

**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 Π3.10.2.2

Τίτλος: Τεχνική έκθεση σχεδιασμού, επεξεργασίας και ερμηνείας των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών δεδομένων.

Υπεύθυνος Φορέας/Ινστιτούτο: ΙΜΣ

Ονόματα συμμετεχόντων: Στέλλα Κίρκου, Κλεάνθης Σιμυρδάνης Νίκος Παπαδόπουλος

Ημερομηνία: 30/06/2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Υπουργείο Παιδείας & Θρησκευμάτων
Γενική Γραμματεία Έρευνας & Τεχνολογίας



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ & ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – Ανάλυση του προβλήματος και πεδίο εφαρμογής	3
2. ΑΓΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (Ρέθυμνο)	5
2.1 Θέση και Γενική Γεωλογία της Περιοχής.....	5
2.2 Μεθοδολογία.....	8
2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας και Η/Μ.....	13
2.4 Αποτελέσματα Μαγνητικής Επιδεκτικότητας Εδαφικών Δειγμάτων	20
3. ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ (Χανιά)	24
4. Ρούστικα-Ρέθυμνο.....	27
4.1 Αποτελέσματα τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στα Ρούστικα	30
4.2 Αποτελέσματα μαγνητικής επιδεκτικότητας.....	31
5. Συμπεράσματα – Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα.....	35
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	36
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Συνθετικό Μοντέλο Ηλεκτρικής Τομογραφίας	37

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η μόλυνση του περιβάλλοντος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα σήμερα της ανθρωπότητας, το οποίο επιτείνεται ιδιαίτερα λόγω της συνεχιζόμενης αστικοποίησης, της βιομηχανοποίησης του τρόπου ζωής, της ανεξέλεγκτης χρήσης φυτοφαρμάκων με ταυτόχρονη καταστροφή των φυσικών πόρων του πλανήτη. Η επιστημονική κοινότητα τις τελευταίες δεκαετίες έχει στρέψει την προσοχή της στην εξεύρεση αποτελεσματικών λύσεων για την αντιμετώπιση αυτών των σημαντικών περιβαλλοντικών προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα στην Ελλάδα, λόγω κυρίως της γεωγραφικής της θέσης (μεσογειακό κλίμα) και του πληθυσμού της (μεγάλο σχετικά ποσοστό αγροτικού πληθυσμού), πρέπει να αντιμετωπιστούν συγκεκριμένα περιβαλλοντικά προβλήματα τα οποία σχετίζονται με την διαχείριση αποβλήτων αγροτικής παραγωγής, όπως είναι η παραγωγή ελαιόλαδου από την επεξεργασία του ελαιόκαρπου.

Η παραγωγή του ελαιόλαδου στην Μεσόγειο αποτελεί μία από τις βασικές οικονομικές δραστηριότητες, με ετήσια παραγωγή που υπερβαίνει τους 2.300.000 τόνους. Ο ελαιοπαραγωγικός κλάδος αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς της γεωργικής παραγωγής στην Ελλάδα καθώς είναι η τρίτη ελαιοπαραγωγός χώρα σε παγκόσμιο επίπεδο μετά την Ισπανία και την Ιταλία με συμμετοχή κατά προσέγγιση 15% της παγκόσμιας παραγωγής ελαιόλαδου. Παράλληλα η ποιότητα του ελληνικού ελαιόλαδου εκτιμάται ως ανώτερη των λοιπών ελαιοπαραγωγικών χωρών. Στα παραπάνω πρέπει να προστεθεί ότι και τα ωφέλη της κατανάλωσης του ελαιόλαδου είναι γνωστά από την αρχαιότητα όσον αφορά μία ισορροπημένη διατροφή

Από την άλλη όμως κατά την επεξεργασία και παραγωγή του λαδιού προκύπτει μεγάλη ποσότητα υγρών αποβλήτων (γνωστά και ως «κατσίγαρος»). Τα απόβλητα των ελαιοτριβείων αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα ρύπανσης στις ελαιοκομικές περιοχές αλλά και ένα σημαντικό πρόβλημα προς επίλυση για τη γεωργική βιομηχανία. Οι κυριότεροι λόγοι είναι: α) Η μεγάλη παραγωγή αποβλήτων μέσα σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, τα οποία θα πρέπει, ιδανικά, να κατεργαστούν ή να διατεθούν με ασφάλεια για το περιβάλλον πριν αρχίσει η επόμενη παραγωγική περίοδος. β) Τα φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων, κάποια από τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σημαντική επιβάρυνση στους αποδέκτες που διατίθενται γ) Το ιδιαίτερα υψηλό οργανικό φορτίο των αποβλήτων καθώς και ορισμένα ανόργανα συστατικά (ενώσεις του αζώτου και του φωσφόρου, νάτριο, κάλιο, σίδηρος, κ.α.) τα οποία αν και δεν είναι τοξικά, εν τούτοις η μεγάλη συγκέντρωσή τους και η επαναλαμβανόμενη, επί μακρόν, διάθεσή τους μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στο περιβάλλον.

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία εξαγωγής του ελαιόλαδου τα κατάλοιπα της επεξεργασίας αποτίθενται σε λεκάνες, συνήθως τεχνητά δημιουργημένες μέσα στο έδαφος. Οι λεκάνες αυτές εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας του κατσίγαρου δεν επαρκούν για να συγκρατήσουν την αυξημένη ποσότητα των αποβλήτων με αποτέλεσμα την υπερχείλιση αυτών σε παρακείμενες περιοχές (π.χ. ποτάμια). Επιπλέον, με τη πάροδο του χρόνου απορροφάται μεγάλη ποσότητα από το υπέδαφος και σε συνδυασμό με την υψηλή τους περιεκτικότητα σε οργανικά στοιχεία (κυρίως φαινόλες και πολυφαινόλες) και ανόργανα συστατικά (κάλιο και φώσφορο) τα καθιστούν ιδιαίτερα επικίνδυνα για την ισορροπία του περιβάλλοντος. Είναι προφανές ότι η μακροχρόνια διάθεση των αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε μελλοντική σοβαρή υποβάθμισή της ποιότητας του εδάφους και των υδάτων.

Ο κατσίγαρος αποτελεί ένα υδατικό φυτικό εκχύλισμα, που περιέχει μία σειρά από ουσίες όπως σάκχαρα, αζωτούχες ενώσεις, οργανικά οξέα, πολυαλκοόλες, πολυφαινόλες και υπολείμματα ελαιόλαδου. Η έντονη οσμή του και στο σκούρο χρώμα του έχουν άμεση επίπτωση και σημαντική υποβάθμιση στο περιβάλλον. Επιπλέον το οργανικό φορτίο που περιέχει, είναι πιθανόν να δημιουργήσει ευτροφικά φαινόμενα σε περιπτώσεις που καταλήγει σε αποδέκτες με μικρή ανακυκλοφορία νερών (κλειστούς θαλάσσιους κόλπους, λίμνες κ.τ.λ). Από τα συστατικά που περιέχονται στον κατσίγαρο, οι πολυφαινόλες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον διότι από τη μία πλευρά προσδίδουν στα απόβλητα τοξικές ιδιότητες έναντι των φυτών και αποδομούνται με βραδύ σχετικά ρυθμό από εξειδικευμένες ομάδες μικροοργανισμών, ενώ από την άλλη είναι υπεύθυνες για τη συντήρηση της ποιότητας του λαδιού στο χρόνο (χαμηλή οξύτητα) ως φυσικό συντηρητικό. Επειδή η παραγωγή του ελαιόλαδου είναι μία φυσική διαδικασία, πρέπει να σημειωθεί ότι ο κατσίγαρος δεν περιέχει άλλες ουσίες που είναι ιδιαίτερα τοξικές, όπως τα βαρέα μέταλλα και οι συνθετικές οργανικές ενώσεις.

Το υψηλό οργανικό φορτίο του κατσίγαρου σε συνάρτηση με την παρουσία των πολυφαινολών (Rodis et al 2002) δεν επιτρέπει την απευθείας διάθεσή του στο περιβάλλον, αλλά καθιστά αναγκαία την πρότερη επεξεργασία του. Παρόλα αυτά, περίπου το 90% των ελαιουργείων διοχετεύει τα απόβλητα στο περιβάλλον χωρίς καμία επεξεργασία καθώς μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί μία ολοκληρωμένη λύση διαχείρισης των αποβλήτων αυτών. Η συνήθης πρακτική αποτελεί η απόθεση των αποβλήτων σε δεξαμενές εξάτμισης που κατασκευάζονται στο υπέδαφος χωρίς καμία πρόβλεψη υποτυπώδους στεγανοποίησης, είτε απευθείας στο έδαφος, είτε σε παραπλήσια ποτάμια ή ακόμα και ρυάκια.

Για τους προαναφερθέντες λόγους κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικό η αντιμετώπιση της μόλυνσης του περιβάλλοντος από τον κασιγάρο, που με μία πρώτη προσέγγιση μπορεί να γίνει με την γεωφυσική παρακολούθηση του φαινομένου και συγκεκριμένα με τον εντοπισμό της ροής των αποβλήτων τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Ο στόχος (κασιγάρος) παρουσιάζει χαμηλή τιμή αντίστασης (αγώγιμος) και σε σχέση με τις υψηλές τιμές αντίστασης του περιβάλλοντα χώρου είναι εφικτή η χαρτογράφηση και η παρακολούθηση της ροής του στο υπέδαφος με διάφορες γεωφυσικές τεχνικές (ηλεκτρική τομογραφία, ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι, μέτρηση μαγνητικής επιδεκτικότητας).

Οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν ένα σύγχρονο εργαλείο ελέγχου και χαρακτηρισμού του υπεδάφους. Ειδικότερα, γεωφυσικές διασκοπήσεις εκτελούνται στην επιφάνεια (Lanz et al., 1998, Benson et al., 1984) και σε γεωτρήσεις (εγκατάσταση ηλεκτροδίων/δεκτών σε δίκτυο γεωτρήσεων με σκοπό τη διαχρονική παρακολούθηση μεταβολής των χαρακτηριστικών του υπεδάφους). Οι συχνότερα προτεινόμενες γεωφυσικές μέθοδοι στον εντοπισμό ρύπων στο υπέδαφος είναι οι ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης όπως η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας (Sourios et al. 2007; Slater et al. 2007; Papadopoulos et al. 2009). Δεδομένου ότι στην ηλεκτρική τομογραφία η ανάλυση των εικόνων μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος έρευνας, η χρήση ηλεκτροδίων στις γεωτρήσεις μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα της λαμβανόμενης γεωηλεκτρικής εικόνας. (Daily and Ramirez, 2000; Tsourlos et al., 2008). Η μόνιμη εγκατάσταση ηλεκτροδίων σε γεωτρήσεις επιτρέπει τη διαχρονική λήψη μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας ώστε να καταγραφούν οι χωρικές και χρονικές αλλαγές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων λόγω της κίνησης των ρυπαντών (Kim et al 2009). Η χρήση ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού της μόλυνσης α) από ρύπους που βρίσκονται εντός του εδάφους και πάνω από τον υδροφόρο, β) από επιπλέοντας ρύπους και γ) από βυθιζόμενους και διαλυμένους ρύπους εντός του υδροφορέα (π.χ. Bradford and Wu 2007). Επίσης ο περιβαλλοντικός μαγνητισμός αποτελεί μια σχετικά καινούρια επιστήμη η οποία έχει επεκταθεί και προς την έρευνα για την ανθρωπογενή ρύπανση (Maher and Thompson, 1999).

Μία σειρά από διαφορετικές γεωφυσικές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικά σε τρεις διαφορετικές θέσεις απόθεσης αποβλήτων στην Κρήτη (Σχήμα 1) με σκοπό την μελέτη της αποτελεσματικότητάς τους στην χαρτογράφηση και παρακολούθηση της ροής των ρύπων στο υπέδαφος. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα της ολοκληρωμένης γεωφυσικής χαρτογράφησης στις θέσεις του Αγίου Ανδρέα (Ρέθυμνο), Αλικιανού (Χανιά) και Ρούστικα (Ρέθυμνο) καθώς και τα γενικά συμπεράσματα της εφαρμογής αυτών των μεθοδολογιών για αντιμετώπιση του περιβαλλοντικού προβλήματος της μόλυνσης από την απόθεση του κασιγάρου.



Σχήμα 1: Χωρική κατανομή των θέσεων αποβλήτων ελαιοτριβείων (Αγ. Ανδρέας, Ρούστικα, Αλικιανός) όπου πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις των γεωφυσικών διασκοπήσεων (Δορυφορική εικόνα από Google Earth).

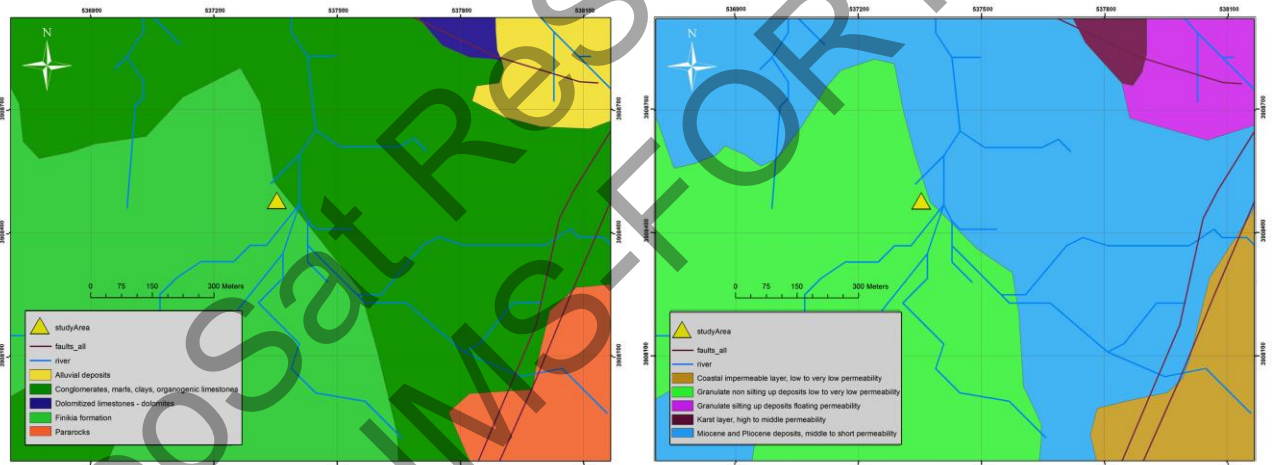
2. ΑΓΙΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (ΡΕΘΥΜΝΟ)

2.1 Θέση και Γενική Γεωλογία της Περιοχής

Το χωριό Άγιος Ανδρέας βρίσκεται περίπου 15 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά της πόλης του Ρεθύμνου (**Σχήμα 2**). Η ευρύτερη περιοχή αποτελείται από κροκαλοπαγή, μάργες, αργίλους, οργανογενή και δολομιτωμένους ασβεστόλιθους (**Σχήμα 3, αριστερά**). Στην ανατολική πλευρά της περιοχής μελέτης, που επισημαίνεται με κίτρινο τρίγωνο, υπάρχει ένα ποτάμι που ακολουθεί την κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο (**Σχήμα 3, δεξιά**). Επιπλέον, προσχωματικές αποθέσεις με χαμηλή έως πολύ χαμηλή διαπερατότητα εντοπίζονται στο δυτικό μέρος της περιοχής. Αποθέσεις του Μειόκαινου και Πλειόκαινου με μέτρια έως χαμηλή επιδεικτικότητα έχουν αποθεθεί προς την ανατολική πλευρά.

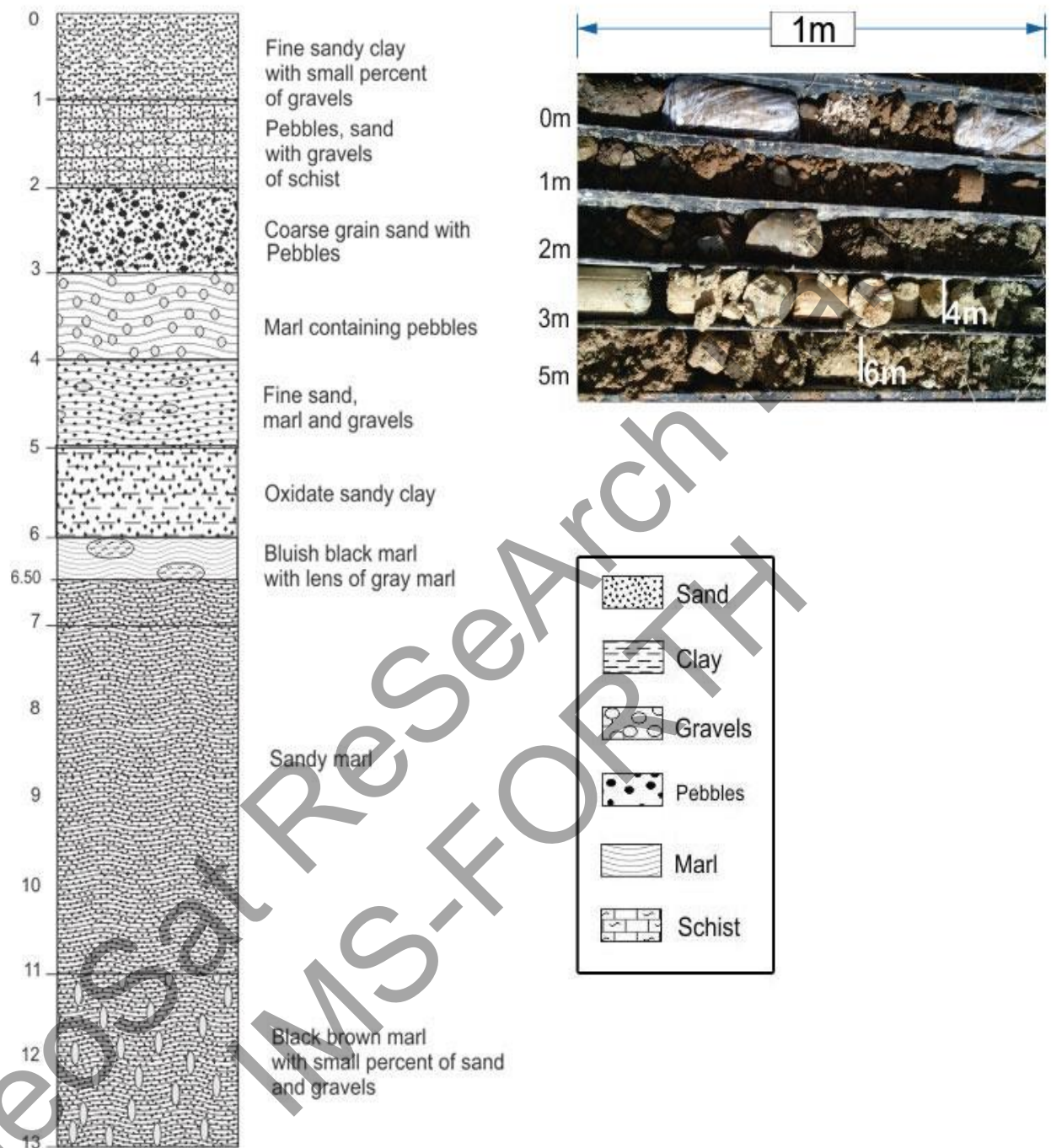


Σχήμα 2. Χάρτης όπου απεικονίζεται η περιοχή ενδιαφέροντος που βρίσκεται στο χωριό Αγ. Ανδρέας κοντά στην πόλη του Ρεθύμνου (Κρήτη).



Σχήμα 3. Γεωλογικός (αριστερά) και υδρογεωλογικός (δεξιά) χάρτης της ευρύτερης περιοχής. Με κίτρινο τρίγωνο επισημαίνεται η περιοχή ενδιαφέροντος.

Η λεπτομερέστερη καταγραφή της στρωματογραφίας της περιοχής μελέτης προέκυψε από την περιγραφή των σχηματισμών που καταγράφηκαν και των δειγμάτων που συλλέχθηκαν στις δύο γεωτρήσεις που ανοίχτηκαν με περιστροφικό γεωτρήσιμο. Η δειγματοληψία των εδαφικών δειγμάτων στις γεωτρήσεις ήταν συνεχής μέχρι το βάθος των 13 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους (**Σχήμα 4**). Η περιοχή μελέτης γενικά χαρακτηρίζεται από μαργαϊκές αποθέσεις με ψιλόκοκκη άμμο και χαλίικα. Συγκεκριμένα οι εδαφικοί σχηματισμοί που αναγνωρίστηκαν στις γεωτρήσεις με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους είναι: Αμμώδης πηλός με μικρό ποσοστό από χαλίικα (0-1 μ.), χαλίικα, άμμος με αμμοχάλικα από σχιστόλιθο (1-2 μ.), βότσαλα (2-2.5 μ.), χονδρόκοκκη άμμος (2.6-3 μ.), μάργες που περιέχουν βότσαλα (3-4 μ.), ψιλόκοκκη άμμος, μάργες και κροκάλες (4-5 μ.), άμμώδης και οξυδωμένη αμμώδης άργιλος (5-5.8 μ.), γκρί μάργα, κυανότερη μάργα με φακούς γκρί μάργας και αμμώδης μάργα (5.8-7 μ.) σύμφωνα με το **Σχήμα 4**.

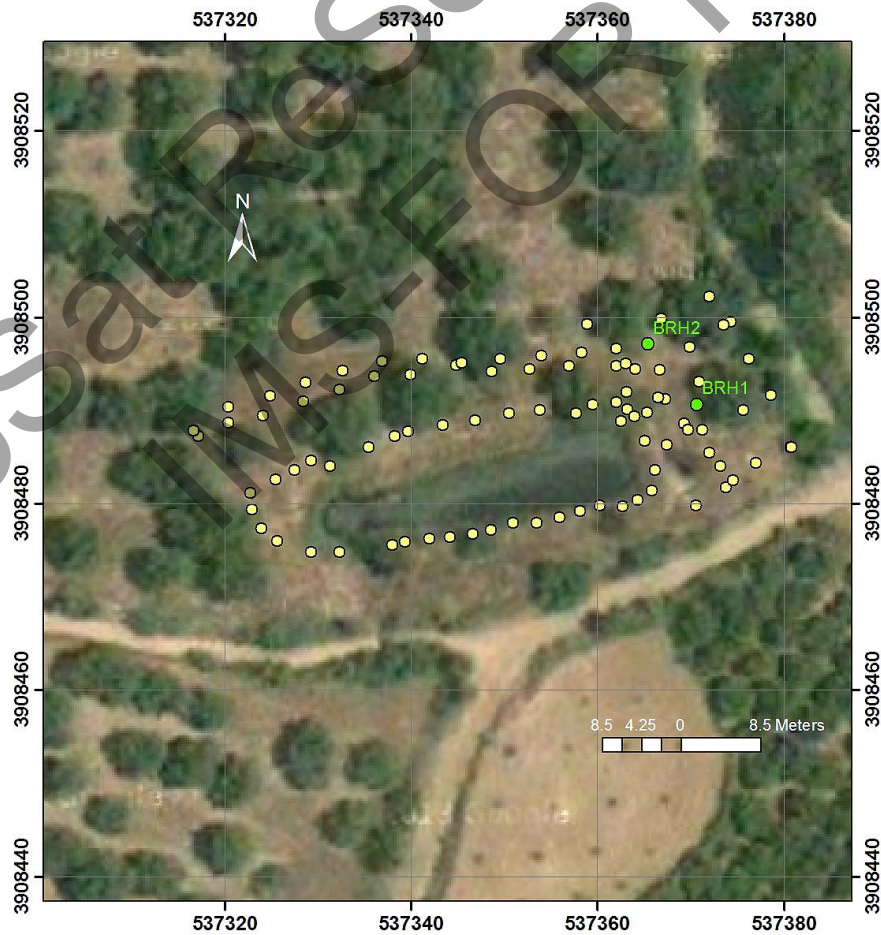


Σχήμα 4. Στρωματογραφική στήλη (αριστερά) συνοδευόμενη με φωτογραφία από τα εδαφικά δείγματα της γέωτρησης (δεξιά).

