφος μέσω του αλφαδολαστίχου.

Πριν από την έναρξη του πειράματος διαχρονικής παρακολούθησης της ροής του ρύπου μέσα στον αμμούχο στόχο του σκάμματος, προηγήθηκαν δοκιμαστικές στατικές τομογραφικές μετρήσεις με τα πρωτόκολλα που αντιστοιχούσαν στα πλήρη (full) και βελτιστοποιημένα (optimized) πακέτα των μετρήσεων. Σκοπός των πρωταρχικών αυτών μετρήσεων ήταν να ελεγχθεί η πλήρης λειτουργικότητα των ηλεκτροδίων που είχαν εγκατασταθεί στις γεωτρήσεις, η επαρκής επαφή τους με το υπέδαφος που θα επέτρεπε την διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος και η σύγκριση των γεωηλεκτρικών μοντέλων αντιστροφής. Ειδικά η τελευταία αυτή παράμετρος ήταν πολύ σημαντική καθώς η συγκριτική ομοιότητα των μοντέλων αντιστροφής ανάμεσα στα πλήρη και βελτιστοποιημένα πρωτόκολλα θα επέτρεπε τελικά την χρήση των βελτιστοποιημένων πρωτοκόλλων κατά την διάρκεια των διαχρονικών μετρήσεων, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο τον συνολικό χρόνο υλοποίησης του πειράματος.

Για την συλλογή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες παράμετροι που αφορούσαν στον προγραμματισμό του SYSCAL Pro σχετικά με τον χρόνο του παλμού, την τάση της πηγής και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων (Time: 250msec, Qmax=2%, Stack_min=2, Stack_max=3, Vp Voltage requested: Save Energy, Vab_maximum=400). Με βάση αυτές τις παραδοχές στον Πίνακα 4 φαίνεται συνοπτικά ο χρόνος που χρειαζόταν να μετρηθεί κάθε διαφορετικό πρωτόκολλο με το Syscal Pro.

Πρωτόκολλα	Μετρήσεις	Διάρκεια (min)
WE_full	1608	11
WE_opt	507	7
SN_full	1608	11
SN_opt	507	7
3D_full	9648	84
3D_opt	3042	43
Horizontal	656	12

Πίνακας 4: Σύγκριση του χρόνου που χρειαζόταν το Syscal Pro να ολοκληρώσει τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας τα διαφορετικά πρωτόκολλα.

Το βασικό πείραμα για την διαχρονική παρακολούθηση της ροής του ρύπου μέσα στο υπέδαφος του υπαίθριου πεδίου δοκιμών πραγματοποιήθηκε με τα βελτιστοποιημένα πρωτόκολλα στις 28/10/2015. Πριν την έναρξη της ροής του αγωγίμου υγρού μέσα στον στόχο πραγματοποιήθηκε μία σειρά μετρήσεων για την καταγραφή της αρχικής κατάστασης του υπεδάφους (Φάση T0). Εν συνεχεία ξεκίνησε η ροή του αγωγίμου υγρού από την μικρή δεξαμενή στις 07:57 και αμέσως άρχισε και η διαχρονική καταγραφή της ειδικής αντίστασης του υπεδάφους με τα διαφορετικά πρωτόκολλα. Οι μετρήσεις ακολούθησαν μία συστηματική διαδικασία όπου πρώτα γινόταν οι τομογραφικές μετρήσεις μεταξύ των γεωτρήσεων W-E, μετά ακολουθούσαν οι μετρήσεις στο επίπεδο S-N και εν συνεχεία ολοκληρωνόταν το πρωτόκολλο ανάμεσα στις οριζόντιες γεωτρήσεις. Στο τέλος μετρήθηκε επίσης και το τρισδιάστατο πρωτόκολλο που συνδυάζει όλες τις κατακόρυφες γεωτρήσεις. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν επτά διαφορετικές φάσεις (T1-T7) για την παρακολούθηση του φαινομένου. Οι φάσεις T1a έως T7a που υπάρχουν στα επίπεδα W-E και S-N εξήχθησαν από τα αντίστοιχα τρισδιάστατα πρωτόκολλα. Το πείραμα ολοκληρώθηκε στις 16:28 στις 28/10/2015 μετά από 511 λεπτά (8,5 ώρες) παρακολούθησης του φαινομένου της ροής του αγωγίμου ρύπου στο υπέδαφος (Πίνακας 5).

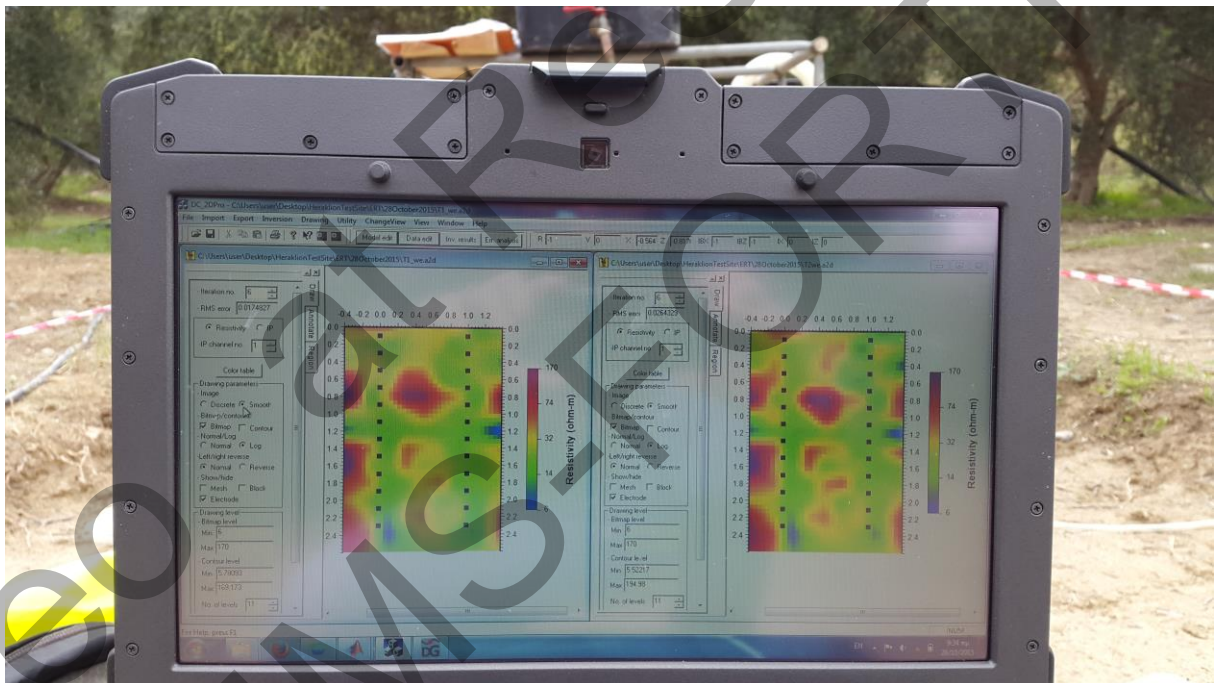
#	Phase	West-East (W-E)			South-North (S-N)		
		Ending time	Duration (hrs)	Duration (min)	Ending time	Duration (hrs)	Duration (min)
1	T0	07:57	00:00	0	07:57	0:00	0
2	T1	08:08	00:11	11	08:16	0:19	19
3	T1a	08:33	00:36	36	09:00	1:03	63
4	T2	09:27	01:30	90	09:35	1:38	98
5	T2a	09:53	01:56	116	10:00	2:03	123
6	T3	10:40	02:43	163	10:48	2:51	171
7	T3a	11:03	03:06	186	11:10	3:13	193
8	T4	11:51	03:54	234	11:59	4:02	242
9	T4a	12:15	04:18	258	12:22	4:25	265
10	T5	13:03	05:06	306	13:13	5:16	316
11	T5a	13:30	05:33	333	13:37	5:40	340
12	T6	14:23	06:26	386	14:31	6:34	394
13	T6a	14:47	06:50	410	14:54	6:57	417
14	T7	15:37	07:40	460	15:45	7:48	468
15	T7a	16:01	08:04	484	16:08	8:11	491

#	Phase	Horizontal Boreholes			3D		
		Ending time	Duration (hrs)	Duration (min)	Ending time	Duration (hrs)	Duration (min)
1	T0	07:57	00:00	0	07:57	0:00	0
2	T1	08:23	00:26	26	09:06	1:09	69
3	T2	09:44	01:47	107	10:23	2:26	146
4	T3	10:55	02:58	178	11:36	3:39	219
5	T4	12:07	04:10	250	12:46	4:49	289
6	T5	13:22	05:25	325	14:05	6:08	368
7	T6	14:38	06:41	401	15:22	7:25	445
8	T7	15:53	07:56	476	16:28	8:31	511

Πίνακας 5: Αναλυτική περιγραφή της χρονικής διάρκειας που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της παρακολούθησης της ροής του αγώγιμου υλικού μέσα στο σκάμμα με τις τομογραφικές γεωηλεκτρικές μετρήσεις μεταξύ των κατακόρυφων και οριζόντιων γεωτρήσεων. Το πείραμα παρακολούθησης ολοκληρώθηκε σε 8,5 ώρες στις 28/10/2015. Ως φάση αναφορά ορίστηκε η T0. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν επτά φάσεις παρακολούθησης (T1-T7). Οι φάσεις T1a έως T7a εξήχθησαν από τα αντίστοιχα τρισδιάστατα πρωτόκολλα.

Κατά την διάρκεια υλοποίησης του πειράματος, τα τομογραφικά δεδομένα μεταξύ των γεωτρήσεων W-E και S-N για τις διαφορετικές χρονικές φάσεις (T0-T7) υπέστησαν μία πρωταρχική επεξεργασία στο πεδίο με την ανακατασκευή των αντίστοιχων γεωηλεκτρικών εικόνων του υπεδάφους. Το στάδιο αυτό ήταν πολύ σημαντικό για την ομαλή υλοποίηση του πειράματος καθώς ανά πάσα στιγμή ήταν δυνατή η παρακολούθηση της ομαλής πορείας και ολοκλήρωσης των μετρήσεων (Σχήμα 21).





Σχήμα 21: Επί τόπου παρακολούθηση της πορείας του πειράματος στο πεδίο δοκιμών με την πρωταρχική επεξεργασία των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των γεωτρήσεων W-E και την ανακατασκευή των αντίστοιχων γεωηλεκτρικών μοντέλων του υπεδάφους για τις διαφορετικές φάσεις.

5 Επεξεργασία πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων

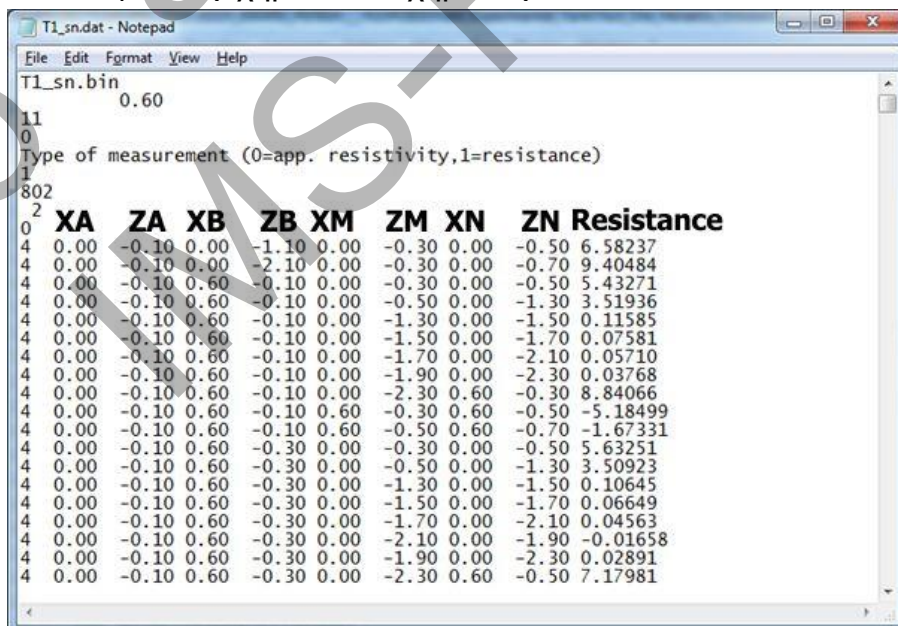
Στην παράγραφο αυτή θα αναφερθούν τα βασικά στάδια επεξεργασίας των τομογραφικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από το πεδίο δοκιμών, που αφορούν την προετοιμασία των δεδομένων σε κατάλληλη μορφή ώστε να εισαχθούν στα αντίστοιχα λογισμικά επεξεργασίας. Επίσης αναφέρονται συνοπτικά οι βασικές αρχές της επίλυσης του ευθέως και αντίστροφου γεωηλεκτρικού προβλήματος, στις οποίες βασίζονται τα λογισμικά επεξεργασίας των τομογραφικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

5.1 Προετοιμασία δεδομένων για αντιστροφή

Τα αρχικά τομογραφικά δεδομένα, τα οποία αποθηκεύονται στη εσωτερική μνήμη του Syscal Pro, μεταφέρονταν και αποθηκεύονταν σε μορφή bin αρχείων στο toughbook το οποίο ήταν συνδεδεμένο με το Syscal Pro μέσω του προγράμματος FieldView (Iris Instruments), το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την διαχείριση των δεδομένων κατά την διάρκεια του πειράματος. Για κάθε ένα πρωτόκολλο (W-E, S-N, 3D, HorBrh) και για κάθε φάση αποθηκεύτηκε και ένα ξεχωριστό bin αρχείο (συνολικά 32 αρχεία), το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες (συντεταγμένες μετρήσεων, εισερχόμενο ρεύμα, μετρούμενη διαφορά δυναμικού, σφάλμα μετρήσεων κλπ) για κάθε διαφορετική μέτρηση των πρωτοκόλλων.

Από τα bin αρχεία που αντιστοιχούσαν στις τομές μεταξύ των W-E, S-N και οριζοντίων γεωτρήσεων έγινε εξαγωγή μέσω του προγράμματος Prosys II (Iris Instruments) σε αντίστοιχα ascii dat αρχεία (RES2DINV) όπου η τιμή της φυσικής ποσότητας δινόταν ως αντίσταση (Σχήμα 22). Στη συνέχεια τα ascii αυτά αρχεία μετασχηματίστηκαν στην αντίστοιχη μορφή όπου θα μπορούσαν να εισαχθούν για περαιτέρω επεξεργασία και αντιστροφή με συγκεκριμένα λογισμικά (RES2DINV, DC_2DPRO).

Ο παραπάνω μετασχηματισμός επιτεύχθηκε μέσω μίας απλής εφαρμογής που υλοποιήθηκε σε Matlab (readcros1.m). Στο **readcros1.m** εισαγόταν το dat αρχείο που έβγαινε από το Prosys II καθώς και οι συντεταγμένες των ηλεκτροδίων, εν συνεχεία υπολογιζόταν ο γεωμετρικός παράγοντας και τέλος εξαγόταν τα αντίστοιχα αρχεία σε τέτοια μορφή που θα μπορούσαν να εισαχθούν σε διαφορετικά προγράμματα αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων (Σχήμα 23 & Σχήμα 24).



```
T1_sn.dat - Notepad
File Edit Format View Help
T1_sn.bin
0.60
11
0
Type of measurement (0=app. resistivity,1=resistance)
1
802
2
0 XA ZA XB ZB XM ZM XN ZN Resistance
4 0.00 -0.10 0.00 -1.10 0.00 -0.30 0.00 -0.50 6.58237
4 0.00 -0.10 0.00 -2.10 0.00 -0.30 0.00 -0.70 9.40484
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -0.30 0.00 -0.50 5.43271
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -0.50 0.00 -1.30 3.51936
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -1.30 0.00 -1.50 0.11585
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -1.50 0.00 -1.70 0.07581
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -1.70 0.00 -2.10 0.05710
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -1.90 0.00 -2.30 0.03768
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.00 -2.30 0.60 -0.30 8.84066
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.60 -0.30 0.60 -0.50 -5.18499
4 0.00 -0.10 0.60 -0.10 0.60 -0.50 0.60 -0.70 -1.67331
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -0.30 0.00 -0.50 5.63251
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -0.50 0.00 -1.30 3.50923
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -1.30 0.00 -1.50 0.10645
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -1.50 0.00 -1.70 0.06649
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -1.70 0.00 -2.10 0.04563
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -2.10 0.00 -1.90 -0.01658
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -1.90 0.00 -2.30 0.02891
4 0.00 -0.10 0.60 -0.30 0.00 -2.30 0.60 -0.50 7.17981
```

Σχήμα 22: Τυπική μορφή του αρχείου dat το οποίο εξάγεται από το αρχικό bin αρχείο μέσω του Prosys II και αφορά τα τομογραφικά δεδομένα για τις οριζόντιες και κατακόρυφες γεωτρήσεις W-E, S-N.


```

D:\PROJECTS\KRHPIS_2013-2015_KRHPIS_PEFIKA\YLOPOIISI\Field_Experimental_Tank\Test_Site_Heraklio_October2015\process\FINAL_PRO...
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ?
readcros_3d_3.m readcros1.m T1_sn_lk.dat
1 T1_sn
2 0.200000
3 12
4 774
5 2
6 0
7 Surface Electrodes
8 6
9 -0.200 0
10 0.000 0
11 0.200 0
12 0.400 0
13 0.600 0
14 0.800 0
15 Borehole 1
16 12
17 0.000 0.100
18 0.000 0.300
19 0.000 0.500
20 0.000 0.700
21 0.000 0.900
22 0.000 1.100
23 0.000 1.300
24 0.000 1.500
25 0.000 1.700
26 0.000 1.900
27 0.000 2.100
28 0.000 2.300
29 Borehole 2
30 12
31 0.600 0.100
32 0.600 0.300
33 0.600 0.500
34 0.600 0.700
35 0.600 0.900
36 0.600 1.100
37 0.600 1.300
38 0.600 1.500
39 0.600 1.700
40 0.600 1.900
41 0.600 2.100
42 0.600 2.300
43 Measured Data
44 4 0.000000 0.100000 0.000000 1.100000 0.000000 0.300000 0.000000 0.500000 22.595727
45 4 0.000000 0.100000 0.000000 2.100000 0.000000 0.300000 0.000000 0.700000 25.239445
46 4 0.000000 0.100000 0.600000 0.100000 0.000000 0.300000 0.000000 0.500000 23.294541
47 4 0.000000 0.100000 0.600000 0.100000 0.000000 0.500000 0.000000 1.300000 30.381516
48 4 0.000000 0.100000 0.600000 0.100000 0.000000 1.300000 0.000000 1.500000 30.214219
49 4 0.000000 0.100000 0.600000 0.100000 0.000000 1.500000 0.000000 1.700000 32.575835
50 4 0.000000 0.100000 0.600000 0.100000 0.000000 1.700000 0.000000 2.100000 22.997892
51 4 0.000000 0.100000 0.600000 0.100000 0.000000 1.900000 0.000000 2.300000 22.399326
Normal text file length: 65428 lines: 818 Ln:1 Col:1 Sel:0|0 UNIX UTF-8 w/o BOM INS

```

Σχήμα 23: Μορφή του αρχείου dat για μια τυπική περίπτωση τομογραφικών δεδομένων μεταξύ δύο κατακόρυφων γεωτρήσεων το οποίο μπορεί να εισαχθεί για αντιστροφή στο πρόγραμμα RES2DINV. Φαίνονται οι συντεταγμένες των ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε κάθε γεώτρηση και η αλληλουχία των μετρήσεων, όπου σε κάθε σειρά δίνονται οι συντεταγμένες X, Z των ηλεκτροδίων A, B, M, N και η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



```

D:\PROJECTS\KRHPIS_2013-2015_KRHPIS_PEFIKA\YLOPOIISI\Field_Experimental_Tank\Test_Site_Heraklio_October2015\process\FINAL_PROC...
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ?
readcros_3d_3.m readcros1.m T1_sn_ik.dat T1_sn.a2d
1 1.000
2 T1_sn
3 2
4 b1
5 0 0 0
6 0 0
7 b2
8 0.600000 0 0
9 0.600000 0
10 24
11 1 0.000 -0.100 1
12 2 0.000 -0.300 1
13 3 0.000 -0.500 1
14 4 0.000 -0.700 1
15 5 0.000 -0.900 1
16 6 0.000 -1.100 1
17 7 0.000 -1.300 1
18 8 0.000 -1.500 1
19 9 0.000 -1.700 1
20 10 0.000 -1.900 1
21 11 0.000 -2.100 1
22 12 0.000 -2.300 1
23 13 0.600 -0.100 2
24 14 0.600 -0.300 2
25 15 0.600 -0.500 2
26 16 0.600 -0.700 2
27 17 0.600 -0.900 2
28 18 0.600 -1.100 2
29 19 0.600 -1.300 2
30 20 0.600 -1.500 2
31 21 0.600 -1.700 2
32 22 0.600 -1.900 2
33 23 0.600 -2.100 2
34 24 0.600 -2.300 2
35 0
36 774 0
37 1 6 2 3 22.595727
38 1 11 2 4 25.239445
39 1 13 2 3 23.294541
40 1 13 3 7 30.381516
41 1 13 7 8 30.214219
42 1 13 8 9 32.575835
43 1 13 9 11 22.997892
44 1 13 10 12 22.399326
45 1 13 12 14 24.359908
46 1 13 14 15 22.232360
47 1 13 15 16 24.358466
48 1 14 2 3 23.060744
49 1 14 3 7 29.783914
50 1 14 7 8 35.168184
51 1 14 8 9 38.374613
Normal text file length: 16340 lines: 811 Ln: 1 Col: 1 Sel: 0 | 0 UNIX UTF-8 w/o BOM INS

