



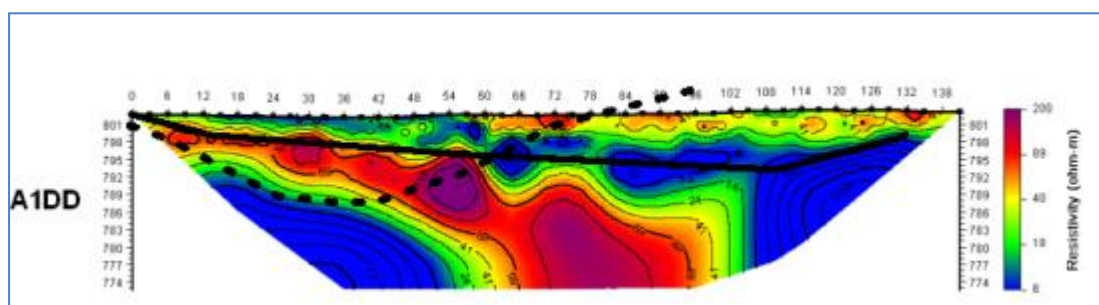
**ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ Α.Ε.**

---

**ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΟΥ:**

**«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΧΥΤΑ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ ΓΙΑ  
ΠΙΘΑΝΕΣ ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΕΚΚΡΙΜΑΤΟΣ ΣΤΟ  
ΥΠΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ  
ΜΕΘΟΔΩΝ»**

**ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ**



**ΑΝΑΔΟΧΟΣ :**



**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΕΡΓΟ Ε.Λ.Κ.Ε. Α.Π.Θ.: 88529**



---

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012**

---



# ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ Α.Ε.

**ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΟΥ:**

## «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΧΥΤΑ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ ΓΙΑ ΠΙΘΑΝΕΣ ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΕΚΚΡΙΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΥΠΕΛΑΦΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ»

**ΕΡΓΟ ΕΛΚΕ Α.Π.Θ.: 88529**

**ΑΝΑΔΟΧΟΣ :**

**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**



**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΑ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ:**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΤΣΟΥΡΛΟΣ**

*(ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΑΠΘ)*

**ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΟΜΑΔΑ:**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΤΣΟΥΡΛΟΣ**

*(ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΑΠΘ)*

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΒΑΡΓΕΜΕΖΗΣ**

*(ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΠΘ)*

**ΗΛΙΑΣ ΦΙΚΟΣ**

*(ΔΡ. ΓΕΩΛΟΓΟΣ, ΙΔΑΧ ΑΠΘ)*

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΔΕΡΕΚΑΣ**

*(ΓΕΩΛΟΓΟΣ ΜΕΛΕΤΗΤΗΣ)*



**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2012**

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>5</b>
1.1	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ .....	5
1.2	ΧΥΤΑ: ΓΕΩΛΟΓΙΑ - ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.....	6
1.2.1	ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΥΤΑ .....	7
1.2.2	ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΥΤΑ .....	9
1.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ -ΙΣΤΟΡΙΚΟ.....	11
1.4	ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	12
1.4.1	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ.....	13
<b>2</b>	<b>ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b> .....	<b>15</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
2.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ.....	15
2.2.1	Βασική Μέτρηση .....	16
2.2.2	Διατάξεις μέτρησης .....	18
2.3	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ .....	20
2.3.1	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	22
2.3.2	ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ.....	23
2.4	ΑΛΛΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	24
2.4.1	ΦΥΣΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ .....	24
2.4.2	ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ .....	27
2.5	ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΧΥΤΑ.....	28
2.5.1	ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΡΟΩΝ ΣΕ ΧΥΤΑ.....	30
2.6	ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	33
<b>3</b>	<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ</b> .....	<b>35</b>
3.1	ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ -ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	35
3.1.1	ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ .....	36
3.1.2	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	38
3.2	ΤΟΜΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΤΟΥ ΧΥΤΑ.....	40
3.3	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ .....	44
3.4	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ .....	51

---

<b>4</b>	<b>ΑΛΛΕΣ ΜΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>60</b>
4.1	ΦΥΣΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ.....	60
4.2	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASTM 7007.....	62
<b>5</b>	<b>ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>68</b>

---

# ***1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ***

## **1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ**

Αντικείμενο της παρούσας έκθεσης είναι η περιγραφή και ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων που διεξήχθησαν τον Ιούλιο και Αύγουστο του 2012 στο χώρο του ΧΥΤΑ Ιωαννίνων (τοπική κοινότητα Ελληνικού του Δήμου Βορείων Τζουμέρκων) με σκοπό τον εντοπισμό πιθανής διαρροής στραγγισμάτων στο υπέδαφος.

Στο πλαίσιο της μελέτης διενεργήθηκαν πυκνές μετρήσεις με τη γεωφυσική μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και με διάφορες διατάξεις μέσα στο κύτταρο του ΧΥΤΑ ώστε να διερευνηθεί τόσο η γεωλογική/υδρογεωλογική δομή του υπεδάφους αλλά κυρίως για να εντοπιστούν περιοχές ύποπτες για τυχόν διαρροή στραγγισμάτων. Στο κύτταρο του ΧΥΤΑ ελήφθησαν πρόσθετες μετρήσεις με τη μέθοδο του Φυσικού Δυναμικού και εκτελέστηκαν μετρήσεις σε επιλεγμένες τομές με την ειδική ηλεκτρική μεθοδολογία ASTM D 7007. Τέλος για την καλύτερη ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων στο κύτταρο μετρήθηκε επιπρόσθετα και μια συμπληρωματική τομή ηλεκτρικής τομογραφίας έξω από τον χώρο του ΧΥΤΑ η οποία και συνδυάστηκε με τη μέθοδο της Επαγόμενης Πόλωσης.

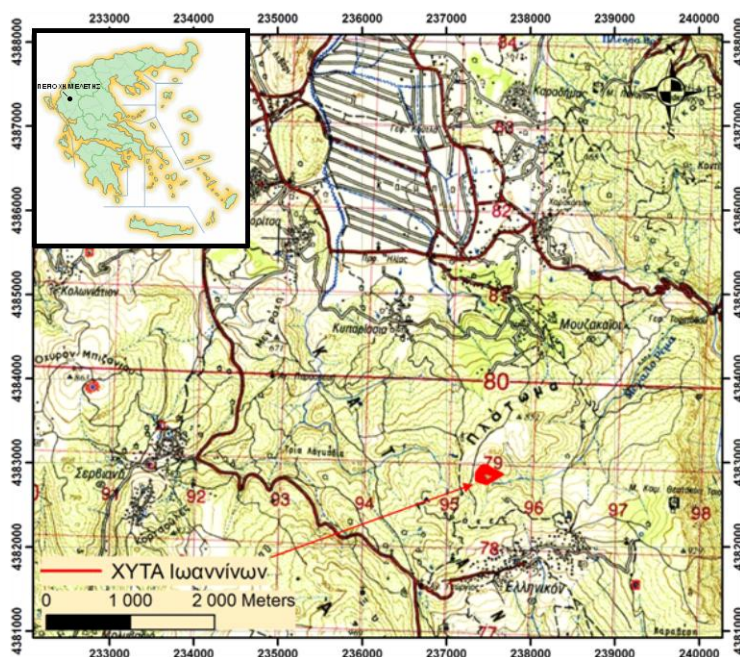
Η παρούσα μελέτη αποτελεί την έκθεση αποτελεσμάτων του ερευνητικού προγράμματος (έργο ΕΛΚΕ ΑΠΘ 88529): «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΧΥΤΑ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ ΓΙΑ ΠΙΘΑΝΕΣ ΔΙΑΡΡΟΕΣ ΕΚΚΡΙΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ» το οποίο ανατέθηκε από την εταιρεία Μεσόγειος Α.Ε. στον Τομέα Γεωφυσικής του ΑΠΘ μετά από υπογραφή σχετικής σύμβασης στις 4/7/2012 μεταξύ της εταιρείας και του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης - Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας. Επιστημονικά Υπεύθυνος του έργου είναι ο Αναπληρωτής Καθηγητής του Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Παναγιώτης Τσούρλος και στη σύνταξη της παρούσας έκθεσης συμμετείχαν επίσης οι: Γιώργος Βαργεμέζης (Επίκουρος Καθηγητής ΑΠΘ), Ηλίας Φίκος (Δρ. Γεωλόγος Γεωφυσικός, υπάλληλος ΙΔΑΧ ΑΠΘ) και Νίκος Δερέκας (Γεωλόγος Μελετητής). Τέλος στη διαδικασία λήψης των μετρήσεων συμμετείχαν, εκτός από τους συντάξαντες, οι συνάδελφοι Αλέξανδρος Σταμπολίδης (Δρ. Γεωλόγος

Γεωφυσικός, υπάλληλος ΙΔΑΧ ΑΠΘ) και Νεκταρία Διαμαντή (Δρ. Γεωλόγος Γεωφυσικός, υπάλληλος ΙΔΑΧ ΑΠΘ).

Η ερευνητική ομάδα ευχαριστεί θερμά τα στελέχη και εργαζόμενους της Μεσόγειος Α.Ε. για την βοήθεια σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων στο χώρο του ΧΥΤΑ, για την άμεση παροχή πρόσθετων δεδομένων (π.χ. τοπογραφικές μετρήσεις, σχέδια κ.α.) όποτε αυτά ζητήθηκαν και γενικότερα για την άριστη συνεργασία.

Επίσης, ευχαριστεί τον κ. Γρηγόρη Σιαμόπουλο (Χημικό Μηχανικό, Προϊστ. Τμήματος Εργαστηρίων της Περιφέρειας Ηπείρου) καθώς και τον κ. Αναστάσιο Τσόγκα (Προϊστ. Δ/σης Χ.Υ. Ιωαννίνων του Γενικού Χημείου του Κράτους) για την ενημέρωση που μας παρείχαν και το ενδιαφέρον που έδειξαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Επιπροσθέτως ευχαριστεί τον κ. Σιαμόπουλο για τη διάθεση από μέρους του δημοσιευμένων εκθέσεων και στοιχείων σχετικών με το θέμα τα οποία και μας βοήθησαν να διαμορφώσουμε μια γενικότερη εικόνα για το υπό μελέτη πρόβλημα και συνεκτιμήθηκαν κατά την ερμηνεία των δεδομένων

## 1.2 ΧΥΤΑ: ΓΕΩΛΟΓΙΑ - ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ



Ο Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) βρίσκεται στην περιοχή Πλάτωμα, 2Km περίπου βόρεια της τοπικής κοινότητας Ελληνικού του δήμου Βορείων Τζουμέρκων Ιωαννίνων όπως φαίνεται στο Σχ1.1.<sup>1</sup>

Σχήμα 1.1: Χάρτης της περιοχής του ΧΥΤΑ

<sup>1</sup> Όλοι οι χάρτες στην παρούσα έκθεση έχουν συντεταγμένες σε προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 87

---

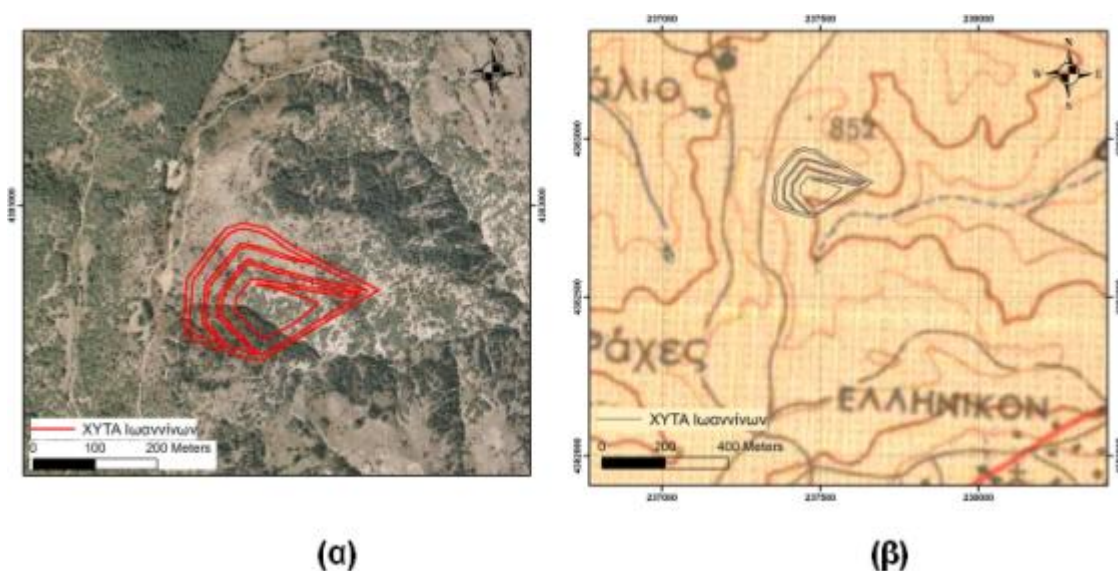
### **1.2.1 ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΧΥΤΑ**

Από γεωλογική άποψη ο ΧΥΤΑ εδράζεται σε σχηματισμό φλύσχη, Ανώτ. Ολιγόκαινο-Μειοκαινικής ηλικίας, ο οποίος κυριαρχεί στη γεωλογική δομή της περιοχής (Σχ. 1.2). Ο φλύσχη συνίσταται από εναλλαγές λεπτοκόκκων ψαμμιτών και σκληρών αργιλούχων ιλυωδών μαργών και επικάθεται επί της ασβεστολιθικής σειράς στο σύγκλινο του Ελληνικού. Η γενική παράταξη των στρωμάτων του φλύσχη στην περιοχή είναι Β-Ν και η κλίση 5°-10° δυτικά. Οι ψαμμίτες είναι πολύ συνεκτικοί, λεπτόκοκκοι, σχηματίζουν πάγκους πάχους μέχρι και 30εκ. και παρουσιάζουν μεταξώδη λάμψη, η οποία οφείλεται στους μαρμαρυγιακούς κόκκους που περιέχουν. Οι μάργες είναι αρκετά συνεκτικές, κατά θέσεις σκληρές και η σύστασή τους είναι κυρίως αργιλική κατά τόπους όμως εμφανίζουν υψηλό βαθμό αποσάθρωσης.

Από υδρογεωλογική άποψη ο φλύσχη συνολικά ως ενότητα αποτελεί διαπεράτο σχηματισμό. Στον αποσαθρωμένο μανδύα, τις ψαμμιτικές τράπεζες του φλύσχη καθώς και στις ζώνες τεκτονισμού (κυρίως διεύθυνσης ΝΔ-ΒΑ) αναπτύσσεται τοπική ασυνεχής μικρή υδροφορία η οποία εκδηλώνεται με μικροπηγές στην γενικότερη περιοχή. Η παροχή των πηγών μειώνεται κατά την ξηρά περίοδο στο ελάχιστο ή και σε ορισμένες περιπτώσεις στερεύουν πλήρως.

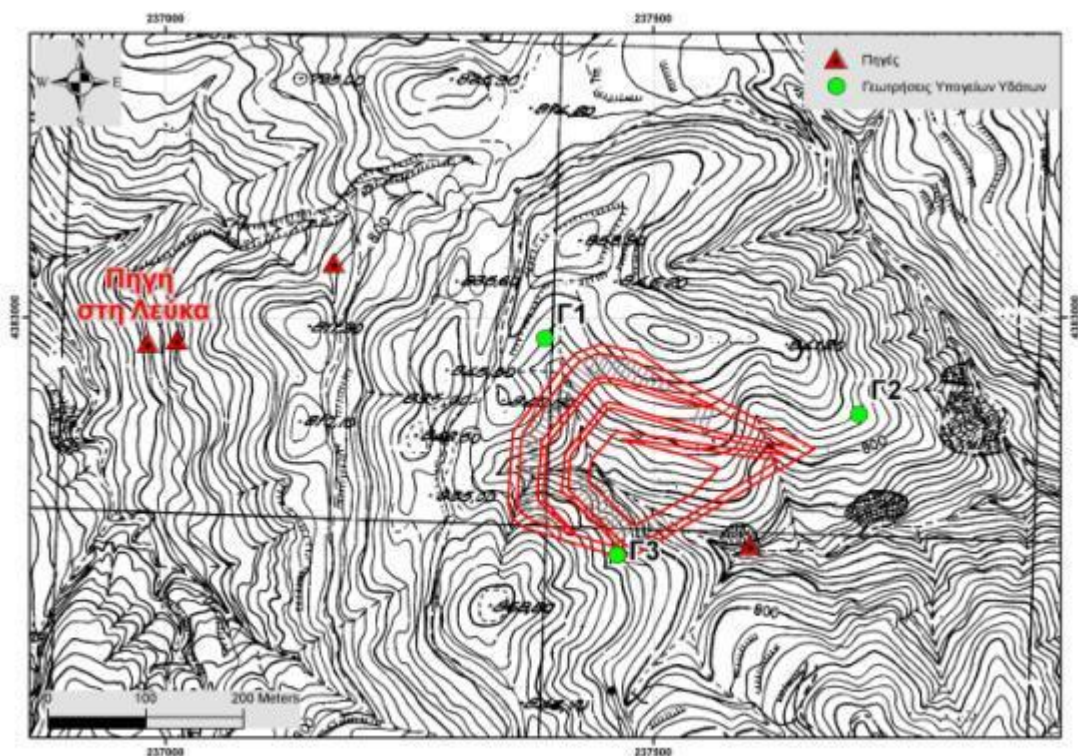
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού των πηγών της περιοχής κυμαίνεται από 350 έως 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Η θερμοκρασία του νερού των πηγών κυμαίνεται από 9,5 έως 11,6 °C.

Από υδρολογική άποψη, ο χώρος του ΧΥΤΑ εντάσσεται στην υδρολογική λεκάνη Αράχθου και βρίσκεται στην άμεση γειτνίαση με τον υδροκρίτη της λεκάνης του Αράχθου με τη λεκάνη Ιωαννίνων.



**Σχήμα 1.2:** Η περιοχή του ΧΥΤΑ με υπόβαθρο (α) τη δορυφορική φωτογραφία και (β) το γεωλογικό χάρτη (ΙΓΜΕ, φύλλο ΙΩΑΝΝΙΝΑ κλ. 1:50.000) όπου κυριαρχεί ο σχηματισμός του φλύσχη.

Τα υψόμετρα στον χώρο του ΧΥΤΑ κυμαίνονται από 750 μέτρα έως 860 μέτρα (Σχ. 1.3). Όπως φαίνεται και από τον τοπογραφικό χάρτη (Σχ. 1.3) στο Νοτιοδυτικό τμήμα του χώρου του ΧΥΤΑ παρουσιάζεται και το χαμηλότερο υψόμετρο.



**Σχήμα 1.3:** Η περιοχή του ΧΥΤΑ με υπόβαθρο τον τοπογραφικό χάρτη κλίμακας 1:5.000. Περιλαμβάνεται επίσης η θέση των πηγών και των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων.



## 1.2.2 ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΥΤΑ

Η κατασκευή του ΧΥΤΑ ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2011 (Σχ.1.4). Παρακάτω αναφέρονται τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου και ιδιαίτερα του κυττάρου το οποίο και αποτέλεσε το κύριο αντικείμενο των μετρήσεων. Οι στρώσεις στεγάνωσης και αποστράγγισης των στραγγισμάτων του κυττάρου, σύμφωνα με την οριστική μελέτη καθώς τις τροποποιήσεις αυτής κατά την κατασκευή, είναι οι εξής:

### Στην περιοχή του πυθμένα

- Φυσικός αργιλικός γεωλογικός φραγμός, πάχους 50cm, από άργιλο συμπιεσμένη σε τρεις στρώσεις, αρχικού πάχους 20cm και συντελεστή διαπερατότητας  $K=5 \times 10^{-10}$  m/s.
- Γεωσυνθετικός φραγμός από μπεντονίτη (GCL), αρχικού πάχους (πριν από τη διαβροχή) 1cm περίπου και διαπερατότητας μικρότερης από  $1 \times 10^{-11}$  m/sec.
- Γεωμεμβράνη πολυαιθυλαινίου (HDPE), τραχεία στις δύο όψεις, πάχους 2mm
- Γεώφασμα πολυπροπυλαινίου προστασίας της γεωμεμβράνης, βάρους 500gr/m<sup>2</sup>
- Άμμος προστασίας της γεωμεμβράνης πάχους 10cm
- Στρώση αποστράγγισης και συλλογής στραγγισμάτων, από καθαρό χαλίκι 16/32, πάχους 50cm και απορροής  $1 \times 10^{-3}$  έως  $1 \times 10^{-2}$  m/sec
- Γεώφασμα πολυπροπυλαινίου προστασίας και διαχωρισμού της στρώσης αποστράγγισης από τα απορρίμματα, βάρους 180gr/m<sup>2</sup>.

### Αντιστοίχως για τα πρανή του χώρου:

- Γεωσυνθετικός φραγμός από μπεντονίτη (GCL), αρχικού πάχους (πριν από τη διαβροχή) 1cm περίπου και διαπερατότητας μικρότερης από  $1 \times 10^{-11}$  m/sec.
- Γεωμεμβράνη πολυαιθυλαινίου (HDPE), τραχεία στις δύο όψεις, πάχους 2mm
- Γεώφασμα πολυπροπυλαινίου προστασίας της γεωμεμβράνης, βάρους 500gr/m<sup>2</sup>
- Αποστραγγιστική μεμβράνη Cordrain, πάχους 8mm, με ικανότητα απορροής  $5 \times 10^{-3}$  m/sec αντί της στρώσης του χαλικιού η οποία ολισθαίνει στα διαμορφούμενα πρανή.



**Σχήμα 1.4:** Φωτογραφία του ΧΥΤΑ κατά το τελικό στάδιο κατασκευής του

Το χαμηλότερο υψόμετρο του πυθμένα της λεκάνης βρίσκεται στο ΕΙ:792,00 ενώ το κάτω μέρος του επιχώματος βρίσκεται στο ΕΙ:752,00.

Επίσης στο κατάντη τμήμα του κυττάρου έχει κατασκευαστεί ειδικό οπλισμένο επίχωμα το οποίο έχει διαπερατές στρώσεις βάσης για να μπορούν να εκτονωθούν οι υδραυλικές πιέσεις τυχόν διηθημάτων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον έλεγχο των υπογείων υδάτων στο χώρο του ΧΥΤΑ έχουν κατασκευαστεί περιμετρικά του κυττάρου 3 γεωτρήσεις ελέγχου (μία ανάντη της λεκάνης του ΧΥΤΑ και δύο κατάντη) τα χαρακτηριστικά των οποίων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Κατά την ανόρυξη όλων των γεωτρήσεων παρατηρήθηκε ο σχηματισμός του φλύσχη, ήτοι εναλλαγές ιλυωδών αργιλούχων μαργών και ψαμμιτών.