Μέσα σε μία ιδιοκτησία που περιλαμβάνει ελαιόδεντρα έχει κατασκευαστεί μία τεχνητή λεκάνη βάθους περίπου 3-4 μέτρων και διαστάσεων περίπου 43x12 μέτρων (**Σχήμα 5**). Στην υπαίθρια αυτή δεξαμενή αποτίθενται ακόμα και σήμερα τα απόβλητα που παράγονται από την παραγωγή του ελαιολάδου σε γειτονικό ελαιουργείο. Στο **Σχήμα 6** απεικονίζεται η οριοθέτηση της δεξαμενής όπως αυτή χαρτογραφήθηκε με τη χρήση GPS περιμετρικά (κίτρινες κουκκίδες).



Σχήμα 5. Φωτογραφία δεξαμενής απόθεσης αποβλήτων ελαιοπαραγωγής στον Άγιο Ανδρέα.

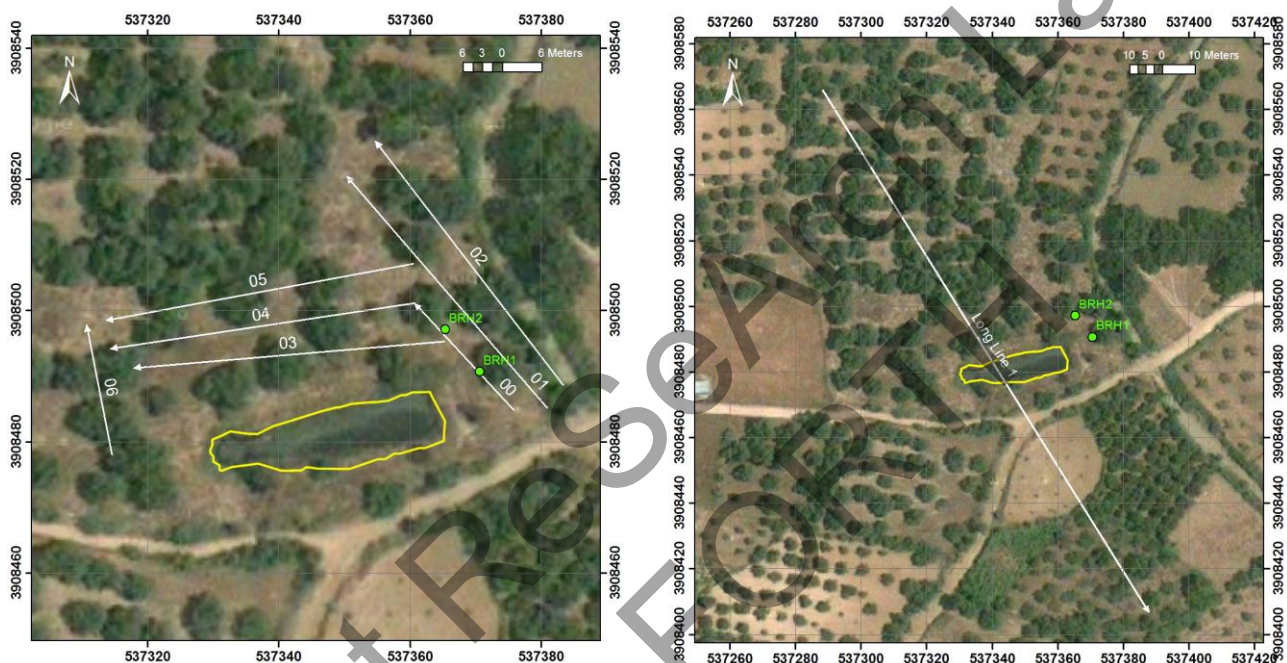


Σχήμα 6. Δεξαμενή απόθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείου στον Άγιο Ανδρέα που επισημαίνεται με GPS χαρτογράφηση (κίτρινες κουκκίδες) και θέση γεωτρήσεων "BH1" και "BH2" (πράσινες κουκκίδες).

2.2 Μεθοδολογία

Για την παρακολούθηση του φαινομένου απορρόφησης των αποβλήτων από το υπέδαφος επιλέχθηκαν συγκεκριμένες θέσεις περιμετρικά γύρω από την δεξαμενή όπου και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας (Σχήμα 7). Σε κάποιες από τις τομές επιπρόσθετα εφαρμόστηκε και η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος με σκοπό από τα συμπεράσματα που θα προκύψουν να συγκριθούν με αυτά των ηλεκτρικών τομογραφιών.

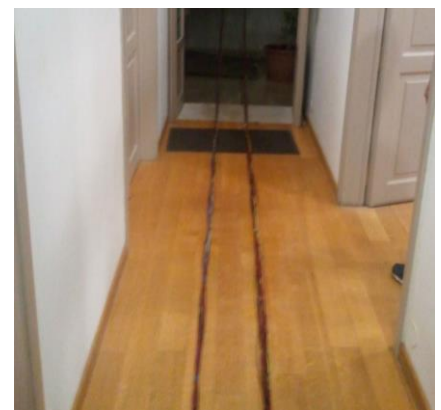
Αρχικά, για την χαρτογράφηση των βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών και τον εντοπισμό του υποβάθρου χρησιμοποιήθηκε μία τομογραφία μήκους 190 μέτρων ("Long Line 1") με κατεύθυνση ΒΔ προς ΝΑ, η οποία περνάει μέσα από την λεκάνη απόθεσης. Μικρότερου μήκους τομές από 24 έως 45 μέτρα ("Line 01", "Line 02", "Line 03", "Line 04", "Line 05" και "Line 06") χρησιμοποιήθηκαν για την χωρική παρακολούθηση της κίνησης των ρύπων στο υπέδαφος. Για τη διαχρονική παρακολούθηση του φαινομένου χρησιμοποιήθηκε η "Line00". Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ανάλογα με την τομή που επιλέγεται μυμάνθηκε από 1 έως 5 μέτρα.



Σχήμα 7. Θέση γραμμών όδευσης για την πραγματοποίηση ηλεκτρικών τομογραφιών μικρού μήκους (αριστερά) και μεγάλου μήκους για τον εντοπισμό του υποβάθρου (δεξιά). Τα όρια της λεκάνης απόθεσης επισημειώνεται με κίτρινο περίγραμμα.

Για την εκτενέστερη μελέτη του φαινομένου πραγματοποιήθηκαν και δύο γεωτρήσεις ("BH1" και "BH2") στην ανατολική μεριά της δεξαμενής (πράσινες κουκκίδες) σύμφωνα με το Σχήμα 9. Με τη δημιουργία των γεωτρήσεων αφενός μεν ελήφθησαν δείγματα εδάφους με το βάθος, αφετέρου χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη πληροφοριών με την εγκατάσταση ηλεκτροδίων στο εσωτερικό των γεωτρήσεων. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων είναι 9 μέτρα και το βάθος τους φτάνει στα 12 μέτρα με το πρώτο ηλεκτρόδιο να ξεκινάει από τα 0.5 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους. Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσα στις γεωτρήσεις ήταν 0.5 μέτρο.

Για τη λήψη των τομογραφικών γεωηλεκτρικών μετρήσεων από τις γεωτρήσεις κατασκευάστηκαν καλώδια συνολικού μήκους 15 μέτρων έτσι ώστε να τοποθετηθούν μέσα στις γεωτρήσεις (Σχήμα 8). Τα ηλεκτρόδια (24 στο σύνολο ανά γεώτρηση) του καλωδίου μέσα στη γεώτρηση απείχαν μεταξύ τους 0.5 μέτρο. Κάθε ένα από αυτά τα ηλεκτρόδια (απογυμνωμένο καλώδιο) δέθηκε πάνω σε πλαστική σωλήνα (συνολικού μήκους 13 μέτρων) και με τη χρήση αλουμινοταινίας δημιουργήθηκε επιπλέον αγωγίμη επιφάνεια (Σχήμα 9). Με το πέρας της εγκατάστασης των σωλήνων με τα ηλεκτρόδια μέσα στις γεωτρήσεις προστέθηκε μεταξύ του πλαστικού σωλήνα και των τοιχωμάτων της γεώτρησης μείγμα από μπεντονίτη (σε μορφή σκόνης) και νερού ώστε να μειωθεί η αντίσταση επαφής ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και στο έδαφος.



Σχήμα 8. Κατασκευή καλωδίων για τοποθέτηση αισθητήρων μέσα σε γεωτρήσεις.



α



β



γ

Σχήμα 9. Κατασκευή γεωτρήσεων για την εγκατάσταση ηλεκτροδίων στο εσωτερικό του υπεδάφους (α) με ειδικό μηχάνημα διάτρησης, (β) Τοποθέτηση αισθητήρων με τη χρήση αλουμινοταινίας για αύξηση της αγωγιμής επιφάνειας. (γ) Ολοκλήρωση εγκατάστασης με επιπλέον γέμισμα με μπεντονίτη (σακιά) για καλύτερη επαφή ανάμεσα στους αισθητήρες και στο έδαφος.

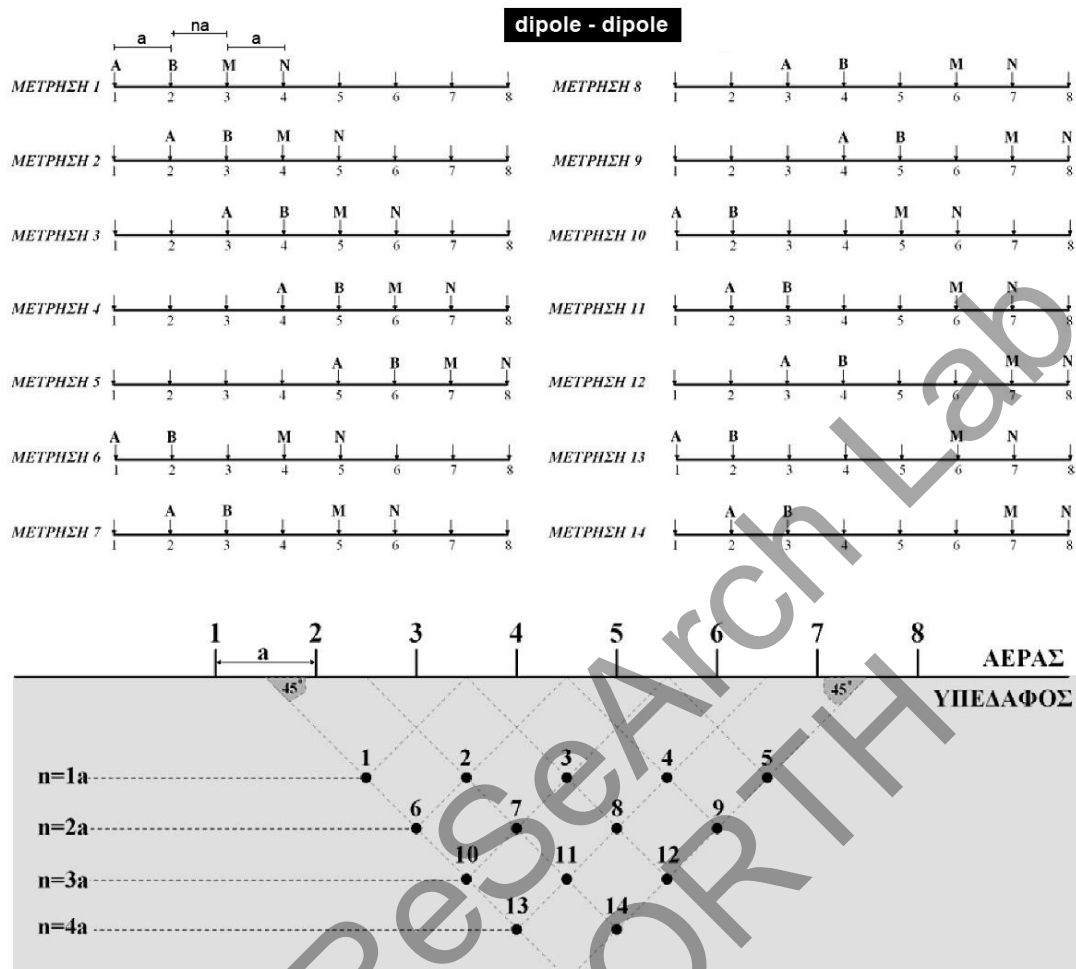
Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένα πολυκάναλο όργανο μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης (Syscal Pro-Switch Pro) και για τις επιφανειακές μετρήσεις εργοστασιακά καλώδια με εσωτερικές αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων του 1 ή 5 μέτρων, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 10**. Η επιλογή του κατάλληλου καλωδίου προέκυπτε κατά περίπτωση ανάλογα με το συνολικό μήκος της τομής (τα καλώδια με εσωτερική απόσταση του 1 μέτρου δεν μπορούν να διεκπεραιώσουν τομές πάνω από 95 μέτρα αφού το σύνολο των αισθητήρων είναι 96).



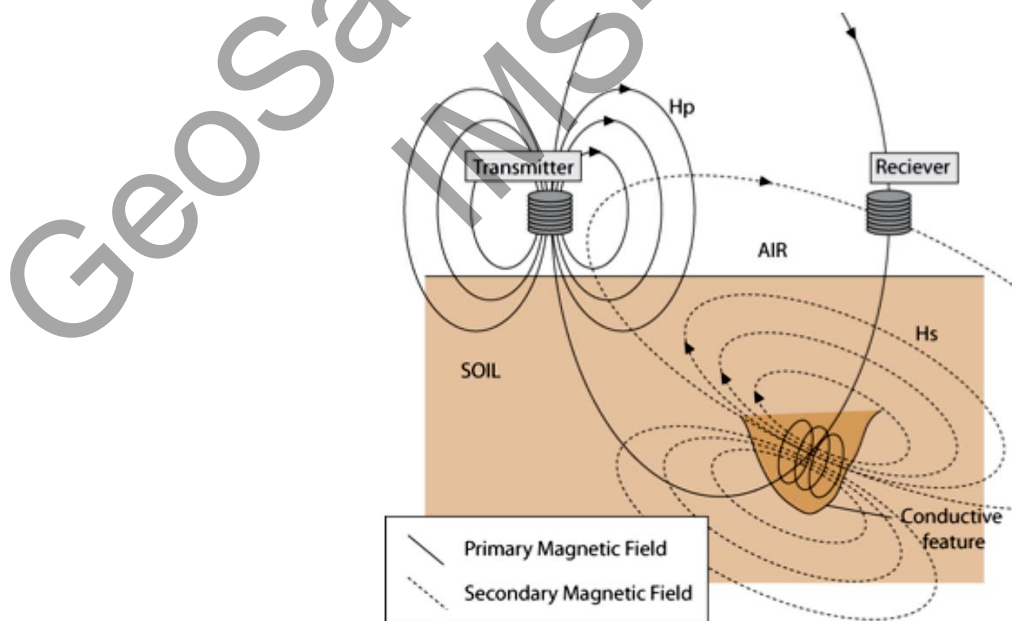
Σχήμα 10. Εξοπλισμός για τη συλλογή δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης (όργανο μέτρησης, υπολογιστής, εξωτερική μπαταρία και καλώδιο ηλεκτροδίων).

Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε συγκεκριμένο πρωτόκολλο ("dipole-dipole") το οποίο χρησιμοποιεί δύο ηλεκτρόδια ρεύματος (A, B) για την εισαγωγή του ρεύματος στο υπέδαφος και δύο ηλεκτρόδια δυναμικού (M, N) για την μέτρηση της διαφοράς δυναμικού (**Σχήμα 11**). Η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού κυμαίνεται από $1a$ έως $3a$ και η μέγιστη απόσταση μεταξύ των διπόλων είναι $N = 7a$ (a η βασική απόσταση των ηλεκτροδίων μεταξύ κατά μήκος των γραμμών). Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό "DC2DPro" το οποίο έχει τη δυνατότητα να επιλύει το ευθύ πρόβλημα βασισμένο στην επίλυση των πεπερασμένων στοιχείων και με τη χρήση επαναληπτικού αλγόριθμου και ελαχίστων τετραγώνων είναι ικανό για την ανακατασκευή υπεδάφιας γεωηλεκτρικών μοντέλων.

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος (EM) βασίζεται στην διάδοση με το χρόνο μαγνητικού πεδίου (το ονομαζόμενο «πρωτογενές») μέσω ενός πηνίου (πομπός) όπως φαίνεται στο **Σχήμα 12**. Το πεδίο διαδίδεται στον χώρο του υπεδάφους και δημιουργεί επαγόμενα ρεύματα σε αγώγιμα υλικά. Τα ρεύματα αυτά παράγουν νέο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, το «δευτερογενές». Τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον πεδίο μετρώνται από τον δέκτη του οργάνου. Ταυτόχρονα, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μαγνητίζει το έδαφος μέσω επαγόμενου μαγνητισμού. Η μαγνήτιση επίσης θα επηρεάσει το δευτερεύον πεδίο. Η ιδιότητα του εδάφους η οποία καθορίζει την ένταση αυτής της μαγνήτισης ονομάζεται «μαγνητική επιδεκτικότητα». Το πρωτεύον και δευτερεύον πεδίο είναι μετατοπισμένα στο χρόνο (έχουν διαφορά φάσης). Από τον καθορισμό της τιμής του μιγαδικού αριθμού (πραγματικό και φανταστικό μέρος) προσδιορίζεται το δευτερεύον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και κατ' επέκταση η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η μαγνητική επιδεκτικότητα.



Σχήμα 11. Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστη απόσταση μεταξύ των διπόλων $N=4a$.



Σχήμα 12. Αρχή διάδοσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου: Δημιουργία πρωτεύοντος πεδίου από τον “πομπό” και του δευτερεύοντος πεδίου από αγώγιμο υλικό μέσα στο έδαφος και μετέπειτα καταγραφή και των δύο πεδίων από τον “δέκτη”.

Για την εφαρμογή της μεθόδου των EM ελήφθησαν δεδομένα από τις γραμμές “Line1” και “Line2”. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι: “GEM2”, “EM31” και “CMD”, όπου και τα χαρακτηριστικά του κάθε οργάνου παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η συλλογή των δεδομένων κατά μήκος των γραμμών πραγματοποιήθηκε με σταθερή δειγματοληψία (ανά μέτρο). Όλα τα όργανα ρυθμίστηκαν στην περιοχή μελέτης έτσι ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν πιο πιστά στην τιμή της φαινόμενης αγωγιμότητας της υπό εξέταση περιοχής. Η αντιστροφή των δεδομένων που συλλέχθηκαν βασίστηκε σε έναν αλγόριθμο απόσβεσης ελαχίστων τετραγώνων (μέθοδος Levenberg Marquadt) και η διαδικασία της αντιστροφής τερματίστηκε όταν το % σφάλμα (RMS) ήταν μικρότερο από 3%.

	Coils Spacing (m)	Frequency (Hz)	Geometries	Height (m)
GEM2	1.66	4950, 10230, 21030, 43350, 89430	HCP*, VCP*	0.05
EM31	3.66	9800	HCP, VCP	1
CMD	0.32, 1.71, 1.2	30000	HCP, VCP	0.03

* HCP: Horizontal Co-Planar, *VCP: Vertical Co-Planar

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά των οργάνων μέτρησης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν στις γεωφυσικές μετρήσεις στον Άγιο Ανδρέα.