```

Σχήμα 24: Μορφή του αρχείου a2d για μία τυπική περίπτωση τομογραφικών δεδομένων μεταξύ δύο κατακόρυφων γεωτρήσεων το οποίο μπορεί να εισαχθεί για αντιστροφή στο πρόγραμμα DC_2DPRO. Φαίνονται οι συντεταγμένες των ηλεκτροδίων που βρίσκονται σε κάθε γεώτρηση και η αλληλουχία των μετρήσεων, όπου σε κάθε σειρά η αρίθμηση των ηλεκτροδίων A, B, M, N και η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σχετικά με τα τρισδιάστατα τομογραφικά δεδομένα μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων (W-E-S-N) ακολουθήθηκε παρόμοια αλλά ελαφρά διαφοροποιημένη διαδικασία. Από τα αντίστοιχα bin 3D αρχεία έγινε εξαγωγή σε ascii txt αρχεία μόνο των παραμέτρων που αντιστοιχούσαν στις X, Y, Z συντεταγμένες των A, B, M, N ηλεκτροδίων, της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, της έντασης του ρεύματος και της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού (Σχήμα 25). Στη συνέχεια με την χρήση της εφαρμογής **readcros_3d_3.m** και των συντεταγμένων των ηλεκτροδίων μορφοποιήθηκαν τα αντίστοιχα αρχεία που θα μπορούσαν να εισαχθούν για αντιστροφή στο λογισμικό RES3DINVx64.

```

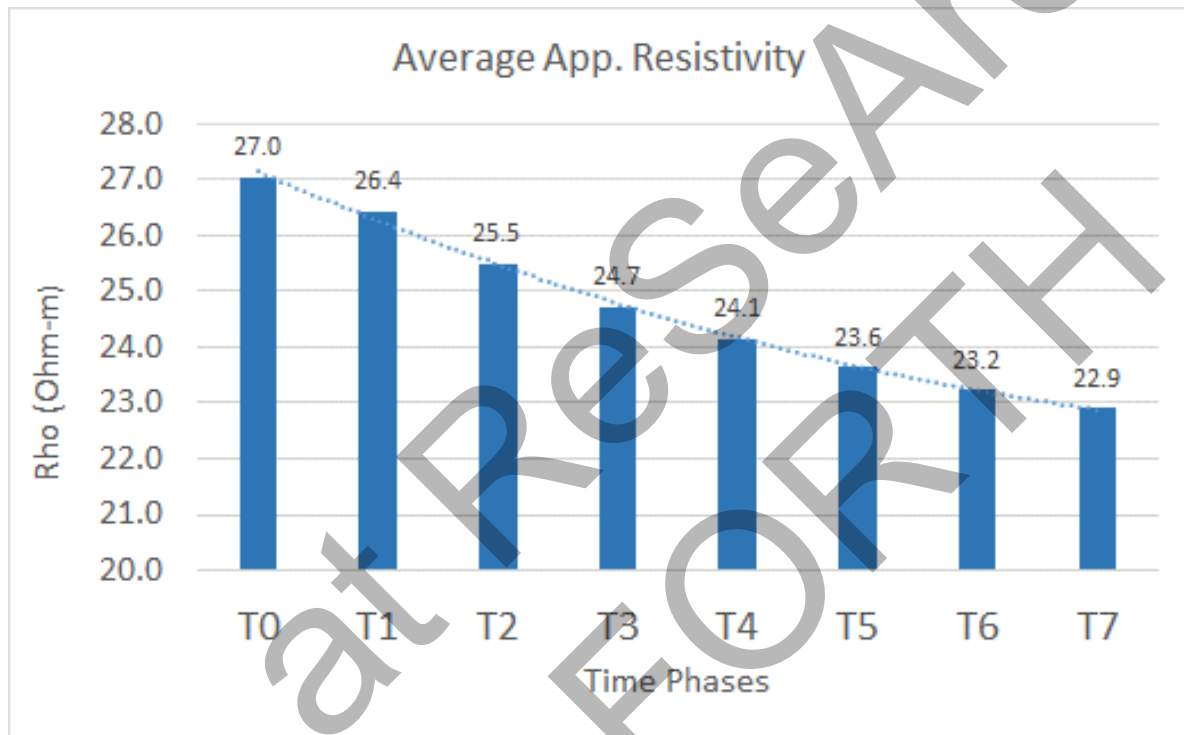
1 Spa.1 Spa.2 Spa.3 Spa.4 Rho Vp In Spa.5 Spa.6 Spa.7 Spa.8 Spa.9 Spa.10 Spa.11 Spa.12
2 0.00 0.00 0.00 0.00 17.43 14.527 1.796 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -1.10 -0.30 -0.50
3 0.00 0.00 0.00 0.00 17.42 -14.561 1.800 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -1.10 -0.50 -0.30
4 0.00 0.00 0.00 0.00 17.44 14.546 1.796 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -1.10 -0.30 -0.50
5 0.00 0.00 0.00 0.00 19.20 17.059 1.599 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -2.10 -0.30 -0.70
6 0.00 1.00 0.00 0.00 18.09 -117.133 16.624 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.10 -0.50 -0.30
7 0.00 1.00 0.00 1.00 18.11 385.222 16.624 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.10 -0.30 -0.30
8 0.00 1.00 1.00 1.00 15.68 -101.552 16.624 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.10 -0.30 -0.50
9 0.00 1.00 1.00 1.00 12.83 -25.870 16.624 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.10 -0.50 -0.70
10 0.00 1.00 1.00 1.00 16.26 -14.626 16.624 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.10 -0.70 -0.90
11 0.00 1.00 0.00 0.00 17.92 76.431 10.800 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.30 -0.30 -0.50
12 0.00 1.00 0.00 1.00 14.20 136.439 10.800 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.30 -0.50 -0.50
13 0.00 1.00 1.00 1.00 8.50 -35.508 10.800 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.30 -0.50 -0.70
14 0.00 1.00 1.00 1.00 11.27 -14.657 10.800 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.30 -0.70 -0.90
15 0.00 1.00 0.00 0.00 17.81 842.771 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.30 -0.50
16 0.00 1.00 0.00 0.00 22.13 489.749 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.50 -0.90
17 0.00 1.00 0.00 0.00 29.80 100.198 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.90 -1.10
18 0.00 1.00 0.00 0.00 36.60 115.609 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -1.10 -1.90
19 0.00 1.00 0.00 0.00 150.05 15.261 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -1.90 -2.30
20 0.00 1.00 0.00 1.00 15.83 436.629 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -2.30 -0.10
21 0.00 1.00 1.00 1.00 6.63 313.504 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.10 -0.30
22 0.00 1.00 1.00 1.00 66.43 153.570 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.30 -0.70
23 0.00 1.00 1.00 1.00 10.71 -487.504 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.70 -0.90
24 0.00 1.00 1.00 1.00 14.35 -204.787 118.013 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.50 -0.90 -1.10
25 0.00 1.00 0.00 0.00 17.73 2112.092 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -0.30 -0.50
26 0.00 1.00 0.00 0.00 23.02 1555.880 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -0.50 -1.10
27 0.00 1.00 0.00 0.00 26.31 117.537 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -1.10 -1.30
28 0.00 1.00 0.00 0.00 42.76 84.688 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -1.30 -1.50
29 0.00 1.00 0.00 0.00 81.87 59.336 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -1.50 -1.70
30 0.00 1.00 0.00 0.00 -1369.77 55.544 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -1.70 -2.10
31 0.00 1.00 0.00 0.00 -121.34 -19.207 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -2.10 -1.90
32 0.00 1.00 0.00 0.00 -79.35 33.991 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -1.90 -2.30
33 0.00 1.00 0.00 1.00 18.34 506.295 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -2.30 -0.10
34 0.00 1.00 1.00 1.00 6.86 272.992 293.338 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.70 -0.10 -0.30
35 0.00 1.00 0.00 0.00 17.75 2671.053 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -0.30 -0.50
36 0.00 1.00 0.00 0.00 23.18 2105.708 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -0.50 -1.10
37 0.00 1.00 0.00 0.00 24.42 163.757 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -1.10 -1.30
38 0.00 1.00 0.00 0.00 40.49 113.925 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -1.30 -1.50
39 0.00 1.00 0.00 0.00 101.89 75.517 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -1.50 -1.70
40 0.00 1.00 0.00 0.00 -68.06 62.491 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -1.70 -2.10
41 0.00 1.00 0.00 0.00 -29.20 -19.426 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -2.10 -1.90
42 0.00 1.00 0.00 0.00 -23.45 34.120 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -1.90 -2.30
43 0.00 1.00 0.00 1.00 15.47 111.701 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -2.30 -0.10
44 0.00 1.00 1.00 1.00 6.55 167.089 367.807 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -0.90 -0.10 -0.30
45 0.00 1.00 0.00 0.00 17.82 4082.639 558.625 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -1.10 -0.30 -0.50
46 0.00 1.00 0.00 0.00 22.08 3672.222 558.625 0.30 0.30 0.30 0.30 -0.10 -1.10 -0.50 -1.30

```

Σχήμα 25: Τυπική μορφή του αρχείου txt το οποίο εξαγεται από το αρχικό bin αρχείο μέσω του Prosys II και αφορά τα 3D τομογραφικά δεδομένα για τις κατακόρυφες γεωτρήσεις W-E, S-N.



Κατά την μετατροπή και δημιουργία των τελικών αρχείων πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό φιλτράρισμα των δεδομένων μέσω των εφαρμογών **readcros1.m** και **readcros_3d_3.m** όπου αποκόπηκαν οι μετρήσεις με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μικρότερες του 1 Ohm-m και μεγαλύτερες των 100 Ohm-m. Για τις διαφορετικές φάσεις του πειράματος υπολογίστηκε η μέση τιμή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τις μετρήσεις που αντιστοιχούσαν στα τρισδιάστατα πρωτόκολλα και διαπιστώθηκε μία ελάττωση της αντίστασης της τάξης των του 15%. Είναι λοιπόν προφανές ότι η ροή του αγώγιμου υγρού μέσα στον αμμούχο σχηματισμό του σκάμματος αντικατοπτρίζεται στην σχετική αυτή ελάττωση της μέσης τιμής της μετρούμενης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 26).

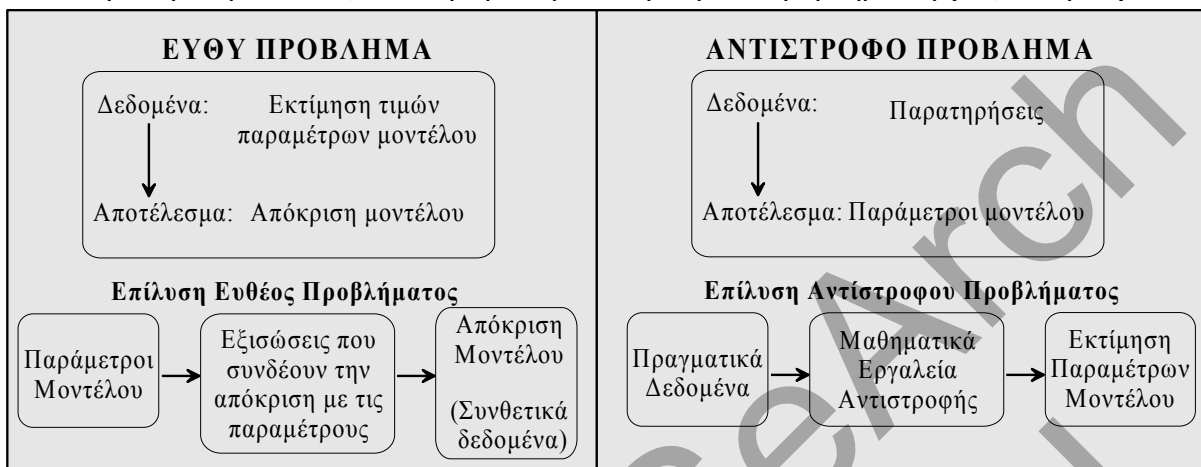


Σχήμα 26: Μεταβολή της μέσης τιμής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους κατά την διάρκεια των διαφορετικών φάσεων παρακολούθησης του πειράματος στο υπαίθριο πεδίο δοκιμών.

5.2 Αντιστροφή τομογραφικών δεδομένων

Ως “αντιστροφή” ή “αντίστροφο πρόβλημα” μπορεί να οριστεί η διαδικασία καθορισμού των παραμέτρων κάποιων μοντέλων του υπεδάφους (αντίσταση), με τη χρήση ορισμένων μετρήσιμων ποσοτήτων (διαφορά δυναμικού ή φαινόμενη αντίσταση), οι οποίες έχουν την δυνατότητα να περιγράψουν τα παρατηρούμενα ή πραγματικά δεδομένα μέσα στα όρια μιας συγκεκριμένης ακρίβειας (Σχήμα 27). Η διαδικασία της αντιστροφής συνδέεται άμεσα με την επίλυση του ευθέως προβλήματος. Δεδομένων κάποιων αρχικών πληροφοριών για τις τιμές των παραμέτρων που αφορούν το μοντέλο της γης και χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν μία φυσική διαδικασία, υπολογίζονται τιμές που αντιστοιχούν στην απόκριση του μοντέλου (συνθετικά δεδομένα). Στην γενική περίπτωση το μοντέλο της γης που χρησιμοποιείται για την διαδικασία αυτή αντιστοιχεί σε μία τρισδιάστατη κατανομή των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους. Γενικά το ευθύ πρόβλημα στην γεωφυσική περιλαμβάνει την μελέτη και επίλυση των πολύπλοκων μαθηματικών σχέσεων που περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο, με τελικό στόχο τον υπολογισμό και την εκτίμηση της απόκρισης μοντέλων γης, τα οποία έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και παραμέτρους. Είναι προφανές ότι πρέπει να

επιλεγεί μία κατάλληλη διαδικασία επίλυσης του ευθέος προβλήματος, η οποία να μπορεί να περιγράψει με επάρκεια τις παρατηρήσεις του κάθε πειράματος. Επίσης σημαντική είναι η γνώση των διαφορετικών παραμέτρων που αποτελούν το μοντέλο αλλά και η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου, ανάλογα με τις απαιτήσεις του προβλήματος (1D, 2D ή 3D).



Σχήμα 27: Βασικά στάδια επίλυσης του ευθέου και του αντίστροφου προβλήματος.

Ο όρος ευθύ γεωηλεκτρικό πρόβλημα παραπέμπει στον υπολογισμό των συνθετικών φαινομένων αντιστάσεων που θα προκαλούσε ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο με γνωστή κατανομή των πραγματικών αντιστάσεων, για μία δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων. Ουσιαστικά, θεωρώντας μία σημειακή πηγή I σε ένα σημείο του χώρου (x_s, y_s, z_s) γίνεται προσπάθεια να βρεθούν βέλτιστες μεθοδολογίες για την πιστότερη επίλυση της εξίσωσης του Poisson
$$\left[-\nabla \left(\sigma_{(x,y,z)} \nabla V_{(x,y,z)} \right) = I \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \right]$$
, με τελικό σκοπό τον υπολογισμό του δυναμικού V σε διαφορετικά σημεία του χώρου. Το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση με αναλυτικό τρόπο είτε χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Η προσέγγιση του προβλήματος με αναλυτικές μεθόδους σημαίνει την άμεση επίλυση της παραπάνω εξίσωσης. Δυστυχώς όμως, αναλυτικές λύσεις της διαφορικής εξίσωσης του Poisson υπάρχουν μόνο για πολύ απλά μοντέλα, όπως δύο οριζόντιων ή κατακόρυφων στρωμάτων ή θαμμένων δομών με σχήμα σφαίρας (Telford 1990). Ένας πρακτικός αλγόριθμος επίλυσης του τρισδιάστατου ευθέου γεωηλεκτρικού προβλήματος θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να περιγράψει με λεπτομέρεια τις έντονες ανομοιογένειες που παρουσιάζονται στην κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται πλέον αριθμητικές μέθοδοι για την επίλυση του ευθέου γεωηλεκτρικού προβλήματος, κάνοντας χρήση των μεθόδων των Ολοκληρωτικών Εξισώσεων, των Πεπερασμένων Διαφορών και των Πεπερασμένων Στοιχείων (Boulianger and Chouteau 2005, Dey and Morisson 1979, Pridmore et al. 1981).

Το μη-γραμμικό αντίστροφο γεωηλεκτρικό πρόβλημα προσεγγίζεται μέσω της επαναληπτικής επίλυσης του γραμμικού συστήματος $\mathbf{J}dx = \mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{x}) \Leftrightarrow \mathbf{J}dx = d\mathbf{y}$ με σκοπό τον υπολογισμό του διανύσματος των διορθώσεων του μοντέλου της αντίστασης. Από μαθηματικής σκοπιάς, το παραπάνω πρόβλημα διατυπώνεται ως μία διαδικασία βελτιστοποίησης, μέσω της οποίας αναζητείται το διορθωμένο μοντέλο αντίστασης, που ελαχιστοποιεί την διαφορά και δίνει την καλύτερη ταύτιση μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών φαινομένων αντιστάσεων.

Ένας ιδιαίτερα δημοφιλής και αποτελεσματικός τρόπος, που μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των άπειρων λύσεων του αντίστροφου προβλήματος αποτελεί η εισαγωγή συγκεκριμένων περιορισμών (π.χ εξομάλυνσης). Ο τρόπος αυτός συμβάλει επίσης στον

καθορισμό ενός ρεαλιστικού, γεωηλεκτρικού μοντέλου, το οποίο δεν αποτελεί μόνο μία μαθηματική λύση αλλά επιπλέον ανταποκρίνεται και στην γεωλογική πραγματικότητα. Οι περιορισμοί αυτοί μπορεί να προέρχονται από προϋπάρχουσες πληροφορίες ή γενικές εκτιμήσεις για το πραγματικό μοντέλο. Γενικά τα κριτήρια αυτά εκφράζονται με μία μαθηματική σχέση, που στα πλαίσια ενός επαναληπτικού αλγορίθμου αντιστροφής έχουν σκοπό να περιορίσουν το διάνυσμα βελτίωσης του γεωηλεκτρικού μοντέλου σε μία εκ των προτέρων περιοχή εμπιστοσύνης έτσι ώστε να αποφευχθούν μη ρεαλιστικές λύσεις.

Έτσι λοιπόν η παραπάνω προοπτική, μπορεί να μετατραπεί σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης, όπου θα ελαχιστοποιείται μία συνάρτηση Φ , που θα βασίζεται στον βαθμό ταύτισης μεταξύ πραγματικών και συνθετικών φαινομένων αντιστάσεων (Φ_d) και στα χαρακτηριστικά που επιθυμείται να έχει το τελικό μοντέλο (Φ_m) μέσω μιας παραμέτρου κανονικοποίησης λ (Tikhonov et al. 1990),

$$\Phi = \Phi_d + \lambda \Phi_m \rightarrow \min$$

Η παράμετρος κανονικοποίησης λ (ή πολλαπλασιαστής Lagrange) εξαρτάται από το επίπεδο του θορύβου που υπάρχει στα δεδομένα και τα όρια που κυμαίνεται η πραγματική λύση, τα οποία όμως δεν είναι γνωστά εκ των προτέρων. Η παράμετρος αυτή ελέγχει και εξισορροπεί την σχέση μεταξύ των συναρτήσεων Φ_d και Φ_m , που καθορίζουν τους περιορισμούς που εισάγονται στα δεδομένα και στο μοντέλο αντίστοιχα. Μικρές τιμές του λ έχουν ως αποτέλεσμα η συνάρτηση Φ_m να παρουσιάζεται σχεδόν ανάλογη της συνάρτησης Φ_d , ενώ αντίθετα η χρήση μεγάλων τιμών για την παράμετρο λ έχει ως αποτέλεσμα να κυριαρχούν τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά του μοντέλου κατά την διάρκεια της αντιστροφής.