Όνομασία Γεώτρησης	Θέση Γεώτρησης	Βάθος γεώτρησης (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Υψόμετρο πυθμένα γεώτρησης (m)	Βάθος τοποθέτησης φιλτροσωλήνων (m)
Γ1	Ανάντη δυτικά	70,00	832,20	762,20	52-64
Γ2	Κατάντη 1 βόρεια	50,00	807,60	757,60	38-44
Γ3	Κατάντη 2 νότια	50,00	810,20	760,20	38-44

---

### 1.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ -ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Σύμφωνα με στοιχεία της Μεσόγειος Α.Ε. αλλά και με βάση την πρόσφατη έκθεση<sup>2</sup> της Επιτροπής Διερεύνησης του προβλήματος που ορίστηκε από την Περιφέρεια Ηπείρου, ο ΧΥΤΑ ξεκίνησε τη δοκιμαστική λειτουργία στις 3/10/2011 ενώ ο βιολογικός καθαρισμός ξεκίνησε μόλις πληρώθηκαν οι δεξαμενές. Στις 19/03/2012 υποδείχθηκε πηγή με την ονομασία «Πηγή στη Λεύκα» στην οποία παρατηρήθηκε ρύπανση. Ταυτόχρονα η ανάλυση δείγματος σε μια από τις γεωτρήσεις ελέγχου (γεώτρηση Γ1 ανάντη) κατέδειξε ελαφριά ρύπανση. Τέλος, στις 29/03/2012 και ενώ βρίσκονταν σε εξέλιξη η παρατήρηση της ρύπανσης της πηγής, εντοπίστηκε εστία ρύπανσης στο ρέμα κατάντη του κυττάρου.

Έγινε αναγνώριση, απογραφή και αξιολόγηση όλων των υδροσημείων στα οποία εμφανίστηκε ρυπαντικό φορτίο, καθώς και άλλων υδροσημείων της άμεσης περιοχής ενδιαφέροντος. Ακολουθήθηκε πρόγραμμα δειγματοληψιών και βασικών ελέγχων χημικών παραμέτρων, ώστε να παρακολουθείται η εξέλιξη των ρυπαντικών φορτίων όλων των υδροσημείων.

Από τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν, τις μετρήσεις υπαίθρου, αλλά και τα έως τώρα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων, προκύπτει ρύπανση της Πηγής στη Λεύκα. Επίσης εντοπίστηκαν ρυπαντικά φορτία στα δείγματα της γεώτρησης Γ1 καθώς και στις εμφανίσεις νερών (εκροές) κατάντη του κυττάρου (λιθοριπή).

Η Επιτροπή Διερεύνησης, απουσία άλλων ρυπαινοσών δραστηριοτήτων, θεωρεί ότι αιτία των φαινομένων ρύπανσης είναι ο χώρος του ΧΥΤΑ. Ανάμεσα σε άλλες πιθανές αιτίες εκφράζει την υποψία ότι κάποιες από τις ρυπογόνες εκροές ενδέχεται να προέρχονται από διαρροή του κυττάρου.

Ανάμεσα στις προτάσεις που σχετίζονται με την περαιτέρω ρύθμιση της λειτουργίας του ΧΥΤΑ και της καλύτερης διαχείρισης των στραγγισμάτων προτείνονται η συνέχιση των δειγματοληψιών καθώς και η διεξαγωγή προγράμματος ιχνηθέτησης ώστε να διερευνηθεί περαιτέρω το ενδεχόμενο διαρροής του κυττάρου του ΧΥΤΑ.

Αν και δεν προτείνεται η διεξαγωγή γεωφυσικών μετρήσεων μέλη της επιτροπής ενθάρρυναν την εφαρμογή γεωφυσικών μετρήσεων καθώς εκτιμάται ότι μπορούν να βοηθήσουν στην καλύτερη σχεδιασμό-αξιοποίηση των ιχνηθετήσεων.

---

<sup>2</sup> Έκθεση των μελών της συσταθείσης Επιτροπής για τη διερεύνηση των φαινομένων ρύπανσης απορροών περιοχής του έργου: «Κατασκευή ΧΥΤΑ 1 της διαχειριστικής ενότητας (Ν. Ιωαννίνων) Περιφέρειας Ηπείρου». Περιφέρεια Ηπείρου, Μάιος 2012, σελ49.

---

## 1.4 ΓΕΩΦΥΣΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πολύπλοκο τεχνικό έργο του ΧΥΤΑ φιλοξενείται σε μια γενικότερη περιοχή η οποία είναι γεωλογικά (παρουσία του ανομοιογενούς σχηματισμού του φλύσχη), υδρογεωλογικά και γεωμορφολογικά (παρουσία υδατορεμάτων, έντονο ανάγλυφο) περίπλοκη. Αυτό καθιστά τη μελέτη και επίλυση του προβλήματος του εντοπισμού της πηγής της ρύπανσης ιδιαίτερα δύσκολη και επομένως απαιτείται διακλαδική αντιμετώπιση.

Οι γεωφυσικές μετρήσεις αποτελούν ένα πλήρως μη επεμβατικό εργαλείο για την απεικόνιση των ιδιοτήτων του υπεδάφους και τη εξαγωγή εμμέσων συμπερασμάτων για τη δομή του. Ειδικότερα, η εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων σε χώρους ΧΥΤΑ συνδέεται τόσο με τη γενική χαρτογράφηση της γεωφυσικής δομής του υπεδάφους αλλά και με τον εντοπισμό διασταλλαζόντων λόγω της πολύ υψηλής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν (χαμηλή ειδική ηλεκτρική αντίσταση). Επίσης, γεωηλεκτρικές γεωφυσικές τεχνικές χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό διαρροών λόγω της λειτουργίας του σημείου της πιθανής διαρροής ως δευτερεύουσας πηγής ρεύματος.

Στο γενικότερο αυτό πλαίσιο η παρούσα γεωφυσική μελέτη καλείται να συμβάλει στη μελέτη του προβλήματος έχοντας ως κύριο αντικείμενο τη διερεύνηση του χώρου του κυττάρου του ΧΥΤΑ για τον εντοπισμό τυχόν θέσεων πιθανής διαρροής εκκρίματος προς το υπέδαφος. Δευτερευόντως, στόχος της γεωφυσικής έρευνας είναι να αποφανθεί -στο μέτρο που το επιτρέπουν οι μετρήσεις- για τις γεωλογικές, υδρογεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν στο υπέδαφος και ειδικότερα στη περιοχή που υλοποιούνται οι μετρήσεις. Οι γεωφυσικές μετρήσεις εκτελέστηκαν στη συντριπτική τους πλειοψηφία στο χώρο του κυττάρου. Πρέπει να τονιστεί ότι με δεδομένη τη λειτουργία του ΧΥΤΑ και τη συσσώρευση ήδη σημαντικού μεγάλου όγκου απορριμμάτων η γεωφυσική έρευνα έχει να αντιμετωπίσει και την πρόσθετη πολυπλοκότητα και μεταβλητότητα της εσωτερικής δομής του κυττάρου του ΧΥΤΑ.

Ιδανικά η γεωφυσική έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί και περιμετρικά του χώρου του ΧΥΤΑ καθώς και στο χώρο των πηγών ώστε να προκύψουν χρήσιμα στοιχεία για τον μηχανισμό τροφοδοσίας των πηγών τα οποία θα συμβάλλουν στη βέλτιστη σχεδίαση μέτρων προστασίας των υπόγειων νερών και των πηγών. Κάτι

---

τέτοιο όμως δε ήταν εφικτό στα πλαίσια του παρόντος έργου καθώς θα ξεπερνούσε κατά πολύ τους υπάρχοντες πόρους.

Πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι ως απεικονιστικές τεχνικές οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν μεν πολύτιμα εργαλεία για τη γρήγορη και οικονομική λήψη πληροφοριών για το υπέδαφος από την άλλη όμως δεν παύουν να παρέχουν μόνο έμμεσες πληροφορίες για αυτό. Η αξιόπιστη ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων βασίζεται στην περαιτέρω επιβεβαίωση των αρχικών συμπερασμάτων από συμπληρωματικές μεθοδολογίες πιο άμεσης παρατήρησης όπως π.χ. δειγματοληψία, χημικές αναλύσεις, γεωτρήσεις κ.α.. Επομένως, οι γεωφυσικές μέθοδοι δεν αποτελούν από μόνες τους πανάκεια αλλά είναι πολύτιμα εργαλεία στη μελέτη ενός προβλήματος μαζί με άλλες υπάρχουσες μεθοδολογίες.

#### **1.4.1 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΟΥ ΑΚΟΛΟΥΘΗΘΗΚΕ**

Βάσει της αρχικής συλλογής στοιχείων για την περιοχή ενδιαφέροντος της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και των διαθέσιμων πόρων, η προσέγγιση που ακολούθηθηκε στην παρούσα μελέτη είναι η εξής:

- Επίσκεψη στο χώρο και συλλογή των υπάρχοντων στοιχείων της περιοχής μελέτης. Καταγραφή του γενικότερου γεωλογικού, τεκτονικού περιβάλλοντος της περιοχή μελέτης.
- Εκτέλεση πυκνών μετρήσεων με τη γεωφυσική μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και με διάφορες διατάξεις μέσα στο κύτταρο του ΧΥΤΑ ώστε να διερευνηθεί τόσο η γεωλογική/υδρογεωλογική δομή του υπεδάφους, αλλά κυρίως για να εντοπιστούν περιοχές ύποπτες για τυχόν διαρροή στραγγισμάτων.
- Λήψη πρόσθετων μετρήσεων (σε ανεξάρτητο δίκτυο) μέσα στο κύτταρο με τη μέθοδο του Φυσικού Δυναμικού.
- Συμπληρωματική εκτέλεση μετρήσεων σε επιλεγμένες τομές με την ειδική ηλεκτρική μεθοδολογία ASTM D 7007.
- Λήψη συμπληρωματικής τομή ηλεκτρικής τομογραφίας έξω από τον χώρο του ΧΥΤΑ η οποία και συνδυάστηκε με τη μέθοδο της Επαγόμενης Πόλωσης για την καλύτερη ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων στο κύτταρο.

- 
- Ερμηνεία των μετρήσεων με ειδικό λογισμικό επεξεργασίας 2 και 3 διαστάσεων. Πρόσθετη παραγωγή συνθετικών μοντέλων ώστε να επιβεβαιωθούν κάποια από τα αποτελέσματα.
  - Καταχώρηση των μετρήσεων και ερμηνειών σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών για την ακριβή γεωαναφορά τους και την καλύτερη συσχέτιση τους έτσι ώστε να αποκτηθεί μια συνολική εικόνα για την περιοχή μελέτης.
  - Τελική εξαγωγή συμπερασμάτων με την παράθεση πιθανών σεναρίων.

Στις επόμενη ενότητα παρουσιάζεται εκτενώς η μεθοδολογία των μετρήσεων που εκτελέστηκαν με έμφαση στην τεχνική της ηλεκτρικής τομογραφίας. Επίσης γίνεται αναφορά στις τεχνικές εκείνες που χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό διαρροών στα ΧΥΤΑ.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται οι μετρήσεις, η επεξεργασία η ανάλυση των δεδομένων και οι ερμηνείες ενώ η έκθεση καταλήγει με τη διατύπωση των τελικών συμπερασμάτων.

---

## **2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στο πλαίσιο της μελέτης διενεργήθηκαν πυκνές μετρήσεις με τη γεωφυσική μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας χρησιμοποιώντας διάφορες διατάξεις μέσα στο κύτταρο του ΧΥΤΑ ώστε να διερευνηθεί τόσο η γεωλογική/υδρογεωλογική δομή του υπεδάφους αλλά κυρίως για να εντοπιστούν περιοχές ύποπτες για τυχόν διαρροή στραγγισμάτων.

Στο κύτταρο του ΧΥΤΑ ελήφθησαν πρόσθετες μετρήσεις με τη μέθοδο του Φυσικού Δυναμικού και εκτελέστηκαν μετρήσεις σε επιλεγμένες τομές με την ειδική ηλεκτρική μεθοδολογία ASTM D 7007.

Τέλος για την καλύτερη ερμηνεία των γεωφυσικών μετρήσεων στο κύτταρο μετρήθηκε επιπρόσθετα και μια συμπληρωματική τομή ηλεκτρικής τομογραφίας έξω από τον χώρο του ΧΥΤΑ η οποία και συνδυάστηκε με τη μέθοδο της Επαγόμενης Πόλωσης.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση των γεωφυσικών τεχνικών που εφαρμόστηκαν καθώς και η μεθοδολογία των μετρήσεων και της επεξεργασίας τους. Επίσης θα γίνει ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και εκτεταμένη αναφορά στις γεωηλεκτρικές εκείνες διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται στον εντοπισμό διαρροών σε ΧΥΤΑ και θα συνδεθεί η εφαρμοσιμότητα τους στη μελέτη του τρέχοντος προβλήματος.

### **2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ**

Με την εφαρμογή ηλεκτρικών μεθόδων επιδιώκεται ο καθορισμός της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υπεδάφους και έτσι έμμεσα μπορούν να ληφθούν πληροφορίες για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους. Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου ενός ζεύγους ηλεκτροδίων. Σε ένα δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων μετράται η πτώση τάσης που προκαλείται (Σχήμα 4.1). Η ωμική αντίσταση που υπολογίζεται ως το πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών

---

χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης η οποία με τη σειρά της μας επιτρέπει τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις οπότε η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και τον εντοπισμό ειδικών στόχων.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών του υπεδάφους κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα<sup>3</sup>. Επομένως η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση, σύσταση του νερού που βρίσκεται στους διάφορους γεωλογικούς σχηματισμούς. Ειδικότερα εξαρτάται από: τις υδρολογικές - υδρογεωλογικές συνθήκες, τη χημική σύσταση του νερού, το μέγεθος των πόρων (πορώδες) των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις – διακλάσεις - ρήγματα των σχηματισμών, τη θερμοκρασία και την πίεση.

Επομένως η ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή.

Η μελέτη της ειδικής αντίστασης μπορεί να δώσει ασφαλή συμπεράσματα για τη δομή μόνο όταν η ερμηνεία γίνεται συνυπολογίζοντας όλες τις υπάρχουσες πληροφορίες για την υπό μελέτη περιοχή (γεωλογικοί χάρτες, γεωτρήσεις αναλύσεις κ.α.).

### **2.2.1 Βασική Μέτρηση**

Η βασική διαδικασία μέτρησης είναι η εξής: χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια (συνήθως μεταλλικοί πάσσαλοι) τα οποία εισάγονται στο έδαφος σε ένα βάθος μερικών εκατοστών (~10cm) και σε αποστάσεις μεταξύ τους που ποικίλουν από μερικά μέχρι μερικές εκατοντάδες μέτρα.

Χρησιμοποιείται όργανο μέτρησης το οποίο συνδέεται με τα ηλεκτρόδια μέσω καλωδίων. Διαβιβάζεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα έντασης  $I_{AB}$  (ποικίλλει από μερικά milli-Ampere έως μερικά Ampere) μέσα στη γη με δυο ηλεκτρόδια ρεύματος που στη βιβλιογραφία ονομάζονται A, B και μετράται σε διάφορες θέσεις η διαφορά δυναμικού  $V_{MN}$  μεταξύ δυο ηλεκτροδίων δυναμικού που στη βιβλιογραφία

---

<sup>3</sup> δηλαδή το ρεύμα άγεται μέσω των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό που βρίσκεται στους πόρους των υλικών του υπεδάφους.



ονομάζονται M, N (βλ. Σχήμα 2. 1). Βρίσκεται έτσι για κάθε μέτρηση η ηλεκτρική αντίσταση R.

$$R = \frac{V_{MN}}{I_{AB}}$$

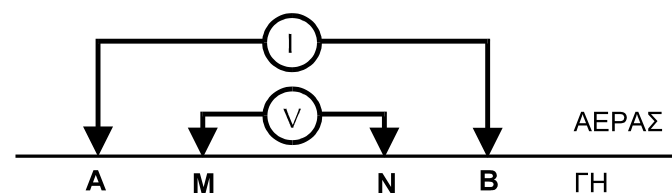
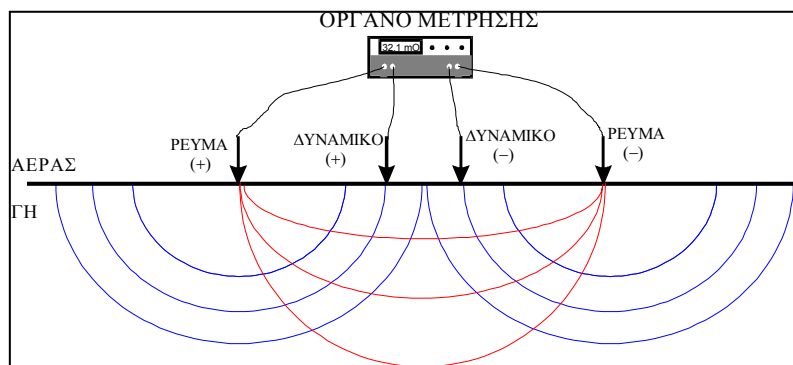
Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος (άρα και το βάθος της διασκόπησης) είναι ανάλογο με την απόσταση των ηλεκτροδίων. Επειδή η γη είναι γεωηλεκτρικά ανομοιογενής, η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση είναι συνάρτηση:

- της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους
- της γεωμετρίας της μέτρησής μας (Θέσεις A, B, M, N)

Για να λάβουμε υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας εισάγεται ο όρος της Φαινόμενης Ειδικής Ηλεκτρικής Αντίστασης  $\rho_a$ .

$$\rho_a = \frac{V_{MN}}{I_{AB}} K$$

Όπου K είναι ο λεγόμενος γεωμετρικός παράγοντας – παράγοντας που εξαρτάται από τις αποστάσεις AB, AM, BM, BN. Στην πράξη, η φαινόμενη αντίσταση  $\rho_a$  αποτελεί (σε μια πρώτη προσέγγιση) ένα είδος «μέσου όρου» των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Άρα δεν δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια «παραμορφωμένη» εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία.



Σχήμα 2.1. Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

---

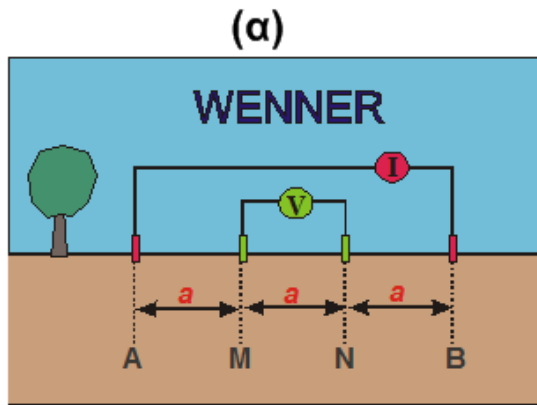
### 2.2.2 Διατάξεις μέτρησης

Υπάρχουν πολλοί τρόποι διάταξης των τεσσάρων ηλεκτροδίων A, B, M, N στην επιφάνεια του εδάφους. Έχουν προταθεί πάρα πολλές διατάξεις με σχετικά θεωρητικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην πράξη χρησιμοποιούνται διατάξεις που έχουν εσωτερική συμμετρία και ελαχιστοποιούν τις μετρήσεις καλωδίων στο ύπαιθρο. Τυπικές διατάξεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.

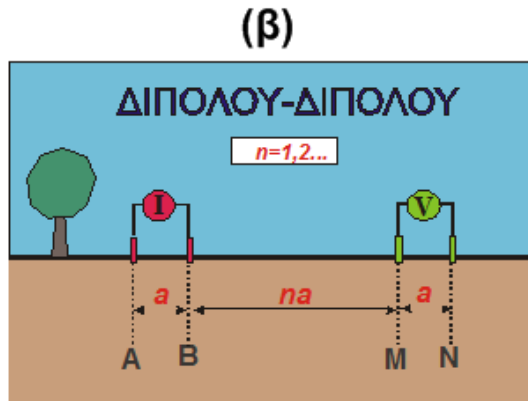
Η διάταξη Wenner (2.2α) είναι χαρακτηριστική καθώς τα ηλεκτρόδια δυναμικού MN εμπερικλείονται στα ηλεκτρόδια ρεύματος AB. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάταξη να έχει ισχυρό σήμα και γενικά μικρό γεωμετρικό παράγοντα σε σχέση με άλλες ισοδύναμες διατάξεις. Επίσης δεν παρουσιάζει τόσο καλή διακριτική ικανότητα στις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης όμως εμφανίζει πολύ καλή κατακόρυφη ανάλυση.

Στη διάταξη διπόλου-διπόλου (2.2β) το δίπολο ρεύματος AB ξεχωρίζει από το δίπολο δυναμικού MN. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάταξη να έχει σχετικά αδύναμο σήμα και γενικά μεγάλο γεωμετρικό παράγοντα σε σχέση με άλλες ισοδύναμες διατάξεις. Παρουσιάζει όμως πολύ καλή διακριτική ικανότητα στις πλευρικές μεταβολές της αντίστασης και για αυτό είναι δημοφιλής για τον εντοπισμό δισδιάστατων στόχων.

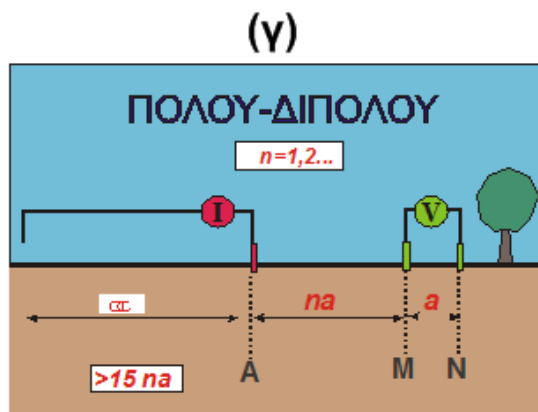
Στη διάταξη Πόλου-Διπόλου (2.2γ) το ηλεκτρόδιο ρεύματος B είναι αρκετά μακριά (στο "άπειρο") και παραμένει σταθερό στη διάρκεια της διασκόπησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διάταξη να έχει μέτριο σήμα και γενικά μέτρια μεγάλο γεωμετρικό παράγοντα σε σχέση με άλλες ισοδύναμες διατάξεις. Παρουσιάζει όμως καλή διακριτική ικανότητα στον εντοπισμό τόσο των πλευρικών όσο και των κατακόρυφων μεταβολών της αντίστασης. Η διάταξη αυτή μπορεί να αναπτυχθεί σε δυο διαφορετικές διαμορφώσεις (A-MN και NM-A) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3



**WENNER: >>>R <<< K**  
*Καλό σήμα – μικρή ευαισθησία*



**ΔΙΠΟΛΟΥ: <<<R >>> K**  
*Κακό σήμα – μεγάλη ευαισθησία*



**ΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ <R > K**  
*Μέτριο σήμα – καλή ευαισθησία*

**ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΣΤΟ «ΑΠΕΙΡΟ» – ΜΑΚΡΙΑ**

Σχήμα 2.2. Τοπικές διατάξεις ηλεκτροδίων



Σχήμα 2.3. Οι δυο διαμορφώσεις της διάταξης πόλου-διπόλου

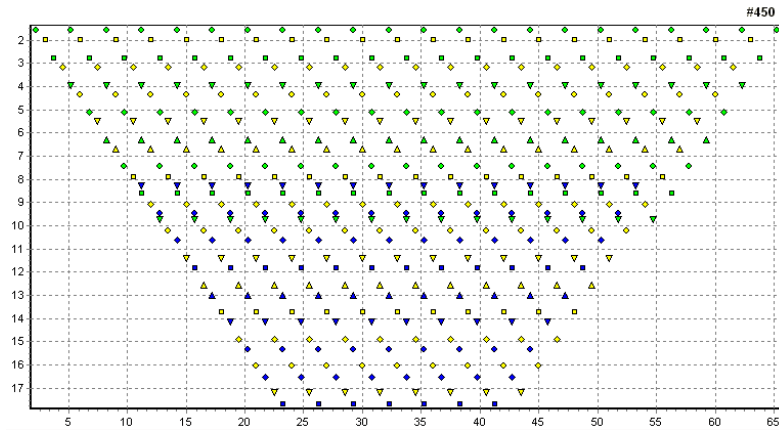
---

## 2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Στην παρούσα έρευνα αξιοποιούνται οι διατάξεις τομογραφίας που μας επιτρέπουν τη μελέτη της κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε δύο διαστάσεις (οριζόντια και κατακόρυφη). Ο όρος ηλεκτρική τομογραφία (ΗΤ) περιγράφει γενικά έναν τύπο μετρήσεων της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους. Μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός δύο “παραδοσιακών” τεχνικών μέτρησης: της όδευσης και της βυθοσκοπήσης. Ειδικότερα, η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η λήψη πληροφορίας τόσο για την κατακόρυφη όσο και για την οριζόντια μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην περιοχή μελέτης και έτσι λαμβάνεται μία πληρέστερη “εικόνα” του υπεδάφους.