DATE	Borehole	Line 00	Line 01	Line 02	Line 03	Line 04	Line 05	Line 06
5/10/2013	X							
1/11/2013	X							
12/11/13		X	X					
18/12/2013		X						
12/2/2014		X	X	X	X	X	X	X
4/4/2014	Alikianos test site							
6/8/2014	Alikianos test site							
9/10/2014		X	X	X	X	X		
25/11/2014	EM Method							
16/10/2014	ERT - Long Line 1							
15/1/2015	Soil Samples							
20/3/2015	Alikianos test site							

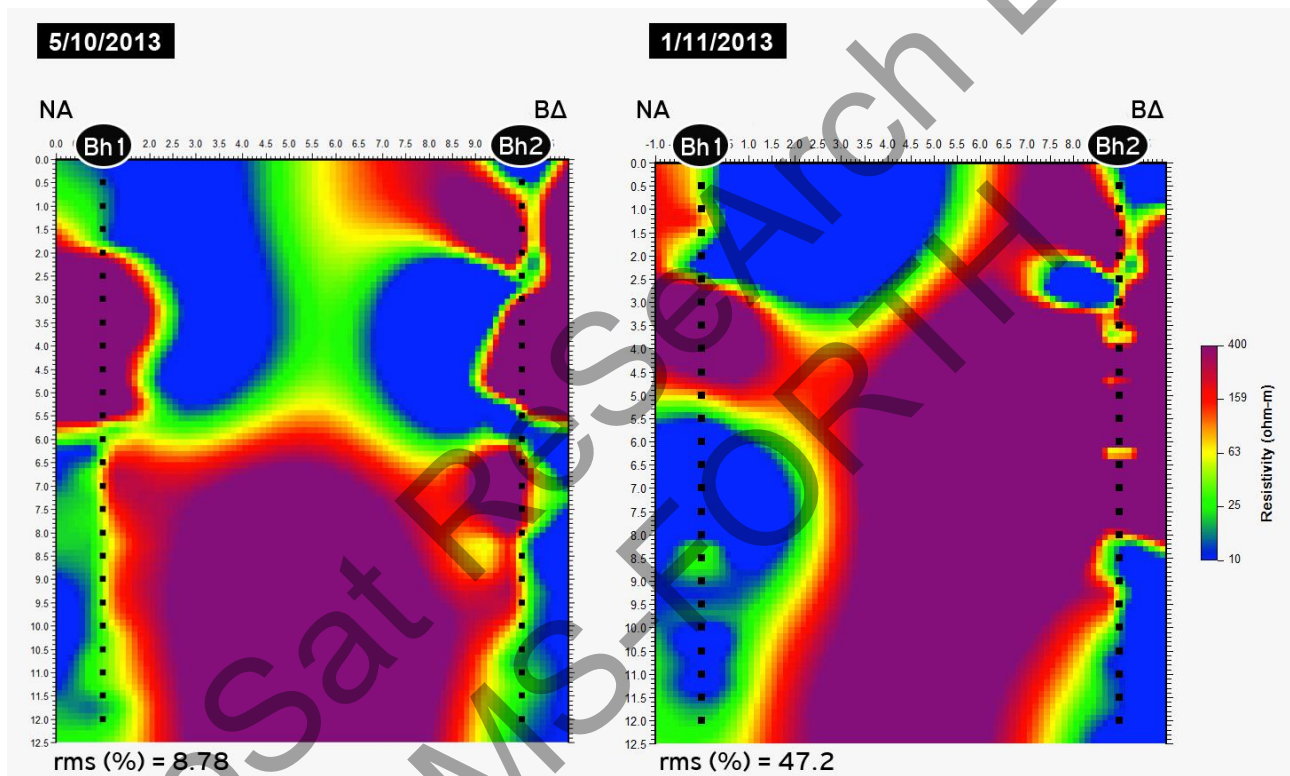
Πίνακας 2. Χρονοδιάγραμμα (μέρα/μήνας/έτος) λήψης δεδομένων: ERT, EM και μαγνητικής επιδεκτικότητας στον Αγ. Ανδρέα και Αλικιανό

Στον Πίνακα 2, παρουσιάζονται εποπτικά οι ημερομηνίες (ημερ./μήνας/έτος) λήψης των δεδομένων (ηλεκτρικών, EM και εδαφική δειγματοληψία για μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας) τόσο στην περιοχή του Αγ. Ανδρέα όσο και στον Αλικιανό. Συνολικά ελήφθησαν δεδομένα από 11 διαφορετικές φάσεις από τις 5/10/2013 έως 20/3/2015, μία χρονική περίοδος ικανοποιητική ώστε να συμπεριλάβει την εξέλιξη του φαινομένου ροής των ρύπων από την απόθεση τους μέχρι την απορρόφησή τους από το έδαφος.

2.3 Αποτελέσματα και ερμηνεία γεωφυσικών δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας και H/M

Τα αποτελέσματα από τις εικόνες αντιστροφής παρατίθενται στα επόμενα σχήματα. Κοινή κλίμακα τιμών ηλεκτρικής αντίστασης έχει χρησιμοποιηθεί σε όλες τις εικόνες αντιστροφής (από 10 έως 400 ohm-m). Η συγκεκριμένη κλίμακα έχει επιλεγεί ώστε να συμπεριλάβει κατά βάσει την χαμηλή τιμή του «στόχου» που εκτιμάται στα 10 ohm-m, αλλά και τις υψηλές τιμές των αντιστατικών περιοχών του υπεδάφους που απεικονίζονται με τιμές που πλησιάζουν τα 400 ohm-m. Οι εικόνες αντιστροφής παρατίθενται με χρονολογική σειρά από τις πλησιέστερες προς τις πιο απομακρυσμένες στην δεξαμενή τομές.

Ξεκινώντας από τις μετρήσεις στις γεωτρήσεις, τα αποτελέσματα παρουσίασαν κάποια προβλήματα τα οποία προφανώς προέκυψαν κατά την εγκατάσταση των αισθητήρων μέσα στις γεωτρήσεις (**Σχήμα 13**). Συγκεκριμένα, οι τιμές των αντιστάσεων είναι αφύσικα πολύ υψηλές, το ίδιο και το % σφάλμα (rms) μεταξύ των θεωρητικών με τις πραγματικές μετρήσεις. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε απαραίτητο να μην χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα στην περαιτέρω ανάλυση λόγω της ελάχιστης αξιοπιστίας τους σε σχέση με την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.



Σχήμα 13. Εικόνες αντιστροφής από τις γεωτρήσεις Bh1 και Bh2. Με μαύρες κουκκίδες απεικονίζεται η θέση των ηλεκτροδίων.

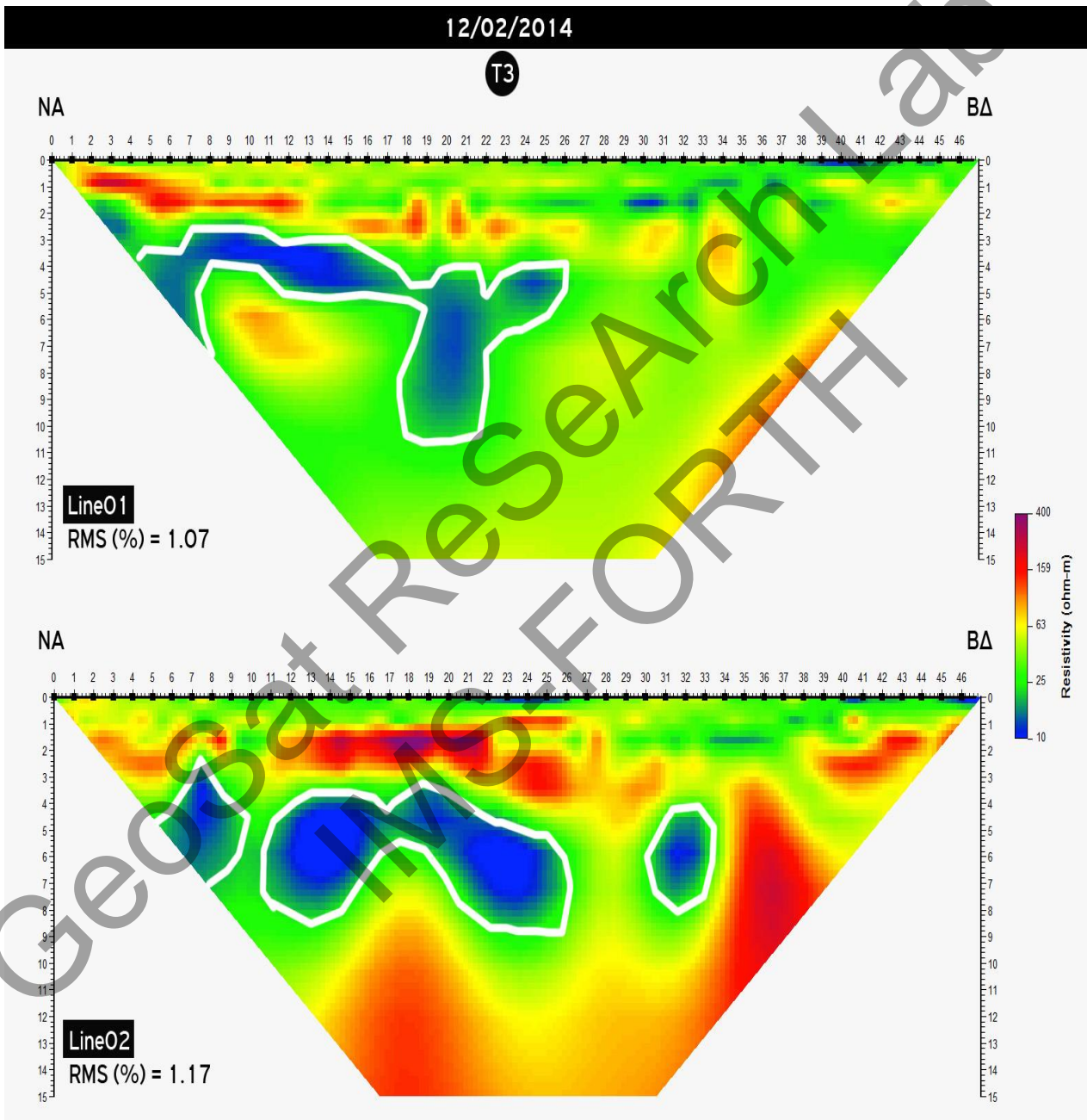
Όσον αφορά τις επιφανειακές τομογραφίες, στο **Σχήμα 14**, απεικονίζονται αποτελέσματα αντιστροφής από δύο παράλληλες μεταξύ τους γραμμές ('Line01' και 'Line02') την ίδια χρονική στιγμή 'T3' (12/02/2014). Η πλησιέστερη στη λεκάνη απόθεσης είναι η γραμμή 'Line01'. Από τη σύγκριση των δύο γραμμών φαίνεται η διάχυση του ρύπου καθώς αυτός απομακρύνεται από την λεκάνη. Και στις δύο γραμμές εντοπίζεται σε βάθος 3-6 μέτρων ως ένας αγωγίμος στόχος.

Στο **Σχήμα 15**, απεικονίζεται η διάχυση του αγωγίμου ρύπου σε τρεις επίσης παράλληλες γραμμές ('Line03', 'Line04' και 'Line05') με την 'Line03' να βρίσκεται πλησιέστερα στην λεκάνη απόθεσης. Παρόλο που ο στόχος εντοπίζεται και στις τρεις γραμμές, παρατηρείται αισθητή μείωση της ποσότητας αυτού όσο απομακρυνόμαστε από τη λεκάνη απόθεσης προς τα βόρεια της περιοχής.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο περιοχών που απαρτίζονται από τις γραμμές: 'Line01'-'Line02' και 'Line03'-'Line04'-'Line05', παρατηρείται ότι η κατεύθυνση του ρύπου προς την ΒΑ πλευρά της λεκάνης υπερισχύει σε σχέση με την ΒΒΔ πλευρά.

Δεδομένα από τις γραμμές 'Line1', 'Line2', 'Line3' και 'Line4' ελήφθησαν επιπλέον τη χρονική στιγμή 'T4' (9/10/2014), και οι γεωηλεκτρικές τομές αντιστροφής φαίνονται στο **Σχήμα 16** και **Σχήμα 17**. Οι υψηλές τιμές των

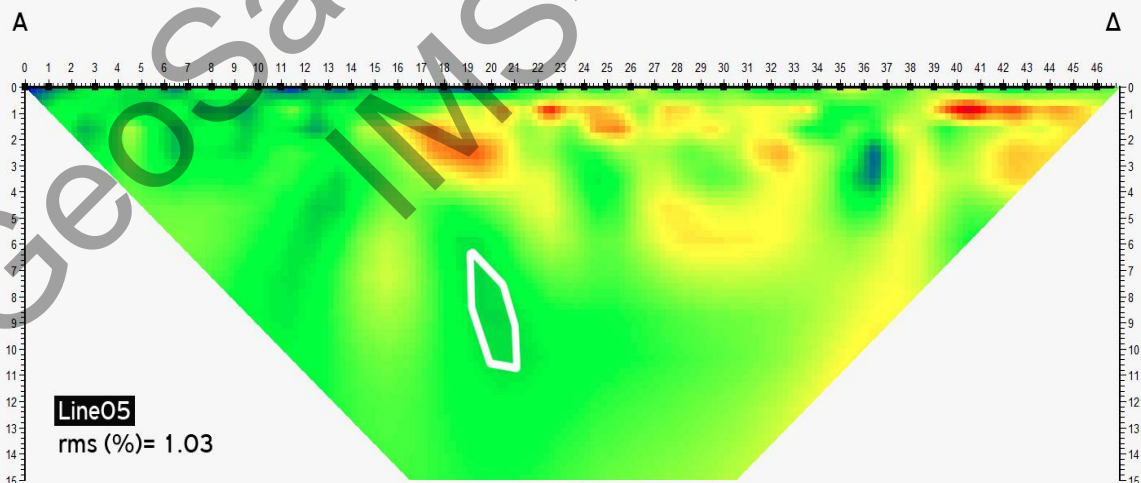
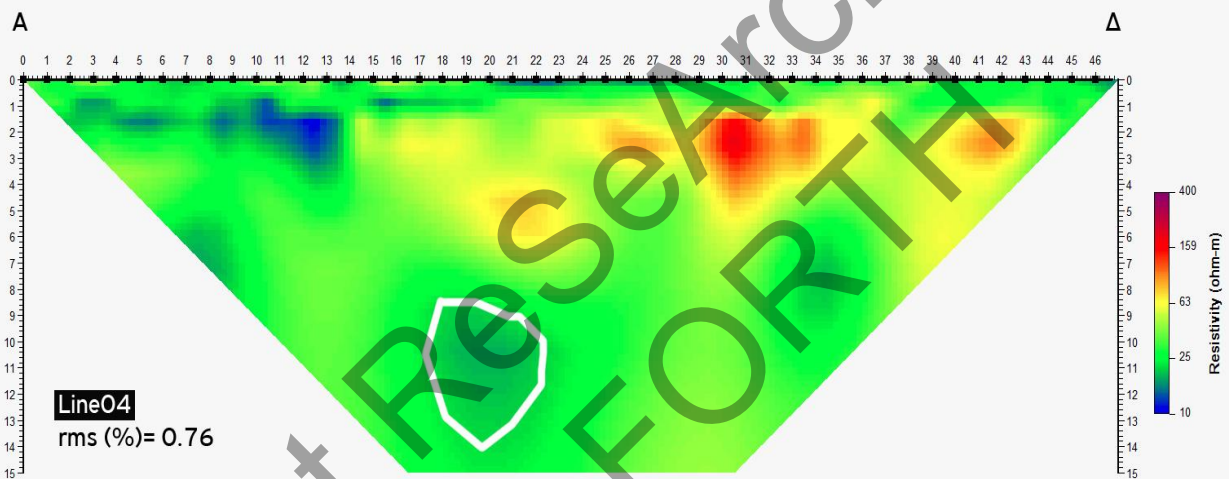
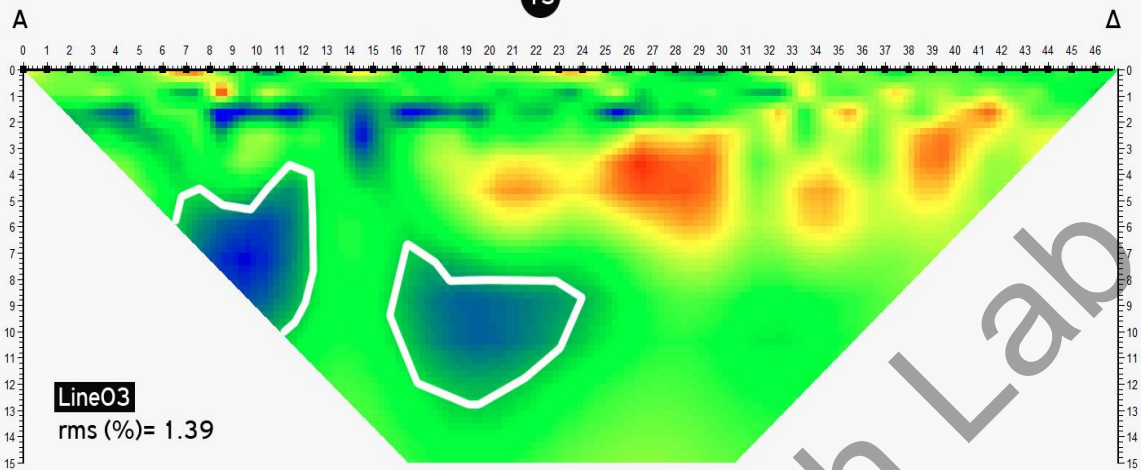
ηλεκτρικών αντιστάσεων στα επιφανειακά στρώματα μέχρι το βάθος των 2-3 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους οφείλονται στις περιόδους ξηρασίας στην ευρύτερη περιοχή που προηγήθηκαν των ημερών της μέτρησης. Συγκεκριμένα, στα επιφανειακά στρώματα των γραμμών 'Line1' και 'Line2' μέχρι βάθος 2.5 μέτρων οι τιμές των αντιστάσεων είναι αρκετά υψηλές κυρίως στο NA μέρος της τομής. Στις γραμμές 'Line3' και 'Line4' οι υψηλές τιμές των αντιστάσεων περιορίζονται στο Δυτικό μέρος της τομής και σε μεγαλύτερα βάθη (έως 4 μέτρα). Ο αγώγιμος ρύπος εμφανίζεται μετά το βάθος των 4 μέτρων στις γραμμές 'Line1' και 'Line2' ενώ στις τομές 'Line3' και 'Line4' μετά δυσκολίας ανακατασκευάζονται.



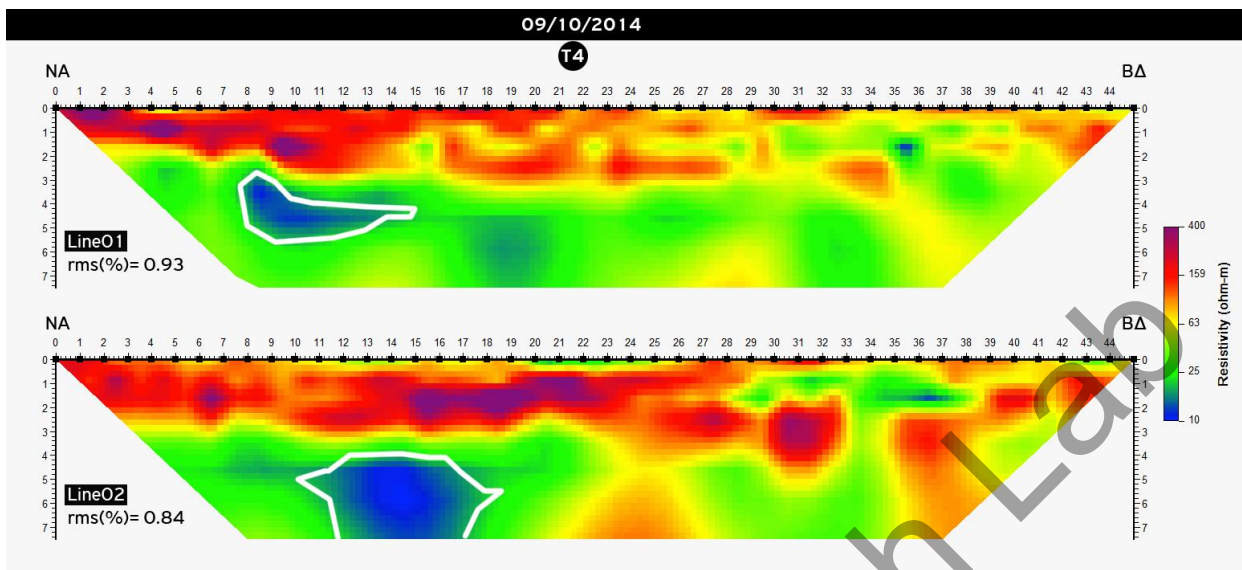
Σχήμα 14. Χωρική μεταβολή του φαινομένου σε δύο παράλληλες μεταξύ τους γραμμές 'Line01' και 'Line02'. Ο στόχος τονίζεται με λευκή γραμμή.

12/02/2014

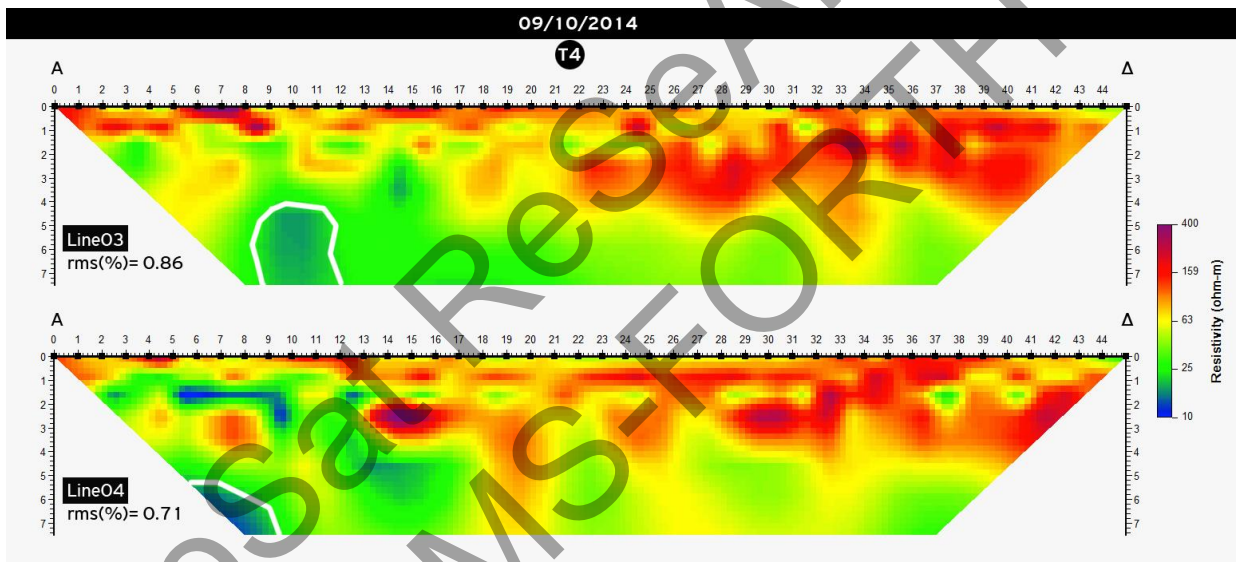
T3



Σχήμα 15. Χωρική μεταβολή του φαινομένου σε τρεις παράλληλες μεταξύ τους γραμμές 'Line03', 'Line04' και 'Line05'. Ο στόχος τονίζεται με λευκή γραμμή.



Σχήμα 16. Εικόνες αντιστροφής από την χρονική στιγμή 'T4' στις γραμμές 'Line01' και 'Line02'. Ο στόχος τονίζεται με λευκή γραμμή.