Χρησιμοποιώντας το L_2 -μέτρο των ελαχίστων τετραγώνων οι συναρτήσεις Φ_d και Φ_m παίρνουν την παρακάτω μορφή

$$\begin{aligned}\Phi_d &= \|\mathbf{D}(\mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{x}))\|^2 = (\mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{x}))^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} (\mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{x})) \\ \Phi_m &= \|\mathbf{C}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^0)\|^2 = (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0)^T \mathbf{C}^T \mathbf{C} (\mathbf{x} - \mathbf{x}^0)\end{aligned}\quad (1)$$

όπου το διάνυσμα \mathbf{x}^0 , $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^N$ είναι ένα αρχικό μοντέλο αντίστασης, το οποίο είτε αντιπροσωπεύει προϋπάρχουσες πληροφορίες είτε μπορεί να είναι ένα μοντέλο ομογενούς γης.

Θέτοντας την παράγωγο της συνάρτησης Φ ως προς το μοντέλο \mathbf{x} ίση με μηδέν ($\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{x}} = 0$) και πραγματοποιώντας τις μαθηματικές πράξεις προκύπτει ότι οι κανονικές εξισώσεις και η βελτίωση του μοντέλου της αντίστασης κατά την k επανάληψη θα ισούται αντίστοιχα με

$$\begin{aligned}(\mathbf{J}_k^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) d\mathbf{x}_k &= (\mathbf{J}_k^T \mathbf{D}^T \mathbf{D}) d\mathbf{y}_k - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}^0) \Leftrightarrow \\ d\mathbf{x}_k &= (\mathbf{J}_k^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} [(\mathbf{J}_k^T \mathbf{D}^T \mathbf{D}) d\mathbf{y}_k - \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} (\mathbf{x}_k - \mathbf{x}^0)] \\ d\mathbf{y}_k &= \mathbf{y} - \mathbf{G}(\mathbf{x}_k)\end{aligned}\quad (2)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ο πίνακας εξομάλυνσης \mathbf{C} αποτελεί μία πεπερασμένη έκφραση της δευτέρας χωρικής παραγωγού και περιγράφει την ομαλή σχέση μεταξύ των παραμέτρων της αντίστασης του μοντέλου, \mathbf{J} είναι ο Ιακωβιανός πίνακας, $d\mathbf{x}_k$ η βελτίωση του γεωηλεκτρικού μοντέλου, $\mathbf{G}(\mathbf{x}_k)$ οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις για κάποιο μοντέλο



αντίστασης \mathbf{x}_k , \mathbf{D} είναι ο πίνακας στατιστικών βαρών που εξαρτώνται από την ακρίβεια κάθε μέτρησης και \mathbf{x}^0 ένα αρχικό μοντέλο αντίστασης.

Στην περίπτωση επεξεργασίας διαχρονικών τομογραφικών χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της σύγχρονης χρονοεξαρτημένης αντιστροφής, όπου εισάγεται η έννοια της ταυτόχρονης αντιστροφής όλων των διαχρονικών δεδομένων τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο (4D inversion, Kim et al 2009). Για την σταθεροποίηση της χρονοεξαρτημένης αντιστροφής εισάγονται δύο τύποι κανονικοποίησης στο χώρο και στο χρόνο, οπότε η εξίσωση (2) των ελαχίστων τετραγώνων στην περίπτωση ενσωμάτωσης διαχρονικών δεδομένων γίνεται:

$$(\mathbf{J}_k^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{J}_k + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} + \sigma \mathbf{M}^T \mathbf{M}) \mathbf{d}\mathbf{x}_k = \mathbf{J}_k^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{d}\mathbf{y}_k - (\lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C} - \sigma \mathbf{M}^T \mathbf{M})(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_0) \quad (3).$$

Ο πίνακας \mathbf{M} έχει ένα διαγώνιο και ένα μη-διαγώνιο στοιχείο με τιμές 1 και -1 και εφαρμόζεται στα διαδοχικά μοντέλα αντιστροφής σε κάθε φάση συσχετίζοντας τους τους παραμέτρους σε δύο διαδοχικές χρονικές φάσεις. Ο πολλαπλασιαστής σ ελέγχει την κανονικοποίηση στο χρόνο επηρεάζοντας το βαθμό αλλαγής του μοντέλου στον χρόνο.

Για την επεξεργασία των δισδιάστατων τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των οριζόντιων και W-E, S-N κατακόρυφων γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα DC_2DPRO (Kim 2005). Τα τρισδιάστατα δεδομένα μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων προσεγγίστηκαν με το λογισμικό RES3DINVx64 (Geotomosoft Solutions 2015) για την ανακατασκευή του διαχρονικών τρισδιάστατων γεωηλεκτρικών μοντέλων του υπεδάφους.

6 Αποτελέσματα επεξεργασίας πειραματικών τομογραφικών μετρήσεων

Η παράγραφος αυτή εστιάζεται στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους επεξεργασίας των τομογραφικών δεδομένων. Αρχικά παρατίθενται τα συγκριτικά αποτελέσματα των μοντέλων που προέκυψαν από την χρήση του πλήρους και του βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου μετρήσεων σε τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια δίνονται τα γεωηλεκτρικά μοντέλα αντιστροφής που προέκυψαν κατά την διαχρονική παρακολούθηση τους ροής του αγώγιμου υγρού στο πεδίο δοκιμών μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων σε δύο και τρεις διαστάσεις και μεταξύ των οριζοντίων γεωτρήσεων.

6.1 Σύγκριση γεωηλεκτρικών μοντέλων αντιστροφής πλήρους και βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου

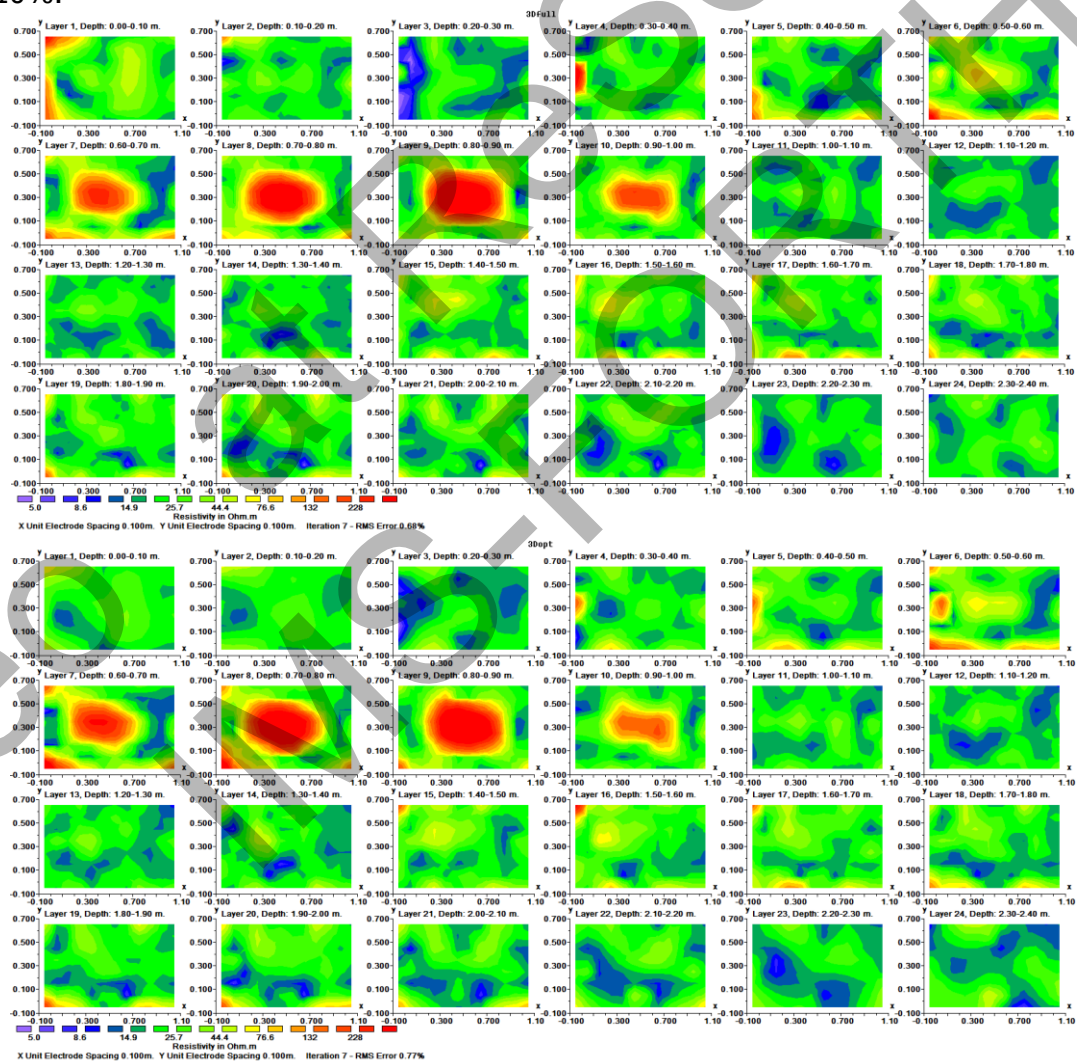
Τα τρισδιάστατα τομογραφικά δεδομένα που συλλέχθηκαν με το πλήρες και το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο αντίστοιχα πριν την έναρξη του πειράματος παρακολούθησης επεξεργάστηκαν με το RES3DINVx64, χρησιμοποιώντας ταυτόσημες παραμέτρους μοντελοποίησης και αντιστροφής. Τα τρισδιάστατα μοντέλα αντιστροφής που προέκυψαν από το πλήρες και το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο παρουσιάζονται συγκριτικά σαν οριζόντιες (XY) τομές αυξανόμενου βάθους (Σχήμα 28), κατακόρυφες τομές (XZ) κατά μήκους τους διεύθυνσης W-E (Σχήμα 29) και κατακόρυφες τομές (YZ) κατά μήκους τους διεύθυνσης S-N (Σχήμα 30). Αντίστοιχα η ισοεπιφάνεια των 71 Ohm-m η οποία προσομοιώνει τον αμμούχο στόχο μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων τόσο με το πλήρες όσο και με το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο φαίνεται στο Σχήμα 31, όπου παρουσιάζεται επίσης το περίγραμμα και το σχήμα του κουτιού μέσα στο οποίο τοποθετήθηκε ο αμμούχος σχηματισμός.

Η ποιότητα των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης ήταν εξαιρετική κάτι το οποίο αποτυπώθηκε και στα τελικά σφάλματα των μοντέλων αντιστροφής μετά από 7 επαναλήψεις, τα οποία ήταν 0.68% και 0.77% αντίστοιχα για το πλήρες και βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο. Το τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο αντιστροφής του στόχου είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τον πραγματικό αμμούχο σχηματισμό που τοποθετήθηκε μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων. Το μοντέλο αντιστροφής δίνει ένα πάχος 40 εκατοστών για τον στόχο, που είναι σε συμφωνία με το πραγματικό του πάχος. Η αντιστροφή υπερεκτίμησε την πραγματική κατακόρυφη θέση κατά 5 εκατοστά (~8%) καθώς στις οριζόντιες τομές (Σχήμα 28), η πάνω επιφάνεια του στόχου βρίσκεται σε βάθος 0.6 μέτρα



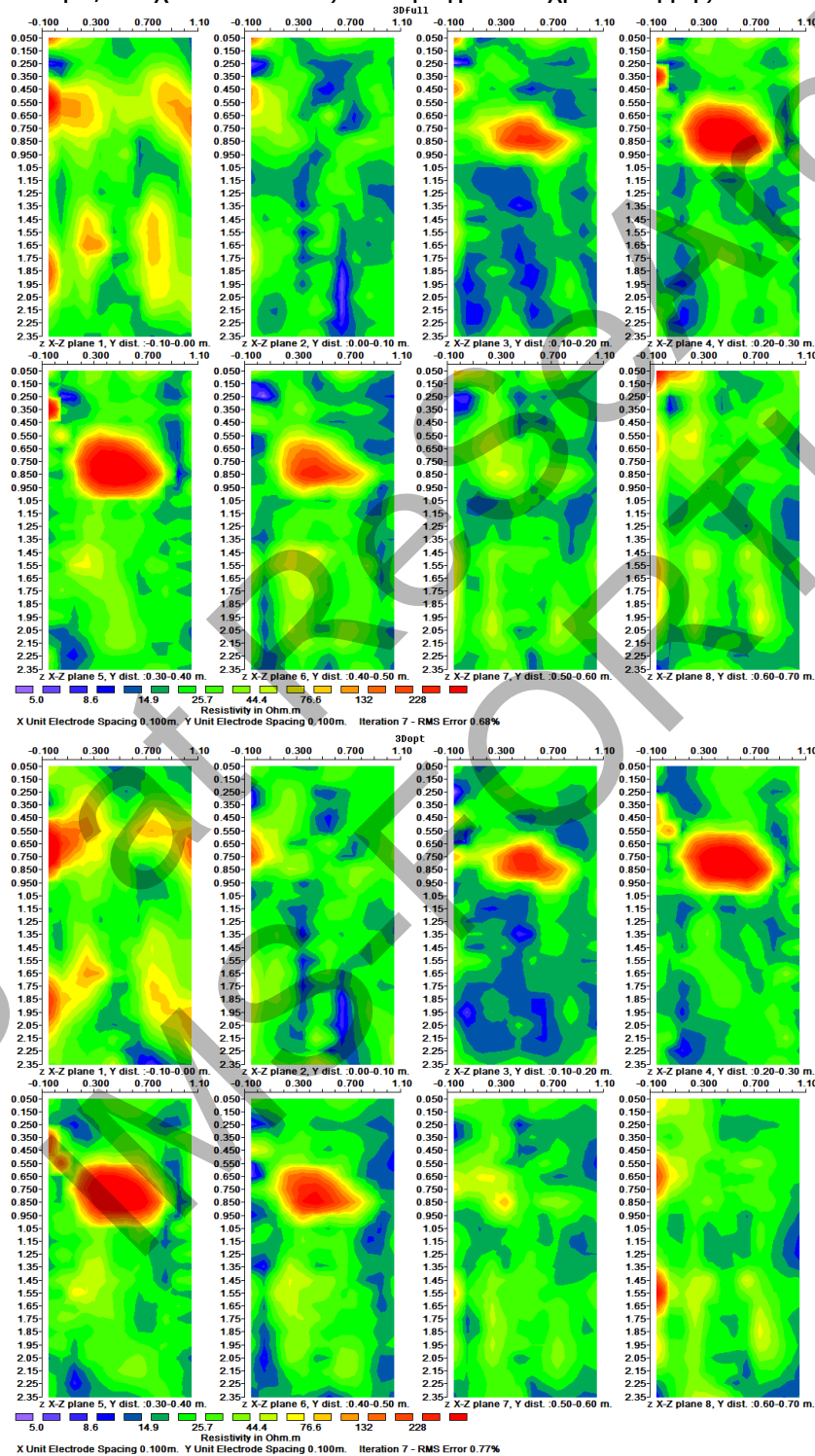
από την επιφάνεια του εδάφους και φτάνει σε βάθος 1 μέτρο, ενώ ο στόχος βρίσκεται σε βάθος μεταξύ 0,55 έως 0,95 μέτρα (Πίνακας 3). Αυτό οφείλεται στην παραμετροποίηση του υπεδάφους το οποίο διαιρέθηκε σε κατακόρυφα στρώματα με πάχος 0,1 μέτρο. Τα μοντέλα αντιστροφής ανακατασκευάσαν την οριζόντια διάσταση κατά την διεύθυνση S-N η οποία ήταν 0,4 μέτρα, αλλά υποεκτιμούν κατά περίπου 10% την οριζόντια διάσταση κατά την διεύθυνση W-E. Σημαντική πληροφορία σχετικά με την ανάλυση του τρισδιάστατου τομογραφικού μοντέλου αποτελεί η χαρτογράφηση του σκαλοπατιού που είχε ο αμμούχος σχηματισμός, ο οποίος διαγράφεται στις κατακόρυφες ΧΖ (W-E) τομές και ιδίως στα επίπεδα Υ (North) 0,1 έως 0,5 μέτρα.

Ο ακόρεστος αμμούχος στόχος εγγράφεται και με τα δύο πρωτόκολλα σαν ένα σώμα υψηλής αντίστασης με μέση τιμή 153 Ohm-m για το πλήρες και 124 Ohm-m για το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο. Το υλικό πλήρωσης του σκάμματος που κάλυπτε τον αμμούχο στόχο ανακατασκευάστηκε από το μοντέλα αντιστροφής του πλήρους και του βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου με τιμές αντίστασης 30 Ohm-m και 27 Ohm-m αντίστοιχα, οι οποίες είναι τυπικές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης τους μάργας που υπάρχει στην περιοχή. Η μέση τιμή της σχετικής διαφοράς μεταξύ των τιμών τους αντίστασης του μοντέλου αντιστροφής με το πλήρες πρωτόκολλο και το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο ήταν τους τάξης του 10%.