Πρόδρομος της ΗΤ είναι η μέθοδος της “ψευδοτομής” που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές, Griffiths et al. 1990). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου). Η ΗΤ όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις (π.χ. Shima 1992).

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ΗΤ είναι ότι σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων άρα και χρήσιμης πληροφορίας (βλ. Σχ.2.4). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, και επομένως χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών με πολυκάναλα καλώδια (σχήμα 2.5). Πολλά τέτοια εμπορικά συστήματα (τουλάχιστον έξι) έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορούν στην αγορά από το 1990 και μετά, γεγονός ενδεικτικό της ανάπτυξης της ΗΤ. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι χρήση αυτών των οργάνων αυξάνει αναπόφευκτα το κόστος εφαρμογής της μεθόδου.



**Σχήμα 2.4.** Κατανομή μετρήσεων στην τομογραφία βάσει του σχεδιασμού λήψης μετρήσεων από τον αυτόματο πολυπλέκτη (διάταξη Πόλου-Διπόλου).



**Σχήμα 2.5.** Πολυκάναλο σύστημα λήψης μετρήσεων ηλεκτρικής τομογραφίας

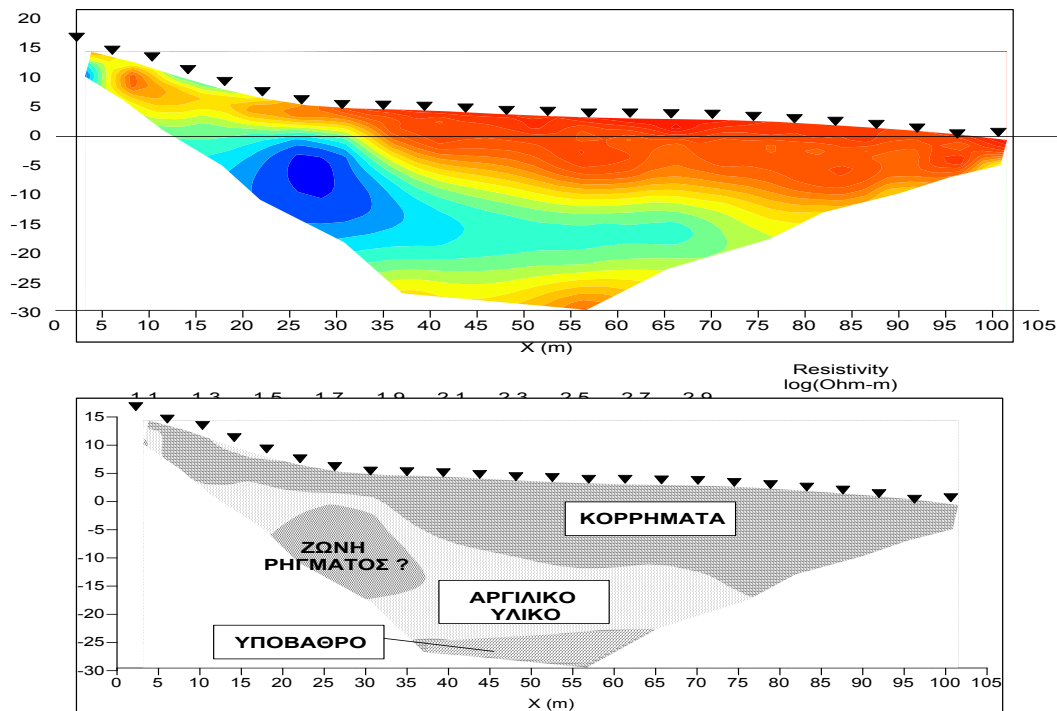
---

### 2.3.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελούν μια «παραμορφωμένη» εικόνα των πραγματικών ηλεκτρικών αντιστάσεων του υπεδάφους είναι απαραίτητο να υποστούν μια ειδική, πολύπλοκη μαθηματικά και υπολογιστικά, διαδικασία η οποία ονομάζεται αντιστροφή. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις δοθείσης της κατανομής της αντίστασης. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για το σκοπό αυτό, στην παρούσα μελέτη, είναι ένας αλγόριθμος πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Η αντιστροφή μπορεί να γίνει σε δυο (δισδιάστατη) ή τρεις (τρισδιάστατη) διαστάσεις.

Στην γεωηλεκτρική μέθοδο λόγω της μη γραμμικής φύσης του αντιστρόφου προβλήματος, οι αλγόριθμοι αντιστροφής είναι μια αυτοματοποιημένη επαναληπτική διαδικασία. Αρχικά, η περιοχή ενδιαφέροντος διακριτοποιείται σε ένα δίκτυο από παραμέτρους στις οποίες και αποδίδεται μια αρχική τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Βάσει αυτού του μοντέλου υπολογίζονται τα αντίστοιχα συνθετικά δεδομένα, τα οποία και συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα. Λαμβάνεται έτσι μια εκτίμηση του λάθους  $dy = (\text{πραγματικά δεδομένα} - \text{συνθετικά δεδομένα})$ . Στη συνέχεια με μια διαδικασία αντιστροφής πινάκων γίνεται διόρθωση του αρχικού μοντέλου αντίστασης και η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το λάθος  $dy$  μεταξύ των πραγματικών και συνθετικών δεδομένων ελαχιστοποιηθεί. Το τελικό μοντέλο αντίστασης θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατανομή των γεωηλεκτρικών αντιστάσεων και με βάση τις υπάρχουσες γεωλογικές συνθήκες ερμηνεύεται ώστε οι αντιστάσεις να μετατραπούν σε λιθολογικές και τεκτονικές τομές του υπεδάφους (Σχ2.6).



**Σχήμα 2.6.** Παράδειγμα γεωλογικής τομής (κάτω) που προκύπτει από την ερμηνεία αποτελεσμάτων αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας (πάνω).

### 2.3.2 ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκε το όργανο SYSCAL Pro της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS. Πρόκειται για πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο μέτρησης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σχεδιασμένο για έρευνα με μεθόδους συνεχούς ρεύματος. Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος της αντιστάθμισης του φυσικού δυναμικού, η ψηφιακή υπέρθεση για την ενίσχυση του σήματος και η προβολή του σφάλματος κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων που προσφέρονται από το συγκεκριμένο όργανο, εξασφαλίζουν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Έχει τη δυνατότητα σύγχρονης καταγραφής 10 διαφορών δυναμικού καθιστώντας ταχύτερη τη διαδικασία μέτρησης. Το συγκεκριμένο όργανο έχει μέγιστη τάση εξόδου 800 V και επιτυγχάνει τη δημιουργία ρεύματος με ένταση που τυπικά ξεπερνάει τα 1000 mA, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτρέπει και σημαντικά μεγαλύτερες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος (έως 1500mA).



**Σχήμα 2.7.** Το γεωηλεκτρικό όργανο SYSCAL-Pro της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των μετρήσεων. (αριστερά). Ο εξοπλισμός με τη συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της μέτρησης (δεξιά).

Τέλος έχει τη δυνατότητα να εκτελεί συμπληρωματικά μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης. Το όργανο μέτρησης παρουσιάζεται στο Σχ.2.7. Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλα πολυκαναλικά καλώδια ειδικά ηλεκτρόδια ατσαλιού (υψηλής μηχανικής αντοχής και υψηλής αγωγιμότητας).

## 2.4 ΑΛΛΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2.4.1 ΦΥΣΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Η μέθοδος του φυσικού δυναμικού είναι μια παθητική γεωφυσική μέθοδος κατά την οποία μετρούμε τις διαφορές δυναμικού που παράγονται από φυσικά ηλεκτρικά ρεύματα τοπικού χαρακτήρα. Τα ρεύματα αυτά παράγονται από πηγές μέσα στη γη λόγω ηλεκτροκινητικής (κίνηση νερού – διαλυμάτων) ή ηλεκτροχημικής (μεταξύ κόκκων μεταλλικών ορυκτών) δράσης. Έχουν αναφερθεί διάφορες θεωρίες γένεσης των φυσικών ρευμάτων τόσο λόγω χημικής δράσης (θεωρία του ηλ/κού στοιχείου, pH) όσο και λόγω κίνησης νερού (και ηλεκτρονίων) σε όρια γεωλογικών σχηματισμών, γεωτρήσεις κ.α. (Σχ.2.8α)

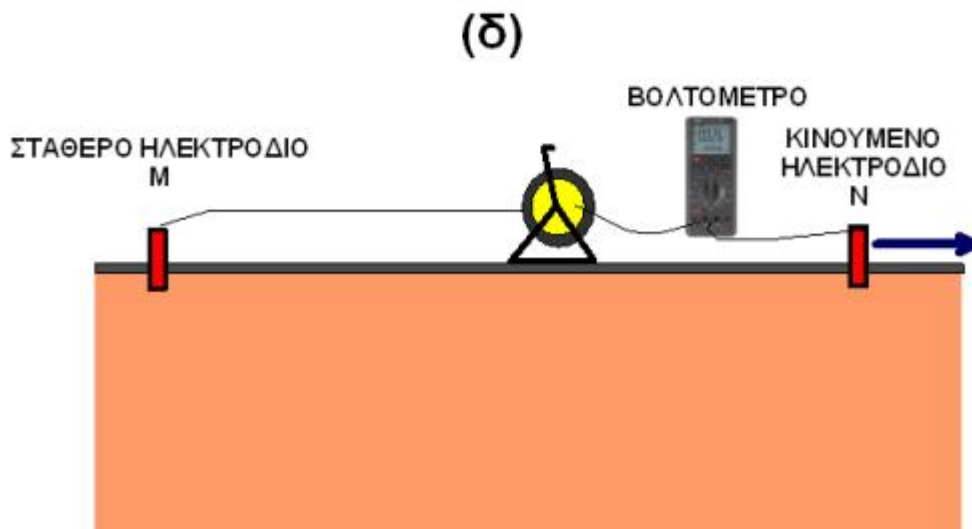
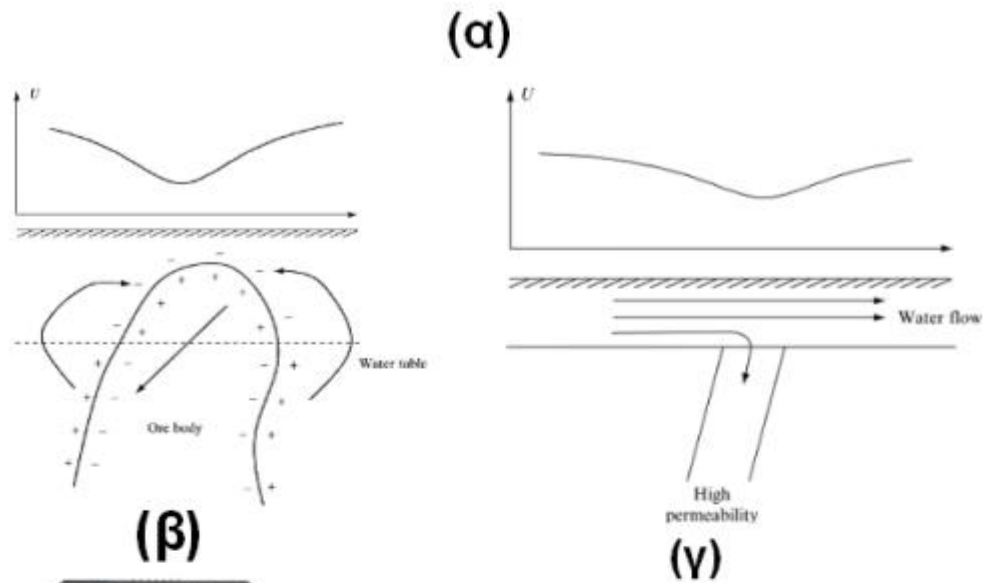
Η μετρούμενη τάση  $\delta V$  που μετράμε με τη μέθοδο του φυσικού δυναμικού μπορεί να είναι από λίγα έως και εκατοντάδες mV (π.χ μεταξύ 5-1000 mV). Η μέτρηση γίνεται με τη χρήση βολτομέτρου μεγάλης εμπέδησης (Σχ.2.8β) και δύο ειδικών ηλεκτροδίων για αποφυγή πόλωσης (Σχ.2.8γ). Συνήθως η μέτρηση εκτελείται



---

με το ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού (M) να παραμένει σταθερό και το άλλο (N) να κινείται σε κανονικό δίκτυο μετρήσεων (Σχ.2.8δ). Τα μετρούμενα δυναμικά χρησιμοποιούνται στην κατασκευή χάρτη ισοδυναμικών γραμμών οι οποίοι και αξιολογούνται ποιοτικά με βάση τις περιοχές υψηλού και χαμηλού δυναμικού.

Εφαρμογές της τεχνικής αναφέρονται στη μεταλλευτική έρευνα, στην υδρογεωλογία και στον εντοπισμό διαρροών νερού και καθιζήσεων του εδάφους. Επίσης οι μετρήσεις φυσικού δυναμικού μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν τη μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων που συνδέονται με τη ροή των ρυπαντών στο υπέδαφος.



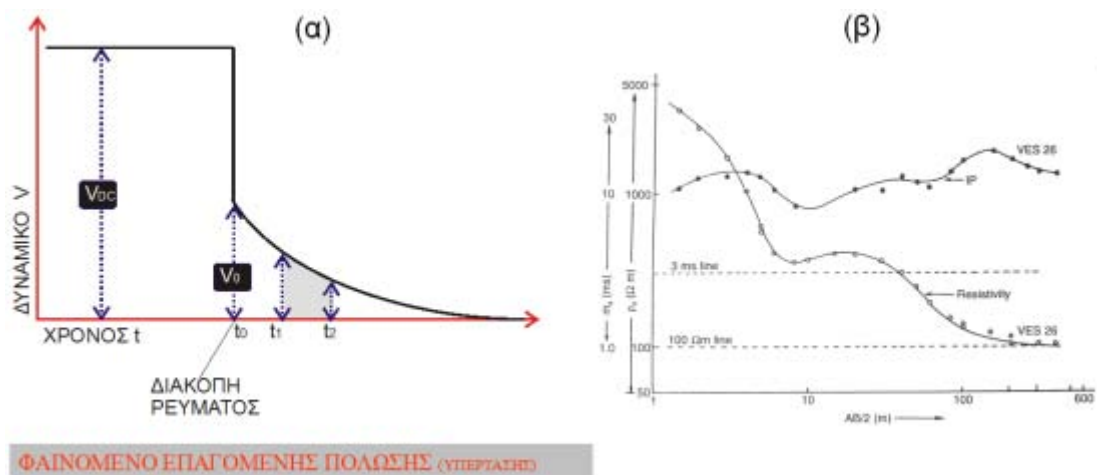
**Σχήμα 2.8.** Φυσικό δυναμικό: (α) ηλεκτροχημική προέλευση (αριστερά) και ηλεκτροκινητική προέλευση (δεξιά), (β) βολτόμετρο λήψης μετρήσεων Protek 506, (γ) μη πολούμενα ηλεκτρόδια, (δ) διαδικασία μέτρησης με σταθερό ηλεκτρόδιο.

## 2.4.2 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΠΟΛΩΣΗ

Η επαγόμενη πόλωση είναι μια ενεργή ηλεκτρική μέθοδος που βασίζεται στο ότι κάποια υλικά της γης συμπεριφέρονται ως πυκνωτές. Εάν διακόψουμε απότομα την παροχή συνεχούς ρεύματος μέσα στη γη παρατηρούμε σε κάποιες περιπτώσεις ότι το δυναμικό  $V_{MN}$  δε μηδενίζεται αμέσως αλλά μειώνεται εκθετικά και μηδενίζεται μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (Σχ. 2.9β). Αυτό συμβαίνει καθώς το έδαφος συμπεριφέρεται ως πυκνωτής που αποθηκεύει μέρος της ενέργειας την οποία και αποδίδει αποφορτιζόμενος μετά τη διακοπή εφαρμογής του ρεύματος.

Η μετρήσεις της επαγόμενης πόλωσης γίνονται πλέον από τα σύγχρονα όργανα μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης ως συμπληρωματικές των γεωηλεκτρικών μετρήσεων: τα όργανα καταγράφουν το φαινόμενο μετά τη διακοπή εισαγωγής ρεύματος και το πέρας καταγραφής της ηλεκτρικής μέτρησης. Επομένως ο εξοπλισμός και οι διατάξεις μέτρησης είναι πρακτικά ίδιοι με αυτόν της ηλεκτρικής τομογραφίας. Απλά, η λήψη των δεδομένων της επαγόμενης πόλωσης αυξάνει αρκετά τη διάρκεια των μετρήσεων. Το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι να καταγράφεται η ικανότητα των υλικών να "αποθηκεύουν" ρεύμα που ονομάζεται φορτιστικότητα.

Το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης είναι έντονο σε μεταλλικά ορυκτά, σε κάποιους ρυπαντές ενώ συναντάται και στα όρια σχηματισμών πλούσιων σε αργιλικά υλικά.



Σχήμα 2.9 (α) το φαινόμενο επαγόμενης πόλωσης, (β) παράδειγμα εντοπισμού στρώματος αργίλου με ηλεκτρική μέθοδο και μέθοδο της επαγόμενης πόλωσης (από Roy & Elliott, 1980).

Η μέθοδος χρησιμοποιείται στη μεταλλευτική έρευνα, στη μελέτη περιβαλλοντικών προβλημάτων (ανίχνευση ρυπαντών) καθώς και στην ταυτοποίηση

---

της αργιλικής σύστασης κάποιων σχηματισμών (Σχ. 2.9β). Επισημαίνεται ότι βάσει της βιβλιογραφίας το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης είναι έντονο σε χώρους ταφής απορριμμάτων.

## 2.5 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΧΥΤΑ

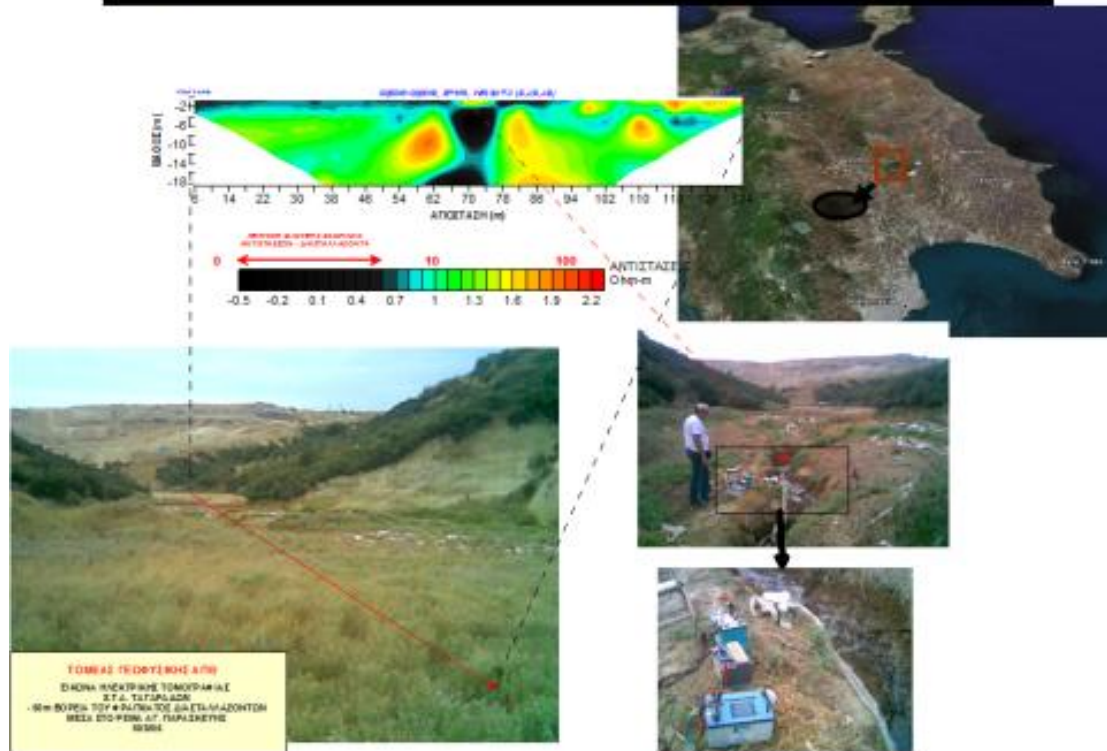
Οι ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι (ηλεκτρική τομογραφία, επαγόμενη πόλωση, φυσικό δυναμικό κ.α.) είναι με διαφορά οι πιο διαδεδομένες σε μελέτες που αφορούν σε χώρους ταφής απορριμμάτων. Αυτό οφείλεται στην έντονη γεωηλεκτρική "υπογραφή" των στραγγισμάτων τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρή ειδική ηλεκτρική αντίσταση (μεγάλη αγωγιμότητα) π.χ.  $<0.5 \text{ Ohm-m}$ .

Υπάρχουν πολλές σχετικές αναφορές στη διεθνή βιβλιογραφία (ανάμεσα σε άλλους Stanton and Schrader 2001; Carpenter et al., 1991; Karlik and Kaya, 2001; Powers et al., 1999; Porsani et al., 2004; Bernstone et al., 2000). Οι περισσότερες έρευνες αφορούν σε μετρήσεις σε υπάρχοντες ανενεργούς χώρους ταφής (χωρίς γεωμεμβράνη) ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο τα διασταλλάζοντα έχουν κατεισχύσει σε βαθύτερους γεωλογικούς ορίζοντες. Επίσης μετρήσεις έχουν γίνει ώστε να διαπιστωθεί η δομή παλαιών η και σύγχρονων χώρων ταφής.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από την Ελλάδα παρουσιάζεται στο Σχ.2.10: εμφανίζεται η γεωηλεκτρική τομή στο ρέμα της Αγίας Παρασκευής στους Ταγαράδες Θεσσαλονίκης μετά από τη μεγάλη διαρροή στραγγισμάτων το 2006 (Βαργεμέζης και Τσούρλος, 2006). Παρατηρείται η διείσδυση των διασταλαζόντων (μαύρο χρώμα που αντιστοιχεί σε πολύ μικρές αντιστάσεις) σε βαθύτερα στρώματα (65-75 μ της τομής).