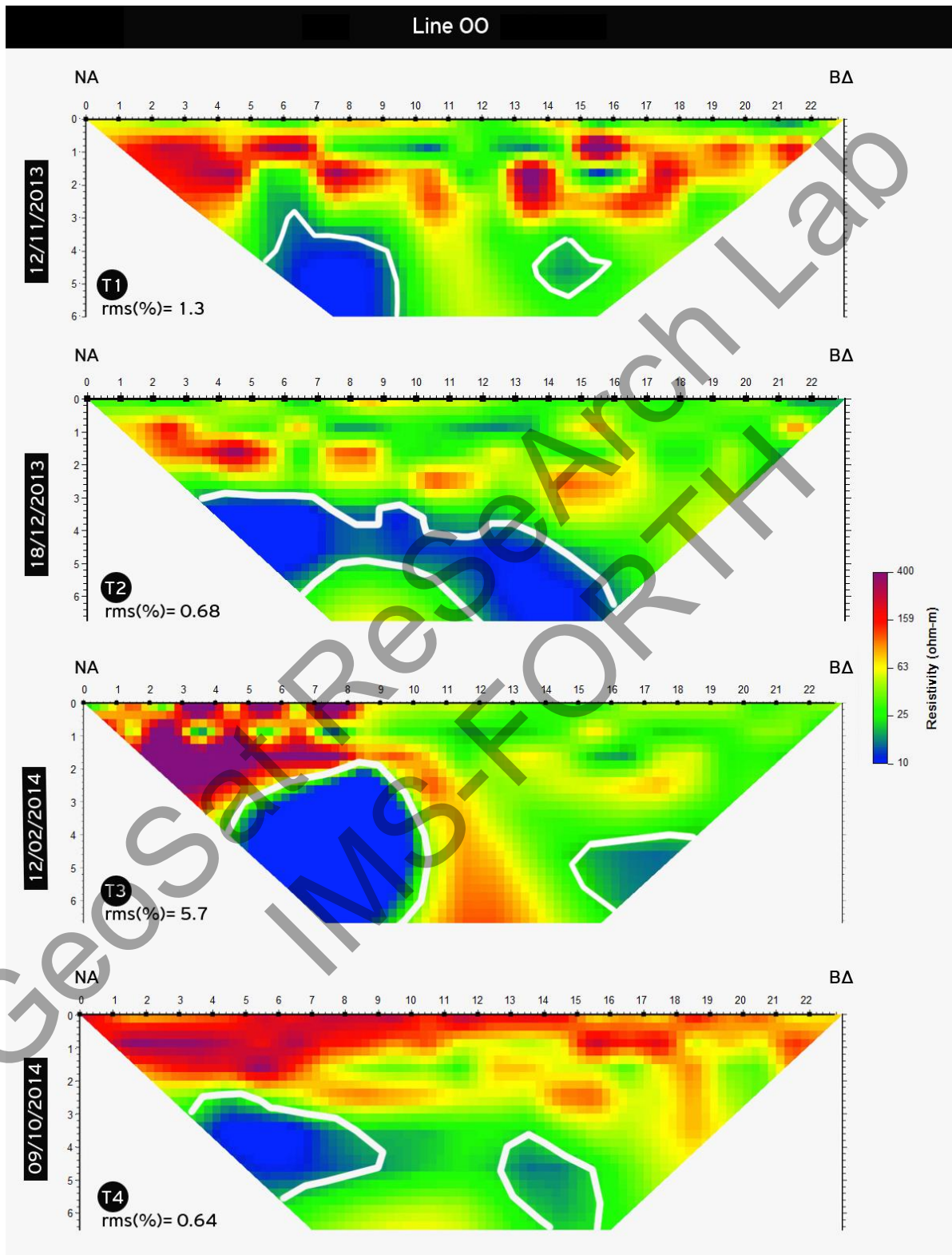


Σχήμα 17. Εικόνες αντιστροφής από την χρονική στιγμή 'T4' στις γραμμές 'Line03' και 'Line04'. Ο στόχος τονίζεται με λευκή γραμμή.

Η γραμμή 'Line00' χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της χρονικής και χωρικής μεταβολής της διάχυσης του ρύπου υπέδαφος. Στο **Σχήμα 18**, απεικονίζονται οι εικόνες αντιστροφής σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές (T1-T4) στην ίδια ακριβώς θέση. Τη χρονική στιγμή 'T1' (12/11/2013), ο στόχος (τονισμένος με λευκή γραμμή) εντοπίζεται στην NA πλευρά της γραμμής και σε βάθος 3 έως 6 μέτρα. Η τιμή αντίστασης κυμαίνεται περίπου στα 10 ohm-m. Στα επιφανειακά στρώματα (0 – 2 μέτρα) η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης πλησιάζει τα 400 ohm-m.

Την χρονική στιγμή 'T2' (18/12/2013) και καθώς η απόθεση του κασιγάρου, λόγω της συνέχισης της ελαιοκομικής περιόδου, παρατηρείται μία αύξηση στην ποσότητα του αγωγίμου ρύπου και παράλληλα μία μετατόπιση αυτού προς τα ΒΔ και σε μεγαλύτερο βάθος (6-7 μέτρα). Η τιμή των επιφανειακών στρωμάτων έχει μειωθεί και αυτό μπορεί να ερμηνευθεί λόγω της αυξημένης βροχόπτωσης που παρατηρήθηκε την συγκεκριμένη περίοδο των μετρήσεων. Την χρονική στιγμή 'T3' (12/02/2014) ο στόχος περιορίζεται πάλι στην NA πλευρά της γραμμής όδευσης αφού η υπόλοιπη ποσότητα έχει ήδη απορροφηθεί από το υπέδαφος. Αρκετά μεγάλες τιμές αντιστάσεων (400 ohm-m) έχουν παρατηρηθεί στην αρχή της τομής ακριβώς πάνω από τον στόχο. Το σχετικά μεγαλύτερο σφάλμα της εικόνας αντιστροφής για την τομή αυτή οφείλεται στην ποιότητα των μετρήσεων, τα οποία είχαν περισσότερο θόρυβο λόγω της ελλιπούς επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος. Στην τελευταία χρονική στιγμή 'T4' (09/10/2014) η ποσότητα του στόχου έχει μειωθεί αρκετά

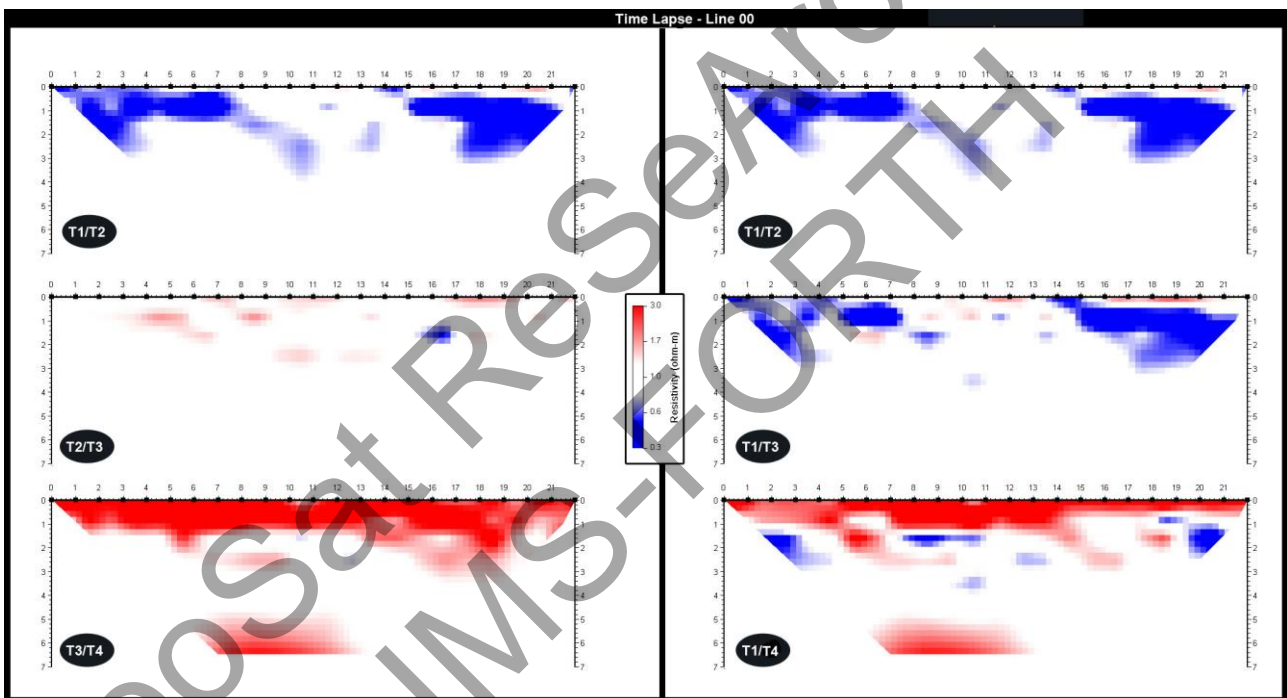
αφού και η απόθεση των παραγώνων του επεξεργασίας του ελαίου έχει σταματήσει. Τα επιφανειακά στρώματα έχουν υψηλές τιμές αντιστάσεων και στα 3-5 μέτρα αναπαρίσταται ο στόχος με αγώγιμη τιμή αντίστασης κοντά στα 10 ohm-m.



Σχήμα 18. Εικόνες αντιστροφής από την 'Line00' (διέρχεται από τις γεωτρήσεις) που παρουσιάζουν την χρονική μεταβολή του φαινομένου. Ο στόχος τονίζεται με λευκή γραμμή.

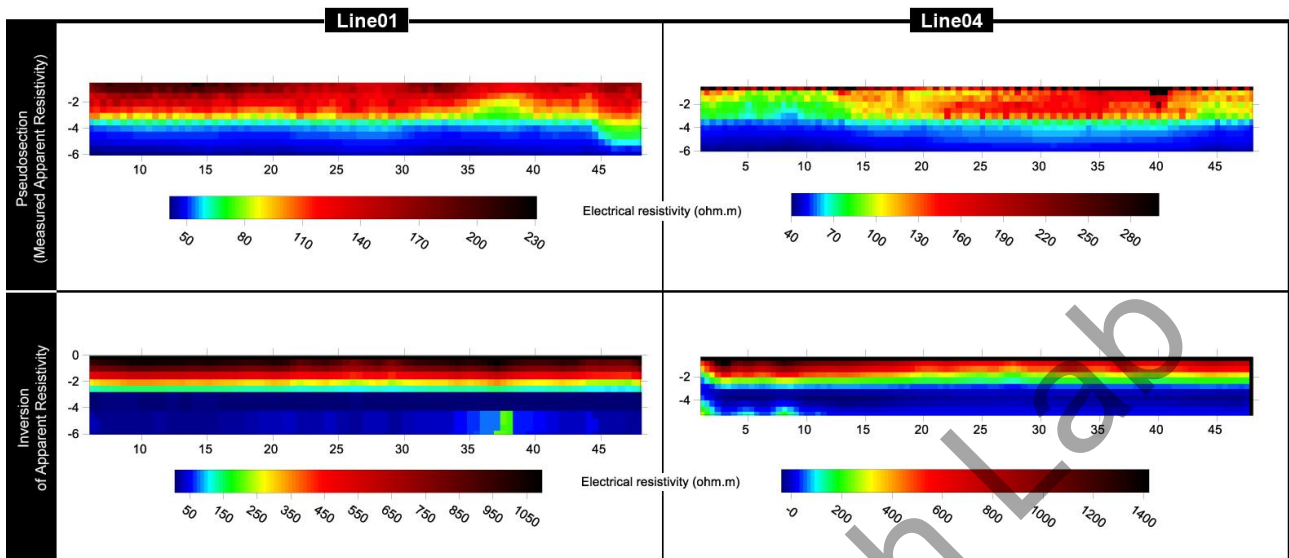
Τα δεδομένα που ελήφθησαν από την συγκεκριμένη γραμμή “Line 00” επεξεργάστηκαν με ειδικό πρόγραμμα αντιστροφής (DC2DPro) λαμβάνοντας υπόψιν τη μεταβολή του χρόνου (time lapse analysis). Ως εκ τούτου, ελήφθησαν δεδομένα από τη συγκεκριμένη γραμμή ανά τακτά χρονικά διαστήματα (Πίνακας 2). Τα αποτελέσματα της αντιστροφής απεικονίζονται στο Σχήμα 19. Στην κλίμακα όπου απεικονίζονται οι αλλαγές στις τιμές αντίστασης με λευκό χρώμα

Στο αριστερό τμήμα της εικόνας απεικονίζεται η μεταβολή των τιμών αντίστασης μεταξύ διαδοχικών χρονικών στιγμών: T1/T2, T2/T3 και T3/T4. Στη μεταβολή T1/T2 παρατηρείται μία μείωση των τιμών αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα κάτι που ερμηνεύεται λόγω καιρικών αλλαγών (βροχοπτώσεων) την χρονική στιγμή T2, σε σχέση με την χρονική στιγμή T1 όπου το κλίμα στην περιοχή ήταν ξηρό. Προφανώς και η αλλαγή αυτή ήταν αρκετά έντονη ώστε να επισκιαστεί η αύξηση του ρύπου σε βάθος κάτω των 3 μέτρων (όπως αυτό παρατηρείται στο Σχήμα 18). Σχεδόν καμία μεταβολή δεν παρατηρείται μεταξύ των χρονικών φάσεων T2 με T3 επειδή αντιστοίχως δεν παρατηρήθηκαν καιρικές μεταβολές και επιπλέον ούτε μετακίνηση του ρύπου σε διαφορετική περιοχή. Μεταξύ των φάσεων T3 και T4, απεικονίζεται έντονη αύξηση των αντιστάσεων κυρίως στα επιφανειακά στρώματα. Και σε αυτά τα αποτελέσματα οι καιρικές μεταβολές (περίοδος ξηρασίας) ευθύνονται για την αλλαγή αυτή των αντιστάσεων χωρίς να είναι ορατή οποιαδήποτε μετακίνηση του ρύπου. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και στο δεξί τμήμα του Σχήμα 19: Μείωση των τιμών αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα λόγω βροχοπτώσεων στην περιοχή των μετρήσεων (T1/T2 και T1/T3) και αύξηση των τιμών αντίστασης λόγω ξηρασίας (T1/T3).



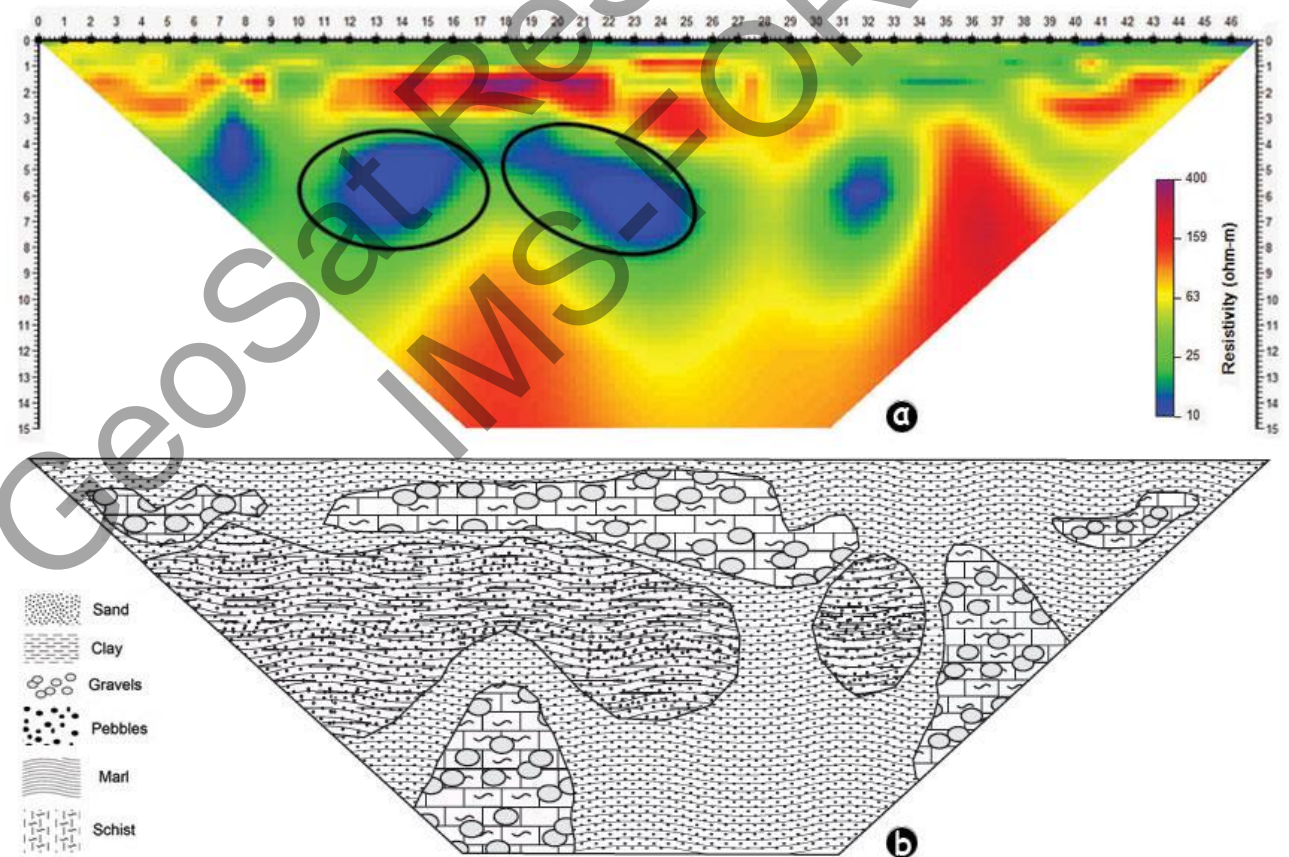
Σχήμα 19. Διαχρονική μεταβολή του φαινομένου χρησιμοποιώντας δεδομένα της γραμμής “Line 00” τόσο μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών T1, T2 και T3 (αριστερό μέρος σχήματος) όσο και χρησιμοποιώντας την χρονική στιγμή T1 ως φάση αναφοράς για σύγκριση με τις υπόλοιπες T2 και T3 (δεξιό μέρος σχήματος).

Η ηλεκτρομαγνητική μέθοδος εφαρμόστηκε στις γραμμές “Line01” και “Line04”. Από τα αποτελέσματα αντιστροφής των δεδομένων προκύπτει ότι και στις δύο γραμμές όδευσης έχουμε κατά βάσει 2 στρώματα: ένα επιφανειακό αντιστατικό (100 έως 300 ohm-m) μέχρι τα 4 μέτρα και μετά ξεκινάει ένα αγωγίμο στρώμα (Σχήμα 20). Στη πρώτη γραμμή όδευσης “Line01” το επιφανειακό στρώμα παρουσιάζεται περισσότερο ομοιογενές από αυτό στην δεύτερη γραμμή “Line04”. Οι υπερβολικά υψηλές τιμές των αντιστάσεων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την διαδικασία αντιστροφής και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την «προσπάθεια» του αλγορίθμου να βρει πολύ χαμηλή τιμή αντίστασης στο υποκείμενο στρώμα (5 ohm-m) πολύ μικρότερη από την αναμενόμενη στην ευρύτερη περιοχή. Αυτό που μπορεί να ειπωθεί από την συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων είναι ότι το αγωγίμο στρώμα κάτω από το αντιστατικό στρώμα συνδέεται με τον μαργαϊκό σχηματισμό που υπάρχει στην περιοχή.



Σχήμα 20. Αποτελέσματα από δεδομένα EM στις γραμμές "Line01" (αριστερά) και "Line04" (δεξιά). Ψευδοτομή με τιμές φαινόμενης αντίστασης (πάνω σειρά), αποτελέσματα αντιστροφής των τιμών φαινόμενης αντίστασης (κάτω σειρά)

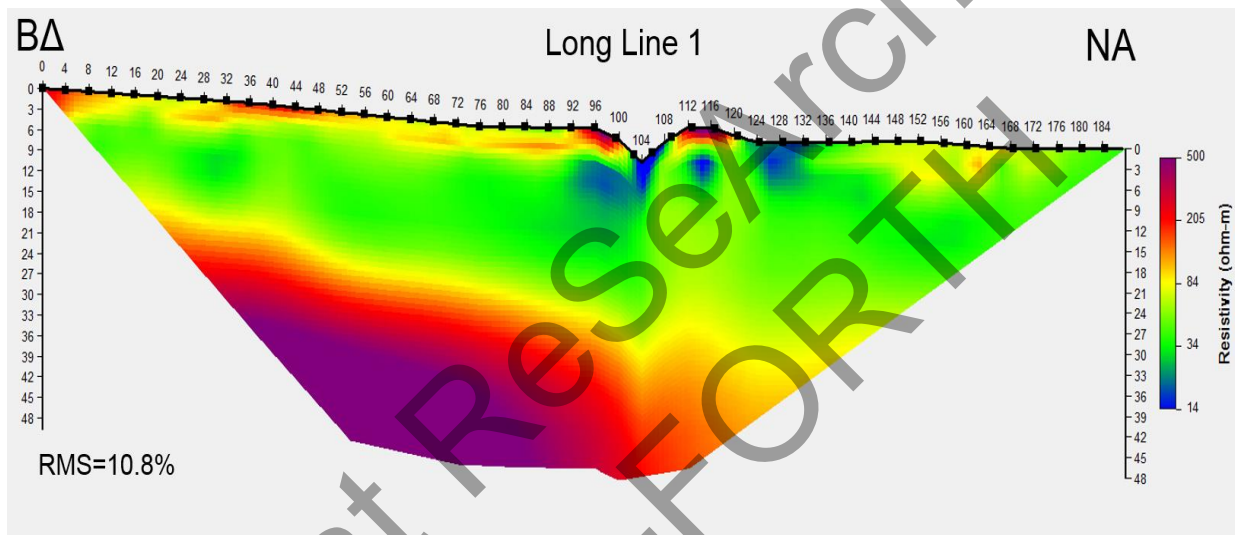
Με την χρήση της στρωματογραφικής στήλης είναι εφικτή η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης με τα δείγματα εδάφους που ελήφθησαν από τις γεωτρήσεις. Γενικά παρατηρείται καλός βαθμός συσχέτισης με την ευρύτερη στρωματογραφία της περιοχής. Σύμφωνα με το Σχήμα 21, οι τιμές αντίστασης μεταξύ 10-25 ohm-m αντιπροσωπεύουν μάργες, άμμο και άργιλο, οι τιμές αντίστασης 25-65 ohm-m αντιπροσωπεύουν αμμώδης μάργα και πάνω από 65 ohm-m άμμο με κροκάλες.



Σχήμα 21. Συσχέτιση μεταξύ της ηλεκτρικής υπογραφής των στρωμάτων (α) και της στρωματογραφικής στήλης (β). Με μαύρο περίγραμμα τονίζεται η περιοχή του στόχου.