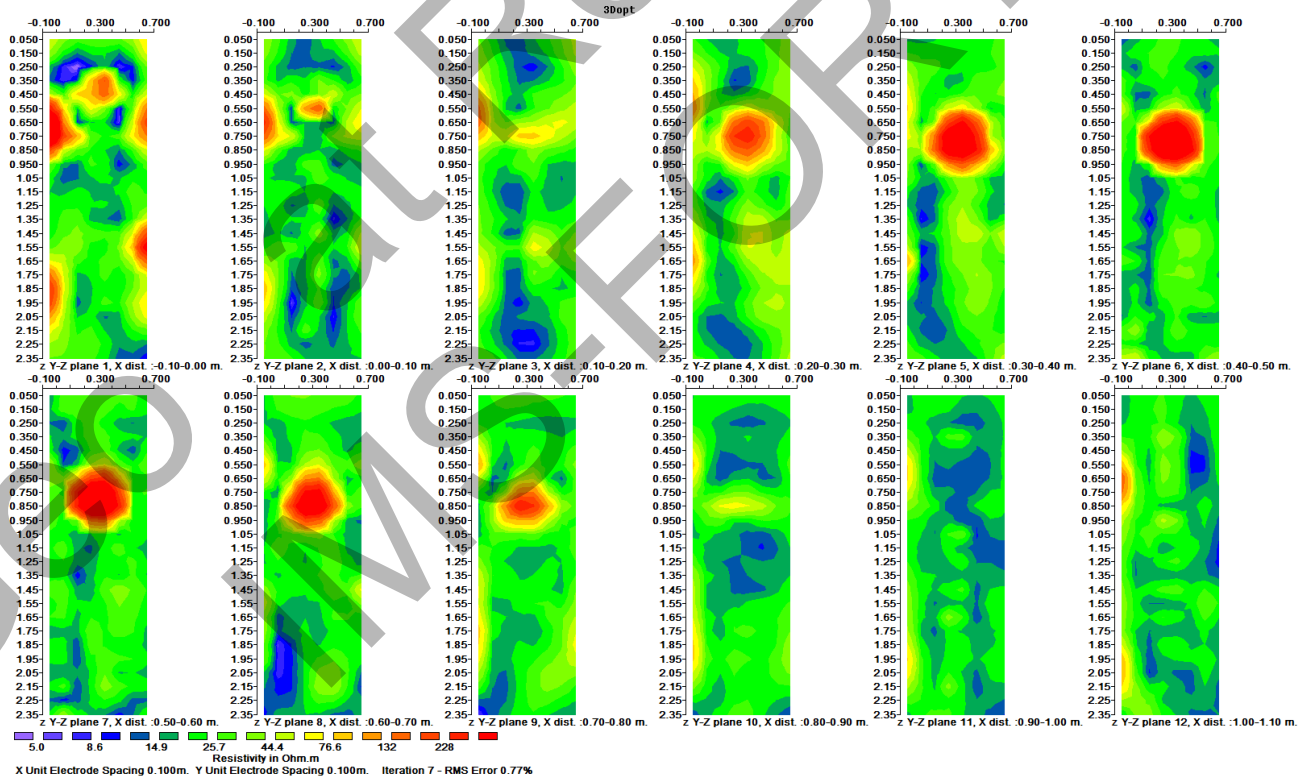
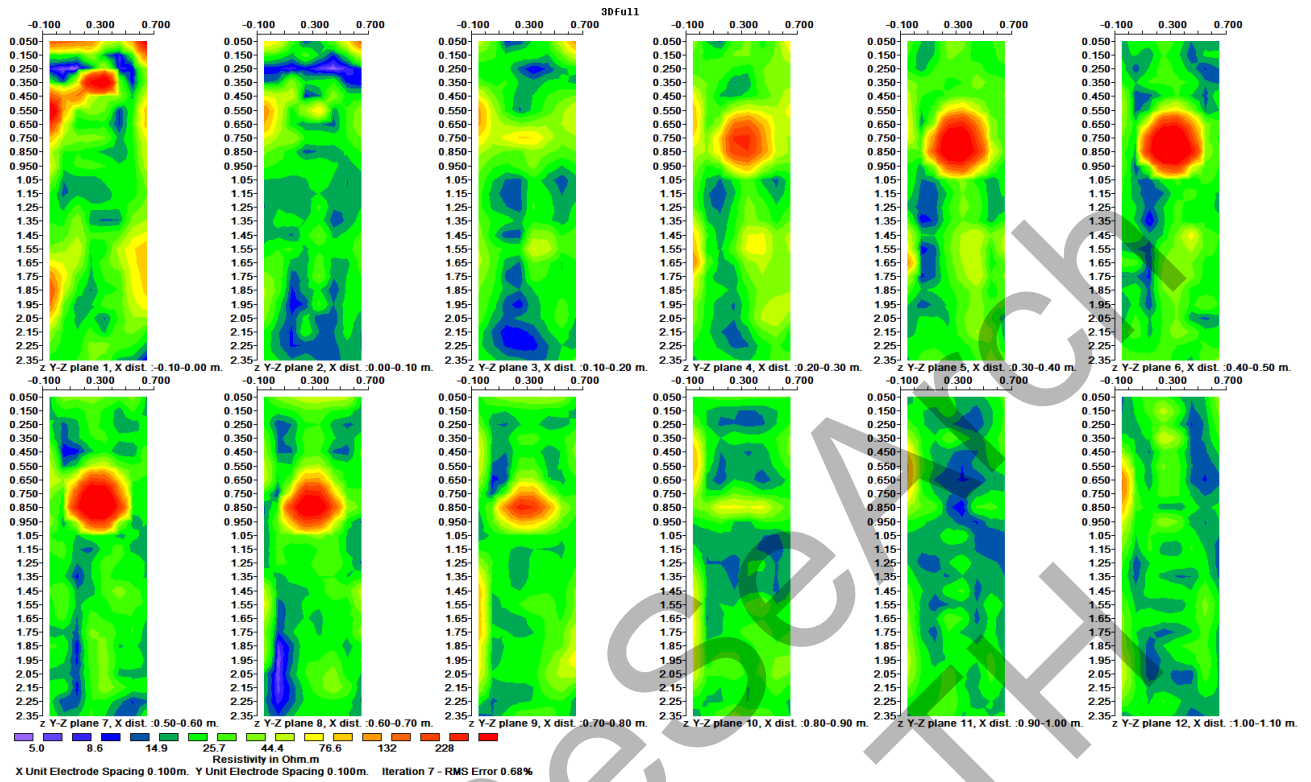


Σχήμα 28: Οριζόντιες τομές (XY) σε διαφορετικά βάθη οι οποίες εξήχθησαν από τα τρισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα αντιστροφής τους προέκυψαν από το πλήρες (πάνω) και το βελτιστοποιημένο (κάτω) πρωτόκολλο μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων.

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο μπορεί να αναπαραστήσει και να ανακατασκευάσει ένα αξιόπιστο τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο το οποίο έχει συγκρίσιμη ομοιότητα με το αντίστοιχο μοντέλο το οποίο προήλθε από το πλήρες πρωτόκολλο. Άρα το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο δύναται να χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια του κύριου πειράματος διαχρονικής παρακολούθησης του αγωγίμου υγρού μέσα στον αμμώχο σχηματισμό, ελαχιστοποιώντας τον πραγματικό χρόνο λήψης των δεδομένων

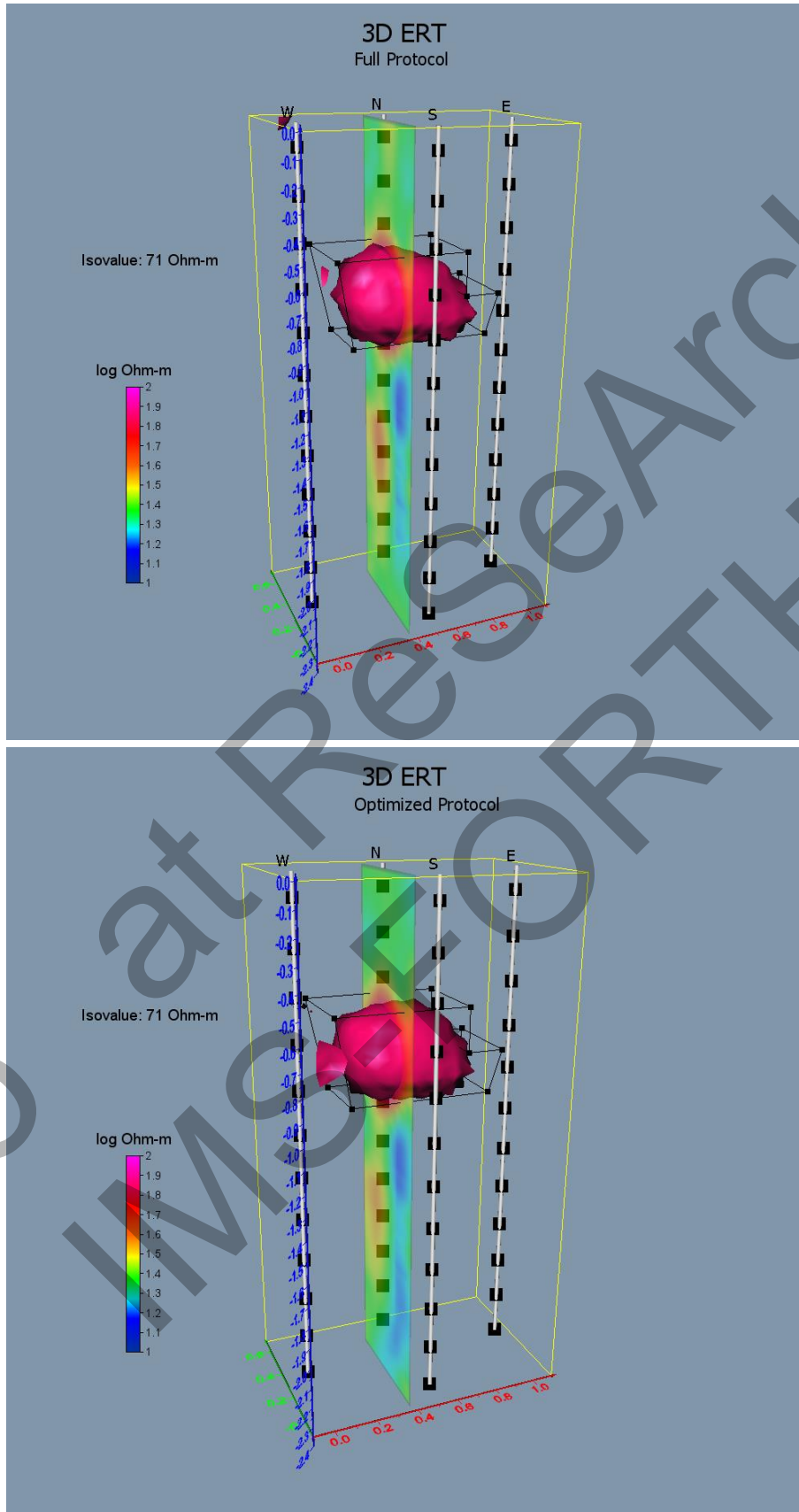


Σχήμα 29: Κατακόρυφες τομές (XZ) κατά μήκος του επιπέδου W-E που εξήχθησαν από τα τρισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα αντιστροφής τους προέκυψαν από το πλήρες (πάνω) και το βελτιστοποιημένο (κάτω) πρωτόκολλο μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων.



Σχήμα 30: Κατακόρυφες τομές (YZ) κατά μήκος του επιπέδου S-N που εξήχθησαν από τα τρισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα αντιστροφής τους προέκυψαν από το πλήρες (πάνω) και το βελτιστοποιημένο (κάτω) πρωτόκολλο μεταξύ των κατακόρυφων γεωηλεκτρικών.





Σχήμα 31: Αναπαράσταση τους τρισδιάστατης ισοεπιφάνειας των 71 Ohm-m που σχετίζεται με τον αμμώχο σχηματισμό που τοποθετήθηκε μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων, τους προέκυψε από την αντιστροφή των δεδομένων με το πλήρες (πάνω) και το βελτιστοποιημένο (κάτω) πρωτόκολλο.

6.2 Εκτίμηση υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφικών σχηματισμών πεδίου δοκιμών

Η εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων των εδαφικών σχηματισμών, όπως για παράδειγμα η υδραυλική αγωγιμότητα, είναι ιδιαίτερα σημαντική στην διαχείριση των υδάτινων πόρων που βρίσκονται σε υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Από την άλλη βέβαια η αξιόπιστη γνώση αυτών των παραμέτρων συνεισφέρει στην πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών μεταφοράς των ρύπων μέσα σε πορώδη σχηματισμούς στο υπέδαφος.

Η εκτίμηση της χωρικής κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας παρουσιάζει συγκεκριμένες δυσκολίες που οφείλονται κυρίως στο μεγάλο εύρος των παρατηρούμενων μετρήσεων των επί τόπου μετρήσεων πεδίου ή τις ελάχιστες ικανοποιητικές εργαστηριακές μετρήσεις (Mendoza et al., 2003). Ο παραδοσιακός τρόπος εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας αποτελεί οι δοκιμές εισπίεσης που πραγματοποιούνται μέσα σε μία γεώτρηση. Το γεγονός της σημειακής πληροφορίας που εξάγεται σε αυτές τους περιπτώσεις σε συνδυασμό με την μικρή πυκνότητα γεωτρήσεων σε μία περιοχή μπορεί να οδηγήσει σε αντιφατικά αποτελέσματα σε σχέση με την μοντελοποίηση των υπόγειων υδραυλικών συστημάτων.

Η άμεση σχέση της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους με το νερό το οποίο ρέει τους πόρους των σχηματισμών έχει χρησιμοποιηθεί στην εξαγωγή σχέσεων συσχετισμού μεταξύ των ηλεκτρικών και των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων στρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα ο νόμος του Archie (Archie 1942) συνδέει την αντίσταση τους κορεσμένου πορώδους μέσου (ρ_0), με το πορώδες (ϕ) του σχηματισμού και την αντίσταση του υγρού (ρ_w) που ρέει μέσα σε αυτόν τον σχηματισμό.

$$\rho_0 = \alpha \rho_w \phi^{-m} \quad (4)$$

όπου το m είναι γνωστός ως παράγοντας τσιμεντοποίησης (cementation factor) και ο συντελεστής α σχετίζεται με το είδος του σχηματισμού. Σε μία πρώτη προσέγγιση οι σταθερές παίρνουν τιμές $\alpha=1$ και $m=2$. Ο λόγος ρ_0/ρ_w αποτελεί τον παράγοντα σχήματος (Formation Factor, Fa). Αναδιατάσσοντας τους όρους της εξίσωσης (4) μπορεί να εξαχθεί η παρακάτω σχέση για την εκτίμηση του πορώδους του υπεδάφους σχηματισμού:

$$\phi = e^{\frac{1}{m} \ln(\alpha) + \frac{1}{m} \ln(1/Fa)} \quad (5).$$

Τέλος με βάση το πορώδες της σχέσης (5) μπορεί εκτιμηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα (κ) από την εξίσωση Kozeny–Carman–Bear που δίνεται από τους Domenico and Schwartz (1990)

$$\kappa = \left(\frac{\delta_w g}{\mu} \right) \left(\frac{d^2}{180} \right) \left[\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \right] \quad (6),$$

όπου d είναι το μέγεθος των κόκκων (σε μέτρα), δ_w η πυκνότητα του υγρού (σε 1000 kg/m³) και μ το ιξώδες (σε 0.0014 kg/m s).

Για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του υλικού πλήρωσης του σκάμματος στο πεδίο δοκιμών και του αμμούχου υλικού που τοποθετήθηκε στο κέντρο του σκάμματος χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της αντίστασης που προέκυψαν από την αντιστροφή του βελτιστοποιημένου πρωτοκόλλου από την φάση T7, όπου είχε ολοκληρωθεί ο κορεσμός της άμμου με το αγωγίμο υγρό. Αυτές οι τιμές της αντίστασης αποτέλεσαν τις αριθμητικές τιμές για την παράμετρο ρ_0 . Καθορίστηκαν δύο βασικές εδαφικές ενότητες: η μία αφορούσε τον αμμούχο σχηματισμό και η άλλη το υλικό πλήρωσης του σκάμματος. Από το τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο απομονώθηκαν οι τιμές των αντιστάσεων που αντιστοιχούσαν σε κάθε μία από τις δύο αυτές βασικές ενότητες.

Ο περιβάλλον χώρος που πλήρωσε το σκάμμα του πεδίου δοκιμών αποτελείτο από μάργα με εκτιμώμενη διάμετρο κόκκων $d = 10^{-5}$ m και αντίσταση του υγρού που έρεε μέσα τους πόρους $\rho_w = 7$ Ohm-m. Αντίστοιχα η διάμετρος των κόκκων του αμμούχου σχηματισμού εκτιμήθηκε στα $d = 2 \times 10^{-4}$ m, ενώ το αγωγίμο υγρό το οποίο διοχετεύτηκε μέσα στην άμμο είχε αντίσταση $\rho_w = 0.5$ Ohm-m.



Με τα παραπάνω δεδομένα και σύμφωνα με τις σχέσεις (5) και (6) η μέση τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για τον μαργαϊκό και αμμούχο σχηματισμό εκτιμήθηκε αντίστοιχα σε 6.5×10^{-6} m/sec και 3.7×10^{-5} m/sec. Οι εκτιμώμενες αυτές μέσες τιμές, που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας, βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις εργαστηριακές μετρήσεις των αντίστοιχων δειγμάτων (Σχήμα 8) που συλλέχθηκαν από την περιοχή (Πίνακας 6).

Εκτίμηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας (m/sec)		
	Εργαστηριακά	Γεωφυσικά
Μάργα	3.0E-06	6.5E-06
Άμμος	7.0E-05	3.7E-05

Πίνακας 6: Σύγκριση των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας τους εκτιμήθηκαν με τους εργαστηριακές και γεωφυσικές τεχνικές για τους εδαφικούς σχηματισμούς στο πεδίο δοκιμών