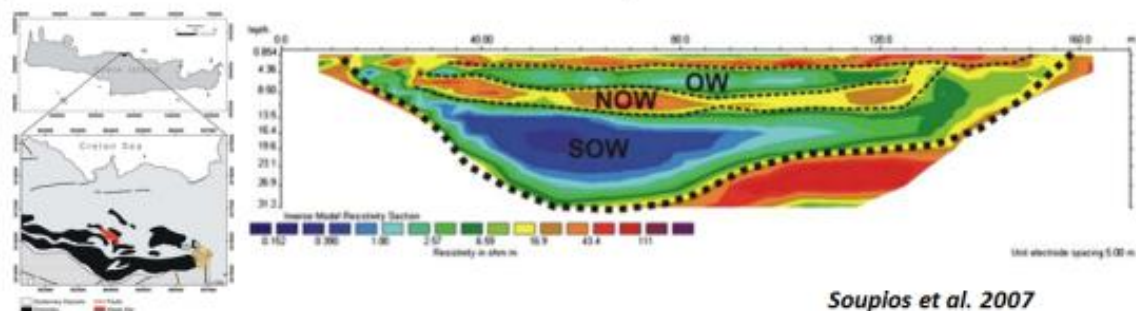
Ένα ακόμα παράδειγμα από εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας σε ΧΥΤΑ στην Ελλάδα παρουσιάζεται στο Σχ.2.11 όπου εμφανίζεται μια χαρακτηριστική γεωηλεκτρική τομή από τον ΧΥΤΑ του Φόδελε Ηρακλείου (Soupios et al., 2007). Στην τομή αποτυπώνονται με διαφορετικά χρώματα περιοχές με οργανικά και ανόργανα απορρίμματα καθώς και μια περιοχή πολύ χαμηλών αντιστάσεων (σκουρό μπλε χρώμα) που αντιστοιχεί σε απορρίμματα κορεσμένα με εκκρίματα. Επίσης διακρίνεται χαρακτηριστικά το κάτω όριο του ΧΥΤΑ στην επαφή του με το αντιστατικό γεωλογικό υπόβαθρο. Στο Σχ.2.11 (κάτω) παρουσιάζεται γεωηλεκτρική τομή

**ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΣΤΟ Χ.Τ.Α. ΤΑΓΑΡΑΔΩΝ (ΘΕΣ/ΝΙΚΗ)**



**Σχήμα 2.10** Γεωηλεκτρική τομή όπου παρατηρείται η διείσδυση των διασταλλαζόντων σε βαθύτερα στρώματα (65-75 μ της τομής).

**ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ ΣΤΑ Χ.Τ.Α. ΦΟΔΕΛΕ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ**



**Σχήμα 2.11** Γεωηλεκτρική τομή από τον ΧΥΤΑ του Φόδελε Ηρακλείου Κρήτης. (Soupios et al. 2007)

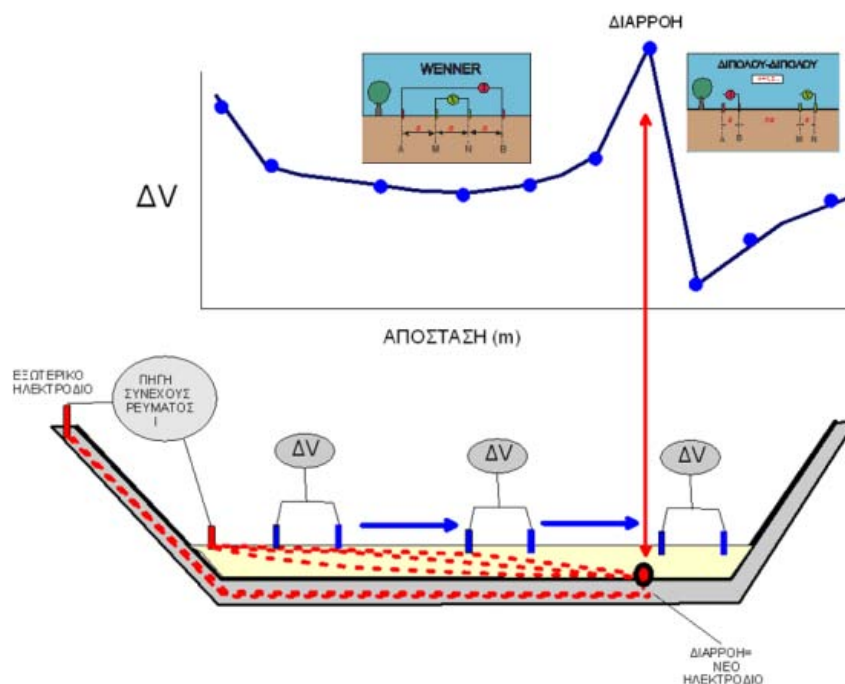
Γενικά η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας εφαρμόζεται σε περιοχές ΧΥΤΑ είτε για τον προσδιορισμό της γενικής δομής τους είτε για τον εντοπισμό πιθανής διάχυσης των εκκρινμάτων στα βαθύτερα γεωλογικά στρώματα και άρα για τον έμμεσο προσδιορισμό πιθανών περιοχών διαρροών (Grellier et al., 2008). Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να γίνουν τόσο σε παλαιού τύπου χώρους ταφής

απορριμμάτων όσο και σε σύγχρονους ΧΥΤΑ που έχουν γεωμεμβράνη. Αυτό συμβαίνει γιατί παρά το γεγονός ότι η γεωμεμβράνη στεγανώνει πρακτικά το χώρο, ηλεκτρικά παρουσιάζει έστω και μια μικρή αγωγιμότητα (Para, 1988) η οποία είναι αρκετή ώστε να χαρτογραφηθεί γεωηλεκτρικά η δομή και κάτω από τη μεμβράνη.

### 2.5.1 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΔΙΑΡΡΟΩΝ ΣΕ ΧΥΤΑ

Οι γεωηλεκτρικές μέθοδοι έχουν καθιερωθεί στον εντοπισμό της θέσης των διαρροών σε γεωμεμβράνες. Βασίζονται στη εισαγωγή ρεύματος σε ένα δίπολο όπου το ένα ηλεκτρόδιο είναι εντός και το άλλο εκτός του χώρου που έχει τοποθετηθεί γεωμεμβράνη και έπειτα με τη συστηματική μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μέσα στη μεμβράνη εντοπίζονται περιοχές που εμφανίζουν μεγάλη διαφορά δυναμικού και αποτελούν περιοχές πιθανής διαρροής.

Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται στην πρωτοποριακή εργασία του Para (1988) και πλέον είναι τυποποιημένες καθώς χρησιμοποιούνται συστηματικά διεθνώς για τη πιστοποίηση της στεγανότητας μιας γεωμεμβράνης πριν από την παράδοση της προς χρήση (π.χ. Para & Owen, 1988; Laine, 1991). Η μεθοδολογία αυτή είναι τυποποιημένη στις ΗΠΑ ως ASTM D 7007 ενώ υπάρχει αντίστοιχη τυποποίηση στη Μ. Βρετανία (Bishop, 2002).



**Σχήμα 2.12** Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας της γεωηλεκτρικής μεθόδου του Para(1998) για τον εντοπισμό διαρροών σε ΧΥΤΑ.

---

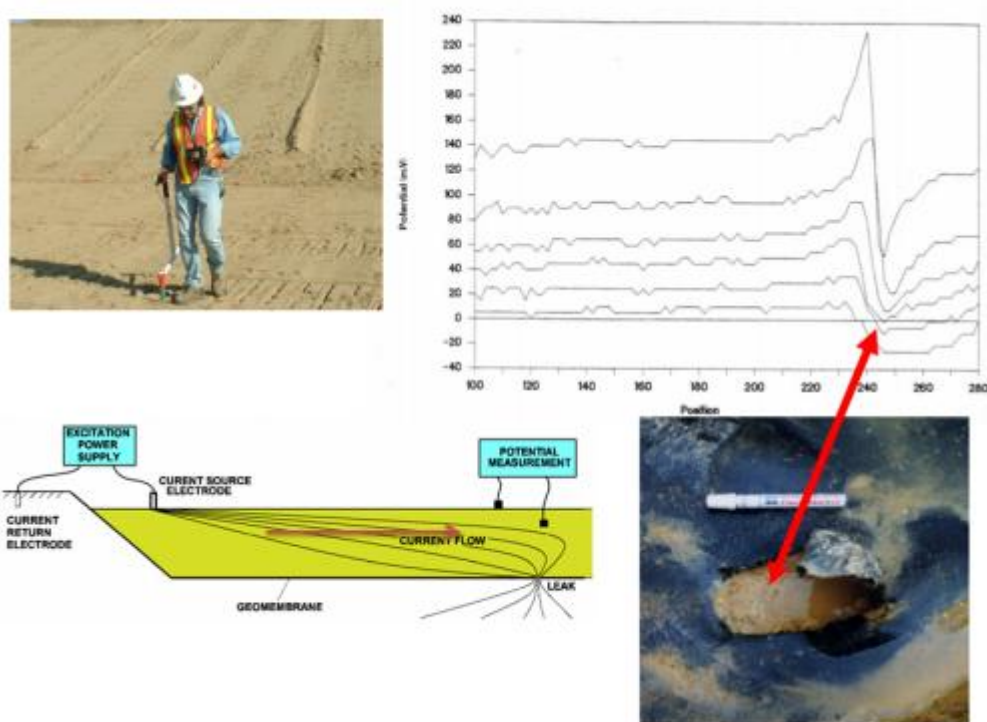
Η τεχνική περιλαμβάνει μετρήσεις με κινούμενο δίπολο δυναμικού ενώ το δίπολο ρεύματος παραμένει σταθερό. Η τεχνική βασίζεται στο ότι τοποθετώντας ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος (π.χ. το θετικό) έξω από τη γεωμεμβράνη στην περίπτωση διαρροής (π.χ. τρύπα στη μεμβράνη) το ηλεκτρικό ρεύμα θα προτιμήσει τον ευκολότερο δρόμο για να κλείσει κύκλωμα με το δεύτερο ηλεκτρόδιο (π.χ. το αρνητικό) που έχει τοποθετηθεί μέσα στη μεμβράνη (Σχ.2.12). Πρακτικά το σημείο διαρροής μετατρέπεται σε ένα δευτερογενές ηλεκτρόδιο ρεύματος οπότε και η ηλεκτρική διάταξη που τελικά υλοποιείται είναι κάθε φορά διαφορετική και εξαρτημένη από τη θέση της ενδεχόμενης διαρροής.

Η σχετική θέση της διαρροής ως προς τη διάταξη μέτρησης επηρεάζει τις μετρούμενες διαφορές δυναμικού οπότε η μελέτη των μετρήσεων μπορεί να αποκαλύψει την άγνωστη θέση του «νέου» ηλεκτροδίου ρεύματος. Ειδικότερα, όταν το δίπολο δυναμικού πλησιάζει τη διαρροή (η διαρροή βρίσκεται δεξιά του δίπολου δυναμικού) λόγω της λειτουργίας της διαρροής ως ηλεκτρόδιο ρεύματος το σήμα της μέτρησης αυξάνεται αντί να μειώνεται λόγω της απομάκρυνσης από την πηγή (Σχ.2.12). Ουσιαστικά η διάταξη των ηλεκτροδίων μετατρέπει τη μέτρηση σε μια τύπου Wenner η οποία και ως γνωστόν έχει ιδιαίτερα υψηλό σήμα (βλ. Κεφάλαιο 2.2.1). Όταν πλέον μετακινούμενο το δίπολο δυναμικού ξεπεράσει το "εικονικό" ηλεκτρόδιο (η διαρροή βρίσκεται αριστερά του δίπολου δυναμικού) τότε το σήμα της μέτρησης μειώνεται απότομα καθώς η διάταξη των ηλεκτροδίων μετατρέπεται σε τύπου διπόλου-διπόλου η οποία και έχει πολύ χαμηλότερο σήμα (βλ. Κεφάλαιο 2.2.1). Η συστηματική χαρτογράφηση των απότομων αυτών αλλαγών δυναμικού μπορεί να προσδιορίσει με ακρίβεια τη θέση της διαρροής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πετυχημένης εφαρμογής της μεθόδου εμφανίζεται στο Σχ. 2.13, όπου με βάση τις μετρήσεις δυναμικού εντοπίζεται η διαρροή σε ΧΥΤΑ στις ΗΠΑ (Darilek, 2007).

Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί συστηματικές μετρήσεις διαφοράς δυναμικού σε δίκτυο και συγκεκριμένα με υλοποίηση κάρναβου 1-4 μέτρων. Για τις μετρήσεις απαιτείται απόλυτη απομόνωση του κυττάρου από το περιβάλλον με ταυτόχρονη περιφερειακή έκθεση της μεμβράνης. Αποτελεί τη μόνη τυποποιημένη μέθοδο για τον έλεγχο της γεωμεμβράνης μετά την τελική φάση κατασκευής και με την παρουσία υλικού κάλυψης και είναι υποχρεωτική σε πολλές χώρες πριν την τελική παραλαβή του ΧΥΤΑ.

Πρέπει να τονιστεί ότι η μέθοδος έχει μειωμένη αποτελεσματικότητα με το πάχος και την ομοιογένεια του υλικού κάλυψης (ιδανικά πρέπει να είναι λίγα εκατοστά έως 1-2 μέτρα). Ειδικότερα ο Para (1988) υπολόγισε ότι η μεταβολή του δυναμικού μπορεί να είναι πολύ μικρή σε περίπτωση που το πάχος του υλικού απόθεσης (π.χ. απορρίμματα) είναι αυξημένο. Επίσης σε αυτή την περίπτωση η αυξομείωση των μετρήσεων του δυναμικού μπορεί να οφείλεται στην ανομοιογένεια των υλικών απόθεση. Για αυτό το λόγο η μέθοδος δεν ενδείκνυται προς χρήση για τον εντοπισμό διαρροών σε λειτουργούντες ΧΥΤΑ.

Σχετικά πρόσφατα υπάρχουν ερευνητικές προσπάθειες στο να προταθούν μέθοδοι οι οποίες να εντοπίζουν διαρροές στην περίπτωση ΧΥΤΑ που είδη λειτουργούν (Binley at al., 1998; Binley & Daily 2003). Αυτές οι μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί με σχετική επιτυχία (π.χ. Laine et al., 1997; Colucci et al., 1999) και βασίζονται σε αυτόματο εντοπισμό της πηγής διαρροής σε τρισδιάστατο χώρο με βάση αλγορίθμους βελτιστοποίησης. Οι τεχνικές αυτές υποφέρουν όμως από το γεγονός ότι πάσχουν από μη μοναδικότητα της λύσης (Binley & Daily, 2003) με αποτέλεσμα να μην είναι πάντα αξιόπιστες ως προς τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης της διαρροής σε ΧΥΤΑ που λειτουργούν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι τυποποιημένες και να αποτελούν ένα ενεργό πεδίο έρευνας.



Σχήμα 2.13 Εντοπισμός διαρροής σε γεωμεμβράνη (από Darilek, 2007).



Εναλλακτικά, αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τον εντοπισμό διαρροής σε λειτουργούντες ΧΥΤΑ μπορούν να ληφθούν με την εγκατάσταση μόνιμων δικτύων γεωηλεκτρικής παρακολούθησης στα πρότυπα του Frangos (1992, 1997). Σε αυτή την περίπτωση οι αισθητήρες (ηλεκτρόδια) τοποθετούνται πάνω στο γεώφρασμα (Σχ. 2.14) και οι συστηματικές μετρήσεις επιτρέπουν τον άμεσο εντοπισμό της διαρροής ανεξάρτητα από το πάχος των υπερκειμένων απορριμμάτων.



**Σχήμα 2.14** Μόνιμα δίκτυα γεωηλεκτρικής παρακολούθησης σε ΧΥΤΑ. (από Darilek, 2007).

Εκτός από τις γεωηλεκτρικές μετρήσεις ως πιθανή μέθοδος για τον εντοπισμό διαρροών σε ενεργούς ΧΥΤΑ έχει προταθεί και η μέθοδος του φυσικού δυναμικού καθώς μπορεί να προσδιορίσει μέσω αρνητικών ανωμαλιών φυσικού δυναμικού τη μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων που συνδέονται με τη ροή των ρυπαντών σε βαθύτερα στρώματα (Nyquist and Corry 2002; Nimmer and Osiensky, 2002). Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής παρουσιάζεται στο Σχ. 2.15.

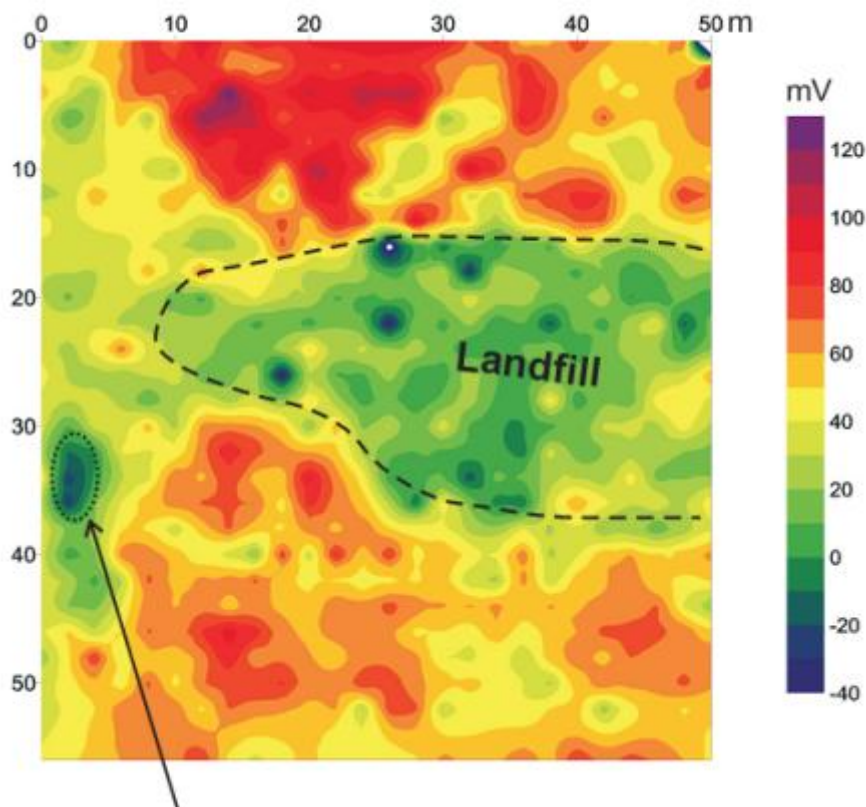
Τέλος το φαινόμενο της επαγόμενης πόλωσης αν και είναι έντονο σε χώρους ταφής απορριμμάτων (Aristodemou and Thomas-Betts, 2000) δεν αναφέρεται να χρησιμοποιείται στον εντοπισμό διαρροών.

## 2.6 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες αποφασίστηκε να διενεργηθούν οι εξής μετρήσεις:

- Πυκνές μετρήσεις μέσα στο κύτταρο του ΧΥΤΑ με τη γεωφυσική μέθοδο της Ηλεκτρικής Τομογραφίας και τη χρήση της διάταξης διπόλου-διπόλου (όλα τα ηλεκτρόδια μέσα στο χώρο του κυττάρου) ώστε να διερευνηθεί τόσο η γεωλογική/υδρογεωλογική δομή του υπεδάφους αλλά κυρίως για να εντοπιστούν περιοχές ύποπτες για τυχόν διαρροή στραγγισμάτων.

- Επανάληψη των μετρήσεων της Ηλεκτρικής Τομογραφίας με τη διάταξη πόλου-διπόλου στην οποία το απομακρυσμένο σταθερό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε εκτός του κυττάρου (περίπου 250 Δ-ΝΔ του κυττάρου). Με αυτόν τον τρόπο έγινε προσπάθεια να εντοπιστούν τυχόν ανωμαλίες και να συνδεθούν με περιοχές ύποπτες για τυχόν διαρροή στραγγισμάτων.
- Μετρήσεις στο κύτταρο του ΧΥΤΑ με τη μέθοδο του Φυσικού Δυναμικού σε δίκτυο ανά 5-7 μέτρα.
- Δοκιμαστική μικρής κλίμακας εφαρμογή της μεθόδου ASTM D 7007 για να επιβεβαιωθεί η αρχική υπόθεση ότι λόγω του μεγάλου πάχους των απορριμμάτων δεν αναμένεται να δώσει διακριτό σήμα.
- Συμπληρωματική τομή ηλεκτρικής τομογραφίας έξω από τον χώρο του ΧΥΤΑ σε συνδυασμό με τη μέθοδο της Επαγόμενης Πόλωσης.



**Σχήμα 2.14** Παράδειγμα εντοπισμού διαρροής σε ΧΥΤΑ (βλ. βέλος) με τη χρήση μετρήσεων φυσικού δυναμικού (από RSK Geophysics, UK.).

---

## **3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ**

### **3.1 ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ -ΛΗΨΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

Οι τομές ηλεκτρικής τομογραφίας που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Οι μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας μέσα στο κύτταρο έλαβαν χώρα στις 9-11 Ιουλίου 2012 ενώ η τομή εξωτερικά του ΧΥΤΑ μετρήθηκε την 1η Αυγούστου.

Οι τομές μέσα στο κύτταρο χωρίζονται σε τρεις ομάδες (ομάδες Α, Β, V του Σχ.3.1) βάσει των κοινών παραμέτρων μέτρησης καθώς και της χωρικής τους εγγύτητας: κάθε ομάδα αποτελείται από παράλληλες και ισαπέχουσες γραμμές μέτρησης.

Οι χωροθέτηση και ομαδοποίηση των τομών αντικατοπτρίζουν σε μεγάλο βαθμό τη σχετική δυσκολία διεξαγωγής των μετρήσεων σε ένα ΧΥΤΑ που λειτουργεί κανονικά. Οι μετρήσεις έγιναν τμηματικά σε συνεννόηση με το διαχειριστή του ΧΥΤΑ ώστε να παραμένουν συνεχώς ελεύθεροι χώροι για τα απορριμματοφόρα και την απόθεση των απορριμμάτων. Επίσης λόγω της ζέστης έπρεπε να γίνεται κάλυψη των απορριμμάτων με αδρανή υλικά.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.1 ο χώρος του κυττάρου καλύφθηκε με σχετικά μεγάλη πυκνότητα μετρήσεων (κατά πολύ μεγαλύτερη από τις αρχικές συμβατικές υποχρεώσεις) στην προσπάθεια να μεγιστοποιηθεί η αξιοπιστία της διαδικασίας μέτρησης. Η αραιότερη κάλυψη που παρουσιάζεται σε ένα μικρό τριγωνικό τμήμα στο κέντρο του ΧΥΤΑ οφείλεται στην αδυναμία διεξαγωγής μετρήσεων λόγω υπερυψωμένης χωμάτινης ράμπας διέλευσης των οχημάτων στην περιοχή αυτή.

Οι χωροθέτηση των τομών έγινε με εξάρτηση της αρχής και του τέλους τους από σταθερά σημεία (π.χ. φρεάτια εξαερισμού) με γνώστες συνταγμένες με βάση τα τοπογραφικά στοιχεία που δόθηκαν από την Μεσόγειο Α.Ε. Συμπληρωματικές μετρήσεις έγιναν με GPS χειρός.