Η γραμμή Long Line 1 (Σχήμα 22) διαπερνάει την λεκάνη απόθεσης έχοντας διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και συνολικό μήκος 188 μέτρα. Η γεωηλεκτρική τομή του υπεδάφους όπως προέκυψε από την αντιστροφή των δεδομένων διπόλου-διπόλου φτάνει σε βάθος περίπου 48 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Το γεωηλεκτρικό μοντέλο αποτυπώνει βασικά την ύπαρξη τριών στρωμάτων τα οποία έχουν μία ελαφριά κλίση προς τα ΝΑ. Το επιφανειακό στρώμα έχει πάχος που δεν ξεπερνά τα 3 μέτρα σε πάχος και εγγράφεται με αντιστάσεις άνω των 80 Ohm-m. Το εν λόγω στρώμα εμφανίζεται κυρίως από την αρχή της τομής μέχρι την θέση της λεκάνης απόθεση των αποβλήτων και συνδέεται με επιφανειακές χαλαρές σύγχρονες προσχώσεις. Το δεύτερο υποκείμενο στρώμα έχει το μεγαλύτερο πάχος το οποίο αυξάνεται από τα 10 μέτρα στα ΒΔ και φτάνει μέχρι περίπου τα 33 μέτρα προς τα ΝΑ. Το στρώμα αυτό εμφανίζεται με αντιστάσεις στο εύρος 35-90 Ohm-m το οποίο αντιπροσωπεύει μαργαϊκές αποθέσεις με στρώσει από αμμοχάλικα. Με τιμές αντιστάσεων πάνω από 90 Ohm-m χαρτογραφείται το κροκαλοπαγές υπόβαθρο της περιοχής το οποίο έχει κεκλιμένη επιφάνεια προς τα ΝΑ και εντοπίζεται σε βάθος από 18 έως 33 μέτρα κατά μήκος της τομής.

Στο γεωηλεκτρικό μοντέλο παρουσιάζεται μία αγωγίμη περιοχή κάτω από την λεκάνη απόθεσης η οποία φτάνει τουλάχιστον τέσσερα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η ζώνη αυτή αποτελεί μία ένδειξη του πάχους του στερεού υπολείμματος των αποβλήτων το οποίο έχει συγκεντρωθεί αθροιστικά μέσα στην λεκάνη από την συνεχή απόθεση των υγρών αποβλήτων. Επίσης παρατηρούνται δύο επιπλέον αγωγίμες ζώνες προς τα ΝΑ της τομής που δείχνουν την μετανάστευση και υπόγεια μετακίνηση των ρύπων προς την κατεύθυνση αυτή (Σχήμα 22).

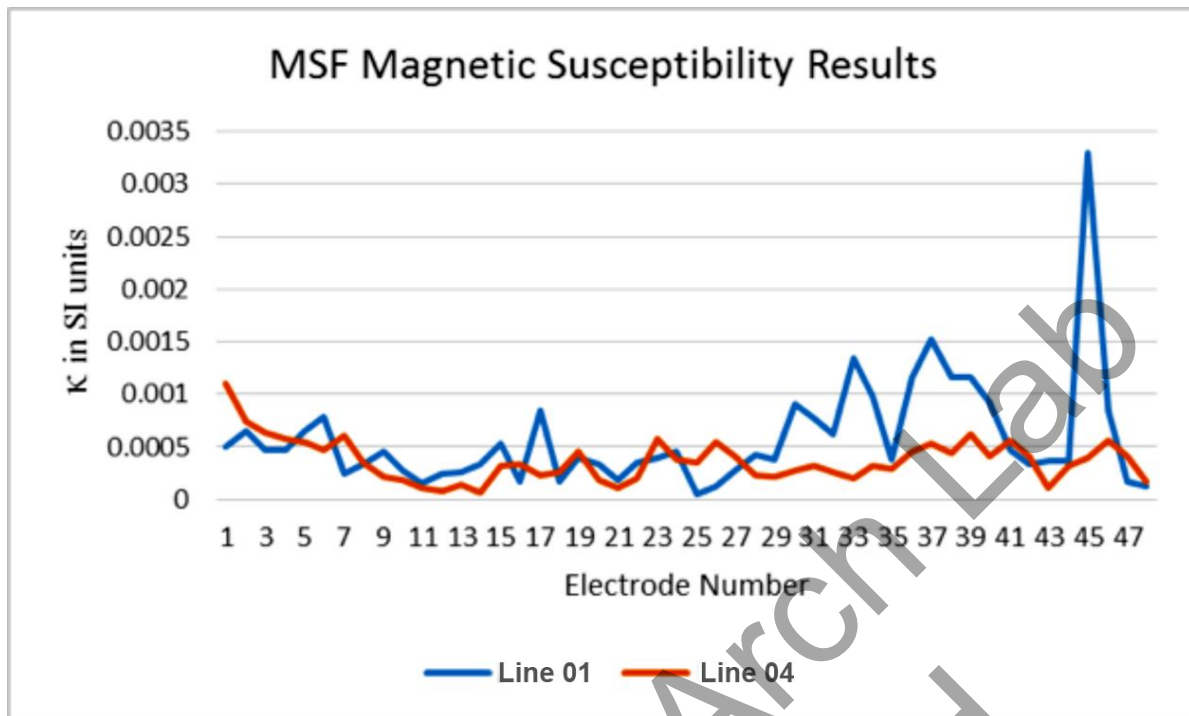


Σχήμα 22: Γεωηλεκτρικό μοντέλο αντιστροφής για την γραμμή Long Line 1 στον Άγιο Ανδρέα.

2.4 Αποτελέσματα Μαγνητικής Επιδεκτικότητας Εδαφικών Δειγμάτων

Εκτός από την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων για τη παρακολούθηση της ροής των αποβλήτων (ηλεκτρικά και EM) κρίθηκε αναγκαίο για πληρέστερη μελέτη του φαινομένου να δοκιμασθεί παράλληλα και η μέθοδος της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε εδαφικά δείγματα (soil samples). Οι επί τόπου μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας ελήφθησαν με το “Bartington” – MS2 με τη χρήση αισθητήρα F. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν μονάδες SI με το όργανο ρυθμισμένο να χρησιμοποιεί υψηλή συχνότητα και ρυθμισμένο σε ύψος πάνω από το κεφάλι του χειριστή. Οι εργαστηριακές μετρήσεις μαγνητικής επιδεκτικότητας ολοκληρώθηκαν με τη χρήση του οργάνου “Bartington” – MS2 με διπλή συχνότητα στα 0.465 kHz and 4.65 kHz.

Στο Σχήμα 23 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των τιμών Μαγνητικής Επιδεκτικότητας στις γραμμές “Line01” και “Line04”. Οι τιμές κυμαίνονται από 0.000055 έως 0.003299. Οι υψηλότερες και πιο ασταθείς μετρήσεις προέκυψαν από το βόρειο τμήμα της γραμμής “Line01” (Σχήμα 24) και αυτό οφείλεται στο διαταραγμένο λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας έδαφος. Ελάχιστα πιο υψηλές είναι οι τιμές στο νότιο άκρο της γραμμής “Line01” και στο ανατολικό τμήμα της “Line04”, όπου και παρατηρείται η λιγότερη δυνατή ανύψωση του εδάφους και ταυτόχρονα εντοπίζεται ένα μικρό ρέμα.



Σχήμα 23: Τιμές Μαγνητικής Επιδεκτικότητας στις γραμμές: Line01 και Line04



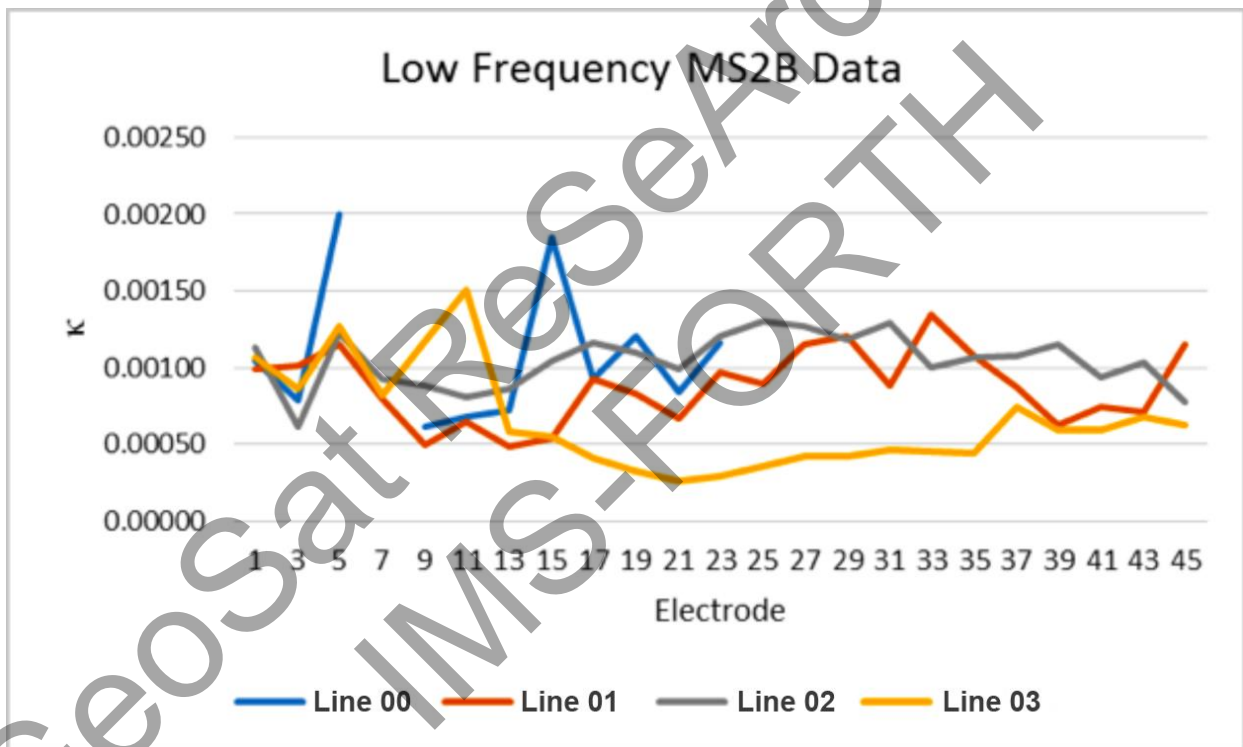
Σχήμα 24: Βόρειο τμήμα της γραμμής "Line01".

Η εργαστηριακή ανάλυση των αποτελεσμάτων βάσει της χρησιμοποιούμενης συχνότητας απεικονίζονται στο Σχήμα 26 (χαμηλή συχνότητα) και Σχήμα 27 (υψηλή συχνότητα) και η διαφορά αυτών απεικονίζεται στο Σχήμα 28. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μεταξύ των ηλεκτροδίων 17 και 35 της γραμμής "Line03" (Σχήμα 25) οι τιμές που προκύπτουν με τη χρήση χαμηλής, υψηλής συχνότητας είναι χαμηλότερες συγκριτικά με τις άλλες γραμμές. Αυτό οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο τμήμα της γραμμής αυτής περνάει από περιοχή όπου το χώμα τοποθετήθηκε στο χείλος της λεκάνης απόθεσης κατά τη διάρκεια δημιουργίας αυτής. Προφανώς και το χώμα προήλθε κάτω από τον «ορίζοντα A» (το ανώτερο στρώμα του εδάφους) χωρίς να έχει τον απαιτούμενο χρόνο για να αποκτήσει μαγνητικές ιδιότητες, όπως συμβαίνει σε βαθύτερα στρώματα.

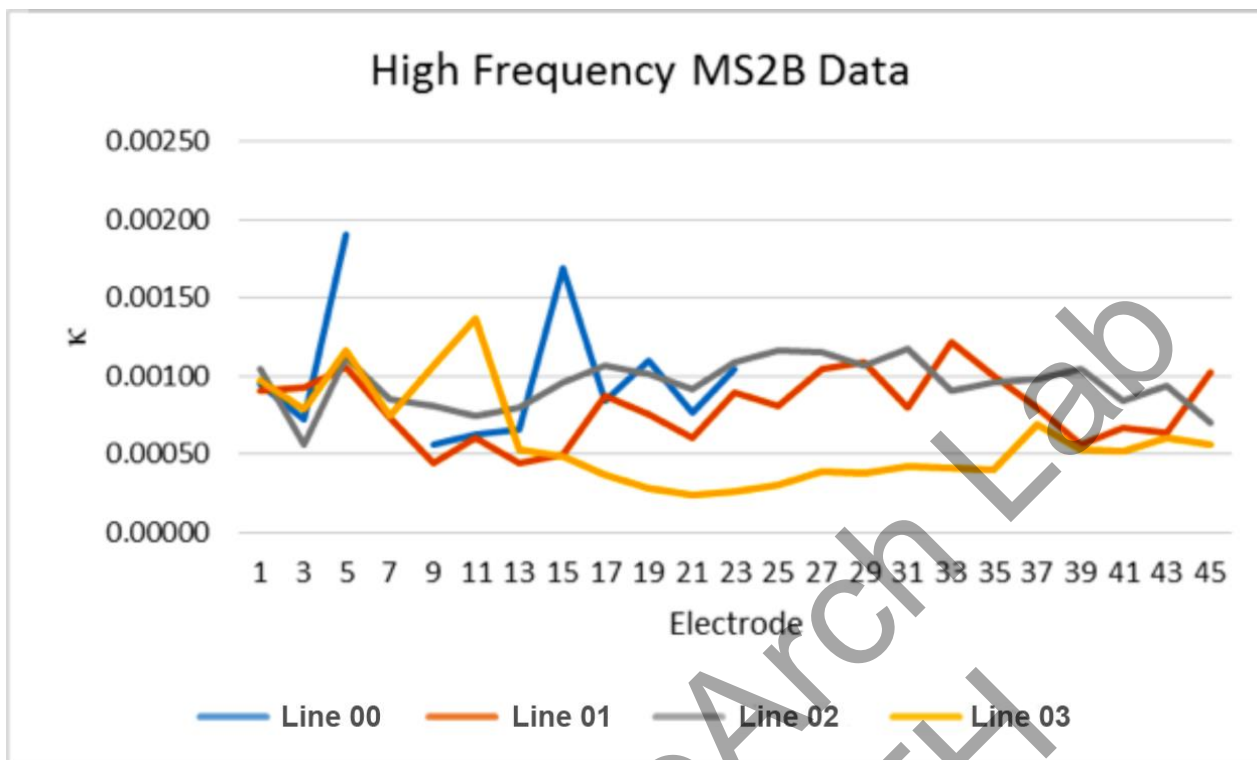
Η γενική ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων, προκύπτει ότι η μαγνητική επιδεκτικότητα τόσο με τις in situ όσο και με τις εργαστηριακές μετρήσεις επηρεάζεται κυρίως από την εδαφική διαταραχή και δεν φαίνεται να σχετίζεται με την παρουσία των αποβλήτων από παραγωγή του λαδιού.



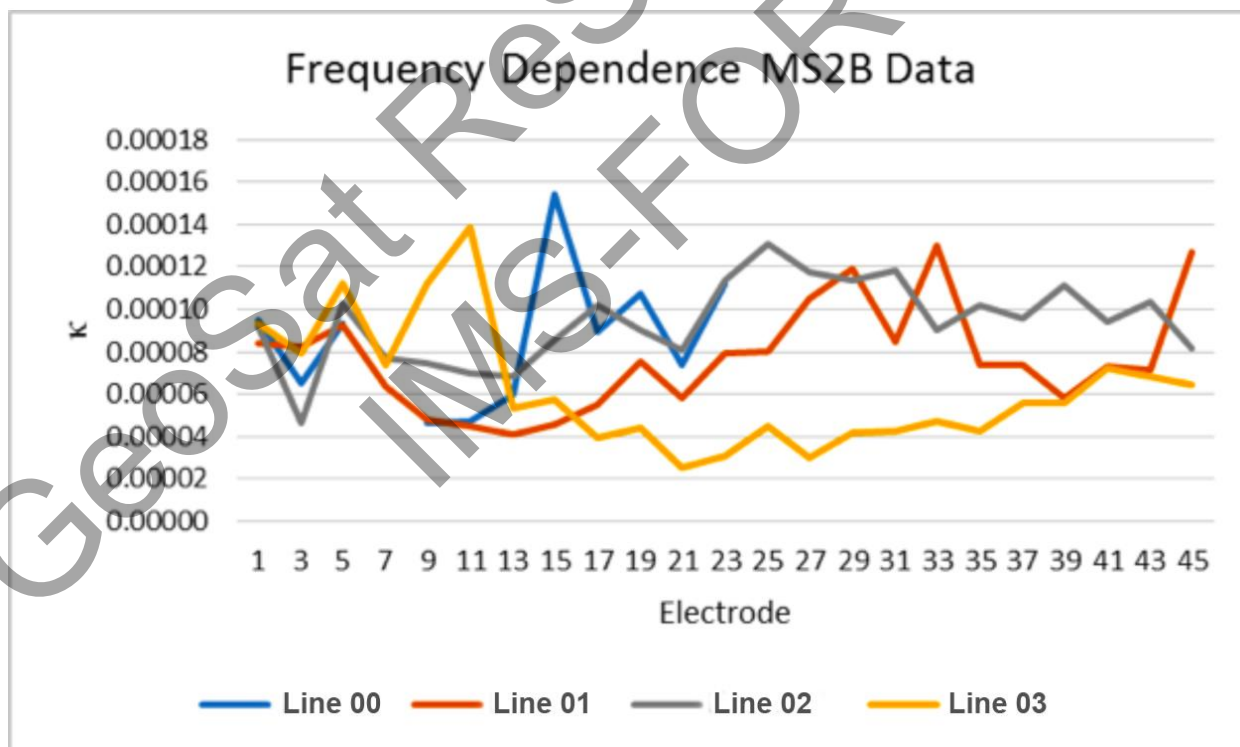
Σχήμα 25: Περιοχή χαμηλών τιμών Μαγνητικής επιδεκτικότητας της γραμμής "Line03".



Σχήμα 26: Αποτελέσματα μετρήσεων Μαγνητικής Επιδεκτικότητας για τις γραμμές "Line00", "Line01", "Line02" και "Line03" με τη χρήση χαμηλής συχνότητας.



Σχήμα 27: Αποτελέσματα μετρήσεων Μαγνητικής Επιδεκτικότητας για τις γραμμές “Line00”, “Line01”, “Line02” και “Line03” με τη χρήση υψηλής συχνότητας.



Σχήμα 28: Αποτελέσματα μετρήσεων Μαγνητικής Επιδεκτικότητας για τις γραμμές “Line00”, “Line01”, “Line02” και “Line03”.

3. ΑΛΙΚΙΑΝΟΣ (Χανιά)

Εκτός από την περιοχή του Αγ. Ανδρέα, ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη μελέτη στην περιοχή του Αλικιανού κοντά στη πόλη των Χανίων (Σχήμα 29). Στη συγκεκριμένη περιοχή, ομοίως μελετήθηκε η απορρόφηση των αποβλήτων της επεξεργασίας των ελαιόλαδου από μία φυσική λεκάνη όπου και γινόταν η απόθεση αυτών. Όπως στη περιοχή του Αγ. Ανδρέα, έτσι και στον Αλικιανό με την εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας επιλέχθηκαν γραμμές περιμετρικά από τη λεκάνη απόθεσης με σκοπό την παρακολούθηση του φαινομένου και την καταγραφή της κατεύθυνσης μέσα στο υπέδαφος του κασιγάρου.



Σχήμα 29. Λεκάνη απόθεσης αποβλήτων από παραγωγή ελαιολάδου στη περιοχή του Αλικιανού.

Σύμφωνα με το Σχήμα 30, δεδομένα ελήφθησαν σε δύο διαφορετικές και κάθετες μεταξύ τους γραμμές ("Line 1", "Line A") σε τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (4/4/2014, 8/8/2014 και 20/1/2015). Το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το dipole-dipole με εσωτερική απόσταση των ηλεκτροδίων $a=1$ μέτρο και συνολικό μήκος της τομής $L=47$ μέτρα. Σε όλες τις εικόνες αντιστροφής έχει χρησιμοποιηθεί κοινή κλίμακα τιμών ηλεκτρικής αντίστασης (από 30 έως 3000 ohm-m).



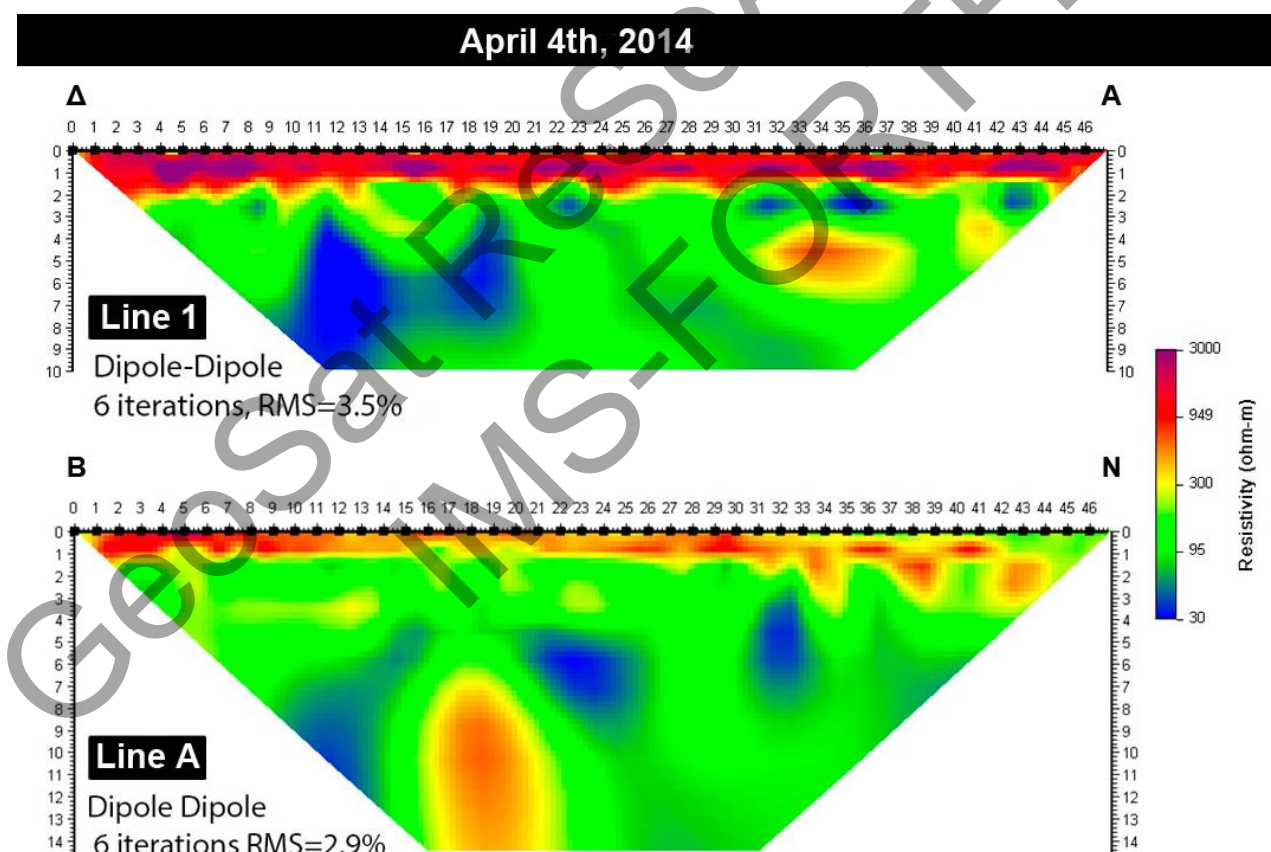
Σχήμα 30. Θέση γραμμών "Line 1" και "Line A" περιμετρικά από τη λεκάνη απόθεσης στον Αλικιανό (τονίζεται με λευκό

Στο **Σχήμα 31**, **Σχήμα 32** και **Σχήμα 33** απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων. Οι τιμές σφάλματος rms μετά την αντιστροφή των δεδομένων δεν υπερβαίνουν το 4% στις 4/4/2014, το 11% στις 8/8/2014 και το 6% στις 20/1/2015. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των εικόνων αντιστροφής είναι οι πολύ υψηλές τιμές αντίστασης στα επιφανειακά στρώματα μέχρι βάθος 2 μέτρων. Οι υψηλές τιμές των αντιστάσεων ερμηνεύεται λόγω κλιματολογικών αιτιών (έντονη ξηρασία) και της ύπαρξης ενός επιφανειακού στρώματος άμμων και κροκάλων.