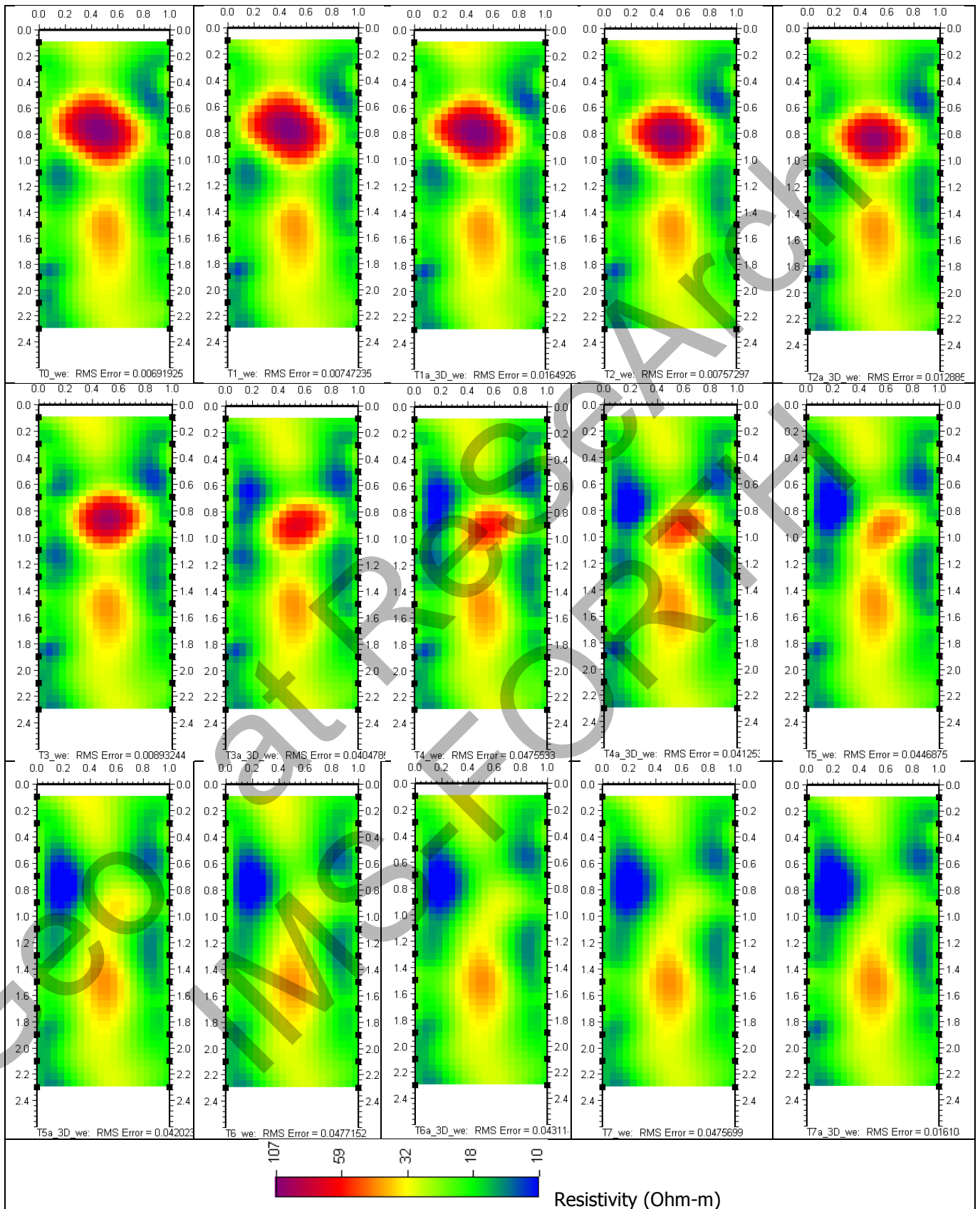


6.3 Διαχρονική παρακολούθηση ροής αγώγιμου υγρού σε δύο διαστάσεις

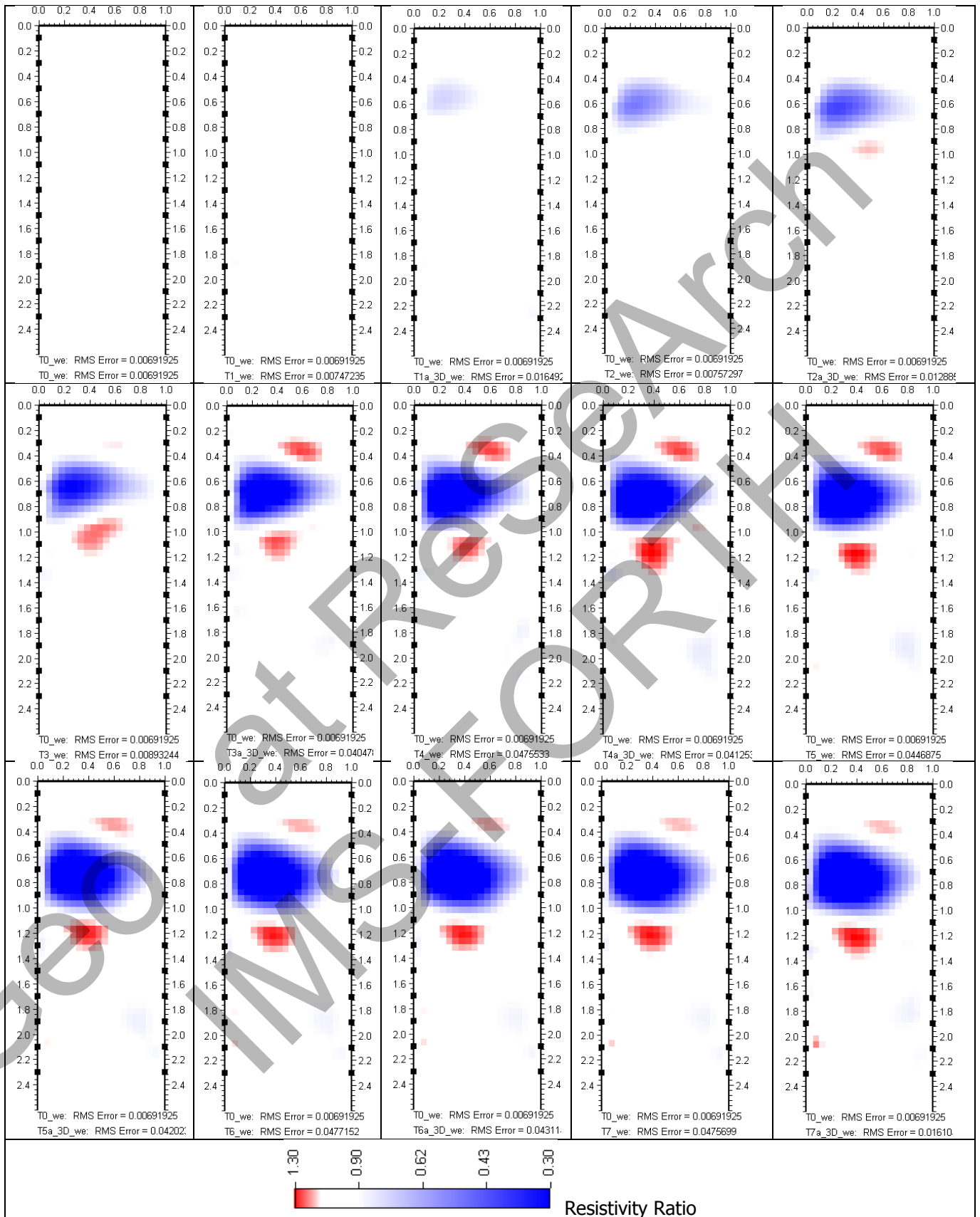
Στο Σχήμα 32 φαίνονται τα δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα μεταξύ των γεωτρήσεων W-E για όλες τις φάσεις του πειράματος, όπως προέκυψαν από την ταυτόχρονη επεξεργασία όλων των τομογραφικών δεδομένων με την τεχνική της σύγχρονης χρονοεξαρτημένης αντιστροφής. Για την άμεση παρακολούθηση της χωρικής μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκε κοινή χρωματική κλίμακα για την αναπαράσταση των τιμών της αντίστασης, η οποία κυμαίνεται από 10 Ohm-m έως 107 Ohm-m. Η περιοχή που εμφανίζεται με πράσινο χρώμα και τιμές αντιστάσεων 15-30 Ohm-m σχετίζεται με το μαργαϊκό υλικό πλήρωσης του σκάμματος. Κατά την φάση αναφοράς T0 η 4-D αντιστροφή κατάφερε με πολύ καλή ακρίβεια να περιγράψει το σχήμα του αμμούχου σχηματισμού μεταξύ των κατακόρυφων γεωτρήσεων, ως μία περιοχή υψηλών αντιστάσεων (50-107 Ohm-m). Η εισχώρηση του αγώγιμου υγρού μέσα στην άμμο αρχίζει να γίνεται εμφανής 90 λεπτά μετά από την έναρξη του πειράματος κατά την διάρκεια της φάσης T3. Από την χρονική στιγμή αυτή και μετά η αντίσταση του αμμούχου σχηματισμού μειώνεται συνεχώς λόγω της πλήρωσης των πόρων του με το αγώγιμο υγρό. Η χωροχρονική μεταβολή των γεωηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους είναι ιδιαίτερα εμφανής στο Σχήμα 33 όπου έχουν χαρτογραφηθεί οι μεταβολές των αντιστάσεων για κάθε φάση σε σχέση με την αρχική φάση αναφοράς T0. Παρατηρείται ότι η αντίσταση του εδάφους μέσα στον αμμούχο σχηματισμό μειώθηκε 30% λόγω της συνεχούς κίνησης του αγώγιμου υγρού κατά την διάρκεια των οκτώ ωρών που διήρκεσε η παρακολούθηση του φαινομένου.

Συγκρίσιμα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν από τα μοντέλα αντιστροφής (Σχήμα 34, Σχήμα 36) και τις σχετικές μεταβολές της αντίστασης (Σχήμα 35, Σχήμα 37) στην περίπτωση των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των γεωτρήσεων S-N και των οριζοντίων γεωτρήσεων Htop-HBottom. Ειδικά στην περίπτωση των οριζοντίων γεωτρήσεων η μεταβολή της αντίστασης για την φάση T7 σε σχέση με την φάση αναφοράς οριοθετεί το σχήμα του αμμούχου σχηματισμού, τονίζοντας ταυτόχρονα και την ανομοιογένεια (σκαλοπάτι) που είχε αρχικά κατασκευαστεί.



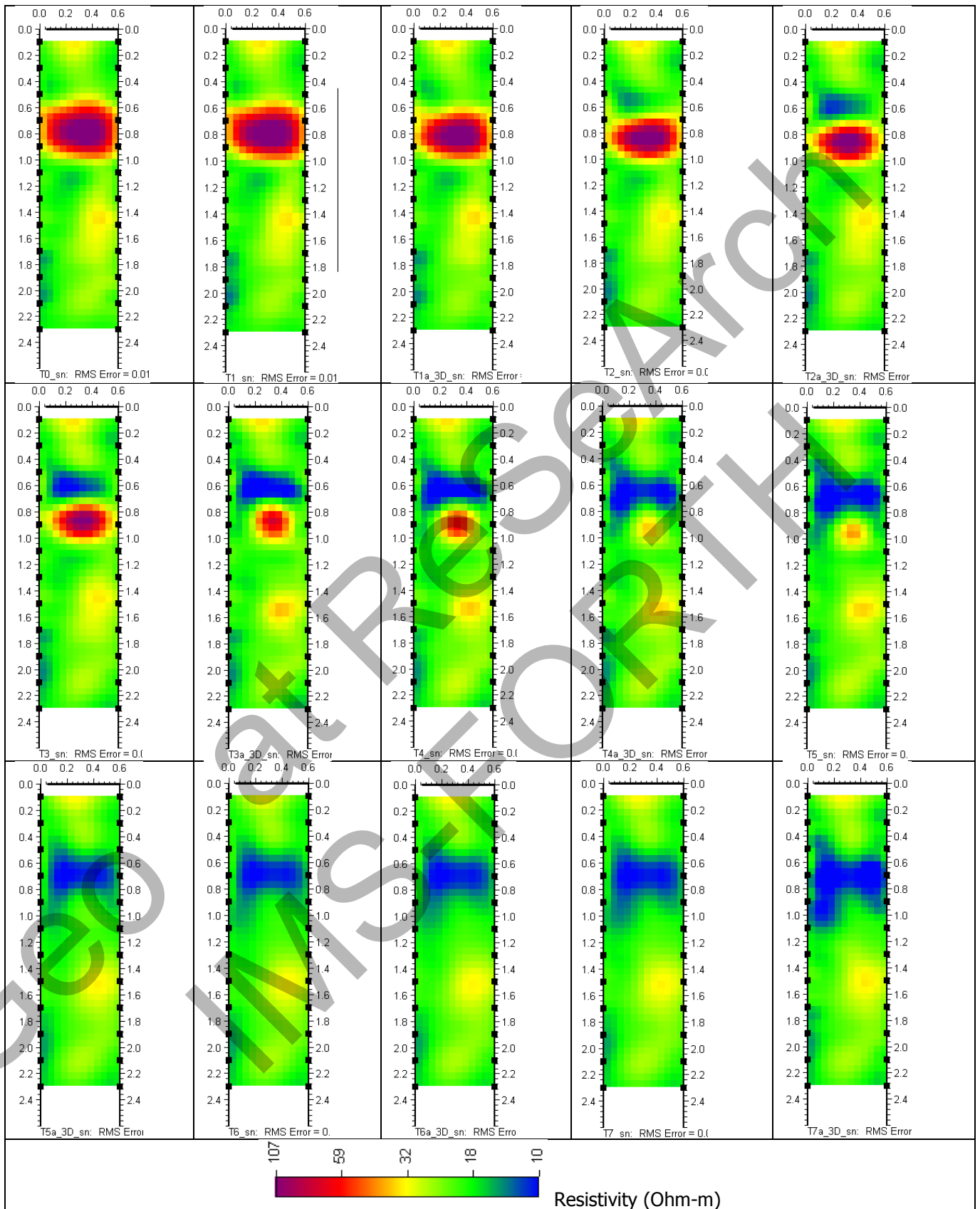


Σχήμα 32: Διαδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα όπως προέκυψαν από την 4D αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των γεωτρήσεων W-E για τις φάσεις του T0 έως T7 και τις ενδιάμεσες T1a-T7a.

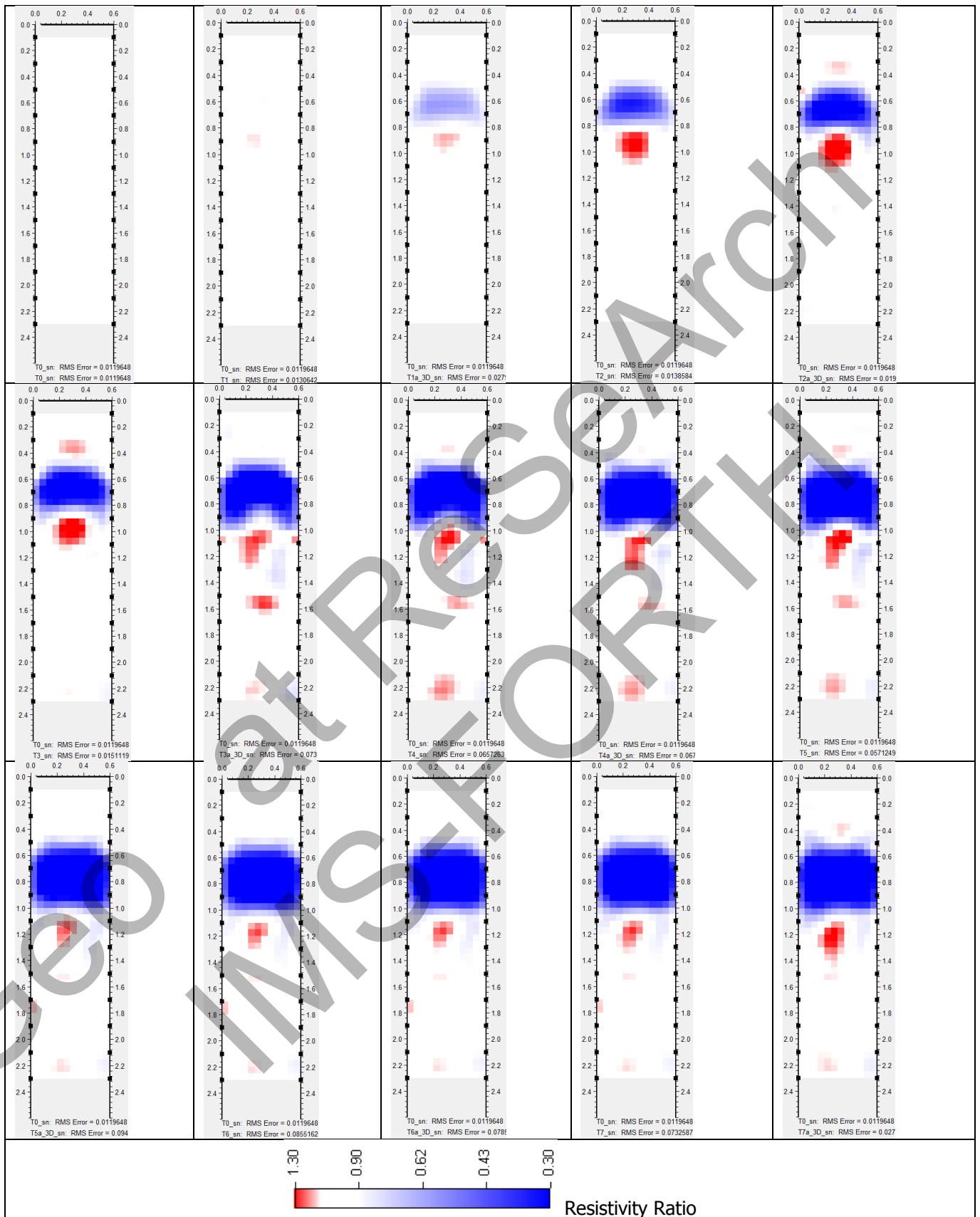


Σχήμα 33 Μεταβολή της αντίστασης των διαφορετικών φάσεων παρακολούθησης σε σχέση με την φάση αναφοράς T0 (εκφρασμένη ως ο λόγος των αντιστάσεων των αντίστοιχων γεωηλεκτρικών μοντέλων) όπως προέκυψαν από την 4D αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των γεωτρήσεων W-E.

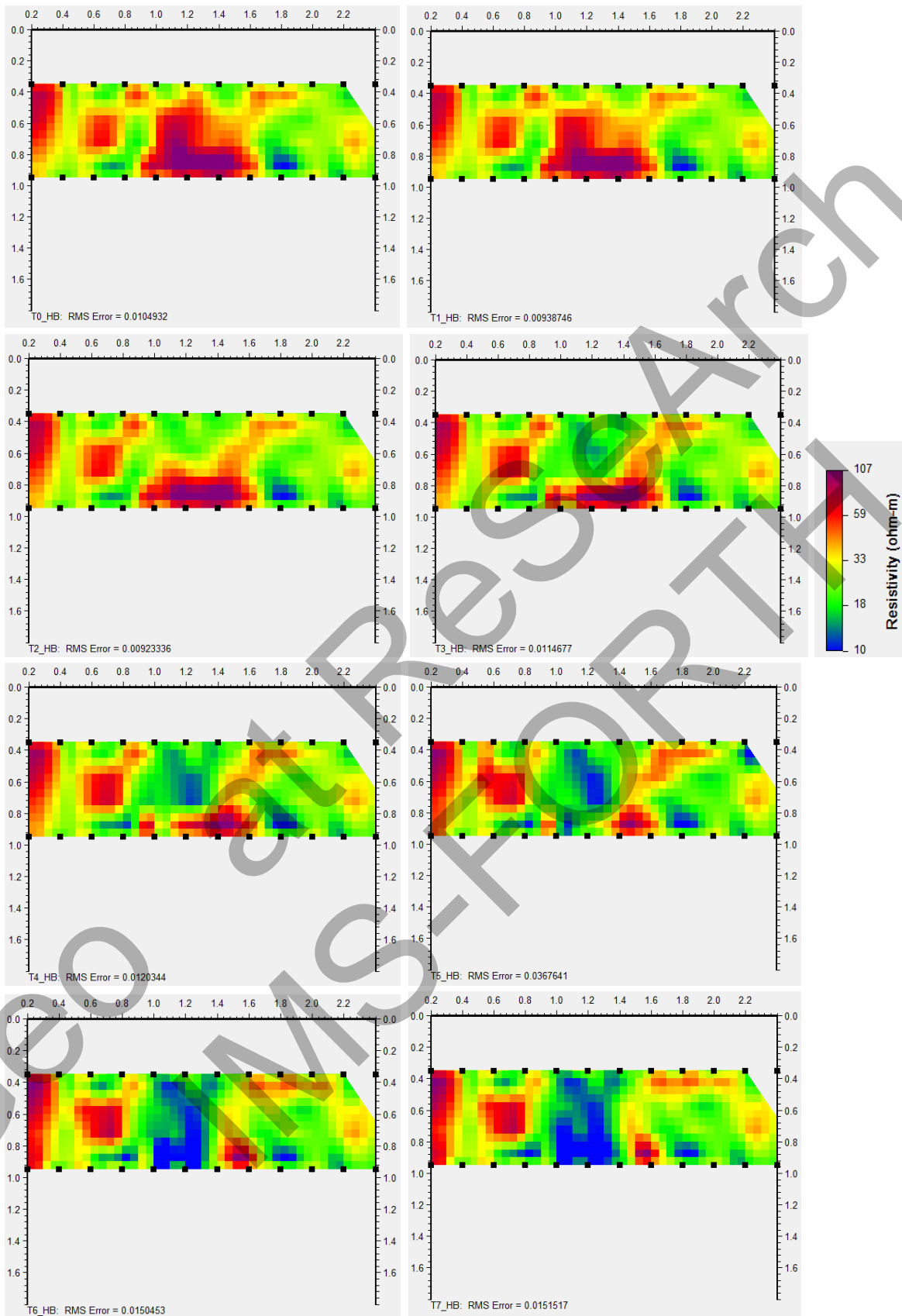




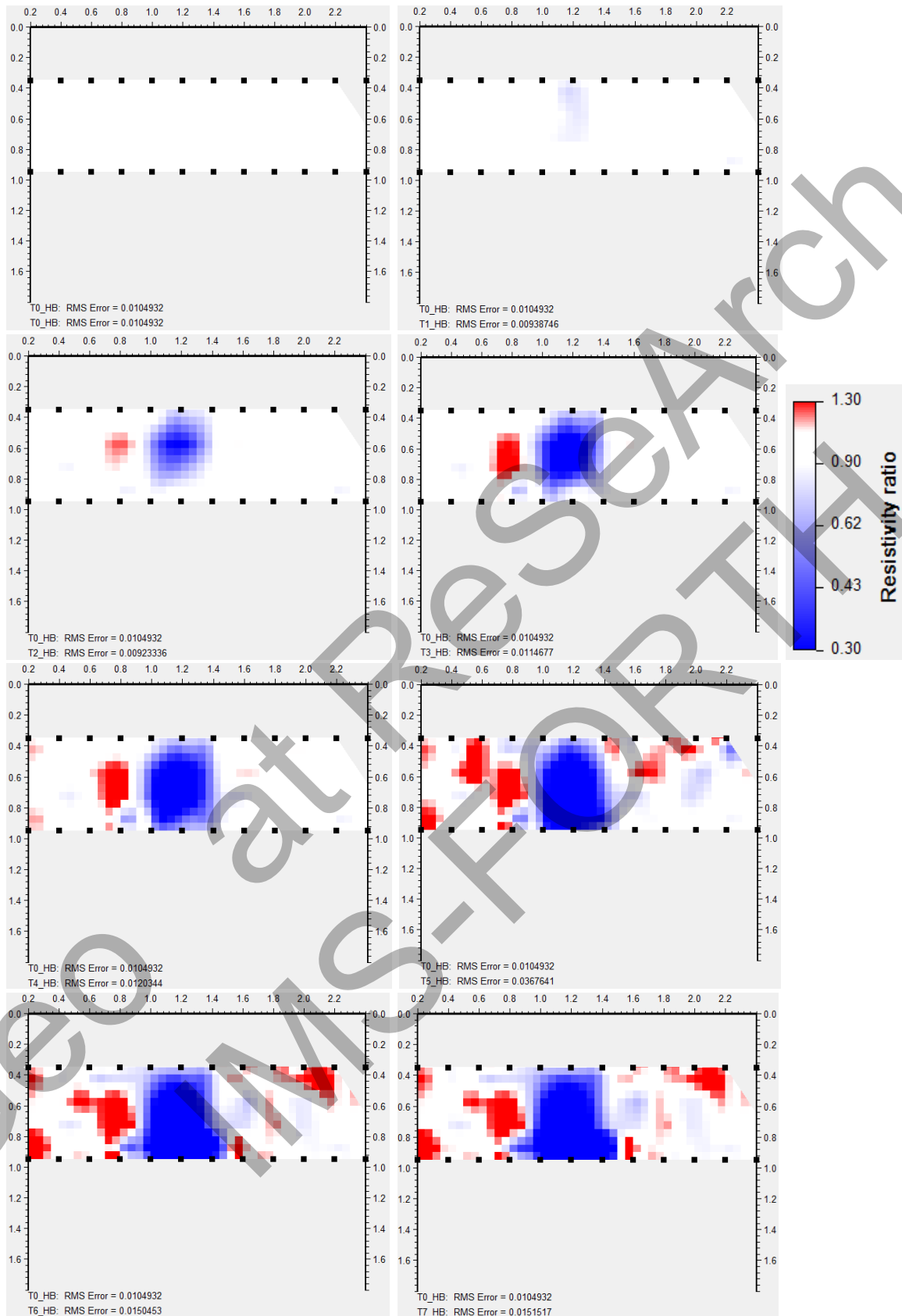
Σχήμα 34: Δισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα όπως προέκυψαν από την 4D αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των γεωτήσεων S-N για τις φάσεις του T0 έως T7 και τις ενδιάμεσες T1a-T7a.