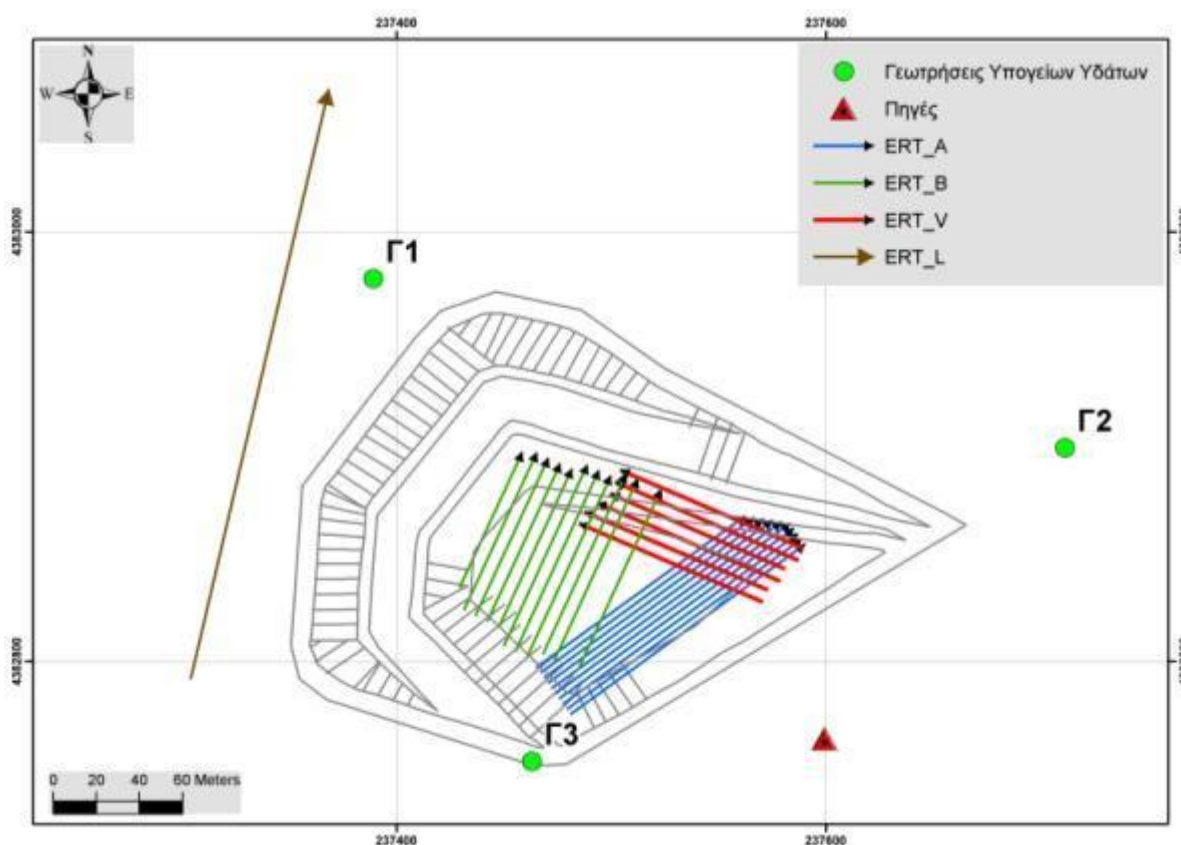
Στο Σχ.3.2 παρουσιάζονται φωτογραφίες από τη συλλογή των δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας στο χώρο του ΧΥΤΑ.

### 3.1.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

Συνολικά υλοποιήθηκαν και μετρήθηκαν είκοσι επτά (27) ηλεκτρικές τομογραφίες μέσα στο χώρο του κυττάρου του ΧΥΤΑ (μήκος περίπου 2600m) και μια (1) εκτός (έχει μήκος 290m). Συνολικά ελήφθησαν παραπάνω από 60000 μετρήσεις φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Λόγω της αναμενόμενης ύπαρξης έντονων ηλεκτρικών ανομοιογενειών επιλέχτηκε η διάταξη μέτρησης διπόλου-διπόλου (Σχήμα 2.2), η οποία χαρακτηρίζεται από άριστη διακριτική ικανότητα τόσο στις πλευρικές όσο και στις κατακόρυφες μεταβολές της υπεδάφειας αντίστασης αλλά έχει σχετικά μικρό σήμα.

Επίσης οι τομές μετρήθηκαν και με διάταξη πόλου-διπόλου (Σχ.2.3) στην οποία το απομακρυσμένο σταθερό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε εκτός του κυττάρου ώστε, ει δυνατόν, να εντοπιστούν περιοχές ύποπτες για τυχόν διαρροή.



Σχήμα 3.1.. Θέση των τομών ηλεκτρικής τομογραφίας στο χώρο του ΧΥΤΑ.



Σχήμα 3.2.. Φωτογραφίες από τη συλλογή μετρήσεων στο χώρο του ΧΥΤΑ.

---

Οι παράμετροι σχεδιασμού της γεωηλεκτρικής τομογραφίας μέσα στο ΧΥΤΑ καθορίστηκαν με βάση τον υπάρχοντα χώρο για την ανάπτυξη της γραμμής μέτρησης: Τα ηλεκτρόδια πρέπει να καρφώνονται στο έδαφος οπότε δεν ήταν δυνατό οι γραμμές να υπερβούν τα όρια των αποθέσεων του κυττάρου καθώς έτσι θα συναντούσαν το γεώφασμα. Μια άλλη παράμετρος σχετίζεται με το βάθος διασκόπησης που στην περίπτωση των μετρήσεων μέσα στο ΧΥΤΑ έπρεπε να ξεπερνά τα 8-10 μέτρα που είναι και το μέσο πάχος των απορριμμάτων κατά την περίοδο των μετρήσεων. Βάσει του αρχικού σχεδιασμού (επιθυμητό βάθος έρευνας, διακριτική ικανότητα, κλπ.) οι παράμετροι μέτρησης που επιλέχθηκαν για τις τομογραφίες στο χώρο του κυττάρου (Σχ2.3) είναι :

1. Απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (a) 3-4 μέτρα.
2. Απόσταση ηλεκτροδίων ρεύματος – δίπολου μέτρησης δυναμικού ( $n \cdot a$ ) με μέγιστο n ίσο με 7.
3. Χρήση αποστάσεων  $2 \cdot a$  και  $3 \cdot a$  με ίδιο n (=7)

#### ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Γενικά η ποιότητα των μετρήσεων κρίνεται ιδιαίτερα καλή καθώς σε πολύ μικρό ποσοστό (<3%) το σφάλμα επανάληψης ήταν >1%. Ακόμα και στις μετρήσεις με τη διάταξη διπόλου-διπόλου, όπου λόγω του χαμηλού της σήματος αναμενόταν προβλήματα, οι μετρήσεις αποδείχθηκαν πολύ καλές καθώς οι ικανοποιητικές αντιστάσεις επαφής στην περιοχή (τυπικά <0.5 KΩ ) επέτρεψαν την εισαγωγή ρεύματος επαρκούς έντασης (>500 mA).

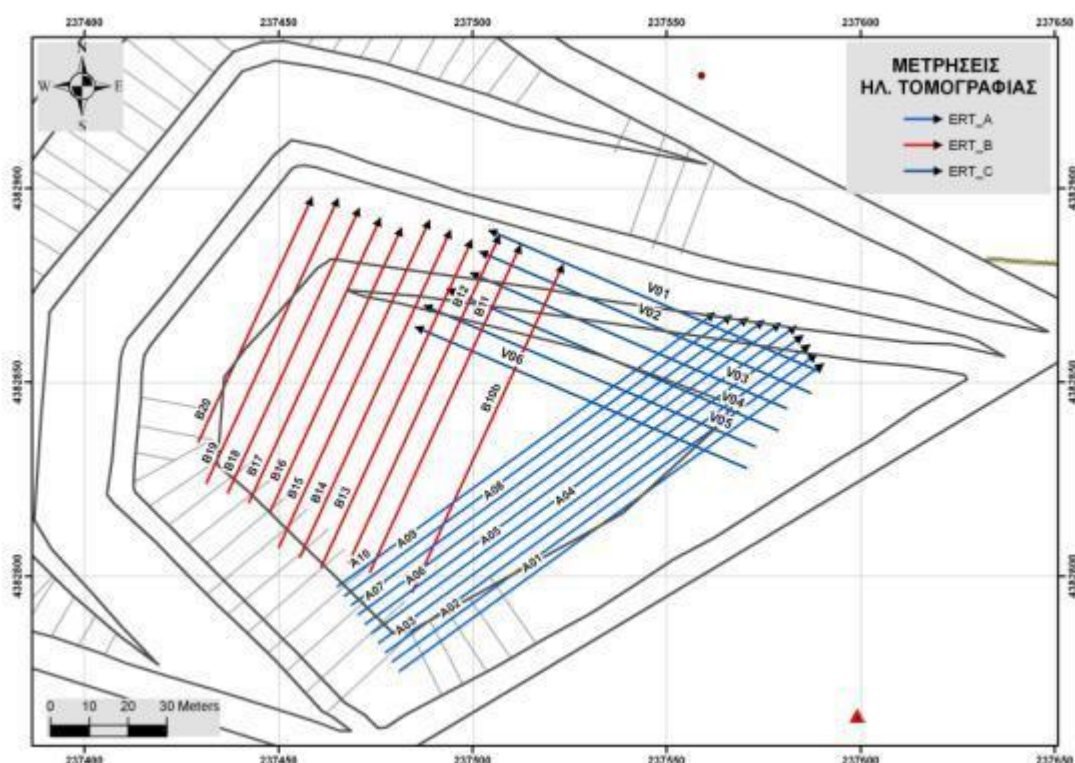
#### **3.1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Για την επεξεργασία των δεδομένων της ηλεκτρικής τομογραφίας ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

Αρχικά ελέγχθηκε η ποιότητα των μετρήσεων και απορρίφθηκαν μετρήσεις με μεγάλα σφάλματα. Γενικά η ποιότητα των μετρήσεων κρίνεται ικανοποιητική καθώς μόλις 3-5% των μετρήσεων τελικά απορρίφθηκαν.

Δεδομένου ότι ήταν επιβεβλημένη η αναφορά των αποτελεσμάτων σε απόλυτα υψόμετρα έγινε αναγωγή όλων των μετρήσεων στο πραγματικό ανάγλυφο με ειδικό αλγόριθμο επεξεργασίας πεπερασμένων στοιχείων (Tsourlos et al, 1998). Οι σχετικές μεταβολές του ανάγλυφου που χρειάζονται για μια τέτοια διαδικασία

ελήφθησαν από την πρόσφατη τοπογραφική αποτύπωση του χώρου που έγινε από τη Μεσόγειος Α.Ε. αμέσως μετά τη λήξη των μετρήσεων υπαίθρου.



**Σχήμα 3.3.** Χάρτης των ηλεκτρικών τομών (με τα ονόματά τους) που υλοποιήθηκαν μέσα στο κώτταρο του ΧΥΤΑ

Τα δεδομένα, στη συνέχεια, υποβλήθηκαν σε δισδιάστατη αντιστροφή. (Tsourlos et al., 1998; Tsourlos and Ogilvy, 1999) με το λογισμικό DC-2DPro (Kim, 2010). Πρόκειται για αλγόριθμο που εκτελεί μη γραμμική δισδιάστατη αντιστροφή γεωηλεκτρικών δεδομένων με την μέθοδο αντιστροφής του Occam (Constable, 1987). Ο αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για να επιλύσει το ευθύ πρόβλημα. Η ερμηνεία των δεδομένων της επαγόμενης πόλωσης έγινε με το λογισμικό Res2Dinv (Loke, 2004).

Η τρισδιάστατη επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με το λογισμικό DC-3DPro (Yi and Kim, 2010) και επιτρέπει την πλήρως τρισδιάστατη μοντελοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο βαθμό ρεαλιστικότητας στα παραγόμενα μοντέλα.

---

Τα αποτελέσματα της αντιστροφής χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα αξιόπιστα καθώς το % λάθος (RMS) για κάθε αντιστροφή κυμάνθηκε μεταξύ 2-6%, ενδεικτικό επίσης και της καλής ποιότητας των πρωτογενών δεδομένων.

Σε κάποιες περιπτώσεις διατάξεων μέτρησης το σφάλμα ήταν συστηματικά μεγαλύτερο κάτι το οποίο όμως όπως θα δείξουμε οφείλεται σε άλλα αίτια και όχι στην ποιότητα των δεδομένων ή του αλγορίθμου αντιστροφής.

Η αντιστροφή για τις τομές επαναλήφθηκε αρκετές φορές με διαφορετικές παραμέτρους βάθους ώστε να επιτευχθεί μια σχετική ομοιομορφία στις μέγιστες τιμές και να διευκολυνθούν έτσι οι συγκρίσεις μεταξύ τομών. Τα τελικά αποτελέσματα και η ερμηνεία τους παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα με την μορφή τομών δυο και τριών διαστάσεων.

Στις τομές που παρουσιάζονται αποτυπώνονται τα πραγματικά βάθη και οι πραγματικές υπεδάφειες αντιστάσεις οι οποίες και παρουσιάζονται με χρωματική κλίμακα «ουρανίου τόξου» με τα ψυχρά χρώματα (μπλε) να αντιστοιχούν σε χαμηλές αντιστάσεις (π.χ. άργιλοι, έκκριμα) και θερμά χρώματα (κόκκινα) να αντιστοιχούν σε σχετικά υψηλές αντιστάσεις (π.χ. ψαμμίτες). Ακολουθεί η παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων για κάθε τύπο μετρήσεων ξεχωριστά.

## 3.2 ΤΟΜΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΤΟΥ ΧΥΤΑ

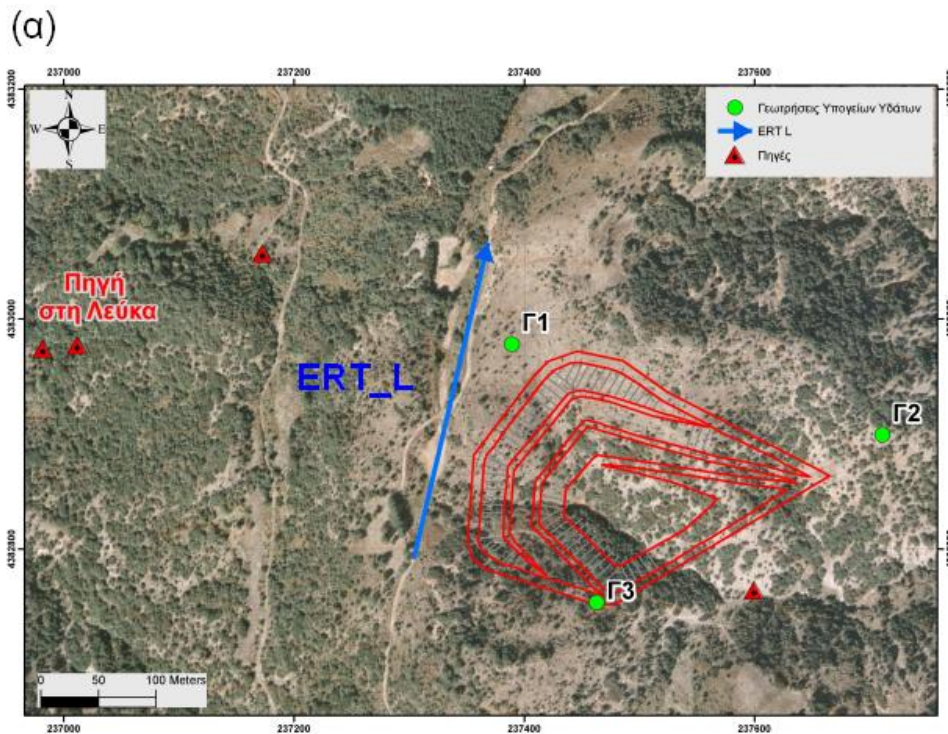
Όπως έχει αναφερθεί εκτός από τις μετρήσεις στο κύτταρο του ΧΥΤΑ υλοποιήθηκε και μέτρηση εκτός του χώρου του ΧΥΤΑ ώστε να αποτυπωθεί η σχετικά αδιατάρακτη κατάσταση των γεωλογικών σχηματισμών του υπεδάφους στο οποίο κατασκευάστηκε ο ΧΥΤΑ. Αν και η συγκεκριμένη τομή μετρήθηκε σε δεύτερη φάση, η παρουσίασή της προτάσσεται καθώς εξυπηρετεί την καλύτερη ερμηνεία των υπόλοιπων μετρήσεων.

Το άμεσο όφελος μιας τέτοιας μέτρησης είναι ότι γίνονται γνωστές οι in-situ τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης των αδιατάρακτων γεωλογικών σχηματισμών και άρα μπορούμε να ερμηνεύσουμε τις αντιστάσεις μέσα στο χώρο του κύτταρου με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Η τομή ERT\_L φαίνεται στο Σχ.3.4α και είναι τοποθετημένη κατά μήκος του δρόμου που διέρχεται από την είσοδο του ΧΥΤΑ με κέντρο περίπου την είσοδο του



ΧΥΤΑ. Πρακτικά η τομή βρίσκεται στον υδροκρίτη της λεκάνης του Αράχθου με τη λεκάνη Ιωαννίνων. Η τομή έχει μήκος 290 μέτρα (30 ηλεκτρόδια τοποθετημένα ανά 10m) επιτυγχάνοντας ένα μέγιστο βάθος διασκόπησης 70 μέτρων.



(β)

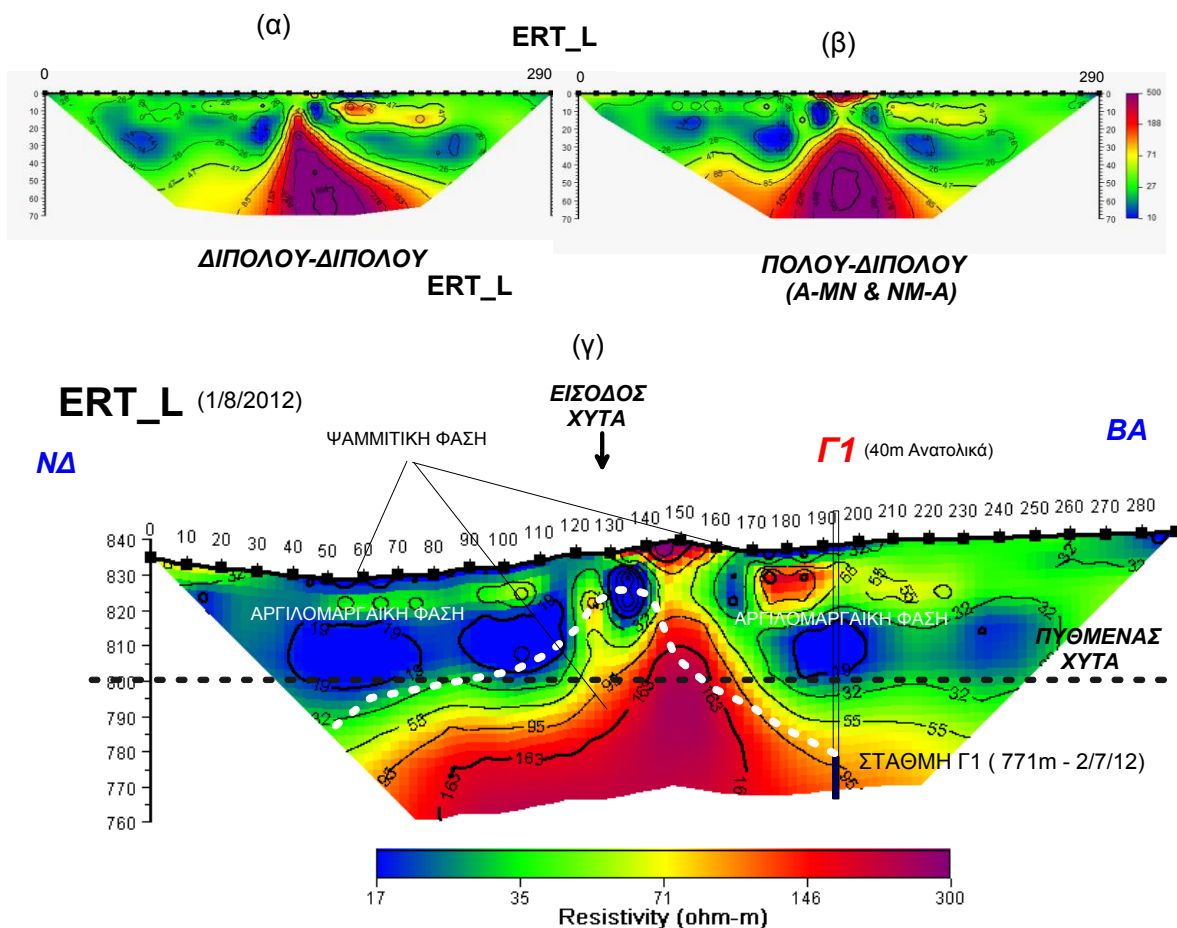


Σχήμα 3.4. (α) Η θέση της ηλεκτρικής τομής ERT\_L με υπόβαθρο τη δορυφορική φωτογραφία. (β) φωτογραφία όπου φαίνεται η θέση της τομής ERT\_L

Οι μετρήσεις έγιναν τόσο με διάταξη διπόλου-διπόλου όσο και με τη διάταξη πόλου-διπόλου (Σχ. 2.2, 2.3) ενώ ελήφθησαν και μετρήσεις επαγόμενης πόλωσης.

Στο Σχ. 3.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής των γεωηλεκτρικών δεδομένων της τομής ERT\_L για τις διατάξεις διπόλου-διπόλου (Σχ. 3.5α) και πόλου-διπόλου (Σχ. 3.5β). Οι τομές αυτές εμφανίζονται σε μεγάλο βαθμό παρόμοιες: εμφανίζουν διαστρωμάτωση υλικών χαμηλών αντιστάσεων μέχρι το βάθος των 30-40 μέτρων ενώ είναι χαρακτηριστική η εμφάνιση αντικλινικής δομής μεγάλων αντιστάσεων στο κέντρο της τομής.

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι οι εικόνες που λαμβάνονται από διαφορετικές γεωηλεκτρικές διατάξεις αναμένεται να είναι παρόμοιες αλλά όχι ακριβώς ίδιες καθώς κάθε διάταξη έχει διαφορετική ευαισθησία στις αλλαγές της αντίστασης. Βέλτιστο αποτέλεσμα λαμβάνεται με τη συνδυασμένη αντιστροφή δεδομένων που προέρχονται από περισσότερες της μιας διατάξεων (Athanasίου et al., 2006).

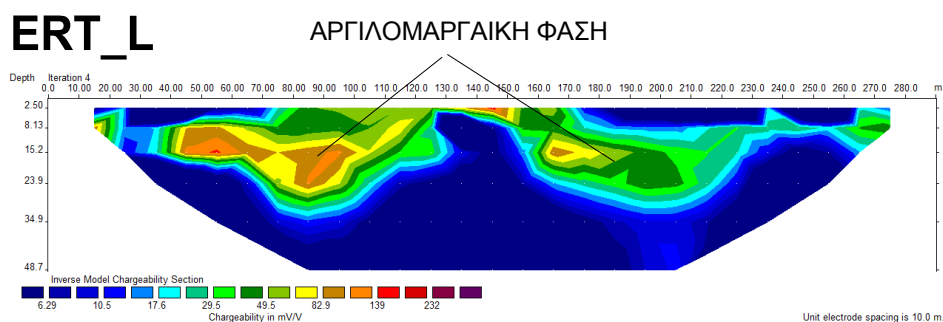


**Σχήμα 3.5.** Αποτέλεσμα της αντιστροφής της τομής ERT\_L για τις διατάξεις (α) διπόλου-διπόλου, (β) πόλου-διπόλου, (γ) συνδυασμό και των δυο διατάξεων με ερμηνεία των ευρημάτων.