Στις 4 Απριλίου 2014 με χαμηλές τιμών αντιστάσεων (κοντά στα 30 ohm-m) εντοπίζονται περιοχές κάτω από 4 μέτρα και όπου και πιθανολογείται η ύπαρξη αποβλήτων από την παραγωγή του ελαιολάδου. Συγκεκριμένα, στην γραμμή "Line 1" ο ρύπος εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα της γραμμής το οποίο και είναι και το πλησιέστερο στη λεκάνη. Αντίστοιχα, στη γραμμή "Line A" ο ρύπος εντοπίζεται στο βόρειο μέρος της γραμμής ανάμεσα στη λεκάνη και στο παρακείμενο ποτάμι (**Σχήμα 31**).

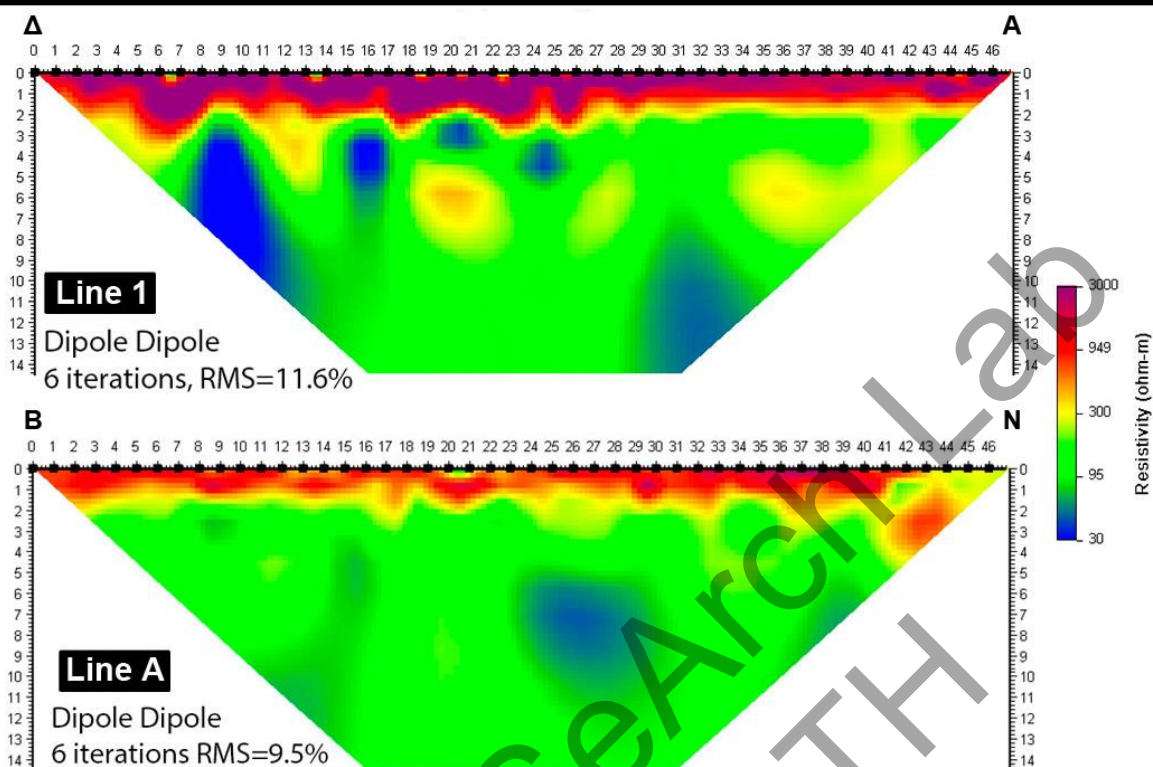
Στις 8 Ιουλίου 2014 οι υψηλές τιμές αντίστασης στο δυτικό μέρος της γραμμής "Line 1" φτάνουν σε βάθος 3 μέτρα. Ο ρύπος αντίστοιχα στο δυτικό μέρος της γραμμής εντοπίζεται πλησιέστερα στα επιφανειακά στρώματα ξεκινώντας από τα 3 μέτρα και στο ανατολικό μέρος της γραμμής εντοπίζεται σε βάθος κάτω από 7 μέτρα. Στη γραμμή "Line A" ο ρύπος εντοπίζεται σε βάθος 4 μέτρων και στο κεντρικό τμήμα της γραμμής; (**Σχήμα 32**).

Στις 20 Ιανουαρίου 2015 και στην γραμμή "Line 1" παρατηρείται μεγάλη ποσότητα ρύπου κυρίως στο δυτικό μέρος της γραμμής και επεκτείνεται σχεδόν σε όλο το μήκος της γραμμής σε βάθος 3 μέτρων. Αντίστοιχα, στη γραμμή "Line A" ο ρύπος εμφανίζεται κυρίως στο βόρειο τμήμα της γραμμής ξεκινώντας από βάθος 2 μέτρων και όσο αυξάνεται το βάθος τόσο αυξάνεται και η ποσότητά του με ένα κενό στο ενδιάμεσο τμήμα της γραμμής. Στο νότιο τμήμα της γραμμής ξαναεμφανίζεται ο ρύπος σε βάθος 4 μέτρων (**Σχήμα 33**).



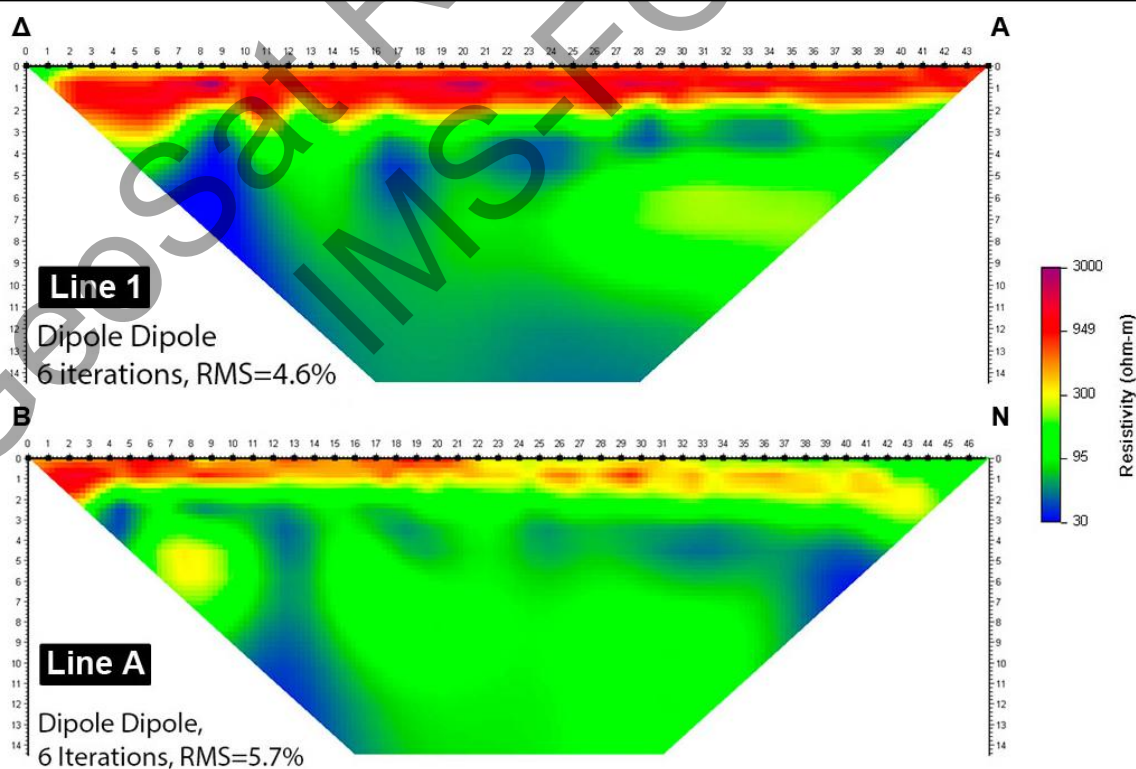
Σχήμα 31: Εικόνες αντιστροφής στη περιοχή του Αλικιανού για τις γραμμές "Line 1" και "Line A".

July 8th, 2014



Σχήμα 32. Εικόνες αντιστροφής στη περιοχή του Αλικιανού για τις γραμμές "Line 1" και "Line A".

January 20th, 2015



Σχήμα 33. Εικόνες αντιστροφής στη περιοχή του Αλικιανού για τις γραμμές "Line 1" και "Line A".

4. ΡΟΥΣΤΙΚΑ-ΡΕΘΥΜΝΟ

Σε μία ιδιωτική έκταση στο χωριό Ρούστικα, το οποίο βρίσκεται 21 χλμ νοτιοδυτικά της πόλης του Ρεθύμνου (Σχήμα 1), βρίσκονται δύο δεξαμενές στις οποίες αποθέτονται τα απόβλητα από την παραγωγή του ελαιολάδου που πραγματοποιείται σε γειτονικό ελαιουργείο. Το συγκεκριμένο οικόπεδο χρησιμοποιείται επίσης για την βοσκή αιγοπροβάτων και περιέχει κάποια σκόρπια ελαιόδεντρα. Η περιοχή των μετρήσεων είναι επίπεδη και έχει έκταση περίπου 70 τ.μ. Η μεγαλύτερη δεξαμενή στα δυτικά έχει έκταση πάνω από 1,050 τετραγωνικά μέτρα και περίμετρο που προσεγγίζει τα 130 μέτρα. Αντίθετα η μικρότερη δεξαμενή στα ανατολικά έχει περίμετρο ίση με 62 μέτρα και έκταση που δεν ξεπερνάει τα 245 τετραγωνικά μέτρα (Σχήμα 34).

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ στην περιοχή του χωριού Ρούστικα και στις γειτονικές περιοχές υπάρχει μια σχετική ομοιογένεια στην γεωλογική δομή του υπεδάφους και δεν συναντιούνται μεγάλες στρωματογραφικές διαφοροποιήσεις. Κυριαρχούν οι υφαλογενείς ασβεστόλιθοι, χρώματος λευκού έως λευκοκίτρινου οι οποίοι εναλλάσσονται με αργιλομαργακικό υλικό, χρώματος τεφρού έως κίτρινου. Μέσα στο υλικό αυτό βρίσκονται διαστρώσεις από ιλύ και άμμο, πλούσιες σε απολιθώματα. Επιπλέον στην γεώτρηση συνολικού βάθους 16 μέτρων που ολοκληρώθηκε στην περιοχή εντοπίζονται κυρίως ο σχηματισμός της μάργας με εξαίρεση μέχρι τα 3 μέτρα όπου υπάρχουν αργιλοαμμούχα υλικά (Σχήμα 35).

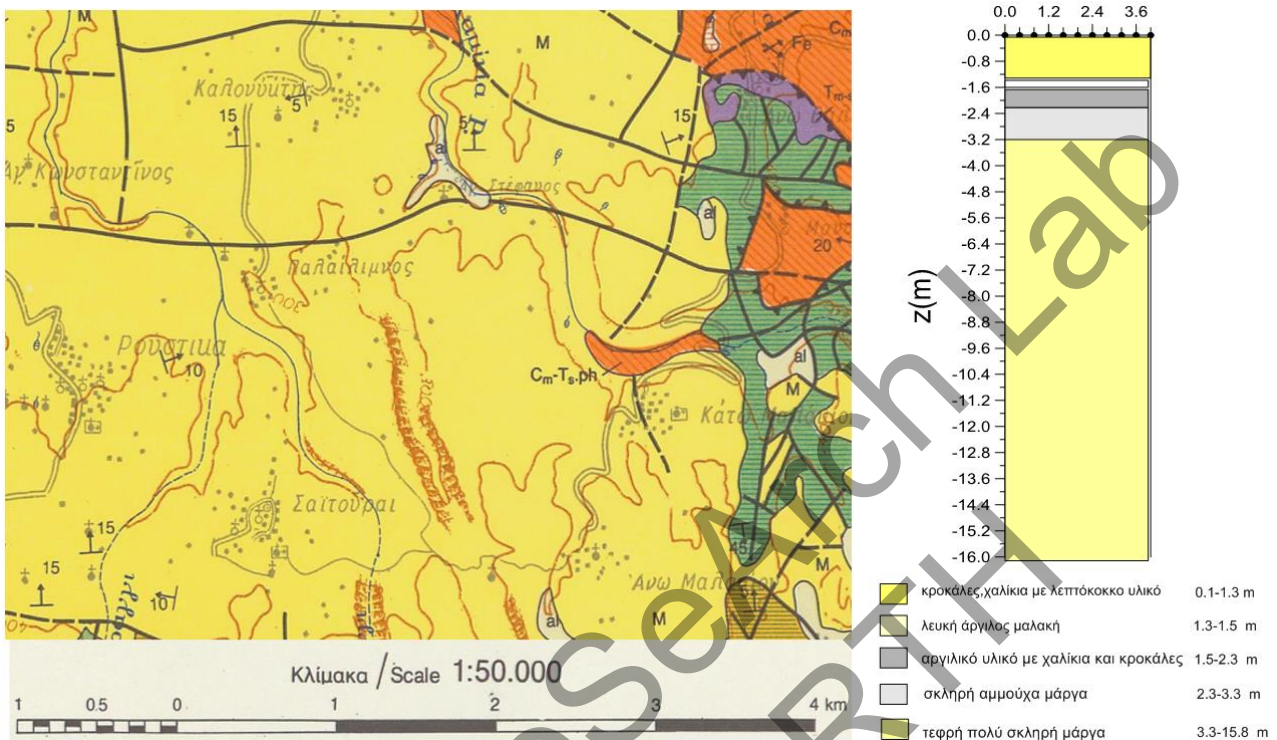


Σχήμα 34: Δορυφορική εικόνα του οικοπέδου που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και της γύρω περιοχής-Φαίνονται οι δύο δεξαμενές

Κατά την διάρκεια της ελαιοκομικής περιόδου, η μεγαλύτερη δεξαμενή δέχεται τον μεγαλύτερο φόρτο αποβλήτων με αποτέλεσμα να παρατηρείται υπερχείλιση των υγρών αποβλήτων. Για τον λόγο αυτό επιλέχθηκε η περιοχή η οποία βρίσκεται στα ανατολικά της δεξαμενής ώστε να εφαρμοστούν οι τεχνικές της ηλεκτρικής τομογραφίας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας για την χαρτογράφηση των φυσικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και της συσχέτισης αυτών με την ροή των αποβλήτων.

Σε μία επίπεδη περιοχή που βρίσκεται στα ανατολικά της μεγάλης δεξαμενής πραγματοποιήθηκαν συνολικά 15 παράλληλες γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, προσαρμόζοντας το συνολικό μήκος κάθε γραμμής ανάλογα με τον διαθέσιμο χώρο που υπήρχε. Σε κάθε γραμμή τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν σε απόσταση ίση με 0.5

μέτρο ενώ απόσταση μεταξύ των παράλληλων γραμμών ήταν 1 μέτρο. Για την συλλογή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε η διάταξη πόλου-διπόλου με $N_{ser}=8a$ ($a=0.5m$). Επιπλέον σε ένα κάναβο με διαστάσεις 10 m x 12 m έγινε εδαφική δειγματοληψία ανά δύο μέτρα και προς τις δύο κατευθύνσεις με σκοπό την μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους (Σχήμα 36).



Σχήμα 35: (αριστερά) γεωλογικός χάρτης της περιοχής, όπου στο κέντρο και αριστερά φαίνεται το χωριό Ρούστικα. (δεξιά) Στρωματογραφική στήλη της γεώτρησης που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης.



Σχήμα 36: Περιοχή στο χωριό Ρούστικα που πραγματοποιήθηκαν οι τομές της ηλεκτρικής τομογραφίας (μαύρα βέλη) και η συλλογή των εδαφικών δειγμάτων για την μέτρηση της μαγνητικής επιδεκτικότητας (κόκκινο ορθογώνιο). Φαίνεται επίσης η θέση της γεώτρησης (BH) και των σημείων που ελήφθησαν τα εδαφικά σε βάθος (μπλε τρίγωνα).

Στις εικόνες στο **Σχήμα 37** φαίνονται λεπτομέρειες από την περιοχή ερευνών στην περιοχή Ρούστικα.



Αποψη της μεγάλης δεξαμενής αποβλήτων



Το βέλος δείχνει το μέρος που έχει γίνει η γεώτρηση



Επιφανειακές τομές ηλεκτρικής τομογραφίας



Όργανο ηλεκτρικής τομογραφίας



Συλλογή επιφανειακών εδαφικών δειγμάτων

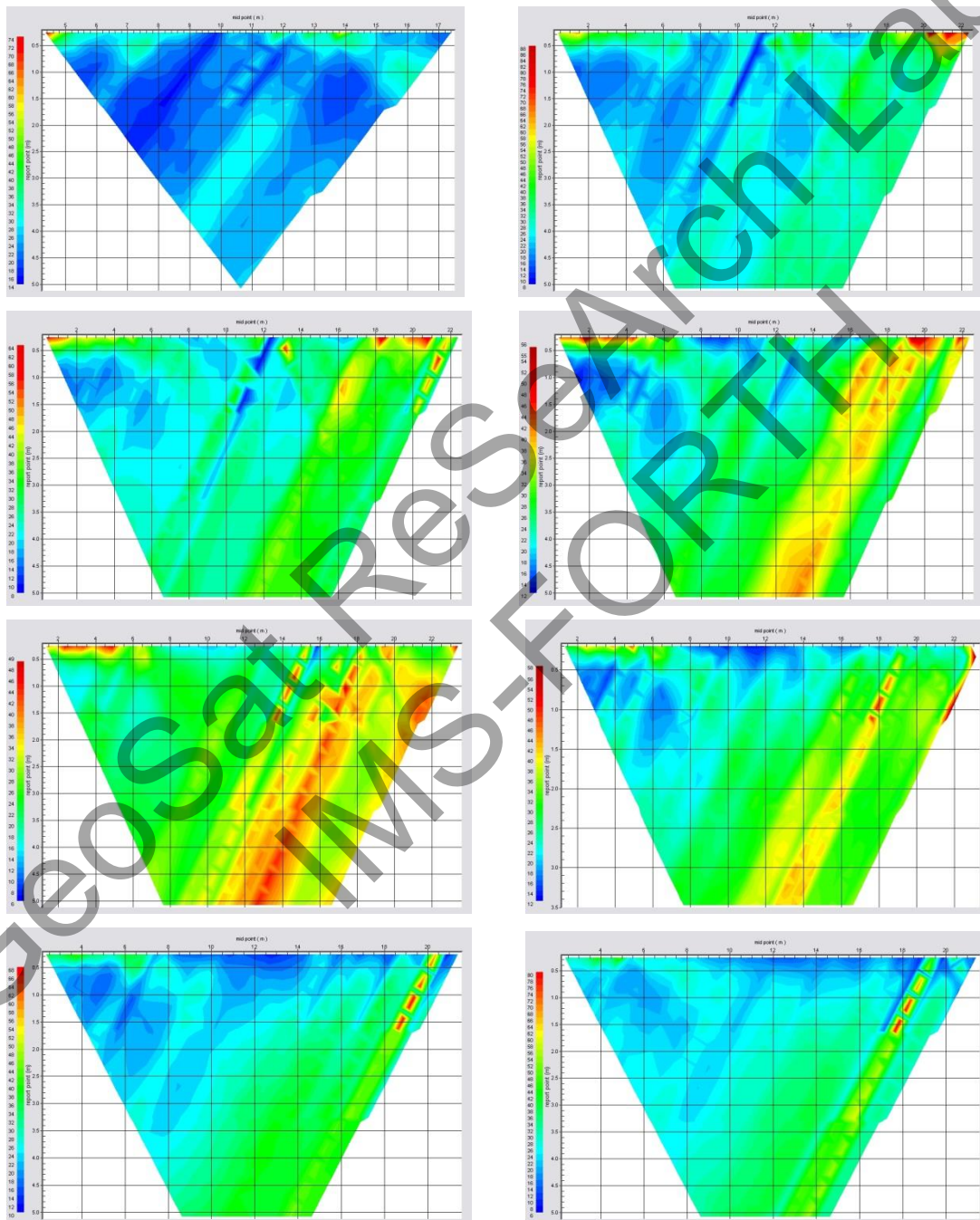


Συλλογή εδαφικών δειγμάτων σε βάθος

Σχήμα 37: Λεπτομέρειες των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην περιοχή Ρούστικα.