Σχήμα 35: Μεταβολή της αντίστασης των διαφορετικών φάσεων παρακολούθησης σε σχέση με την φάση αναφοράς T0 (εκφρασμένη ως ο λόγος των αντιστάσεων των αντίστοιχων γεωηλεκτρικών μοντέλων) όπως προέκυψαν από την 4D αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των γεωτρήσεων S-N.



Σχήμα 36: Διασδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα όπως προέκυψαν από την 4D αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των οριζόντιων γεωτρήσεων Htop-Hbottom για τις φάσεις του T0 έως T7.



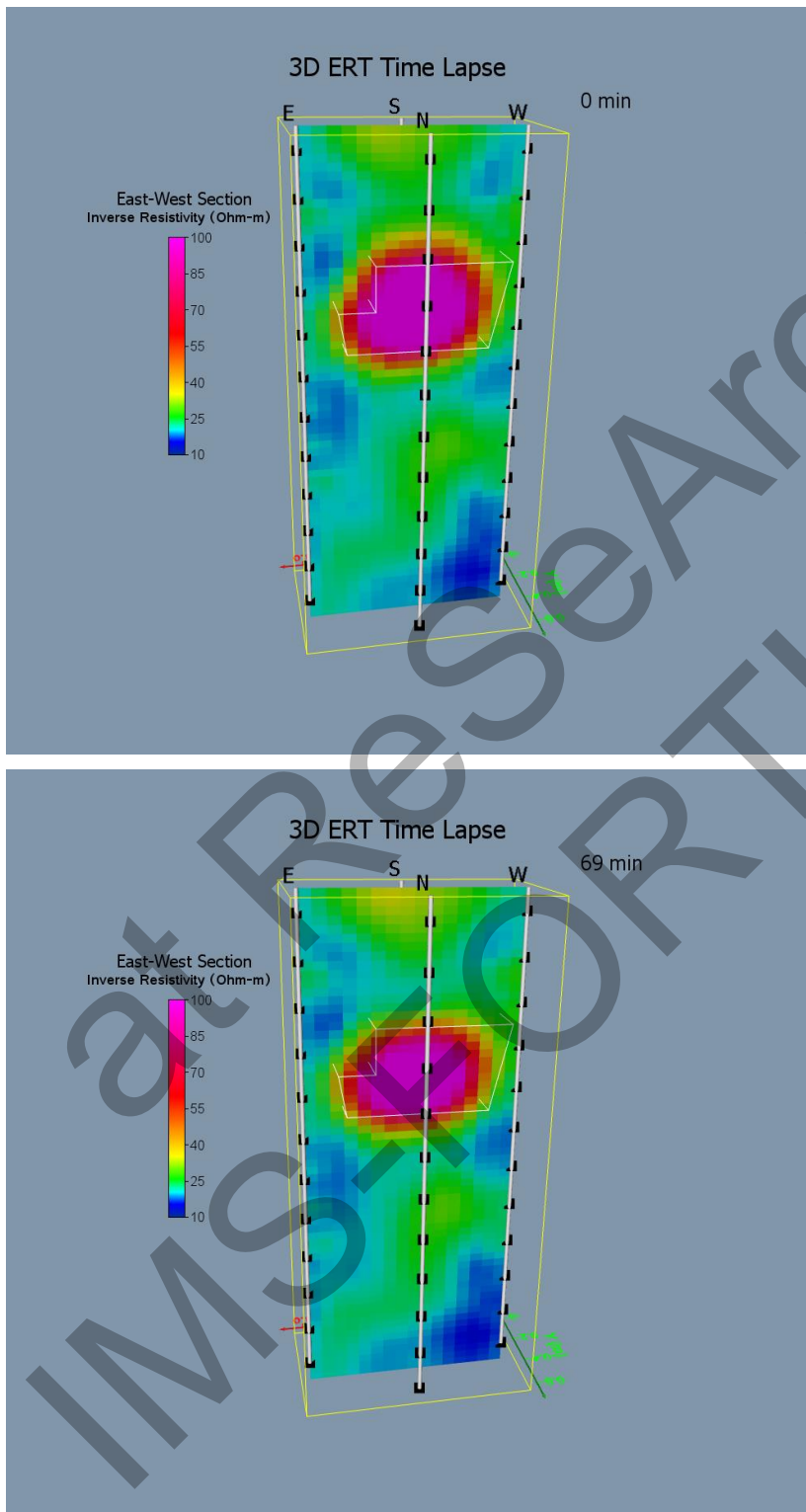
Σχήμα 37: Μεταβολή της αντίστασης των διαφορετικών φάσεων παρακολούθησης σε σχέση με την φάση αναφοράς T0 (εκφρασμένη ως ο λόγος των αντιστάσεων τω αντίστοιχων γεωηλεκτρικών μοντέλων) όπως προέκυψαν από την 4D αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων μεταξύ των οριζοντίων γεωτρήσεων Htop-Hbottom.

6.4 Διαχρονική παρακολούθηση ροής αγώγιμου υγρού σε τρεις διαστάσεις

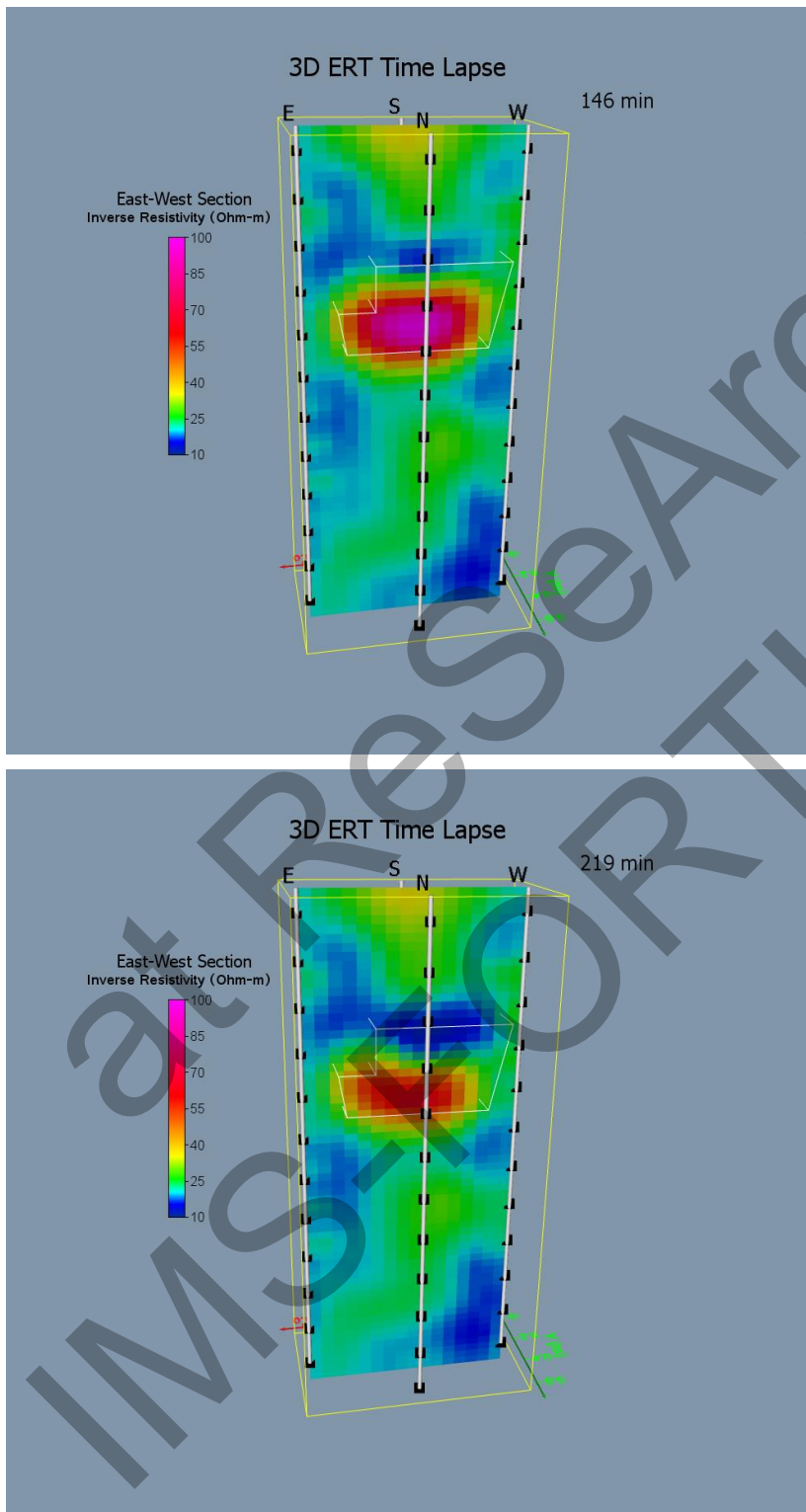
Τα τρισδιάστατα διαχρονικά τομογραφικά δεδομένα επεξεργάστηκαν επίσης με την τεχνική της σύγχρονης χρονοεξαρτημένης αντιστροφής. Από τα διαχρονικά τρισδιάστατα γεωηλεκτρικά μοντέλα για τις διαδοχικές φάσεις του πειράματος εξήχθησαν οι κατακόρυφες τομές μεταξύ των γεωτρήσεων E-W (Σχήμα 38, Σχήμα 39, Σχήμα 40, Σχήμα 41). Η μεταβολή των τιμών της αντίστασης κυμαίνονται μεταξύ 10-100 Ohm-m. Στην φάση αναφοράς T0 και την φάση T1 μετά από 69 λεπτά εκκίνησης της διαρροής του αγώγιμου υγρού διακρίνεται με υψηλές τιμές αντίστασης (55-100 Ohm-m) η άμμος που είχε περιοριστεί μεταξύ των γεωτρήσεων. Η ακριβής αρχική θέση της άμμου καθορίζεται από το λευκό παραλληλεπίπεδο στα αντίστοιχα σχήματα. Μετά την φάση T2 (146 λεπτά από την έναρξη της διαρροής) παρατηρείται μείωση της αντίστασης μέσα στον αμμώχο σχηματισμό. Το μέτωπο της ελάττωσης αυτής είναι προοδευτικό από το πάνω προς το κατώτερο τμήμα της άμμου. Με την ολοκλήρωση του πειράματος μετά από 511 λεπτά η γεωηλεκτρική υπογραφή της άμμου είναι αγώγιμη λόγω της πλήρωσης και του κορεσμού της με το αγώγιμο υγρό το οποίο έρεε στους πόρους της. Το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί επίσης να περιγραφεί και σε τρεις διαστάσεις με την χαρτογράφηση των τρισδιάστατων επιφανειών ίσης αντίστασης των 60, 55 και 10 Ohm-m (Σχήμα 42, Σχήμα 43, Σχήμα 44, Σχήμα 45), στις οποίες είναι χαρακτηριστική η μετάβαση από την υπογραφή της υψηλής προς την χαμηλή αντίσταση της άμμου κατά την διάρκεια της κίνησης του αγώγιμου υγρού μέσα στους πόρους της.

Επιπλέον ποσοτικές πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν μέσω του υπολογισμού και της απεικόνισης της ποσοστιαίας μεταβολής της αντίστασης για τις διαδοχικές χρονικές στιγμές σε σχέση με την φάση αναφοράς. Η χαρτογράφηση της ελάττωσης της αντίστασης κατά 70% περιγράφει με αρκετή σαφήνεια την εξέλιξη του φυσικού φαινομένου της πλήρωσης της άμμου με το αγώγιμο υγρό και την συνακόλουθη μείωση της αντίστασής του (Σχήμα 46, Σχήμα 47, Σχήμα 48, Σχήμα 49). Η διαχρονική παρακολούθηση της μείωσης της αντίστασης της άμμου σε συνδυασμό με την ολοκλήρωση του φαινομένου με τον πλήρη κορεσμό της από το αγώγιμο υγρό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του όγκου της άμμου που τοποθετήθηκε μεταξύ των γεωτρήσεων. Για την περίπτωση της ποσοστιαίας ελάττωσης της αντίστασης κατά 70% ο όγκος της άμμου υπερεκτιμήθηκε στα 170 λίτρα, σε σχέση με τον πραγματικό όγκο των 115 λίτρων της άμμου που χρησιμοποιήθηκε. Αντίστοιχα για την περίπτωση της ποσοστιαίας ελάττωσης της αντίστασης κατά 105% ο όγκος της άμμου που εκτιμήθηκε από την τελική γεωφυσική εικόνα είναι σε πλήρη συμφωνία με τον πραγματικό όγκο της άμμου.

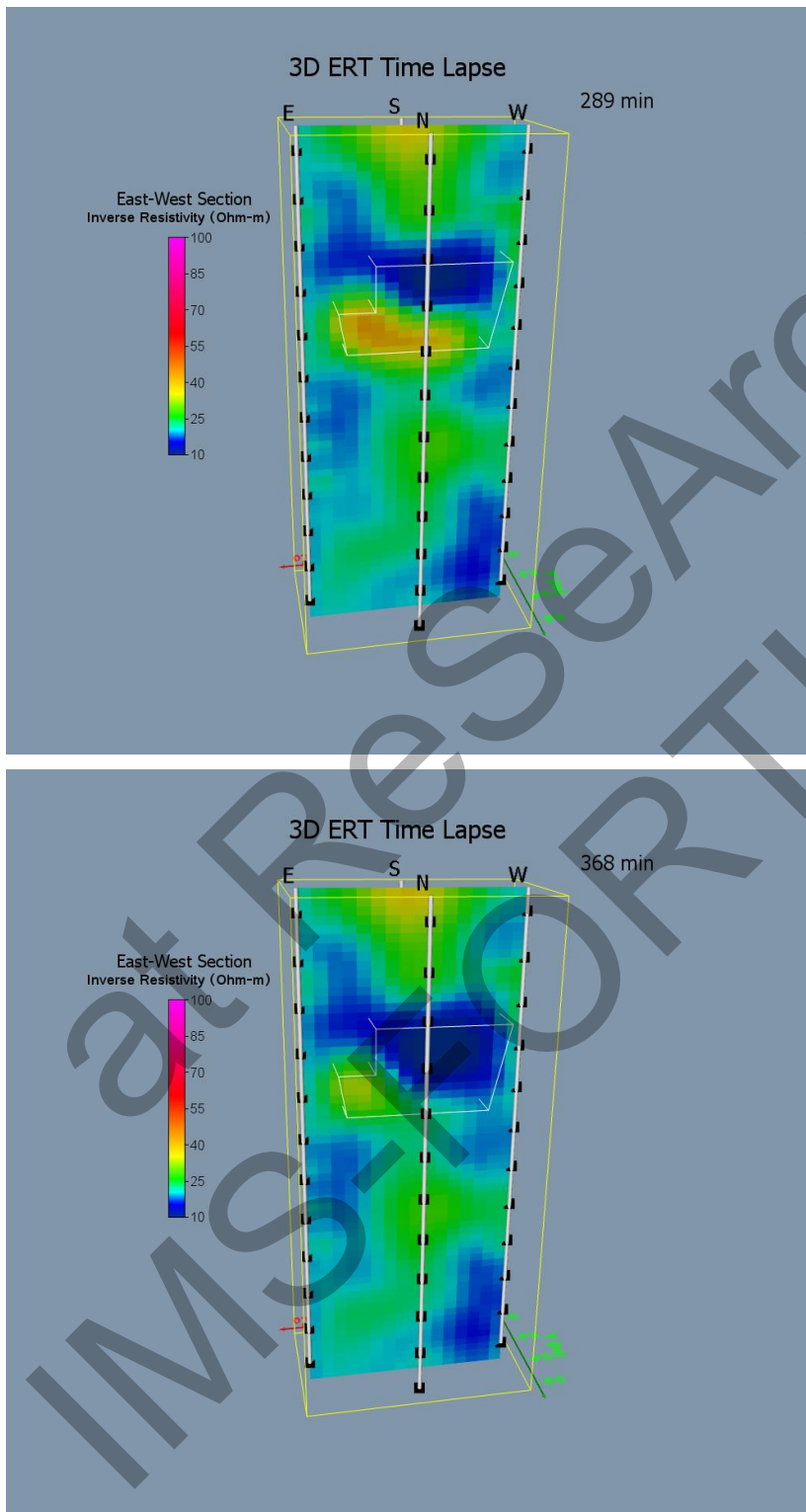




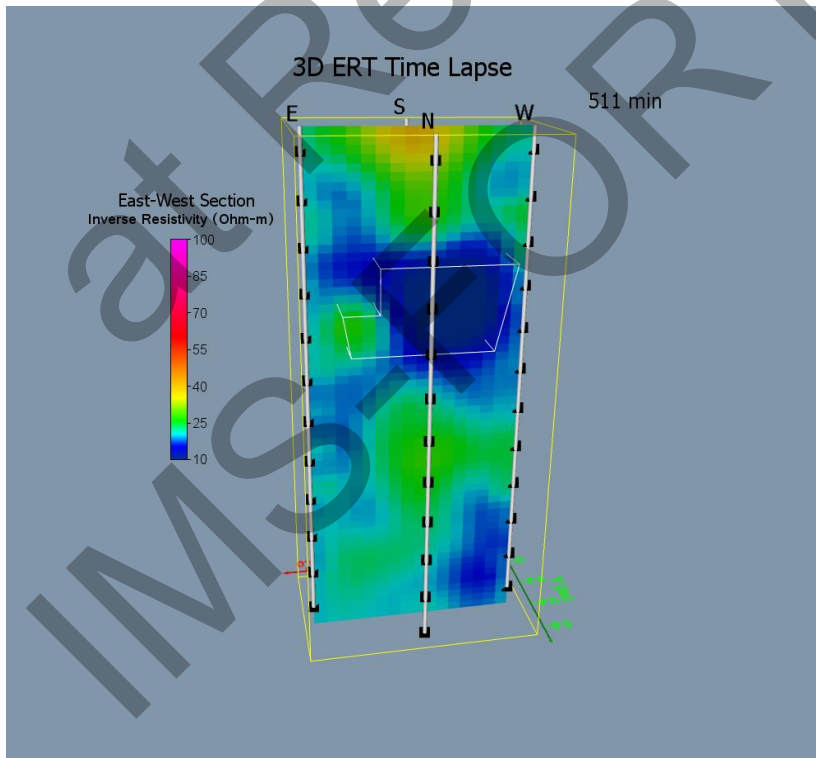
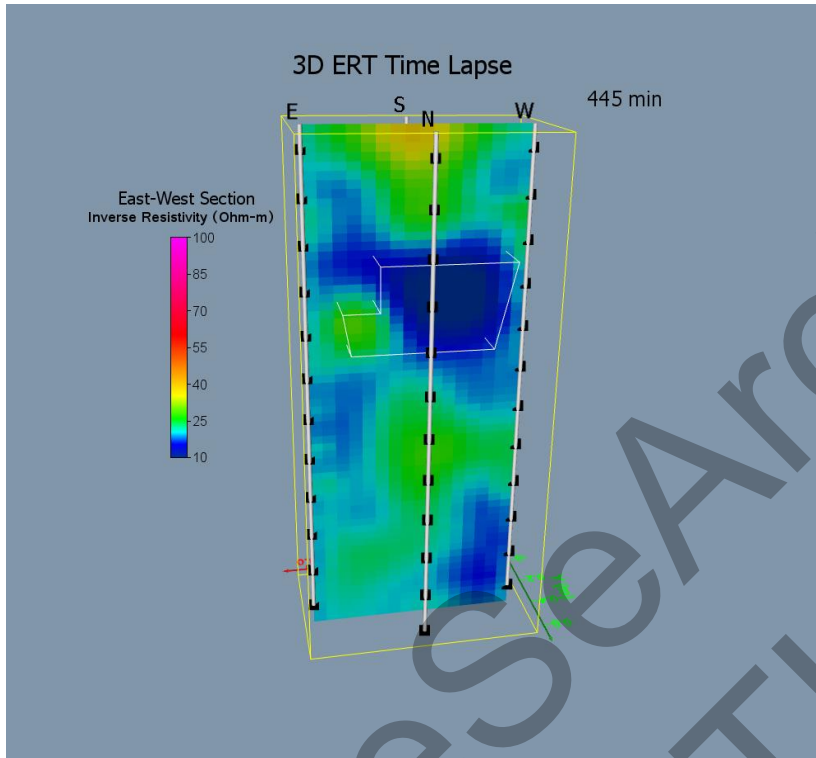
Σχήμα 38: Κατακόρυφη γεωηλεκτρική τομή κατά μήκος της διεύθυνσης E-W που έχει εξαχθεί από τα τρισδιάστατα μοντέλα αντιστροφής για τις φάσεις T0 (πάνω) και T1 (κάτω).