Ακολουθώντας την παραπάνω πρακτική στο Σχ.3.5γ παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της συνδυασμένης αντιστροφής των δεδομένων και των δυο διατάξεων. Η τομή του Σχ. 3.5γ έχει αναχθεί σε πραγματικό υψόμετρο και έχει σημειωθεί η θέση της κοντινής γεώτρησης Γ1 (βρίσκεται περίπου 40μ ανατολικά) καθώς και το κατώτερο υψόμετρο του πυθμένα του ΧΥΤΑ που είναι αρκετά χαμηλά και συνεπάγεται ότι η εικόνα που βλέπουμε αποτυπώνει σε μεγάλο βαθμό τις αντιστάσεις των αδιατάρακτων σχηματισμών ανεπηρέαστων από τυχόν επηρεασμούς λόγω των δραστηριοτήτων στο ΧΥΤΑ.

Η τομή εμφανίζει χαρακτηριστική διαστρωμάτωση υλικών χαμηλών αντιστάσεων (μπλε χρώματα) πάχους 30-40 μέτρων που αντιστοιχούν στην αργιλομαργαϊκή φάση του φλύσχη η οποία και είναι πιθανά αποσαθρωμένη (ηλεκτρικές αντιστάσεις 5-15 Ωμ). Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται πλήρως και από την εικόνα της αντιστροφής των αντίστοιχων δεδομένων επαγόμενης πόλωσης της τομής (βλ. Σχ. 3.6): οι περιοχές χαμηλής αντίστασης εμφανίζονται να έχουν υψηλή φορτιστικότητα που συμβαδίζει με την έντονα αργιλική σύσταση που τους αποδίδεται.

Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η εμφάνιση αντικλινικής δομής μεγάλων αντιστάσεων (>100 έως 700 Ωμ) στο κέντρο της τομής οι οποία και πιθανότατα αντιστοιχεί στο σχηματισμό των συνεκτικών ψαμμιτών (οριοθετείται με τη στικτή άσπρη γραμμή στο Σχ. 3.5). Η μορφή της δομής με τη σχετικά απότομη αλλαγή κλίσης και το έξαρμα μεταξύ των 130-160 μέτρων της τομής δεν αποκλείει τη σύνδεσή της με τεκτονικά στοιχεία (π.χ. πτυχή, ρήγματα). από τη άλλη όμως οι επαφές των υλικών στο υπόλοιπο τμήμα της τομής εμφανίζονται να είναι αρκετά οριζόντιες και δεν δείχνουν έντονους τεκτονικούς επηρεασμούς. Σε κάθε περίπτωση η ευρύτατη παρουσία αργιλικού υλικού και οι αντιστάσεις που μετρήθηκαν καθιστά τη δομή από υδρογεωλογική άποψη μικρής διαπερατότητας συμφωνώντας με το υδρογεωλογικό μοντέλο για μικρή ροή νερού στα όρια του αποσαθρωμένου αργιλικού μανδύα με τις ψαμμιτικές τράπεζες του φλύσχη.



Σχήμα 3.6. Εικόνα αντιστροφής δεδομένων επαγόμενης πόλωσης της τομής ERT\_L

---

### 3.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μετρήσεις μέσα στο κύτταρο του ΧΥΤΑ. Οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν με τη μέθοδο του διπόλου-διπόλου όσο και με τη μέθοδο του πόλου-διπόλου. Τα αποτελέσματα με τις διατάξεις πόλου διπόλου αποδείχτηκαν μερικώς ασύμβατα με αυτά της διπόλου-διπόλου και διαφορετικά μεταξύ τους (διάταξη A-MN, NM-A). Το γεγονός αυτό μελετήθηκε ιδιαίτερα και για αυτό αποτελεί αντικείμενο ξεχωριστής ενότητας.

Όπως έχει είδη αναφερθεί οι τομές μέσα στο κύτταρο χωρίζονται σε τρεις ομάδες (ομάδες A, B, V του Σχ.3.1) βάσει των κοινών παραμέτρων μέτρησης καθώς και της χωρικής τους εγγύτητας και με βάση αυτό το διαχωρισμό αρχικά θα παρουσιαστούν ξεχωριστά.

#### ΟΜΑΔΑ Α

Οι 10 τομές της ομάδας A έχουν διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και μετρήθηκαν με απόσταση ηλεκτροδίων 3m ενώ ισαπέχουν μεταξύ τους κατά 3m. Οι τομές περιλαμβάνουν διαφορετικό αριθμό ηλεκτροδίων που κυμαίνεται από 46 (τομή Α01) έως 42( τομή Α10) ηλεκτρόδια.

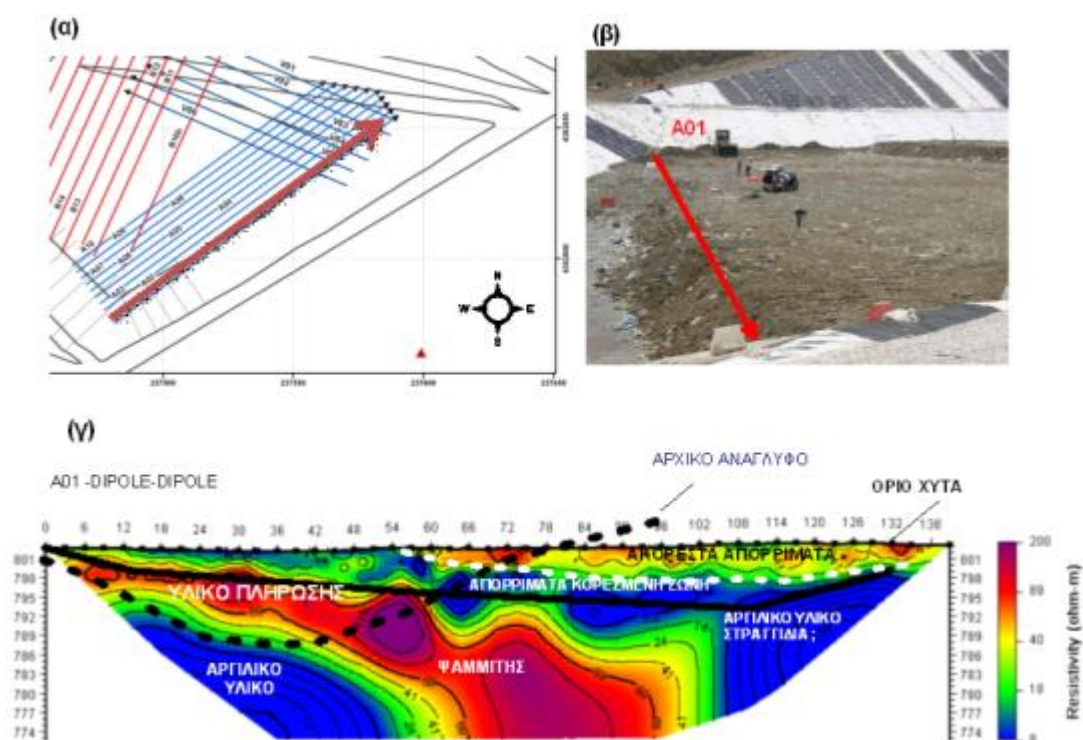
Χαρακτηριστική τομή της ομάδας αυτής είναι η Α01 (βλ. Σχ3.7α,β). Τα ερμηνευμένα αποτελέσματα της αντιστροφής των μετρήσεων της διάταξης διπόλου-διπόλου για την τομή Α01 παρουσιάζονται στο Σχ. 3.7γ. Επίσης στην τομή, η οποία έχει αναχθεί σε απόλυτα υψόμετρα, εμφανίζονται τόσο η γραμμή που αντιστοιχεί στο παλαιό ανάγλυφο όσο και η γραμμή που ορίζει το όριο του ΧΥΤΑ.

Με βάση τα παραπάνω η ζώνη απόθεσης των απορριμμάτων εμφανίζεται με μέσες (20-40Ωm - επιφανειακό τμήμα των αποθέσεων) έως χαμηλές αντιστάσεις (5-15Ωm - βαθύτερο τμήμα). Οι σχετικά υψηλές αντιστάσεις αντιστοιχούν στην ακόρεστη ζώνη των απορριμμάτων ενώ τα βαθύτερα αγωγήμα τμήματα σχετίζονται είτε με απορρίμματα κορεσμένα με έκκριμα (βλ. Σχ.2.11 από Soupios et al., 2007) είτε/(και) με τον αργιλικό γεωφραγμό που βρίσκεται στον πυθμένα του ΧΥΤΑ.

Στο ΝΔ άκρο αλλά και κεντρικό τμήμα της τομής, αμέσως κάτω από τα όρια του ΧΥΤΑ, εμφανίζεται μια περιοχή μεγάλων αντιστάσεων (<80Ωm) που ερμηνεύεται ως συμπαγές ψαμμιτικό υλικό σύμφωνα και με τις παρατηρήσεις στην

τομή ERT\_L. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι στο ΝΔ άκρο της τομής το υλικό αυτό είναι φερτό καθώς φαίνεται να έχει χρησιμοποιηθεί για να πληρώσει ταπεινώσεις του ανάγλυφου ώστε και ισοπεδωθεί ο χώρος του ΧΥΤΑ.

Στο ΝΔ άκρο της τομής και κάτω από την περιοχή του υλικού πλήρωσης εμφανίζεται μια περιοχή χαμηλών αντιστάσεων. Εκτιμάται ότι σχετίζεται με λεπτόκοκκο υλικό απόθεσης και όχι με το έκκριμα καθώς δε φαίνεται να επικοινωνεί με το χώρο του ΧΥΤΑ λόγω της παρεμβολής του υψηλά αντιστατικού υλικού.



**Σχήμα 3.7.** (α) Η θέση της ηλεκτρικής τομής A01 (β) φωτογραφία όπου φαίνεται η θέση της τομής A01. (γ) ερμηνευμένη εικόνα αντιστροφής της τομής A01 για τη διάταξη διπόλου-διπόλου.

Τέλος στο ΒΑ τμήμα της τομής και στην περιοχή όπου το ΧΥΤΑ έχει το μέγιστο βάθος εμφανίζεται μια περιοχή με πολύ χαμηλές αντιστάσεις (108-138μ της τομής). Βάσει της κατασκευής του ΧΥΤΑ αναμένεται στην περιοχή αυτή να συγκεντρώνεται το έκκριμα άρα οι πολύ χαμηλές αντιστάσεις είναι αναμενόμενες. Από την άλλη η περιοχή αυτή των χαμηλών αντιστάσεων φαίνεται να εκτείνεται σε αρκετά μεγάλο βάθος και επομένως μπορεί να σχετίζεται με τα αργιλικά υλικά του φλύσχη. Τέλος, και καθώς είμαστε στην άκρη της τομής ενδέχεται η συγκέντρωση των χαμηλών αυτών αντιστάσεων να αντικατοπτρίζει την αδυναμία του αλγόριθμου να βρει βέλτιστη λύση που να περιγράφει τη μεγάλη αντίθεση των αντιστάσεων και

---

επομένως να έχουμε να κάνουμε με μια μη ρεαλιστική αποτύπωση των αντιστάσεων στα μεγάλα βάθη.

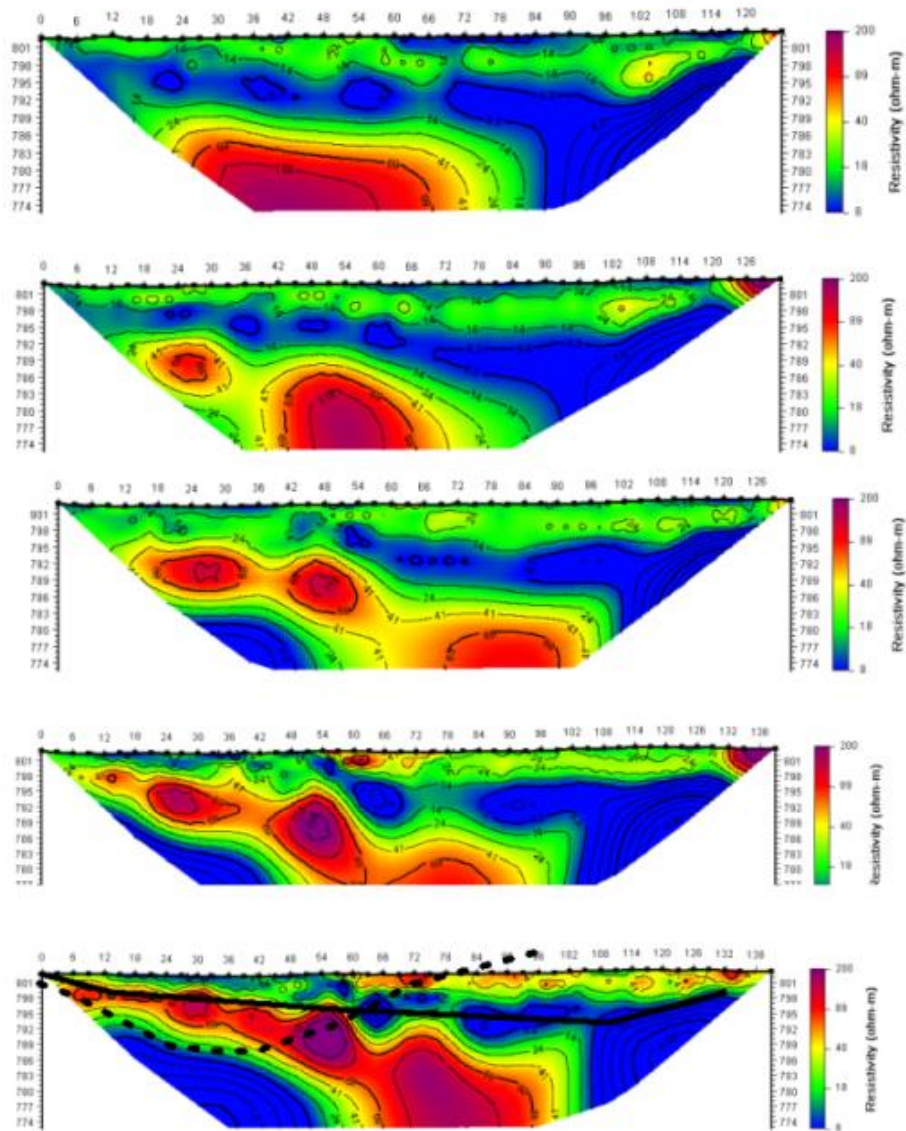
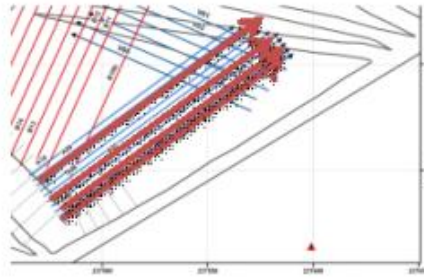
Πολύ παρόμοιες γεωηλεκτρικές εικόνες με αυτή της τομής A01 προέκυψαν και για τις υπόλοιπες τομές της ομάδας A. Ειδικότερα στο Σχ 3.8 παρουσιάζονται οι εικόνες της αντιστροφής για τις τομές της ομάδας A. Σε όλες τις εικόνες ξεχωρίζει χαρακτηριστικά τόσο η ακόρεστη ζώνη (σχετικά υψηλές αντιστάσεις) όσο και η βαθύτερη ζώνη των κορεσμένων με στραγγίδια απορριμμάτων. Στο ΝΔ και κεντρικό τμήμα των τομών αμέσως κάτω από τα όρια του ΧΥΤΑ εμφανίζεται μια περιοχή μεγάλων αντιστάσεων (συμπαγές ψαμμιτικό υλικό). Η αγωγήμη περιοχή στο ΝΔ άκρο των τομών που ερμηνεύτηκε ως λεπτόκοκκο υλικό απόθεσης εμφανίζεται να μειώνεται σε μέγεθος (και τελικά εξαφανίζεται) καθώς προχωράμε ΒΔ στο "εσωτερικό" του ΧΥΤΑ. Τέλος, στο ΒΑ τμήμα όλων των τομών είναι εμφανής η πολύ χαμηλών αντιστάσεων περιοχή η οποία και εκτείνεται σε μεγάλο βάθος.

Οι τομές της ομάδας A είναι τοποθετημένες σε κανονικοποιημένο δίκτυο (βλ. Σχ. 3.1) γεγονός που επέτρεψε την τρισδιάστατη ερμηνεία των ηλεκτρικών δεδομένων όλων των σχετικών τομογραφιών. Η επεξεργασία επιτρέπει την πλήρως τρισδιάστατη μοντελοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων εξασφαλίζοντας μεγαλύτερο βαθμό ρεαλιστικότητας στα παραγόμενα μοντέλα.

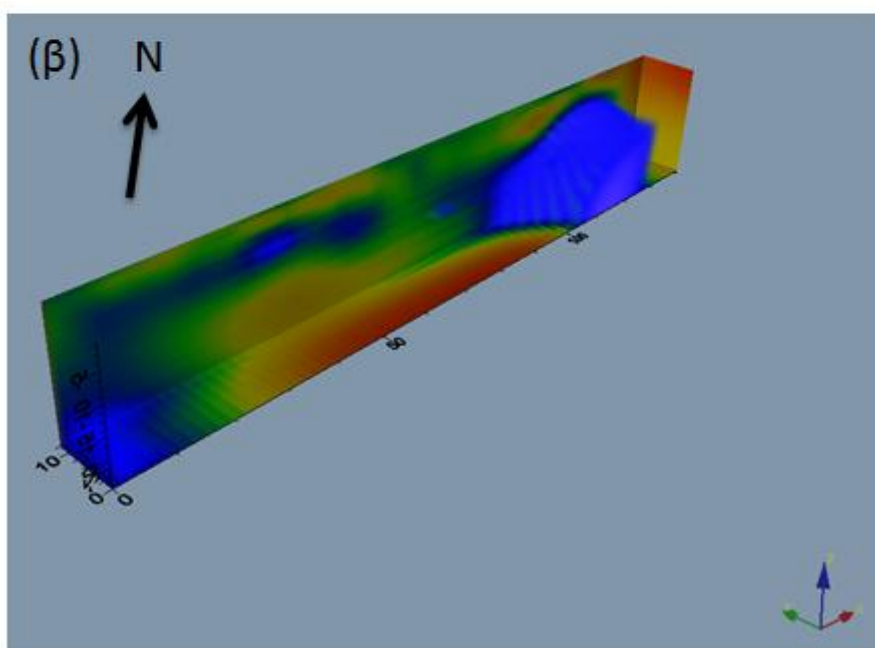
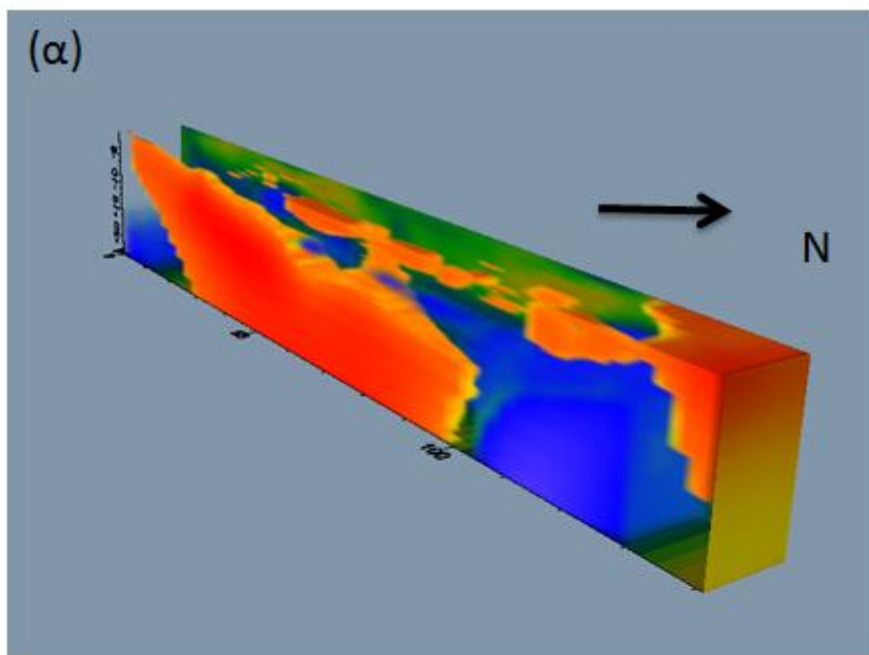
Η τρισδιάστατη γεωηλεκτρική εικόνα του υπεδάφους της περιοχής έρευνας (ομάδα τομών A) φαίνεται στο Σχ.3.9. Στο Σχ 3.9α: εμφανίζονται μόνο οι περιοχές με μεγάλες αντιστάσεις ενώ στο Σχ.3.9β εμφανίζονται μόνο οι περιοχές χαμηλών αντιστάσεων όπου φαίνεται χαρακτηριστικά η αγωγήμη περιοχή στο ΒΔ τμήμα των τομών.

### ΟΜΑΔΑ Β

Οι 11 παράλληλες τομές της ομάδας Β (βλ. Σχ 3.3) έχουν επίσης διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και μετρήθηκαν με απόσταση ηλεκτροδίων 3-3.5-4m ενώ ισαπέχουν μεταξύ τους κατά 4m. Οι τομές έχουν σταθερό αριθμό ηλεκτροδίων: 24 ανά τομή.



Σχήμα 3.8: Αποτελέσματα της αντιστροφής για τομές της ομάδας A (διάταξη διπόλου-διπόλου).



**Σχήμα 3.9** Τρισδιάστατες εικόνες αντιστροφής των τομών της ομάδας A με χαρτογράφηση (α) των μεγάλων αντιστάσεων, (β) των περιοχών με χαμηλές αντιστάσεις.