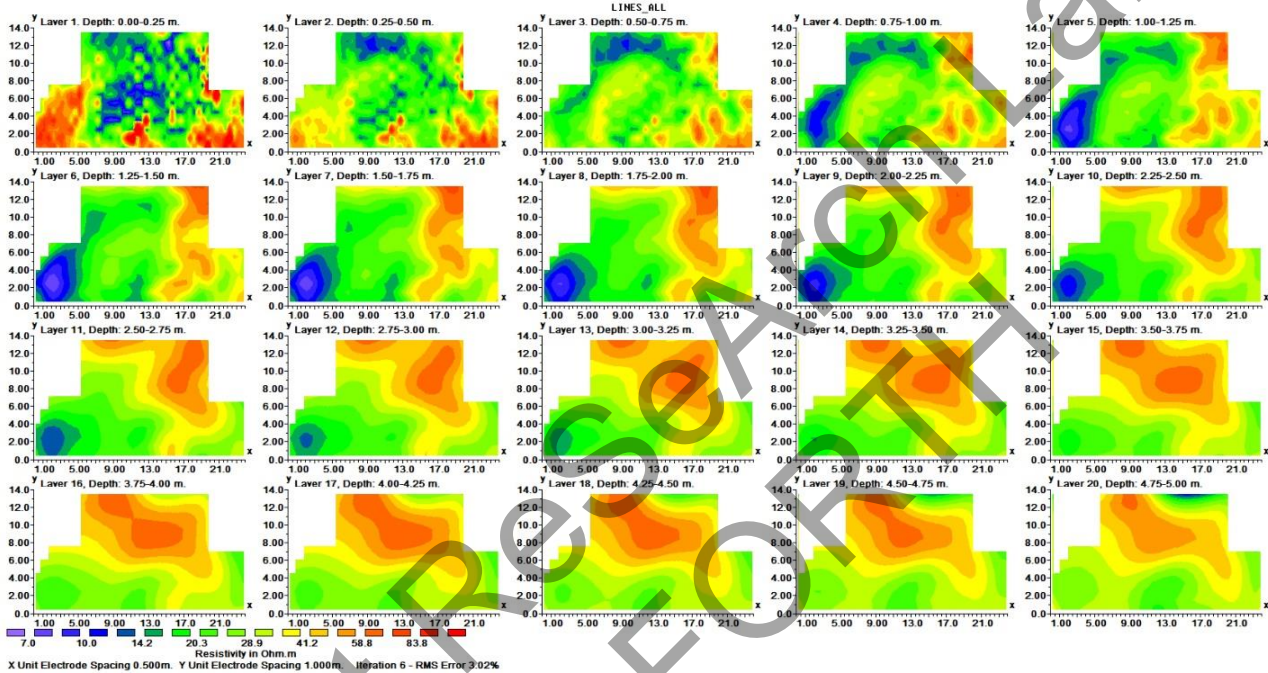
4.1 Αποτελέσματα τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας στα Ρούστικα

Στα αρχικά δεδομένα εφαρμόστηκαν συγκεκριμένα φίλτρα για την απομάκρυνση θορυβώδων μετρήσεων φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης που είχαν σφάλμα πάνω από 0.5%. Επίσης για την περαιτέρω επεξεργασία διατηρήθηκαν οι μετρήσεις που βρίσκονταν στο εύρος των 6 έως 100 Ohm-m. Όλες οι μετρήσεις που βρίσκονταν έξω από το συγκεκριμένο διάστημα απομακρύνθηκαν από τα δεδομένα. Με βάση το στάδιο αυτό της προ-επεξεργασίας διατηρήθηκαν τελικά πάνω από 9000 μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης. Στη συνέχεια σε κάθε τομή δόθηκε μία συγκεκριμένη τιμή συντεταγμένης με σκοπό την τοποθέτηση κάθε τομής στον χώρο και παρήχθησαν οι αντίστοιχες ψευδοτομές (Σχήμα 38).



Σχήμα 38: Ψευδοτομές της κατανομής των φαινόμενων αντιστάσεων για τομές της (1-8) γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας.

Στη συνέχεια τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με ένα αλγόριθμο τρισδιάστατης αντιστροφής με σκοπό την ανακατασκευή του τρισδιάστατου γεωηλεκτρικού μοντέλου του υπεδάφους που φαίνεται στο **Σχήμα 39** το οποίο απεικονίζεται ως οριζόντιες τομές πάχους 0,25 μέτρων. Το τελικό μοντέλο ανακατασκευάστηκε μετά από 6 επαναλήψεις και τελικό σφάλμα RMS=3.8%. Στα πολύ επιφανειακά στρώματα και μέχρι σε βάθος 0.5 μέτρου από την επιφάνεια του εδάφους εγγράφεται μία αγώγιμη ζώνη με αντιστάσεις μικρότερες από 10 Ohm-m, που εντοπίζονται στο κεντρικό μέρος της περιοχής. Η διασπορά, το βάθος και η τιμή της αντίστασης θα μπορούσε να αποτυπώνει την ύπαρξη και την ροή ρύπων που συνδέονται με υγρά απόβλητα ελαιολιτριβείων. Οι ρύποι αυτοί μετακινούνται από την δεξαμενή και ρέουν κυρίως στα πολύ επιφανειακά στρώματα. Σε βαθύτερα επίπεδα και συγκεκριμένα μετά το βάθος των 0,75 μέτρων εντοπίζεται μία έντονη αγώγιμη περιοχή στην αριστερή γωνία του καννάβου, η οποία φαίνεται να φτάνει μέχρι το βάθος των 3 μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Η περιοχή αυτή θα μπορούσε να σχετίζεται με την κατακόρυφη ροή του ρύπου στην συγκεκριμένη θέση.

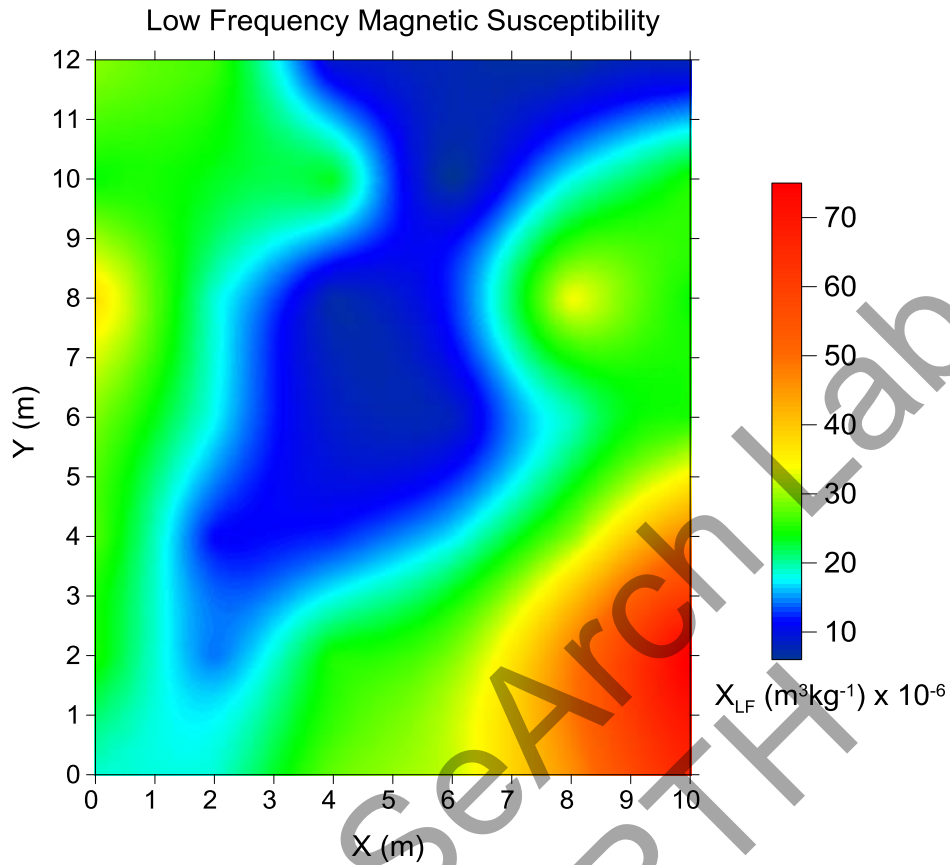


Σχήμα 39: Τρισδιάστατο γεωηλεκτρικό μοντέλο αντιστροφής από την περιοχή μελέτης στα Ρούστικα.

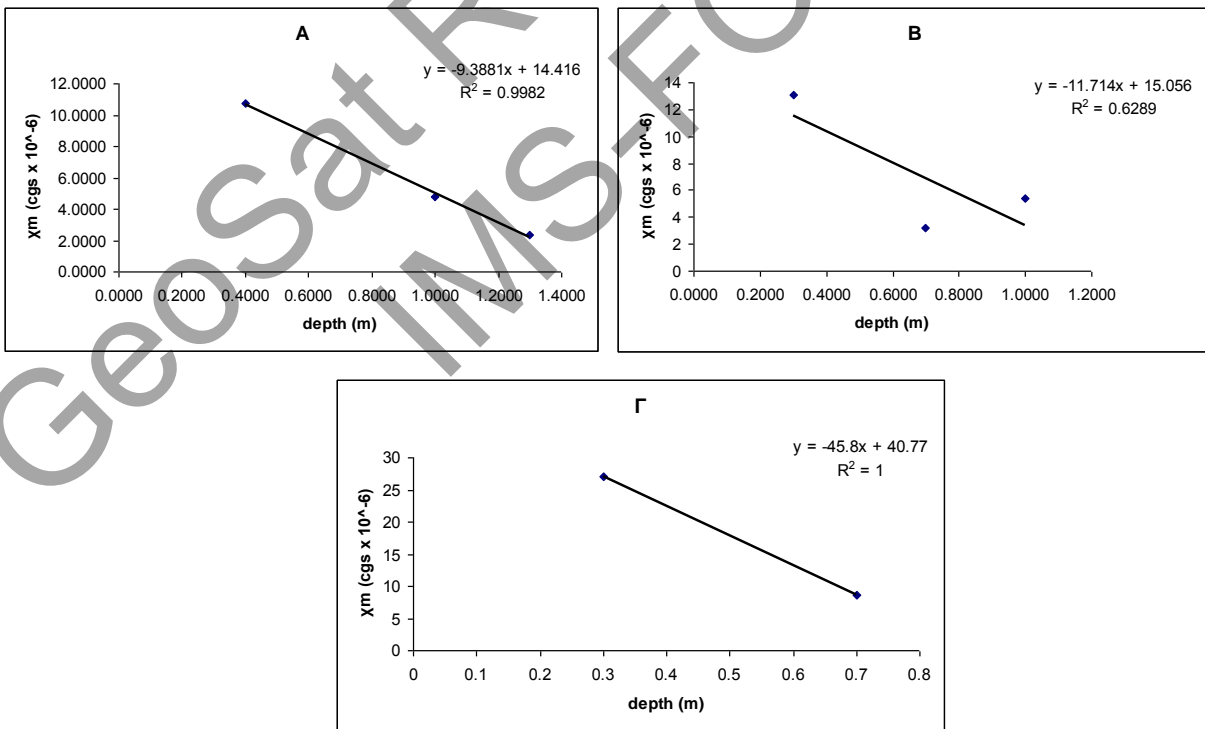
4.2 Αποτελέσματα μαγνητικής επιδεκτικότητας

Σκοπός της εφαρμογής της μαγνητικής επιδεκτικότητας ήταν η συλλογή εδαφικών και σε βάθος δειγμάτων με σκοπό την μελέτη της συσχέτισής της με τις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή. Τα συνολικά 42 εδαφικά δείγματα συλλέχθηκαν από ένα βάθος που δεν ξεπέρασε τα 10-15 εκατοστά από την επιφάνεια του εδάφους. Η μαγνητική επιδεκτικότητα (χ_m) μετρήθηκε σε δύο συχνότητες (χαμηλή 0.47 kHz; Xlf και υψηλή συχνότητα 4.7 kHz; χ_{hf}) με το όργανο Bartington MS2). Στο **Σχήμα 40** είναι εμφανής η χαρτογράφηση μίας περιοχής χαμηλών τιμών μαγνητικής επιδεκτικότητας η οποία σαν μία γλώσσα καλύπτει την περιοχή με διεύθυνση από τα ΒΑ προς τα ΝΔ.

Με βάση επίσης τα αποτελέσματα της ηλεκτρικής τομογραφίας επιλέχθηκαν τρία σημεία (A, B, C, **Σχήμα 36**) για την συλλογή εδαφικών δειγμάτων σε βάθος, σε σημεία που εντοπίστηκαν χαμηλές, μεσαίες και υψηλές τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης. Το μέγιστο βάθος έφτασε τα 1.4, 1 και 0.7 μέτρα για τα σημεία A, B και C. Στο **Σχήμα 41** φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής επιδεκτικότητας με το βάθος για τα αντίστοιχα σημεία.

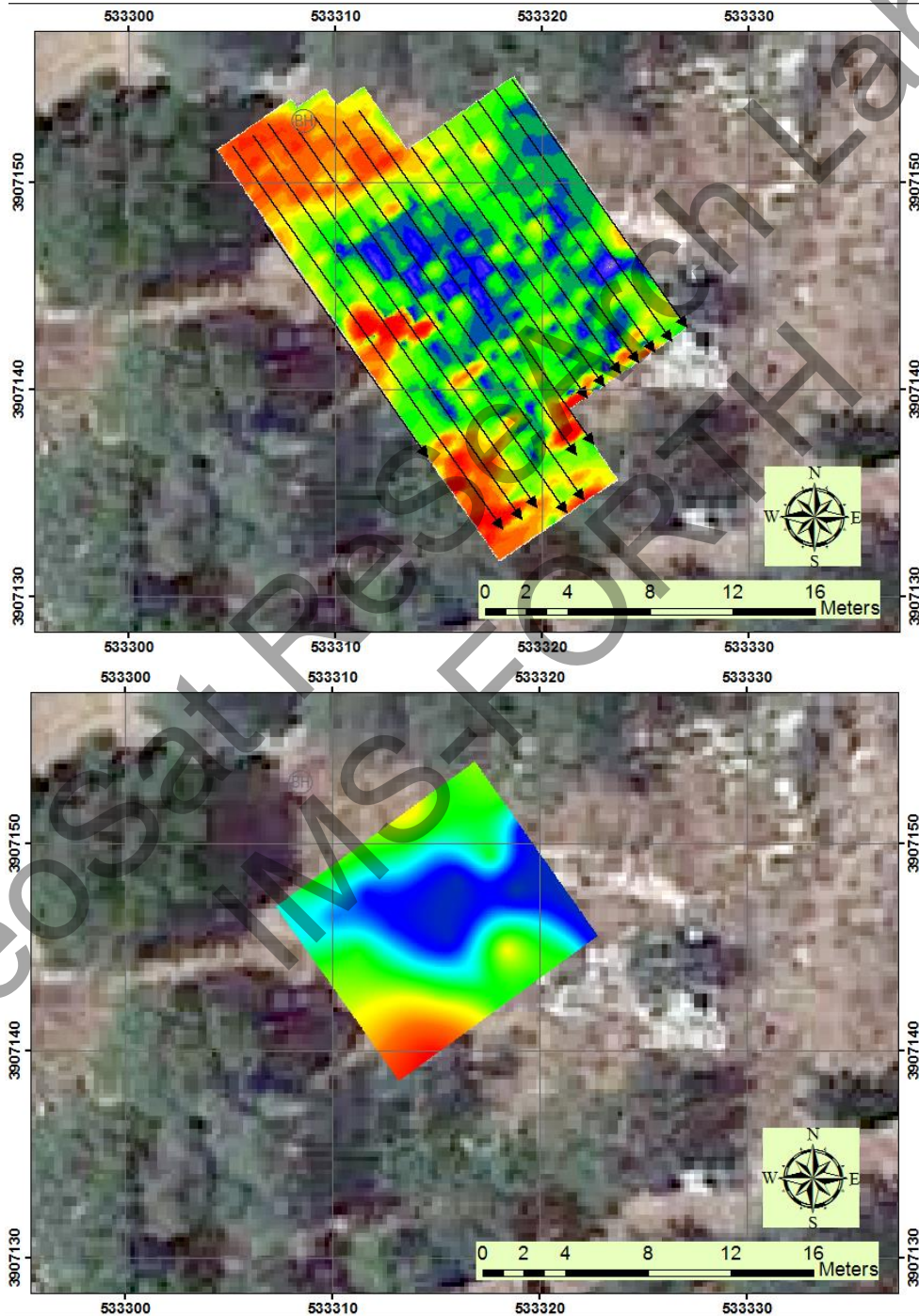


Σχήμα 40: Μεταβολή της μαγνητικής επιδεικτικότητας που μετρήθηκε στα εδαφικά δείγματα σε χαμηλή συχνότητα.

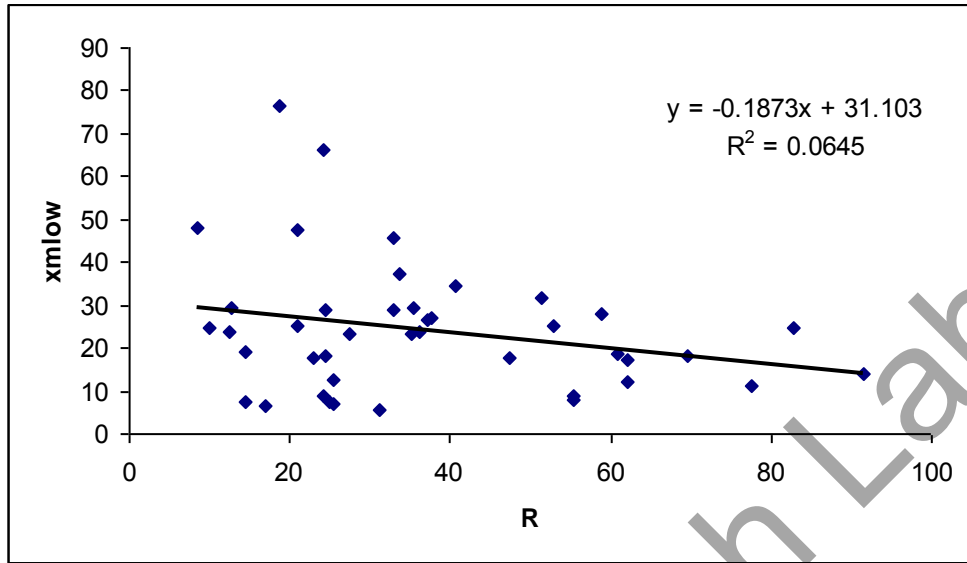


Σχήμα 41: Μεταβολή της μαγνητικής επιδεικτικότητας των εδαφικών δειγμάτων με το βάθος για τα σημεία A, B και C.

Οι μετρήσεις της μαγνητικής επιδεκτικότητας των επιφανειακών δειγμάτων αφορούν την μεταβολή της συγκεκριμένης φυσικής ποσότητας μέχρι το βάθος των 10-15 εκατοστών από την επιφάνεια του εδάφους. Για την άμεση σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα της τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας εξάχθηκε από το τρισδιάστατο μοντέλο αντιστροφής η οριζόντια τομή για το βάθος των 25 εκατοστών από την επιφάνεια του εδάφους. Από την σύγκριση των δύο χαρτών παρατηρείται μια συσχέτιση ανάμεσα στην αγώγιμη ζώνη και στην περιοχή των χαμηλών τιμών της μαγνητικής επιδεκτικότητας (Σχήμα 42). Η συσχέτιση αυτή μεταξύ των δύο φυσικών ποσοτήτων ενισχύει της υπόθεση ότι και οι δύο μέθοδοι κατάφεραν να χαρτογραφήσουν την ροή των αποβλήτων στην συγκεκριμένη περιοχή. Σε γενικές γραμμές παρατηρείται μία ελαφριά γραμμική συσχέτιση μεταξύ των τιμών της αντίστασης και της μαγνητικής επιδεκτικότητας (Σχήμα 43).



Σχήμα 42: Υπέρθυση της οριζόντιας ηλεκτρικής τομής για τον βάθος των 0.25 μέτρων και της μαγνητικής επιδεκτικότητας στην δορυφορική εικόνα της περιοχής.



Σχήμα 43 Διάγραμμα συσχέτισης των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης και της μαγνητικής επιδεκτικότητας.

GeoSat Research Lab
IMS-FORTH

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Σε αυτή την τεχνική έκθεση έγινε εκτίμηση των δυνατοτήτων και των μειονεκτημάτων των γεωφυσικών μεθόδων στην χαρτογράφηση και παρακολούθηση της ροής των ρύπων στο υπέδαφος, οι οποίοι προέρχονται από την διαδικασία παραγωγής ελαιολάδου. Τα απόβλητα αυτά συνήθως διατίθενται σε δεξαμενές εξάτμισης, οι οποίες κατασκευάζονται σε περιοχές με αλλουβιακές προσχώσεις, χωρίς καμία πρόβλεψη στεγανοποίησης του πυθμένα και των τοιχωμάτων αυτών των δεξαμενών. Η συνεχής απόθεση αυτών των αποβλήτων στις δεξαμενές έχει ως αποτέλεσμα την υπερχείλιση των αποβλήτων και την ροή τους τόσο στην επιφάνεια του εδάφους όσο και στους πορώδεις σχηματισμούς του υπεδάφους. Επίσης υπάρχουν περιπτώσεις που η απόθεση αυτών των αποβλήτων γίνεται απευθείας στο έδαφος ή σε γειτονικά ρυάκια και ποτάμια χωρίς να λαμβάνεται κανένα πρόσθετο μέτρο ασφάλειας.

Σε πρώτη φάση το φαινόμενο της ροής αυτών των αποβλήτων στο υπέδαφος προσεγγίστηκε και μελετήθηκε με την χρήση συνθετικών δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας. Μοντελοποιήθηκε ένα τυπικό σενάριο ροής των αγωγίμων αποβλήτων στο υπέδαφος και τα συνθετικά δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης επεξεργάστηκαν τόσο με δισδιάστατους (2-D) όσο και τετραδιάστατους (4-D) αλγόριθμους αντιστροφής γεωηλεκτρικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα της συνθετικής ανάλυσης έδειξαν ότι η ηλεκτρική τομογραφία έχει την απαραίτητη διακριτική ικανότητα να χαρτογραφήσει τα φυσικά, χωρικά και χρονικά χαρακτηριστικά αυτών των ρύπων με σημαντική ακρίβεια.

Για να επιβεβαιωθούν τα αποτελέσματα της συνθετικής μοντελοποίησης επιλέχθηκαν τρεις θέσεις στην Κρήτη (Αγ. Ανδρέας, Αλικιανός, Ρούστικα) για την πρακτική εφαρμογή τόσο της ηλεκτρικής τομογραφίας όσο και άλλων γεωφυσικών μεθόδων (ηλεκτρομαγνητική, μαγνητική επιδεκτικότητα). Σε όλες τις περιπτώσεις φάνηκε ότι η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας μπορεί να χαρτογραφήσει τους αγωγίμους ρύπους που συνδέονται με τα απόβλητα των ελαιοτριβείων. Η χαρακτηριστική αγωγή υπογραφή αυτών των ρύπων που ρέουν μέσα σε ένα λιγότερο αγωγίμο περιβάλλον τους κατατάσσει ως ιδανικούς στόχους ανίχνευσης με την μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας.

Η περαιτέρω πειραματική εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων και μέτρησης της μαγνητικής επιδεκτικότητας σε εδαφικά δείγματα παρουσίασε κάποια σχετική επιτυχία όσον αφορά την χαρτογράφηση αυτών των ρύπων. Αυτή όμως φαίνεται να εξαρτάται από τις τοπικές γεωλογικές και στρωματογραφικές συνθήκες στην εκάστοτε περιοχής μελέτης.