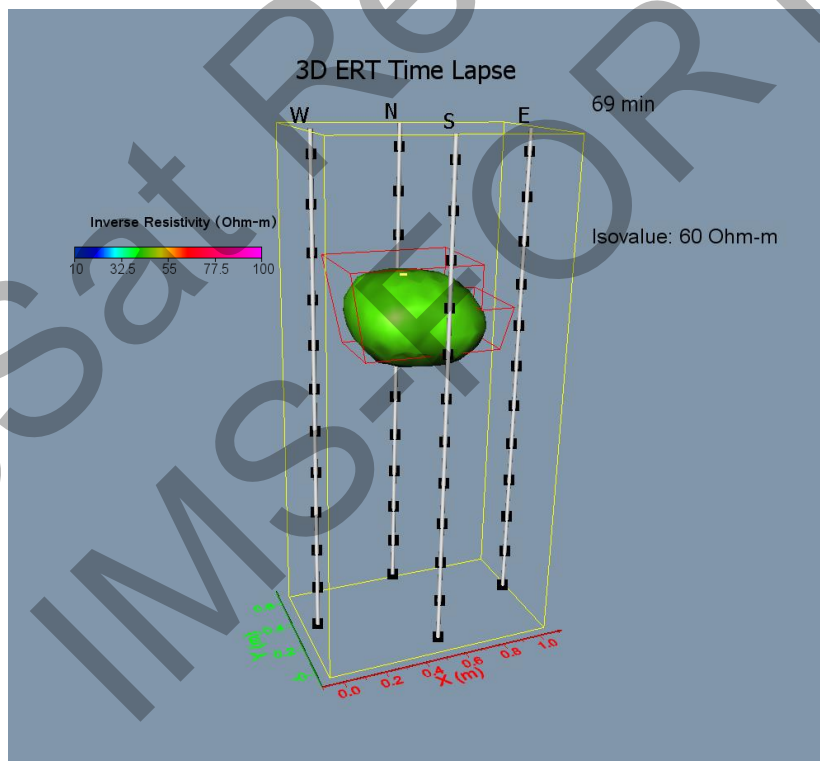
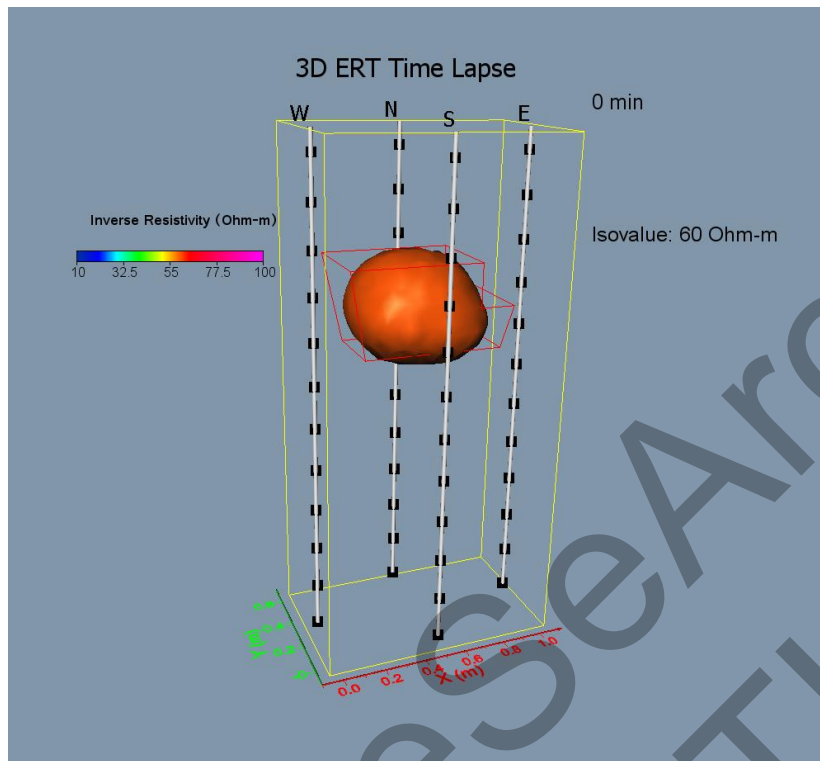
Σχήμα 39: Κατακόρυφη γεωηλεκτρική τομή κατά μήκος της διεύθυνσης E-W που έχει εξαχθεί από τα τρισδιάστατα μοντέλα αντιστροφής για τις φάσεις T2 (πάνω) και T3 (κάτω).



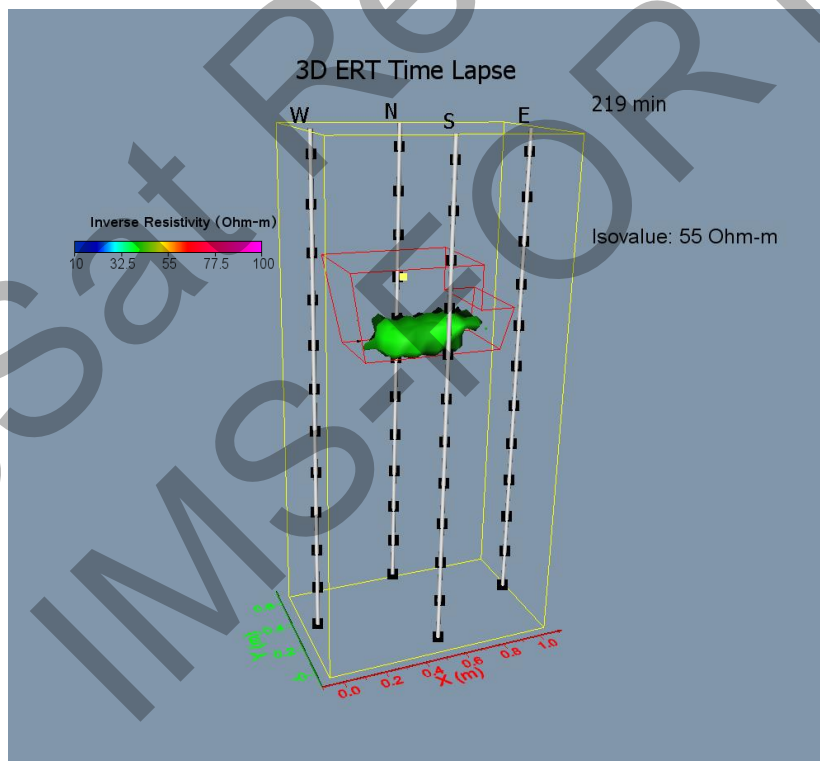
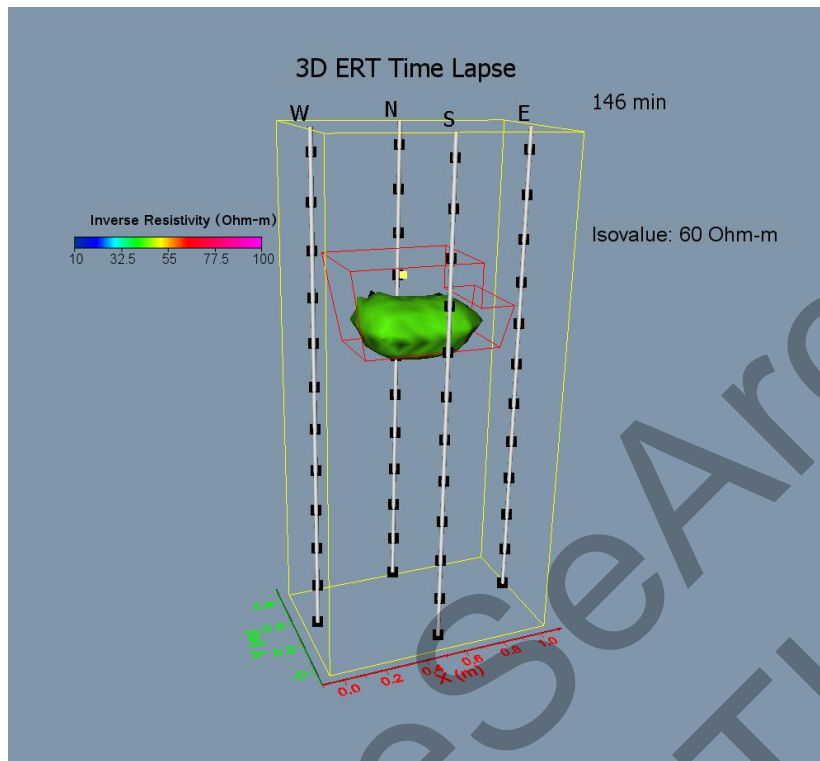
Σχήμα 40: Κατακόρυφη γεωηλεκτρική τομή κατά μήκος της διεύθυνσης E-W που έχει εξαχθεί από τα τρισδιάστατα μοντέλα αντιστροφής για τις φάσεις T4 (πάνω) και T5 (κάτω).



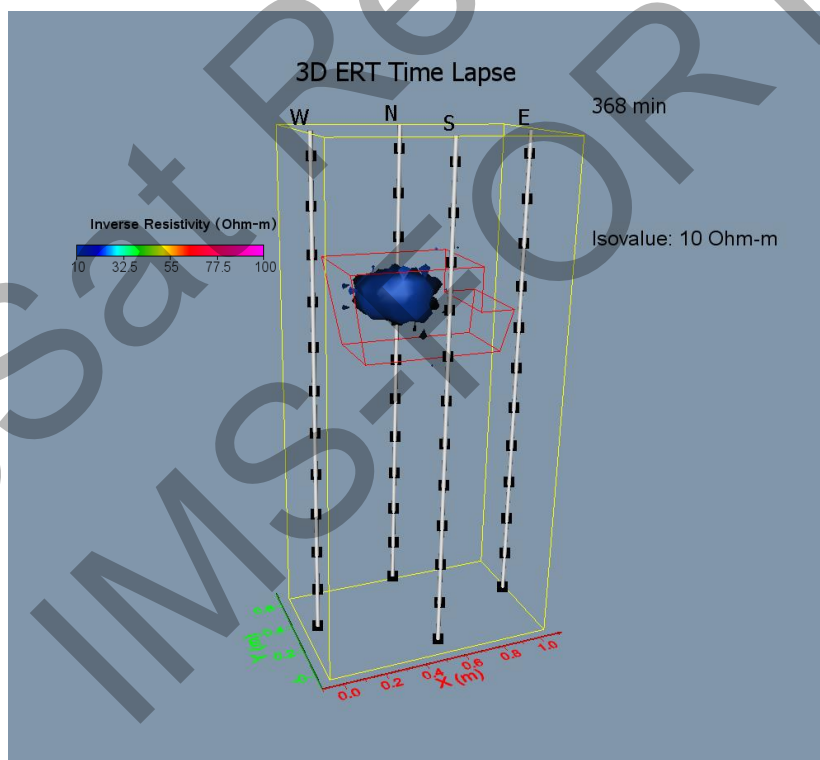
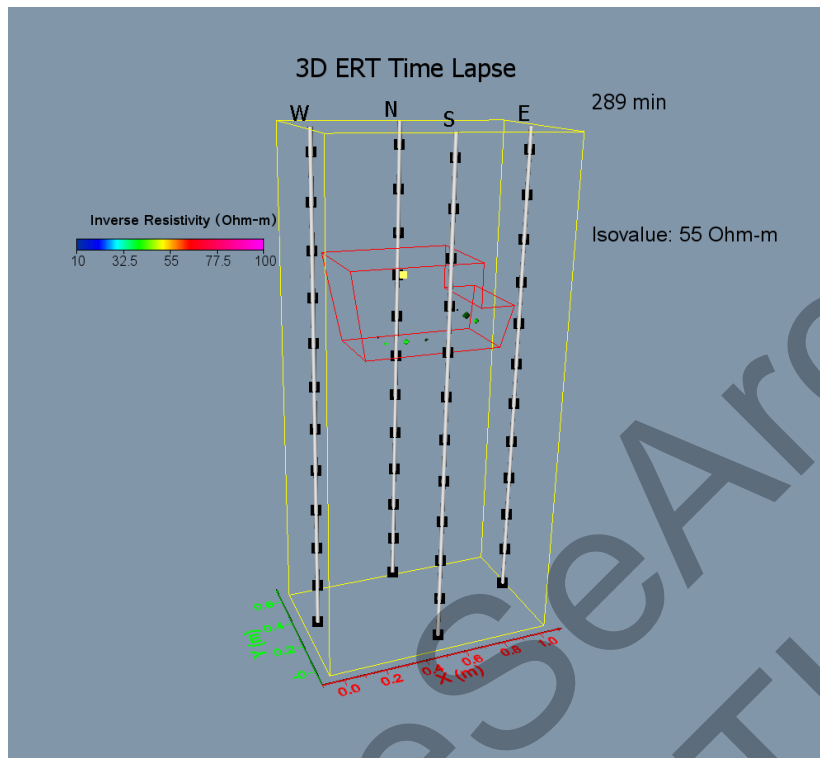
Σχήμα 41: Κατακόρυφη γεωηλεκτρική τομή κατά μήκος της διεύθυνσης E-W που έχει εξαχθεί από τα τρισδιάστατα μοντέλα αντιστροφής για τις φάσεις T6 (πάνω) και T7 (κάτω).



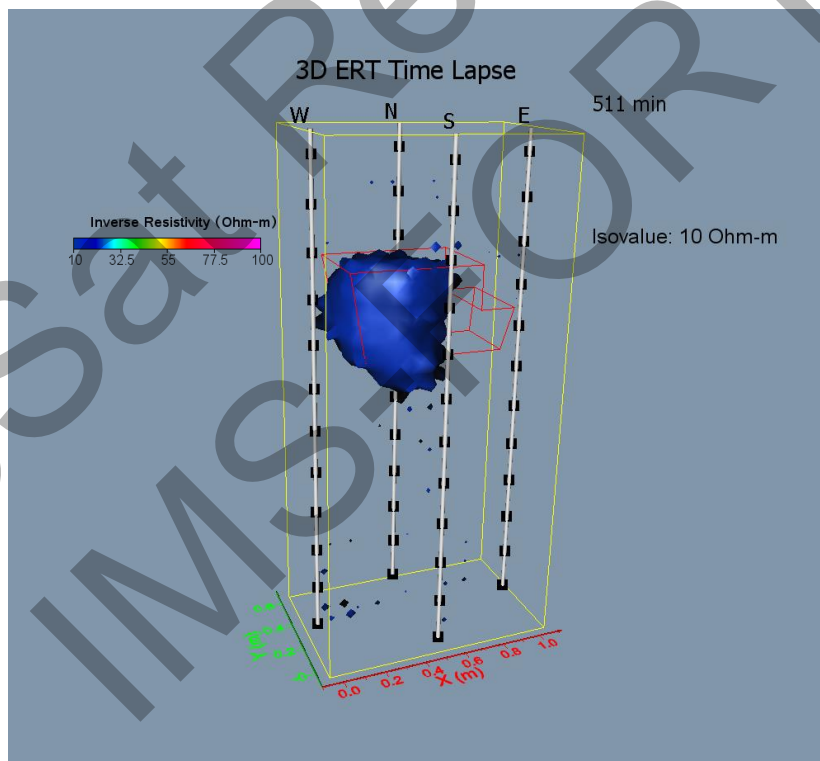
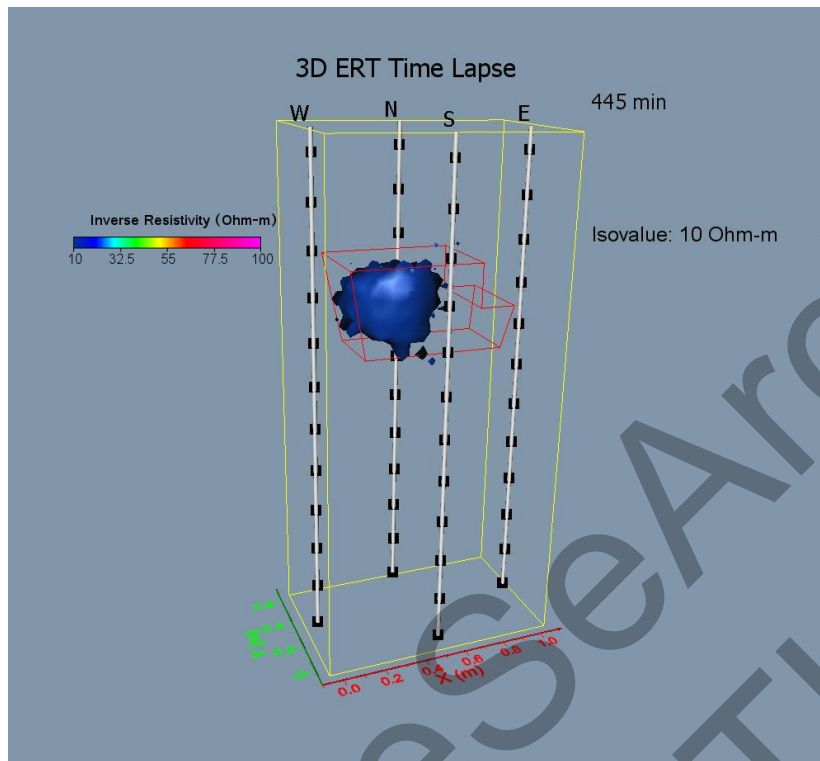
Σχήμα 42: Ισοεισφάνεια της τιμής της αντίστασης των 60 Ohm-m για τις φάσεις T0 (πάνω) και T1 (κάτω).



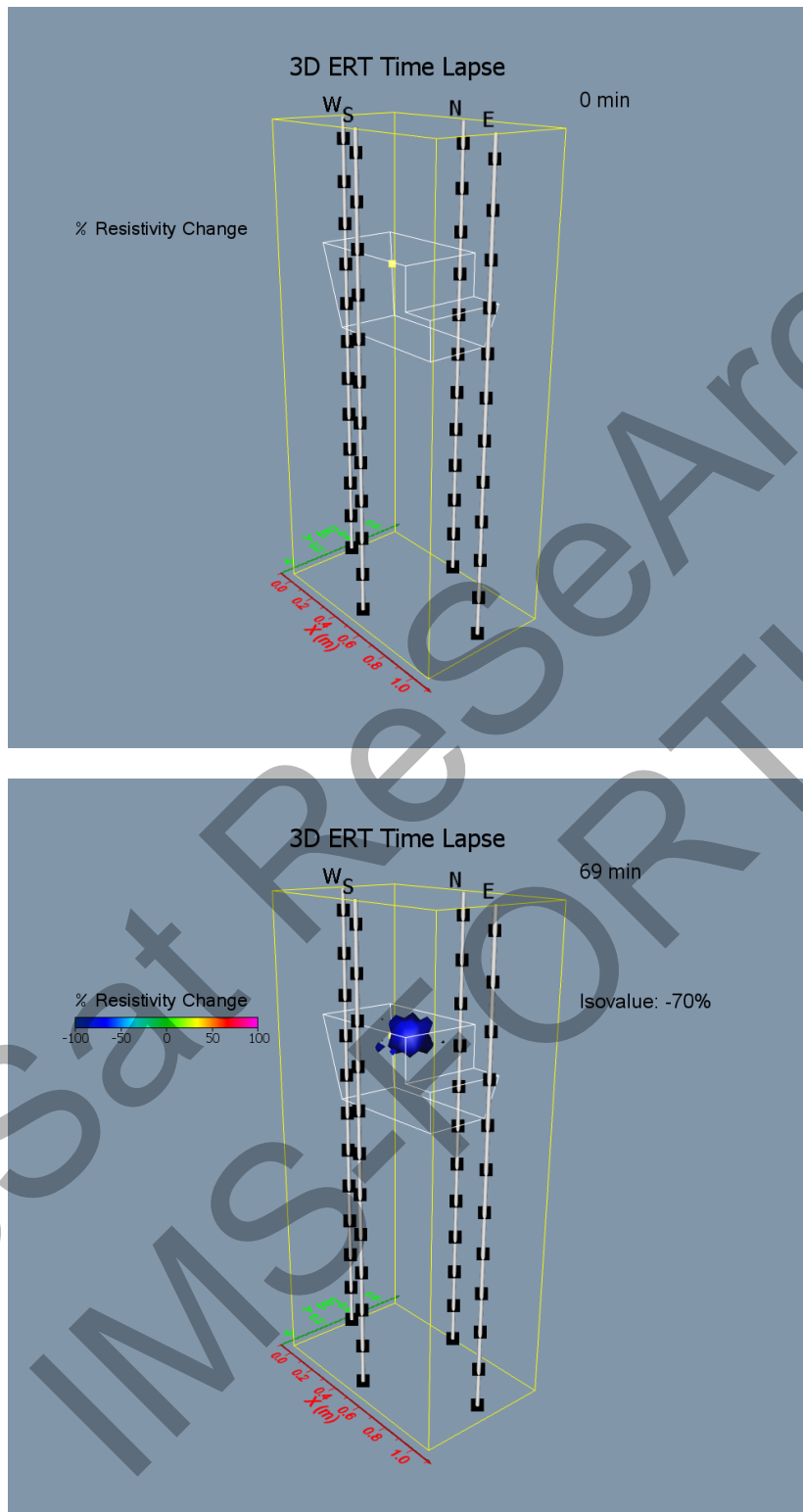
Σχήμα 43: Ισοεπιφάνεια της τιμής της αντίστασης των 60 Ohm-m για τη φάση T2 (πάνω) και των 55 Ohm-m για την φάση T3 (κάτω).