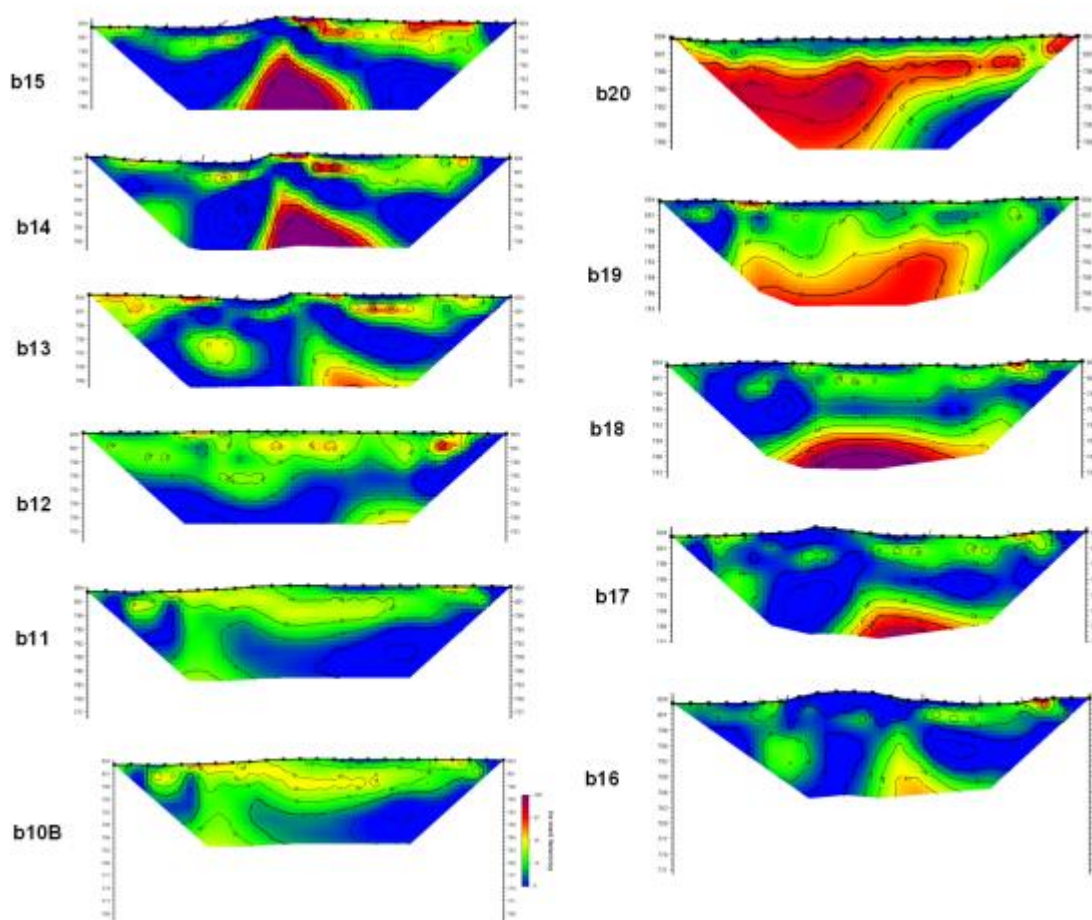
Στο Σχ 3.10 παρουσιάζονται οι εικόνες της αντιστροφής για τις τομές της ομάδας B. Σε όλες τις εικόνες ξεχωρίζει χαρακτηριστικά το στρώμα των απορριμμάτων (σχετικά υψηλές αντιστάσεις). Στο κεντρικό τμήμα των τομών αμέσως κάτω από τα όρια του ΧΥΤΑ εμφανίζεται επίσης μια περιοχή μεγάλων αντιστάσεων (συμπαγές ψαμμιτικό υλικό) από την τομή B13 και βορειοανατολικότερα. Είναι



χαρακτηριστική η ομοιότητα της δομής αυτής σε τομές όπως η B14-15-16 με την αντίστοιχη αντιστατική δομή που εμφανίζεται στη τομογραφία ERT\_L εκτός του ΧΥΤΑ (Σχ 3.5).

Η αγώγιμη περιοχή που παρατηρείται στο ΒΑικό άκρο των τομών της ομάδας A, στις τομές της ομάδας B μειώνεται σταδιακά σε μέγεθος και τελικά εξαφανίζεται όσο προχωράμε ΒΔ στο "εσωτερικό" του ΧΥΤΑ.

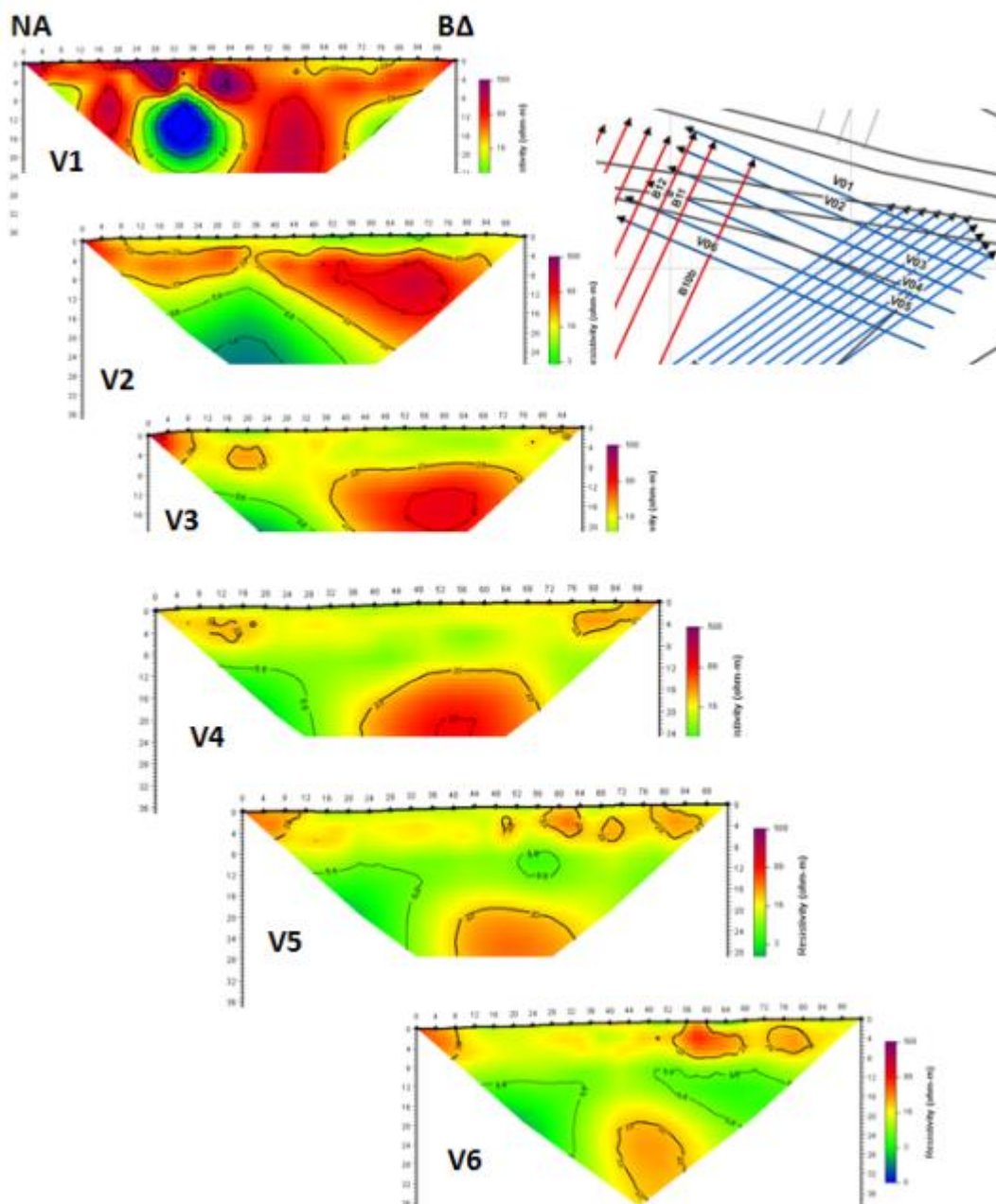
Παρά το ότι οι τομές της ομάδας B είναι παράλληλες, η μη κοινή απόσταση ηλεκτροδίων καθιστά την συνολική τρισδιάστατη ερμηνεία τους προβληματική με τα υπάρχοντα λογισμικά πακέτα.



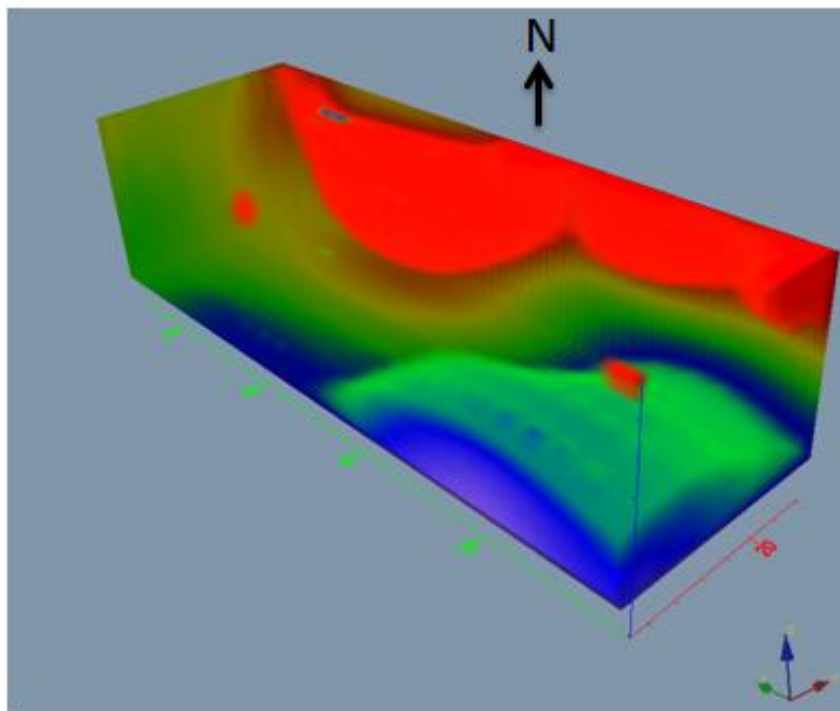
**Σχήμα 3.10:** Αποτελέσματα της αντιστροφής για τομές της ομάδας B (διάταξη διπόλου-διπόλου).

## ΟΜΑΔΑ V

Οι 6 παράλληλες τομές της ομάδας V (βλ. Σχ 3.3) έχουν διεύθυνση NA-BΔ η οποία και είναι σχεδόν κάθετη στη διεύθυνση των τομών των ομάδων A, B. Μετρήθηκαν με απόσταση ηλεκτροδίων 4m ενώ ισαπέχουν μεταξύ τους κατά 4m. Οι τομές έχουν 24 ηλεκτρόδια (μήκος 92μ).



**Σχήμα 3.11:** Αποτελέσματα της αντιστροφής για τομές της ομάδας V (διάταξη διπόλου-διπόλου).



**Σχήμα 3.12** Τρισδιάστατη εικόνα αντιστροφής των τομών της ομάδας V με χαρτογράφηση των περιοχών με πολύ υψηλές και πολύ χαμηλές αντιστάσεις.

Στο Σχ 3.11 παρουσιάζονται οι εικόνες της αντιστροφής για τις τομές της ομάδας V. Και σε αυτή την περίπτωση ξεχωρίζει χαρακτηριστικά το στρώμα των απορριμμάτων ενώ στο ΒΔ τομέα των τομών και κάτω από τα όρια του ΧΥΤΑ εμφανίζεται περιοχή μεγάλων αντιστάσεων (συμπαγές ψαμμιτικό υλικό). Τέλος εμφανίζεται μια αγώγιμη περιοχή στο ΝΑ άκρο κυρίως των τομών V2-V3-V4 η οποία ταυτίζεται με την αντίστοιχη περιοχή της ομάδας Α. Η αγώγιμη αυτή περιοχή φαίνεται καλύτερα στην τρισδιάστατη εικόνα των αντιστάσεων της ομάδας V στο Σχ. 3.12.

### 3.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΟΛΟΥ-ΔΙΠΟΛΟΥ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

Οι τομές μετρήθηκαν και με τη διάταξη πόλου-διπόλου (Σχ.2.3) στην οποία το απομακρυσμένο σταθερό ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε σε μεγάλη απόσταση (>200μ) εκτός του κυττάρου ώστε να εντοπιστούν περιοχές ύποπτες για πιθανή διαρροή.

Οι μετρήσεις αλλά κυρίως οι αντιστροφές που ελήφθησαν με τις διατάξεις πόλου-διπόλου σε αρχική φάση προβλημάτισαν την ερευνητική ομάδα καθώς

---

παρουσιάζονται τελείως διαφορετικές μεταξύ τους αλλά και με τα αποτελέσματα των μετρήσεων της διπόλου-διπόλου.

Υπενθυμίζεται ότι σε κανονικές συνθήκες οι εικόνες ερμηνείας που λαμβάνονται από τις διάφορες διατάξεις για την ίδια τομή πρέπει γενικώς να συμφωνούν χωρίς να ταυτίζονται, όπως συνέβη με τις μετρήσεις στην τομή ERT\_L (Σχ.3.5α,β).

Ως παράδειγμα των "παράδοξων" αποτελεσμάτων που πήραμε παρουσιάζεται ξανά η τομογραφία A01 στο Σχ. 3.13 με τρεις εικόνες αντιστροφής για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (Σχ.3.13α), πόλου-διπόλου NM-A (Σχ.3.13β), και πόλου-διπόλου A-MN (Σχ.3.13γ).

Η διάταξη NM-A δίνει παρόμοια αποτελέσματα με τη διπόλου-διπόλου για το μεγαλύτερο τμήμα της τομής όμως στο τέλος της τομής αντί να εμφανίζει την περιοχή με χαμηλή αντίσταση την εμφανίζει "ανάποδα" με υψηλή (βλ. περιοχή με κόκκινους κύκλους).

Η διάταξη A-MN από την άλλη είναι σχετικά ίδια με τις υπόλοιπες μόνο στα πρώτα λίγα μέτρα. Σε βαθύτερα στρώματα εμφανίζει εξωπραγματικά μεγάλες αντιστάσεις.

Το φαινόμενο δεν περιορίστηκε σε μια μόνο τομή αλλά είναι γενικευμένο και παρατηρήθηκε αρκετά έντονο σε όλες τις τομές της ομάδας A και V όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.14.

Η εξήγηση που δίνεται βασίζεται στην υπόθεση ότι τυχόν διαρροή ρεύματος λειτουργεί ως δευτερογενής πηγή και "νέο" ηλεκτρόδιο. Ειδικότερα, στην περίπτωση των μετρήσεων NM-A (βλ σχήμα Σχ. 3.15) όταν η μέτρηση πλησιάζει τη διαρροή που υποθετικά βρίσκεται μέσα στη τομή μας σε κάποιο βάθος τότε η μετρήσεις είναι τύπου διπόλου-διπόλου και το σήμα παραμένει μικρό. Όταν η διάταξη προσπεράσει το "νέο" ηλεκτρόδιο, οι μετρήσεις μετατρέπονται σε τύπου διάταξης Wenner η οποία ως γνωστόν έχει ιδιαίτερα υψηλό σήμα (βλ. Κεφάλαιο 2.2.1). Καθώς εμείς δε γνωρίζουμε την ύπαρξη του "νέου" ηλεκτροδίου, θεωρούμε ότι το ηλεκτρόδιο είναι στο "άπειρο" οπότε και πολλαπλασιάζουμε τις μετρήσεις με ένα μεγάλο γεωμετρικό παράγοντα. Στην περίπτωση που το σήμα παραμένει μικρό αυτό δε δημιουργεί πρόβλημα. Άλλα όταν το σήμα μεγαλώσει πολύ (μέτρηση τύπου Wenner) οι φαινόμενες αντιστάσεις γίνονται υπερβολικά μεγάλες και οι εικόνες αντιστροφής εξωπραγματικές.

---

Η παραπάνω υπόθεση επιβεβαιώθηκε με την διεξαγωγή προσομοίωσης μέσω μοντέλου αντίστασης (Σχ. 3.16α) για το οποίο πήραμε συνθετικές μετρήσεις βασιζόμενοι στη παρουσία ενός "νέου" ηλεκτροδίου. Κατά τη διάρκεια της αντιστροφής προσποηθήκαμε άγνοια του "νέου" ηλεκτροδίου και εκτελέσαμε την αντιστροφή των δεδομένων υποθέτοντας ότι το Β ηλεκτρόδιο είναι στο "άπειρο". Τα αποτελέσματα της αντιστροφής για τις διατάξεις πόλου-διπόλου (Σχ 3.16γ,δ) είναι απόλυτα συμβατά με τα αποτελέσματα που λάβαμε στο ύπαιθρο γεγονός που φανερώνει ότι η υπόθεση της ύπαρξης δευτερογενούς ηλεκτροδίου ισχύει.

Με δεδομένο ότι το φαινόμενο της "ανάποδης" αντίστασης παρατηρήθηκε έντονα στις τομογραφίες της ομάδας Α και V, χαρτογραφήθηκε ο λόγος των αντιστάσεων των αντιστροφών πόλου-διπόλου και διπόλου-διπόλου για κάθε τομή (Σχ. 3.17). Βάσει της χαρτογράφησης αυτής εντοπίστηκαν γραφικά οι περιοχές εκείνες με τις πιο έντονες ανωμαλίες και καταλήξαμε στον προσδιορισμό μιας περιοχής που θεωρούμε ως την πιο πιθανή για την ύπαρξη δευτερογενούς ηλεκτροδίου. Η περιοχή αυτή παρουσιάζεται στο Σχ.3.18.

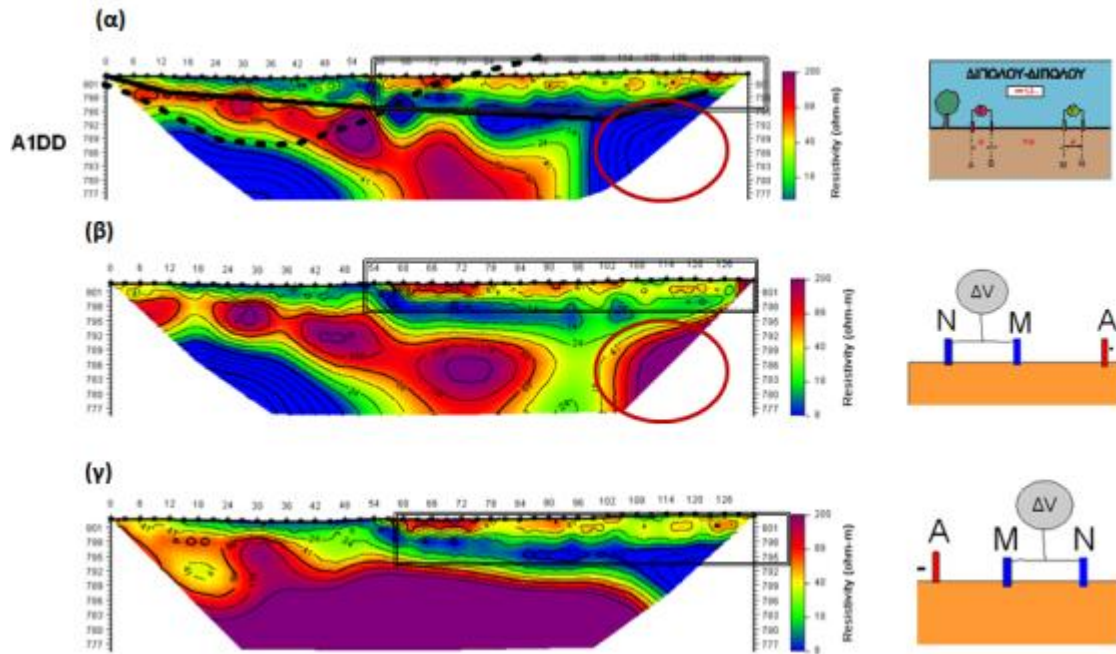
Τονίζεται ότι η περιοχή αυτή αποτελεί ένα σημείο ηλεκτρικής διαρροής. Η ηλεκτρική διαρροή μπορεί να οφείλεται:

1. σε διαρροή εκκρίματος από τον ΧΥΤΑ
2. στη λειτουργία των σωληνώσεων άντλησης των στραγγισμάτων (Σχ.3.19α) ως σημεία διαφυγής του ρεύματος. Ειδικότερα και βάση της τεχνικής έκθεσης οριστικής μελέτης<sup>4</sup>, η παρουσία του συρματόσχοινου ανύψωσης της αντλίας που ξεκινά από τον πυθμένα του ΧΥΤΑ και καταλήγει εκτός ΧΥΤΑ (Σχ. 3.19β) μπορεί να λειτουργεί ως "κρυφό" ηλεκτρόδιο.
3. Στη λειτουργία του δρόμου εισόδου ως σημείο ηλεκτρικής επικοινωνίας με την εκτός ΧΥΤΑ περιοχή. Σημειωτέον ότι παρόμοια φαινόμενα έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία (βλ. π.χ. Binley & Daily, 2003). Η παραπάνω υπόθεση θα μπορούσε να εξεταστεί με πλήρη απομόνωση του δρόμου με αποκάλυψη του γεωφάσματος. Κάτι τέτοιο θα σήμαινε όμως και προσωρινή διακοπή της λειτουργίας του ΧΥΤΑ οπότε η λύση αυτή δεν κρίνεται σκόπιμη.

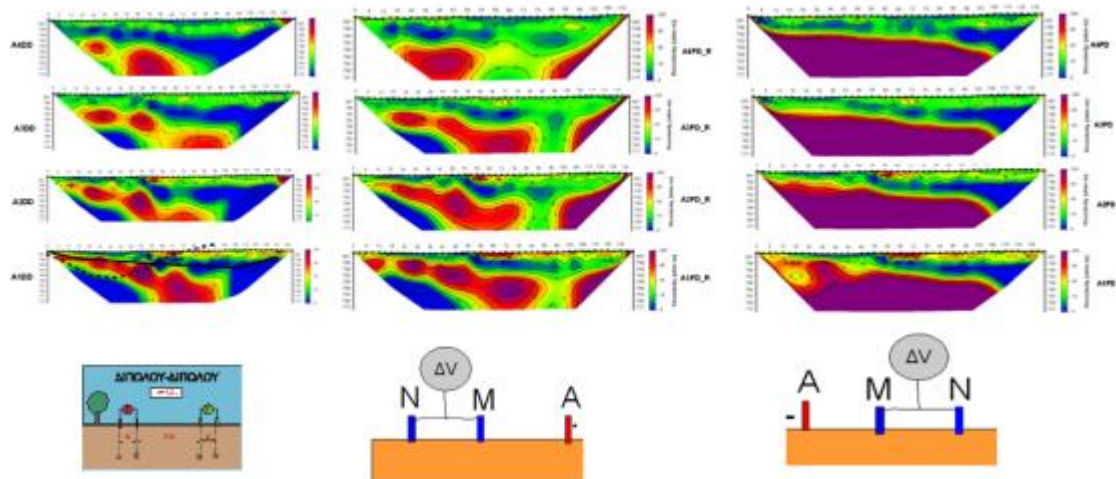
---

<sup>4</sup> Οριστική μελέτη για το έργο 'ΧΥΤΑ ΤΗΣ Δ. Ε. ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΣ ΗΠΕΙΡΟΥ (Ν. ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ)'. Τεύχος 4 : Μελέτη Έργων Συλλογής Στραγγισμάτων Κεφάλαιο 1: Τεχνική Περιγραφή - Τεχνικές Προδιαγραφές, Παράγραφος 1.6.5. σελ. 10

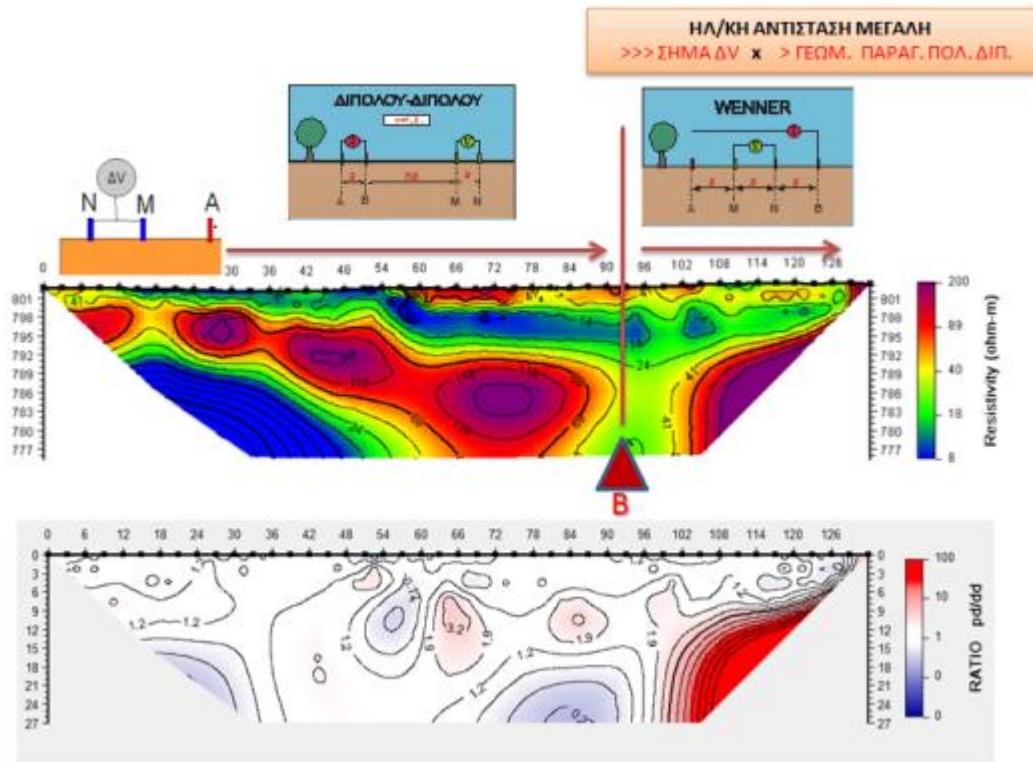
Σε κάθε περίπτωση δεν προέκυψε άλλη περιοχή "ύποπτη" για διαρροή μέσα στο κύτταρο. Με βάση τα παραπάνω στην περιοχή αυτή πρέπει να τοποθετηθούν και οι δείκτες κατά τη διάρκεια της ιχνηθέτησης.