Ο συνδυασμός και η ενσωμάτωση οποιασδήποτε γεωλογικής και υδρογεωλογικής πληροφορίας με τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων μπορούν να δομήσουν ένα σημαντικό διαχειριστικό εργαλείο για την εκτίμηση της επικινδυνότητας και της υποβάθμισης του περιβάλλοντος που προκαλείται από την ανεξέλεγκτη διάθεση των αποβλήτων αυτών στο περιβάλλον. Επίσης οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από αυτήν προσέγγιση θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε μία ολοκληρωμένη πλατφόρμα για την συνεχή παρακολούθηση της μόλυνσης σε τέτοιες περιοχές. Ο συνδυασμός των γεωφυσικών διασκοπήσεων με χημικές αναλύσεις εδαφικών δειγμάτων και η συσχέτισή τους μπορεί να βοηθήσει στην εξαγωγή σχέσεων μεταξύ των γεωφυσικών και των γεωχημικών παραμέτρων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Benson, A.K., 1995, Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities, *Journal of Applied Geophysics*, v. 33, p. 177-193.
- Bradford, J.H., Wu, Y., 2007, Instantaneous spectral analysis: Time-frequency mapping via wavelet matching with application to contaminated-site characterization by 3D GPR, *The Leading Edge*, v. 26, 1019-1023.
- Daily, W., and Ramirez, L., 2000, Electrical imaging of engineered hydraulic barriers: *Geophysics*, 65, 83-94.
- Kim, J.H., Yi, M.J., Park, S.G., Kim, J.G. (2009). 4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model, *Journal of Applied Geophysics*, 68, 522-532. Maher, B. and R. Thompson (eds.), *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*, p. 390, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Rodis, P.S., Karathanos, V.T., Mantzavinou, A. (2002), Partitioning of olive oil antioxidants between oil and water phases. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 596-601.
- Slater, L., Comas, X., Ntarlagiannis, D., Moulik, M.R., 2007, Resistivity-based monitoring of biogenic gases in peat soils, *Water Resources Research*, Volume 43, Issue 10, October 2007, Article number W10430
- Soupios Pantelis, Nikos Papadopoulos, Ilias Papadopoulos, Maria Kouli, Filippou Vallianatos, Apostolos Sarris, Thrassyvoulos Manios, 2007, Application of Integrated Methods in Mapping Waste Disposal Areas, *Environ Geol.*, DOI 10.1007/s00254-007-0681-2.
- Tsourlos P., Kim J.H., Vargemezis G. and Yi M.J., 2008. Ert Monitoring Of Recycled Water Injection in A Confined Aquifer. *Proceedings of SAGEEP 2008 conference*, April 6-11, Philadelphia 1132-1137.
- Lanz E., Maurer H. and Green A.G. (1998) Refraction tomography over a buried waste disposal site, *Geophysics*, Volume 63, Issue 4, pp. 1414-1433.

Geosat Research Ltd
IMS-FORTH

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Συνθετικό Μοντέλο Ηλεκτρικής Τομογραφίας

Η συνθετική μοντελοποίηση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο με σκοπό την εκτίμηση και την αξιολόγηση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας για την χαρτογράφηση και παρακολούθηση της ροής των ρύπων στο υπέδαφος. Προς την κατεύθυνσή αυτή κατασκευάστηκε ένα γεωηλεκτρικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την κίνηση του αγώγιμου ρύπου μέσα σε περιβάλλον μεγαλύτερης αντίστασης. Το σενάριο αυτό αποτελεί μία τυπική διαδικασία σε περιπτώσεις απόθεσης ρύπων από την παραγωγή ελαιολάδου στο υπέδαφος.

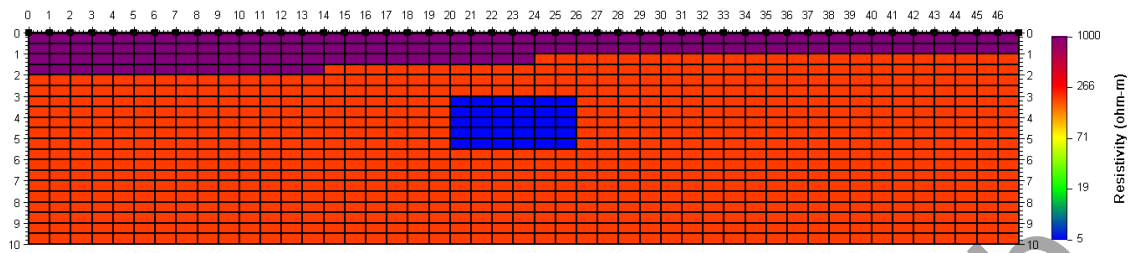
Το αρχικό μοντέλο στο **Σχήμα I. 1** αναπαριστά μία τυπική στρωματογραφική δομή ενός οριζόντιου στρώματος αλλουβιακών αποθέσεων μέσα στις οποίες ρέει ο αγώγιμος ρύπος των αποβλήτων ελαιοτριβείων. Ο ρύπος έχει αντίσταση 5 Ohm-m και μετακινείται μέσα στο αλλουβιακό στρώμα με αντίσταση 200 Ohm-m. Το επιφανειακό στρώμα άμμου και χαλικιών έχει αντίσταση 1000 Ohm-m και πάχος το οποίο μεταβάλλεται μεταξύ 1-2 μέτρα. Μάλιστα η αντίσταση του συγκεκριμένου στρώματος μειώνεται από τα 1000 Ohm-m στα 500 Ohm-m μετά την τρίτη χρονική φάση ώστε να συμπεριληφθούν στο μοντέλο οι θερμοκρασιακές μεταβολές λόγω των καιρικών φαινομένων.

Η τομογραφική γεωηλεκτρική διασκόπηση θεωρήθηκε ότι αποτελείται από 48 επιφανειακά ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετήθηκαν στην επιφάνεια του εδάφους σε ίση απόσταση μεταξύ τους (1 μέτρο). Για την συλλογή των τομογραφικών μετρήσεων θεωρήθηκε η διάταξη διπόλου-διπόλου με συνολικά 895 μετρήσεις και διαφορετικούς συνδυασμούς της απόστασης ηλεκτροδίων "a" και της απόστασης "Nsep" των διπόλων 1a & Nsep=1-10; 2a & Nsep=5-9; 3a & Nsep=6-9). Στη συνέχεια τα συνθετικά δεδομένα τα οποία προέκυψαν από την απόκριση του μοντελου μολύνθηκαν με 3% θόρυβο σε κατανομή Gauss

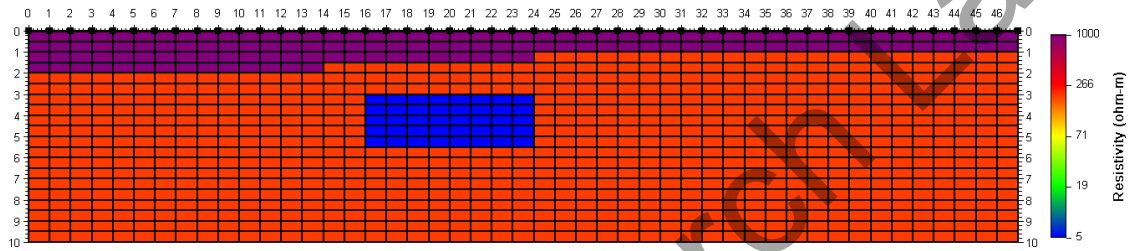
Αρχικά τα συνθετικά δεδομένα επεξεργάστηκαν αυτόνομα με ένα αλγόριθμο δισδιάστατης αντιστροφής και τα αντίστοιχα μοντέλα φαίνονται στο **Σχήμα I. 2**. Οι ανεξάρτητες αντιστροφές για τις τέσσερις πρώτες φάσεις ανακατασκεύασαν το αρχικό μοντέλο καθορίζοντας με συγκριτική ακρίβεια τον αγώγιμο στόχο και τα δύο στρώματα μεγαλύτερης αντίστασης. Ο αγώγιμος στόχος κατά την διάρκεια της φάσης T5 φαίνεται δεν διακρίνεται εξίσου καθαρά εξαιτίας της εγγενούς αδυναμίας της επιφανειακής ηλεκτρικής τομογραφίας να διακρίνει στόχους σε σχετικά μεγάλα βάθη. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η εφαρμογή ανεξάρτητων ηλεκτρικών τομογραφιών έχει τις δυνατότητες να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην χαρτογράφηση της δομής των αγώγιμων ρύπων από τα ελαιοτριβεία που ρέουν στο υπέδαφος.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε για την επεξεργασία των δεδομένων ένας αλγόριθμος αντιστροφής σε 4 διαστάσεις (4-D inversion) ο οποίος ενσωματώνει στην διαδικασία και την παράμετρο του χρόνου. Η σχετική μεταβολή της αντίστασης μεταξύ της φάσης T1 (φάση αναφοράς) και των υπόλοιπων φάσεων, όπως εκφράζεται με το λόγο των αντιστάσεων για τις συγκεκριμένες φάσεις, δείχνει καθαρά τόσο την χωρική όσο και χρονική μεταβολή του ρύπου μέσα στο υπέδαφος. Επιπλέον με την συγκεκριμένη προσέγγιση κατέστη δυνατή η παρακολούθηση της μεταβολής της αντίστασης του επιφανειακού στρώματος λόγω της μείωσης της αντίστασής του με τον χρόνο (**Σχήμα I. 3**).

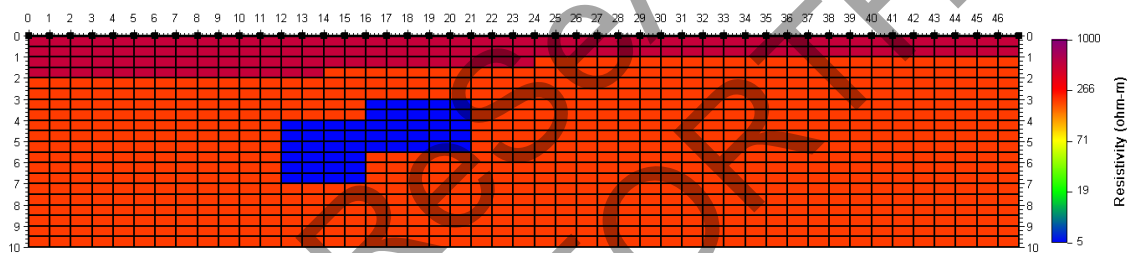
A) ΦΑΣΗ T1



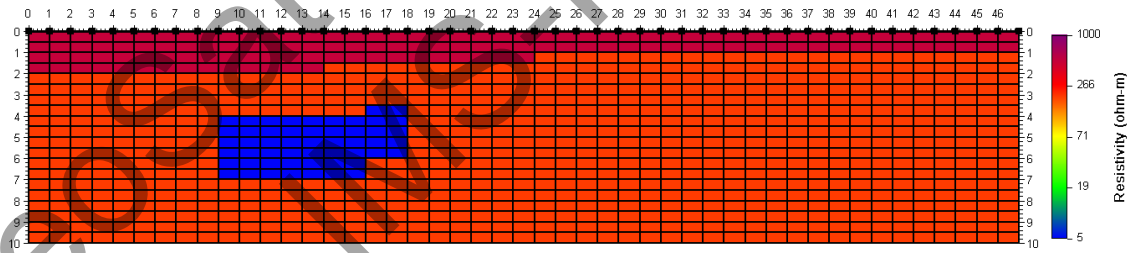
B) ΦΑΣΗ T2



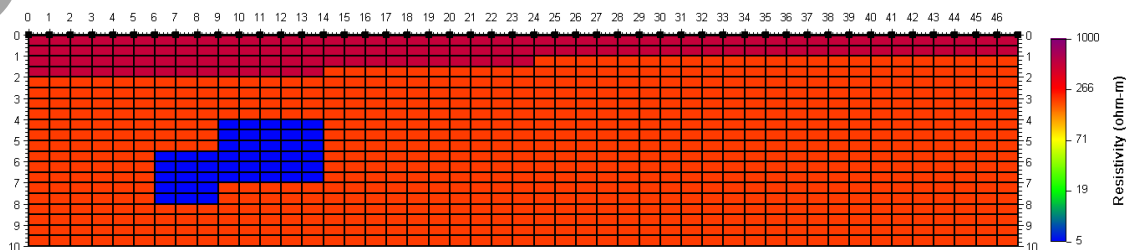
C) ΦΑΣΗ T3



D) ΦΑΣΗ T4

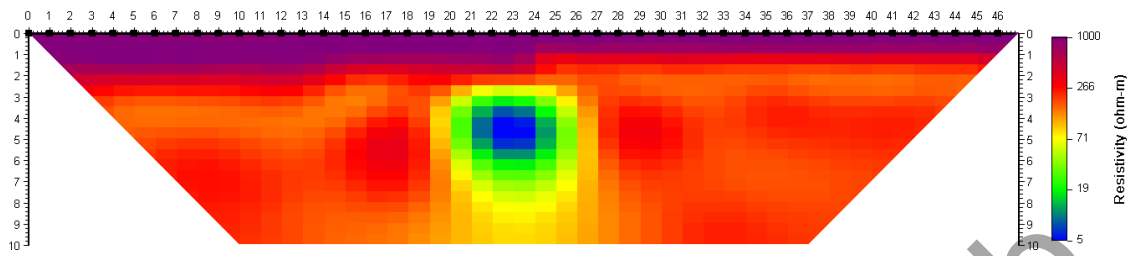


E) ΦΑΣΗ T5

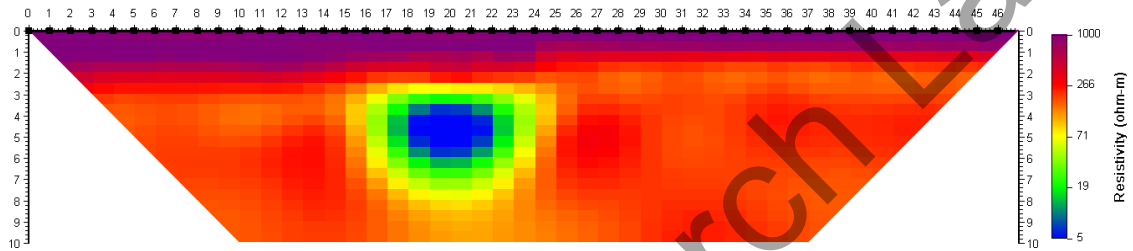


Σχήμα Ι. 1: Αρχικό γεωηλεκτικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει την ροή του αγώγιμου ρύπου (απόβλητα ελαιοτριβείων) μέσα σε ένα πορώδες μέσο μεγάλης αντίστασης κατά την διάρκεια πέντε διαδοχικών φάσεων. Ο οριζόντιος και κατακόρυφος άξονας είναι σε μέτρα.

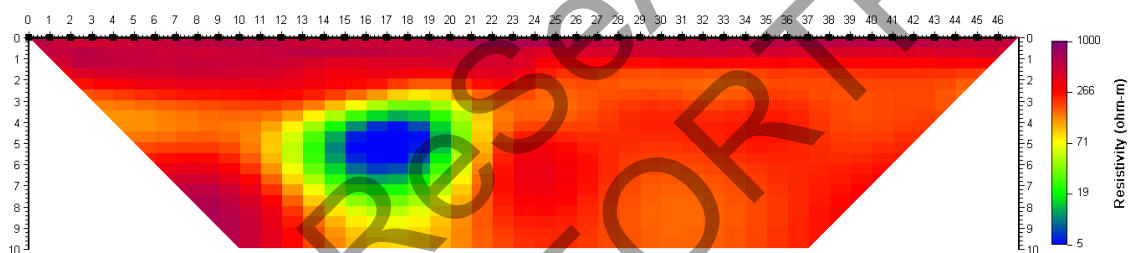
A) ΦΑΣΗ T1



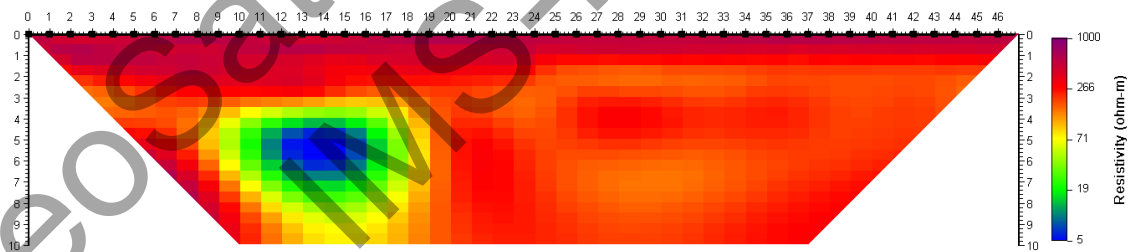
B) ΦΑΣΗ T2



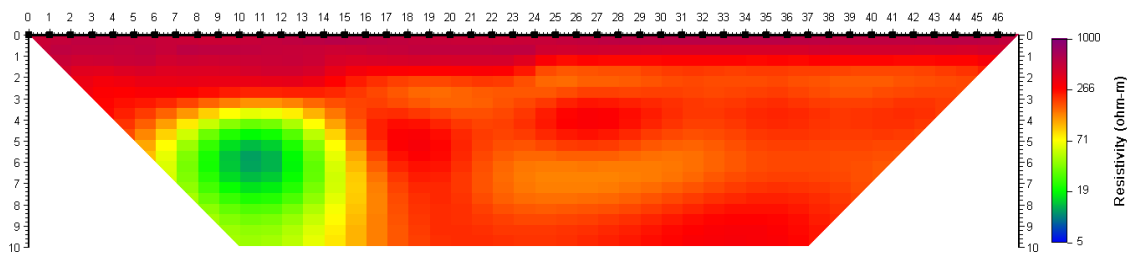
C) ΦΑΣΗ T3



D) ΦΑΣΗ T4

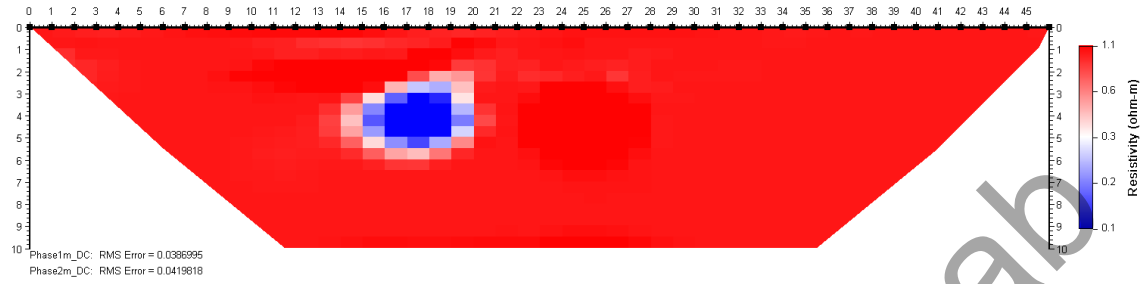


E) ΦΑΣΗ T5

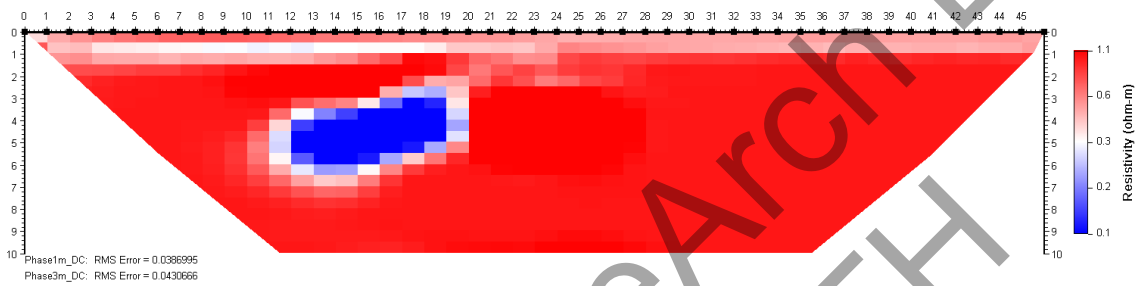


Σχήμα Ι. 2: Ηλεκτρικά μοντέλα αντιστροφής όπως προέκυψαν από την ανεξάρτητη αντιστροφή των τομογραφικών δεδομένων για κάθε διαφορετική φάση. Ο οριζόντιος και κατακόρυφος άξονας είναι σε μέτρα.

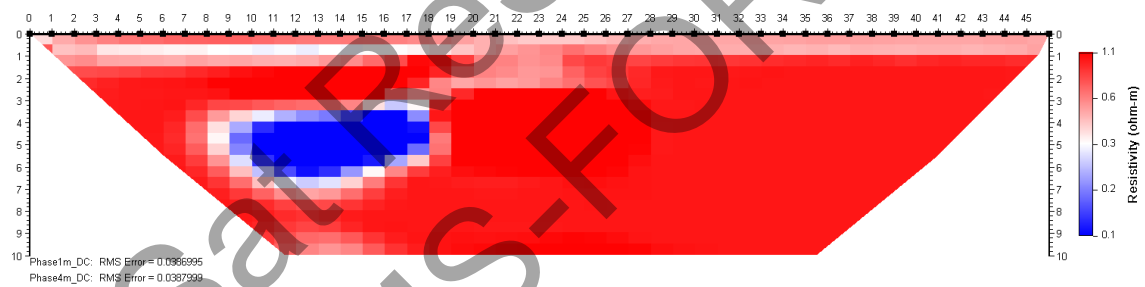
A) T1/T3



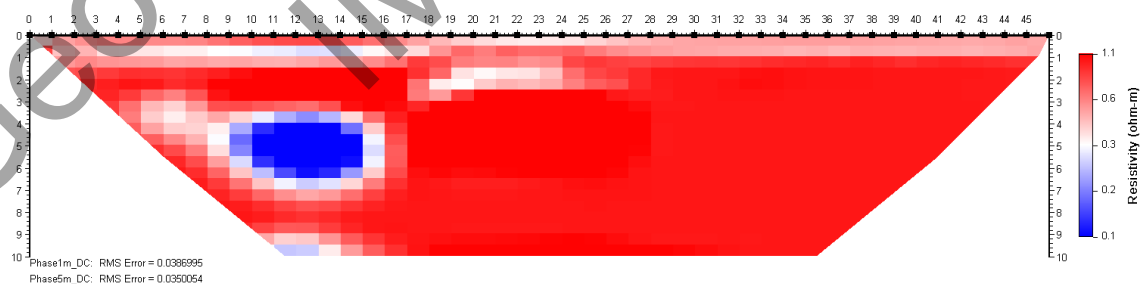
B) T1/T3



C) T1/T4



D) T1/T5



Σχήμα Ι. 3: Μεταβολή της αντίστασης του υπεδάφους μεταξύ της φάσης T1 (φάση αναφοράς) και των υπόλοιπων φάσεων όπως προέκυψε από την 4-D αντιστροφή των συνθετικών δεδομένων