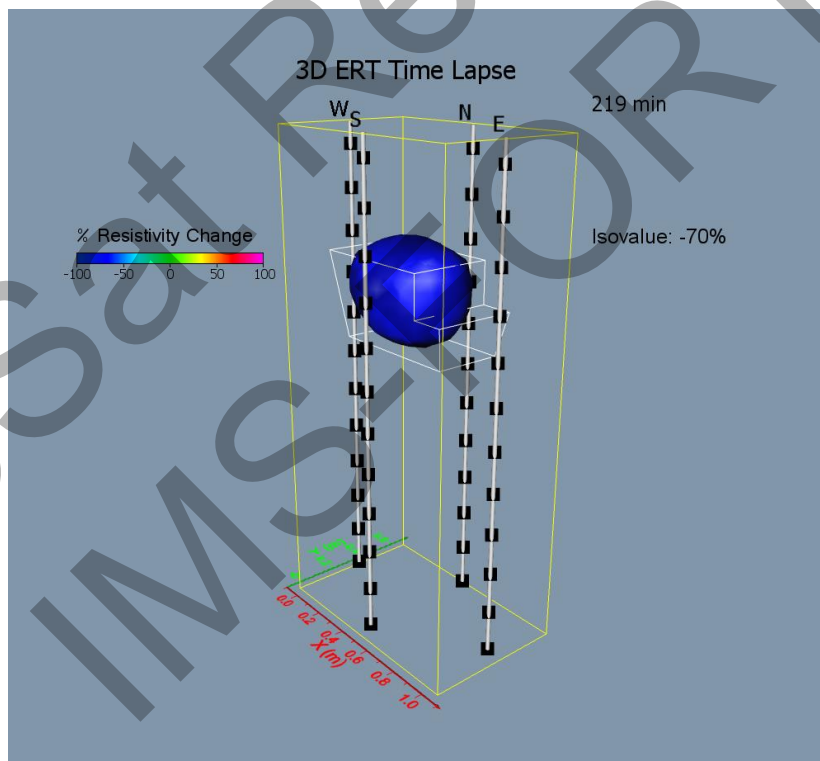
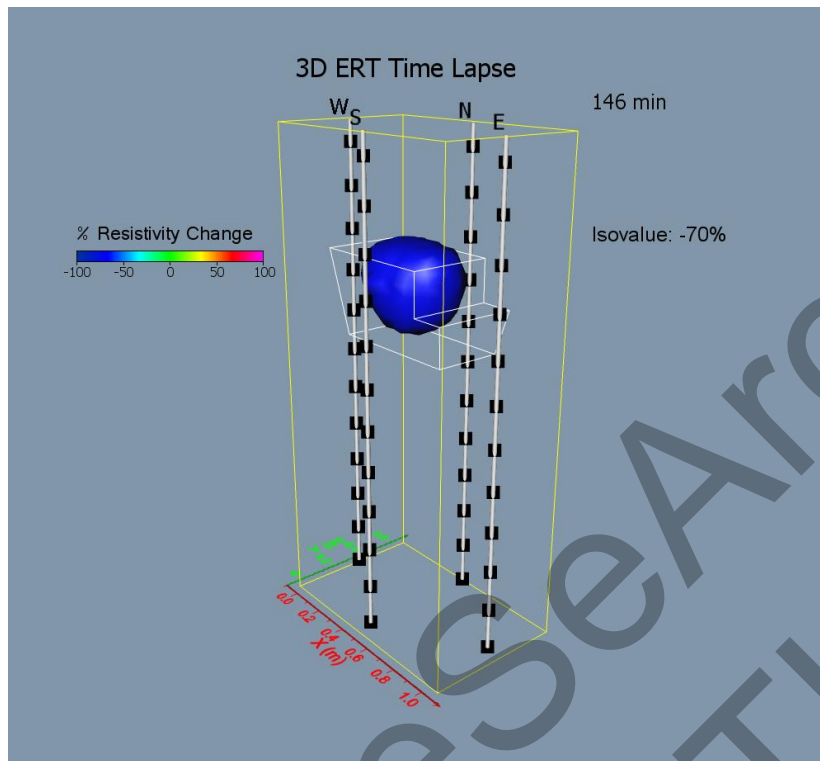
Σχήμα 44 Ισοειφάνεια της τιμής της αντίστασης των 50 Ohm-m για τη φάση T4 (πάνω) και των 10 Ohm-m για την φάση T5 (κάτω).



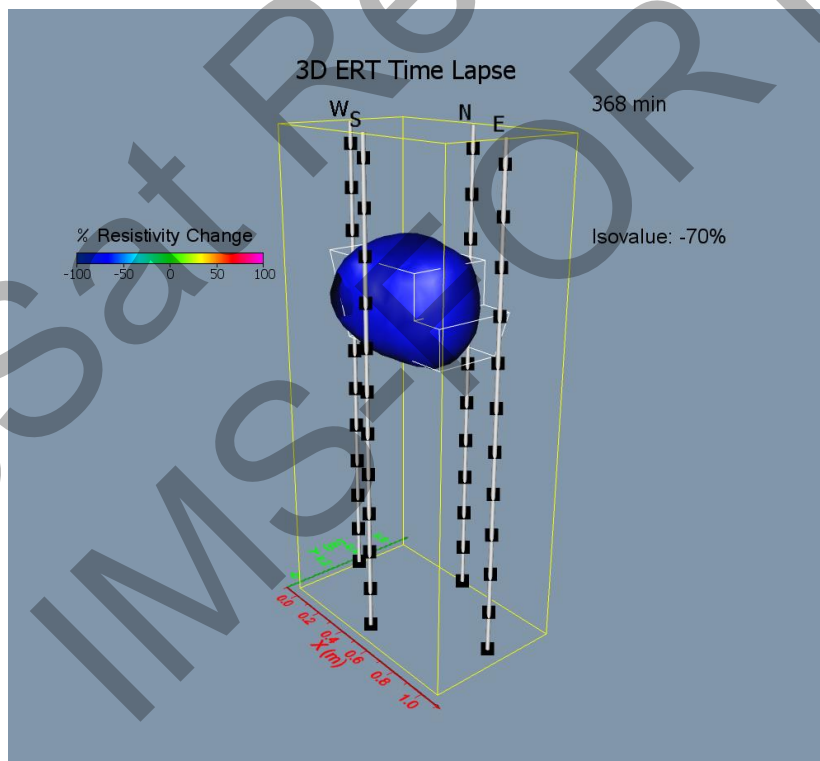
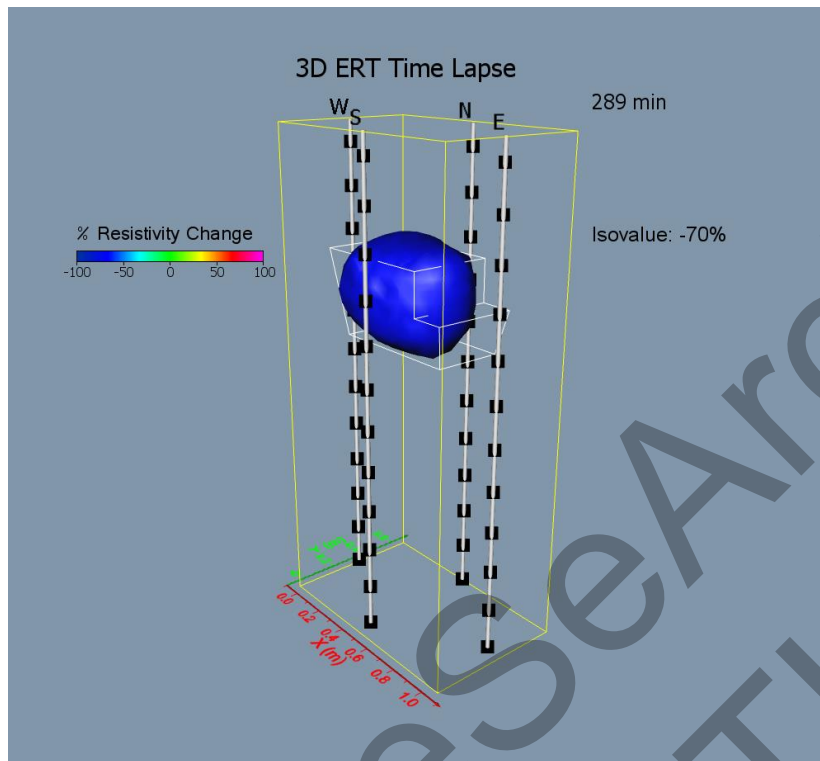
Σχήμα 45 Ισοεισφάνεια της τιμής της αντίστασης των 10 Ohm-m για τις φάσεις T6 (πάνω) και T7 (κάτω).



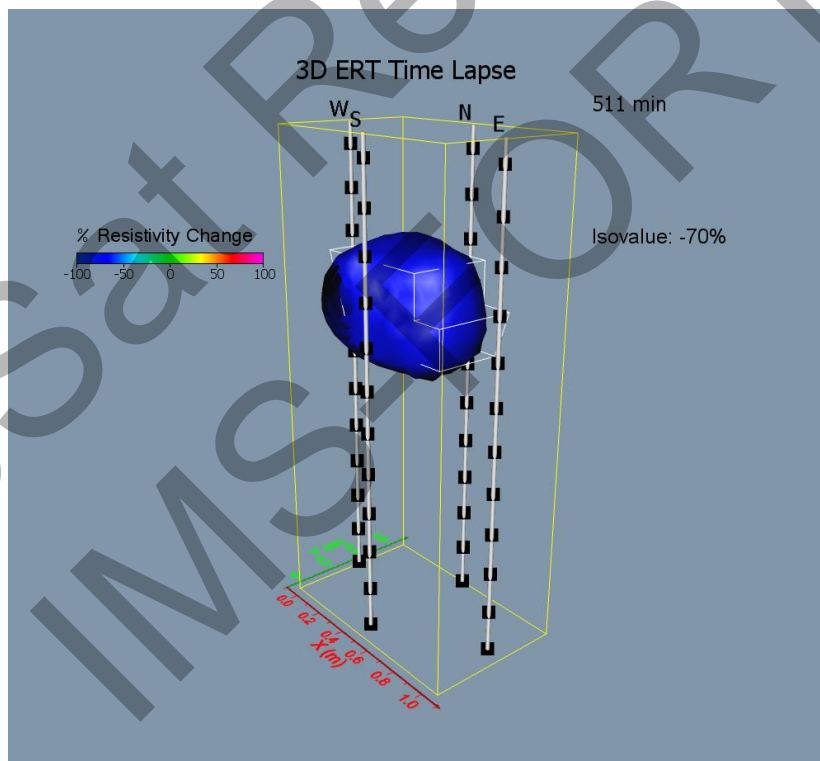
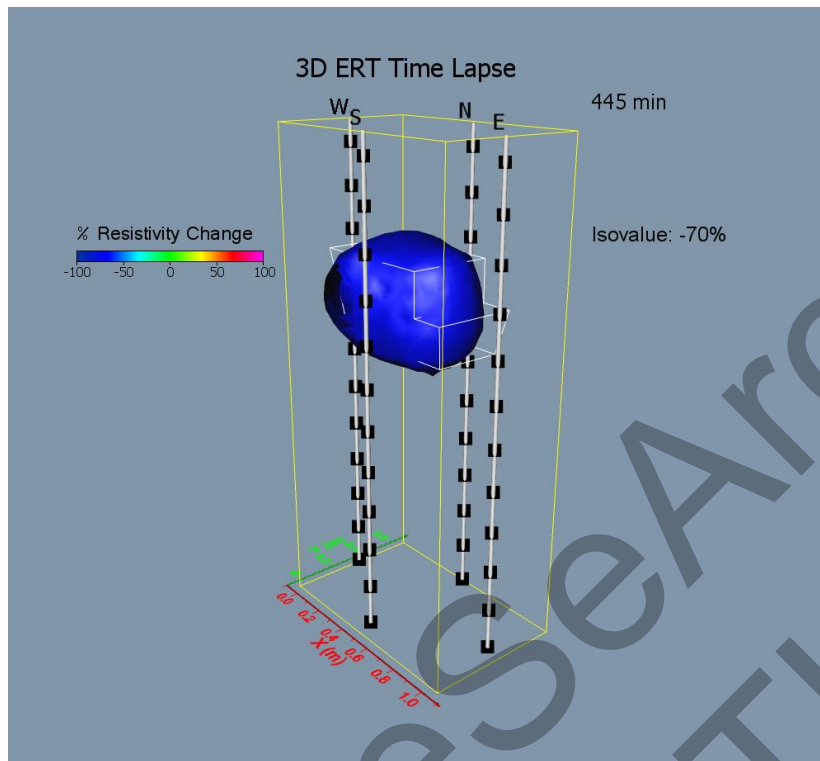
Σχήμα 46: Ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης κατά την διάρκεια της ροής του αγώγιμου υγρού μέσα στον αμμούχο σχηματισμό για τις φάσεις T0 (πάνω) και T1 (κάτω).



Σχήμα 47: Ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης κατά την διάρκεια της ροής του αγώγιμου υγρού μέσα στον αμμούχο σχηματισμό για τις φάσεις T2 (πάνω) και T3 (κάτω).



Σχήμα 48: Ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης κατά την διάρκεια της ροής του αγώγιμου υγρού μέσα στον αμμώχο σχηματισμό για τις φάσεις T4 (πάνω) και T5 (κάτω).



Σχήμα 49: Ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης κατά την διάρκεια της ροής του αγώγιμου υγρού μέσα στον αμμώχο σχηματισμό για τις φάσεις T6 (πάνω) και T7 (κάτω).

7 Γενικά Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των τομογραφικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από το υπαίθριο πεδίο δοκιμών κρίνονται αρκετά επιτυχή και επίσης ελπιδοφόρα σε σχέση με την αξιοπιστία της μεθόδου της γεωηλεκτρικής τομογραφίας στην χαρτογράφηση και παρακολούθηση δυναμικών φαινομένων, όπως η ροή αγώγιμων ρύπων στο υπέδαφος. Η εμπειρία σχετικά με την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό/κατασκευή της ιδιοκατασκευής, καθώς και της διάνοιξης/πλήρωσης του σκάμματος δείχνει ότι τα βήματα που ακολουθήθηκαν μπορούν να αποτελέσουν την βάση για τον σχεδιασμό και υλοποίηση παρόμοιων πεδίων δοκιμών.

Η εφαρμογή της τεχνικής του Ιακωβιανού πίνακα για την εξαγωγή των βέλτιστων τομογραφικών πρωτοκόλλων μέτρησης, ως υποσύνολο ενός αρχικού συνόλου μετρήσεων, έδειξε στην πράξη ότι οι αντίστοιχες γεωηλεκτρικές εικόνες του υπεδάφους είναι συγκρίσιμης ακρίβειας με αυτές που προκύπτουν από πλήρη πρωτόκολλα τα οποία περιλαμβάνουν πολλαπλάσιες μετρήσεις. Το γεγονός αυτό μπορεί να ελαχιστοποιήσει τον πραγματικό χρόνο συλλογής των τομογραφικών δεδομένων. Η διάσταση του χρόνου συλλογής των δεδομένων είναι πολύ σημαντική στην διαχρονική παρακολούθηση των φυσικών φαινομένων, ειδικά σε περιπτώσεις που αυτά εξελίσσονται με σχετικά ταχείς ρυθμούς. Φαίνεται λοιπόν ότι η χρήση τέτοιων πρωτοκόλλων μπορούν να περιγράψουν τα δυναμικά φαινόμενα με αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα σε μικρότερο χρόνο.

Επίσης το συγκεκριμένο πεδίο δοκιμών θα πρέπει να θεωρηθεί ως μία μικρογραφία ενός ευρύτερου και πραγματικού πειράματος ή μελέτης. Τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης τέτοιων πεδίων είναι σημαντικά, καθώς σε ένα ελεγχόμενο "πραγματικό" περιβάλλον μπορούν να γίνουν δοκιμές σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο συλλογής και επεξεργασίας των τομογραφικών δεδομένων. Η γνώση αυτή μπορεί στη συνέχεια να μεταφερθεί σε περιπτώσεις πραγματικών συνθηκών εξοικονομώντας ανθρώπινους και οικονομικούς πόρους.

Μελλοντικά το συγκεκριμένο πεδίο δοκιμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση ρύπων με διαφορετικές φυσικές ιδιότητες (π.χ. DNAPL). Ταυτόχρονα μπορεί να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα συναφών τεχνικών όπως για παράδειγμα η μέθοδος της επαγόμενης πόλωσης. Τέλος τα γεωφυσικά αποτελέσματα από ένα τέτοιο ελεγχόμενο πεδίο δοκιμών μπορούν μέσω κατάλληλων μοντέλων συσχέτισης να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση υδρογεωλογικών παραμέτρων με την ταυτόχρονη επαλήθευση των εκτιμώμενων τιμών με αντίστοιχες εργαστηριακές μετρήσεις.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, American Institute of Mineral and Metal Engineering. Technical Publication 1422, Petroleum Technology, pp. 8–13.
- Athanasίου Η., 2009. Algorithm Development for Optimum Measurements of ERT data, Unpublished PhD Thesis, University of Thessaloniki.
- Boulanger, O. and Chouteau, M., 2005. 3D Modelling and Sensitivity in DC Resistivity using Charge Density. *Geophysical Prospecting*, 53, 579-617.
- Domenico, P.A., Schwartz, F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley Press, p. 324.
- Dey, A. and Morisson, H.F., 1979. Resistivity Modelling for Arbitrarily Shaped Three-Dimensional Structures. *Geophysics*, 44, 753-780.
- Kim, J-H., 2005/ DC_2DPRO V. 0.99 User's Guide, Geoelectrical Imaging Laboratory, Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Kim, J.-H., Myeong-Jong, Yi., Sam-Gyu, Park, Jae Gon, Kim, 2009. 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. *Journal of Applied Geophysics*, 68 , 522–532.
- Mendoza, F.G., Steenhuis, S.T., Todd Walter, M., Parlange, J.-Y., 2003. Estimating basin-wide hydraulic parameters of a semi-arid mountainous watershed by recession-flow analysis. *Journal of Hydrology* 279, 57–69.
- Pridmore, D.F., Hohmann, G.W., Ward, S.H. and Sill, W.R., 1981. An Investigation of Finite-Element Modelling for Electrical and Electromagnetic Data in Three Dimensions. *Geophysics*, 46, 1009-1024.
- Geotomosoft Solutions, 2015. RES3DINVx64, for Windows XP/Vista/7/8, Rapid 3-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990 *Applied Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press.
- Tsourlos, P., 2014. OPTCROS1: CROSS HOLE ERT OPTIMIZED PROTOCOL GENERATOR, Manual.
- Tikhonov, A.N., Leonov, A.S. and Yagola, A.G., 1998. *Non-Linear Ill-Posed Problems*. Chapman and Hall, London, UK.