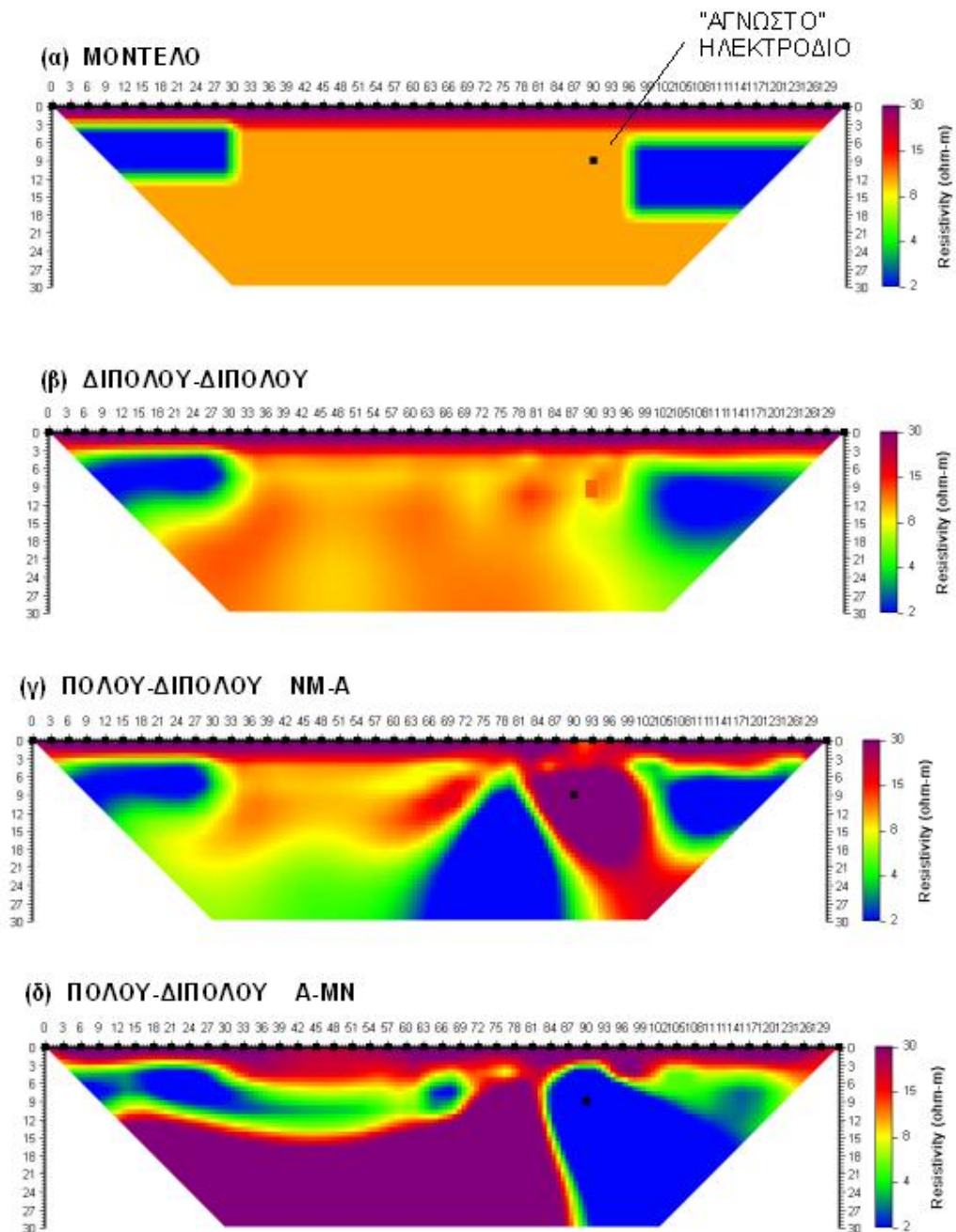
**Σχήμα 3.13:** Εικόνες αντιστροφής της τομής A01 για τη διάταξη (α) διπόλου-διπόλου, (β) πόλου διπόλου NM-A, (γ) πόλου διπόλου A-MN.



**Σχήμα 3.14:** Εικόνες αντιστροφής των τομών της ομάδας A για τη διάταξη διπόλου-διπόλου (1η στήλη), πόλου-διπόλου NM-A (2η στήλη), πόλου-διπόλου A-MN (3η στήλη).

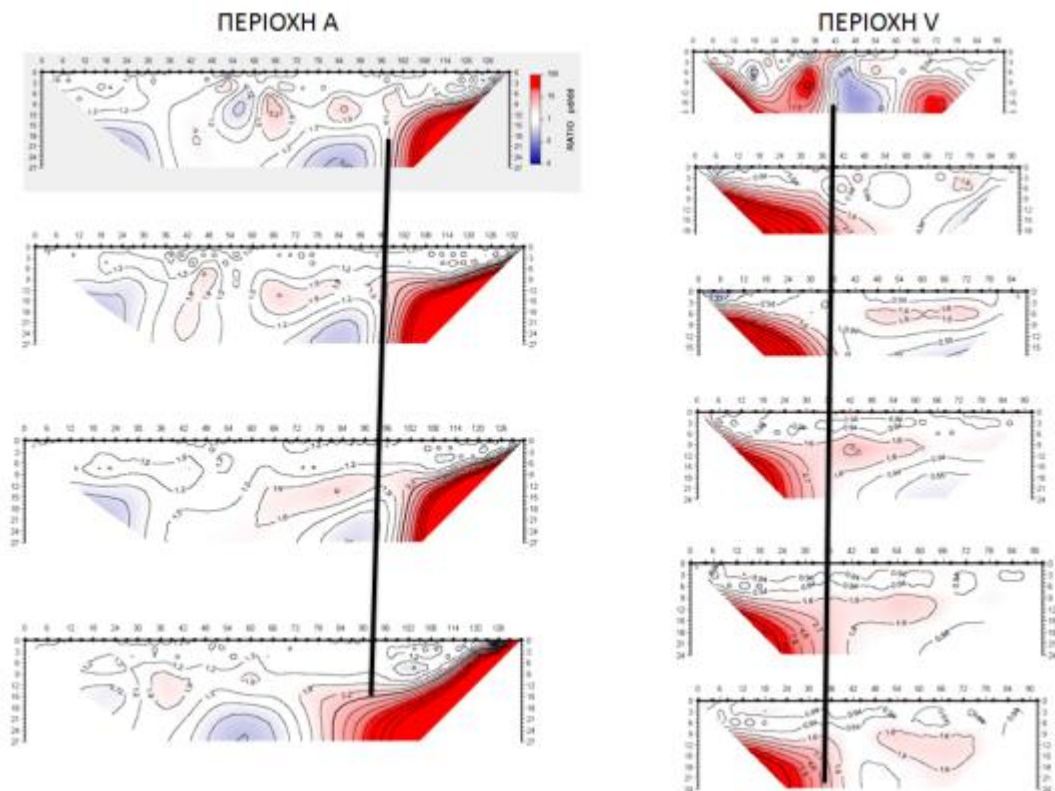


**Σχήμα 3.15:** Σχηματική εξήγηση του παράδοξου φαινομένου "ανάποδης" αντίστασης για τη διάταξη πόλου διπόλου NM-A.

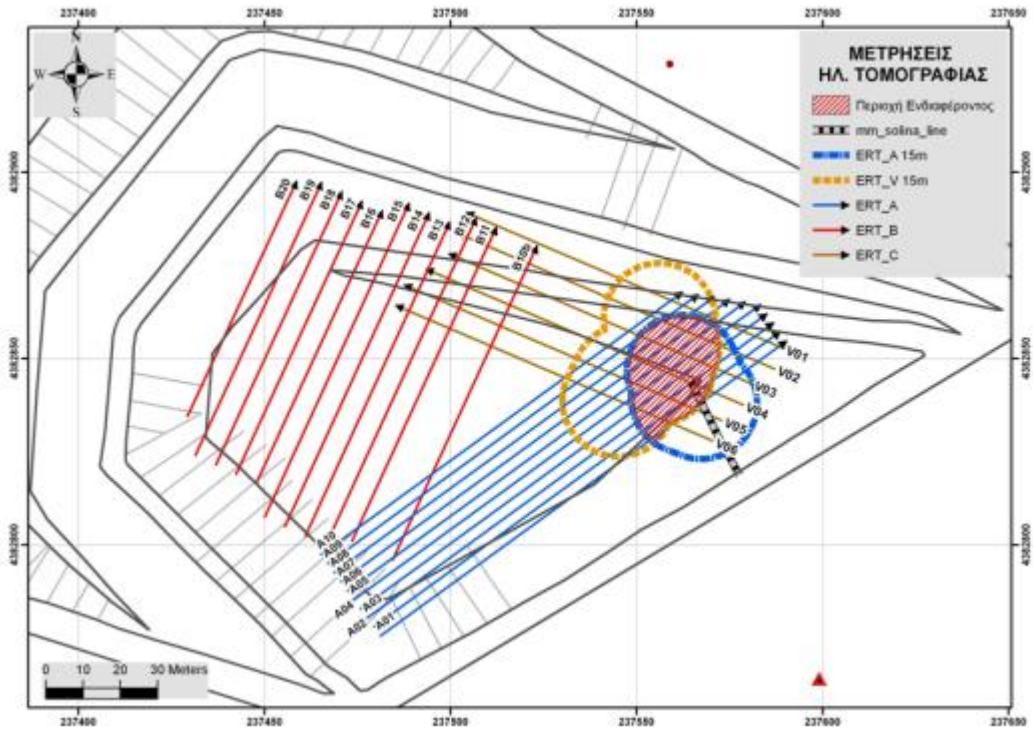


**Σχήμα 3.16:** Επιβεβαίωση του φαινομένου των "ανάποδων" αντιστάσεων για τη διάταξη πόλου διπόλου ΝΜ-Α και Α-ΜΝ με την υπόθεση ύπαρξης δευτερογενούς ηλεκτροδίου.





**Σχήμα 3.17:** Χαρτογράφηση του λόγου των αντιστάσεων των αντιστροφών πόλου-διπόλου και διπόλου-διπόλου για τις τομές των περιοχών *A, V*.

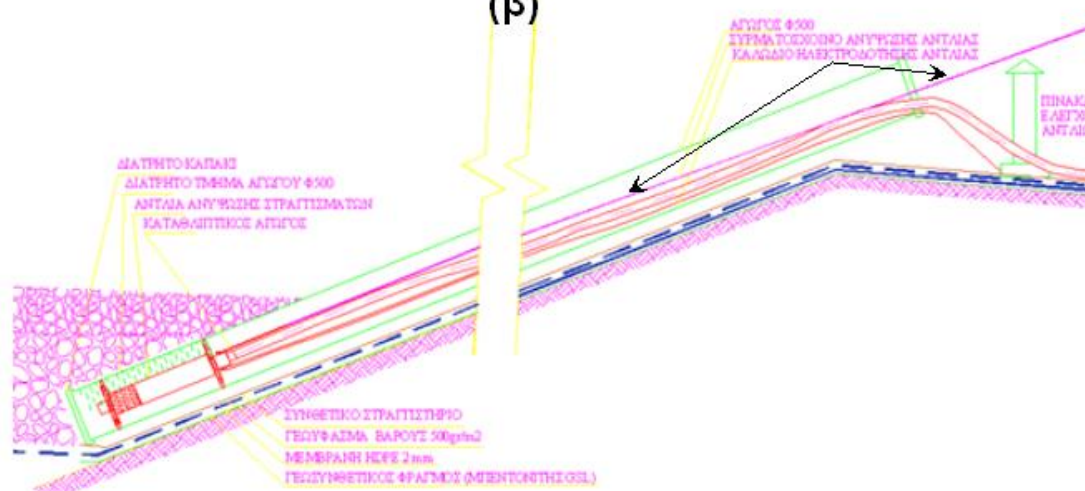


Σχήμα 3.18: Η περιοχή που θεωρείται ύποπτη για ηλεκτρική διαρροή.

(α)



(β)



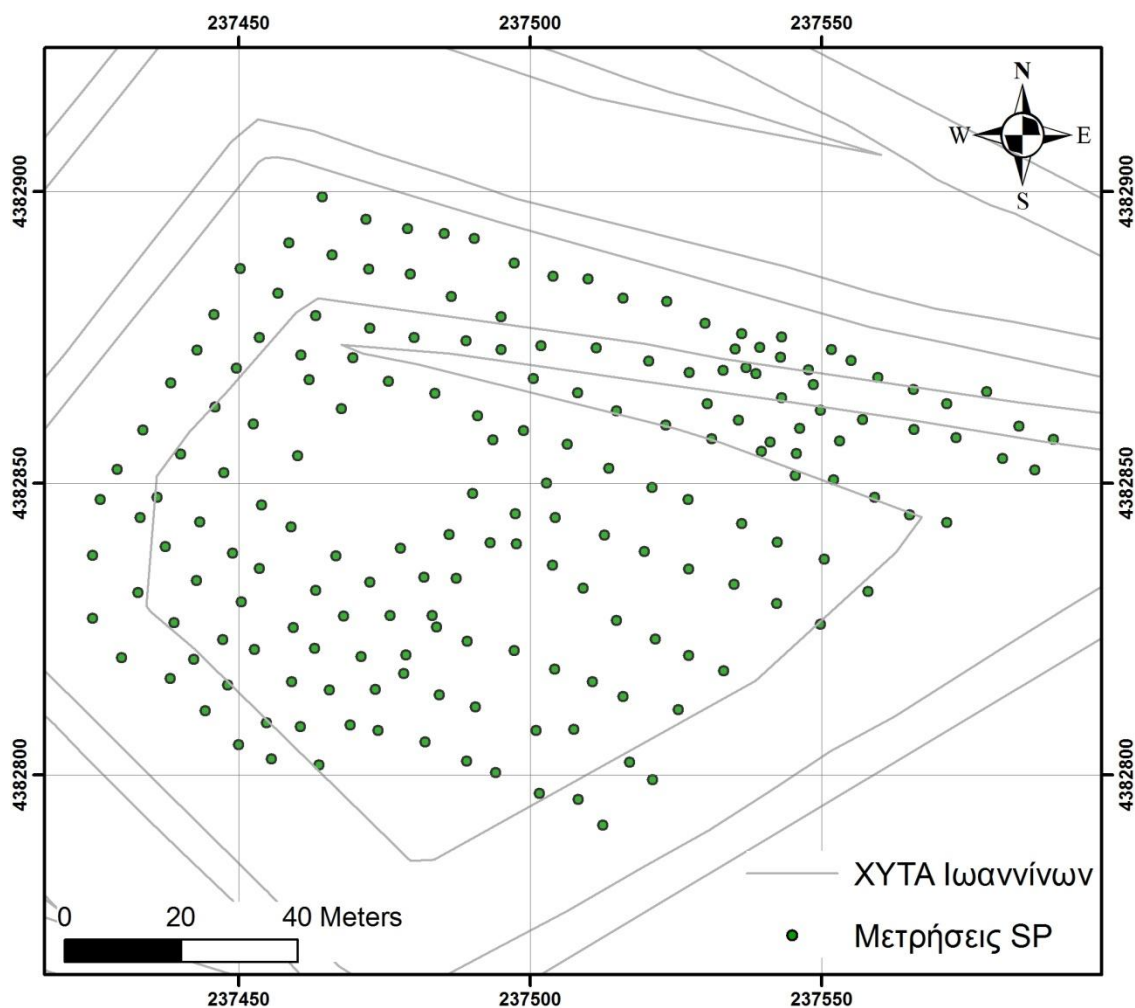
**Σχήμα 3.19:** (α) Φωτογραφία όπου φαίνεται ο δρόμος εισόδου και ο αγωγός άντλησης. (β) Σχέδιο όπου φαίνεται το συρματόσχοινο ανύψωσης της αντλίας βάσει των τεχνικών προδιαγραφών της οριστικής μελέτης.

## 4 ΑΛΛΕΣ ΜΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 4.1 ΦΥΣΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Οι μετρήσεις φυσικού βάσει βιβλιογραφίας μπορούν να προσδιορίσουν μέσω ανωμαλιών φυσικού δυναμικού τη μετακίνηση ηλεκτρικών φορτίων που συνδέονται με τη ροή των ρυπαντών σε βαθύτερα στρώματα.

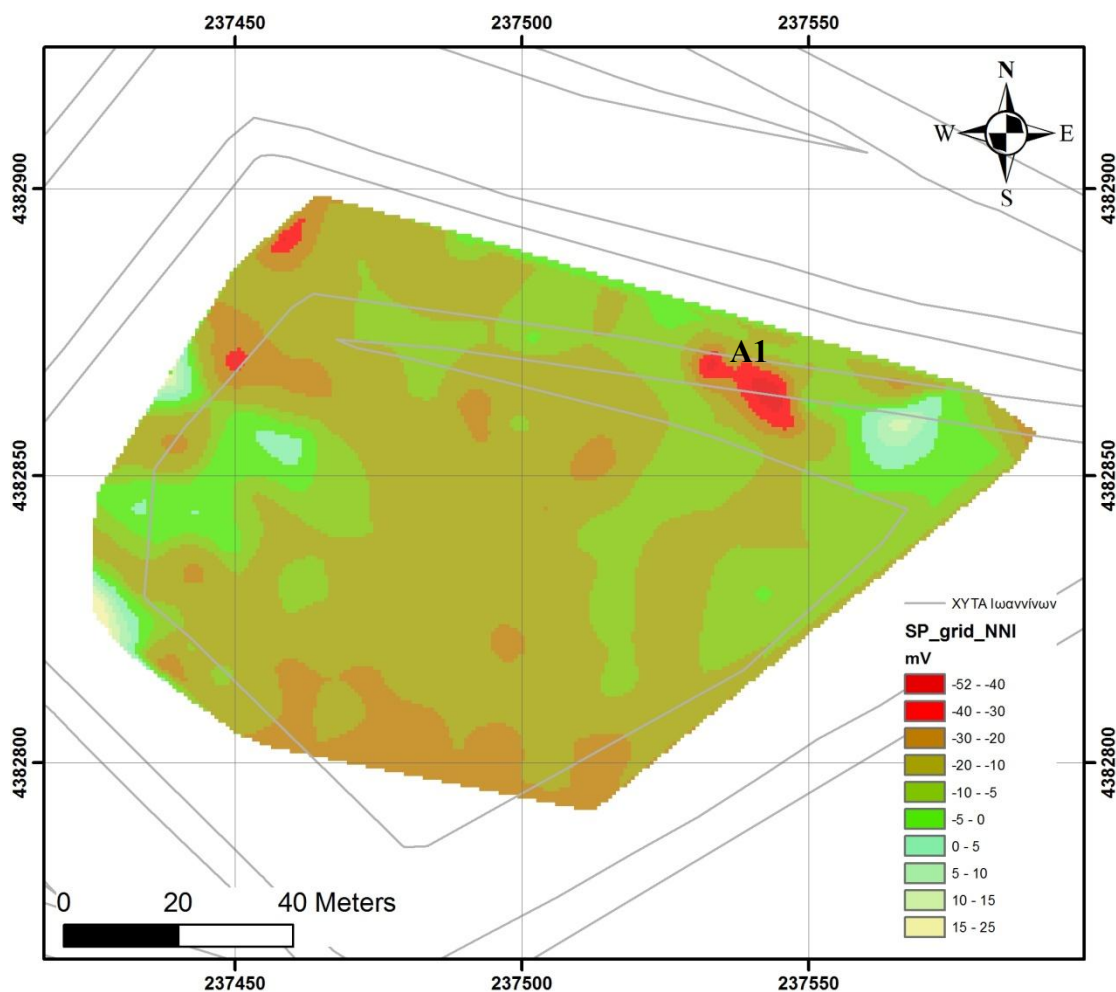
Στην περιοχή του κυττάρου του ΧΥΤΑ υλοποιήθηκε δίκτυο μετρήσεων φυσικού δυναμικού με τον εξοπλισμό και μεθοδολογία που αποτυπώνεται στο Σχ. 2.8. Χρησιμοποιήθηκαν μη πολούμενα ηλεκτρόδια και βολτομέτρο μεγάλης εμπέδησης. Το ηλεκτρόδιο δυναμικού (Μ) παρέμεινε σταθερό (ηλεκτρόδιο αναφοράς) και το άλλο (Ν) μετακινήθηκε με βήμα 5-7 μέτρα σε όλο το μήκος και πλάτος του κυττάρου του ΧΥΤΑ.



Σχήμα 4.1: Τα σημεία που υλοποιήθηκαν οι μετρήσεις φυσικού δυναμικού.

Σε περιοχές όπου παρατηρήθηκαν ανωμαλίες έγινε πύκνωση των σημείων δειγματοληψίας (π.χ. Ανατολικός τομέας του κυττάρου στο Σχ.4.1). Επίσης λόγω της λειτουργίας του ΧΥΤΑ υπήρξε μια περιοχή στο κέντρο του κυττάρου όπου ήταν αδύνατο να διεξαχθούν μετρήσεις.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις του φυσικού δυναμικού ήταν αρκετά ασταθείς γεγονός που μας κάνει σχετικά επιφυλακτικούς στην αξιολόγησή τους.



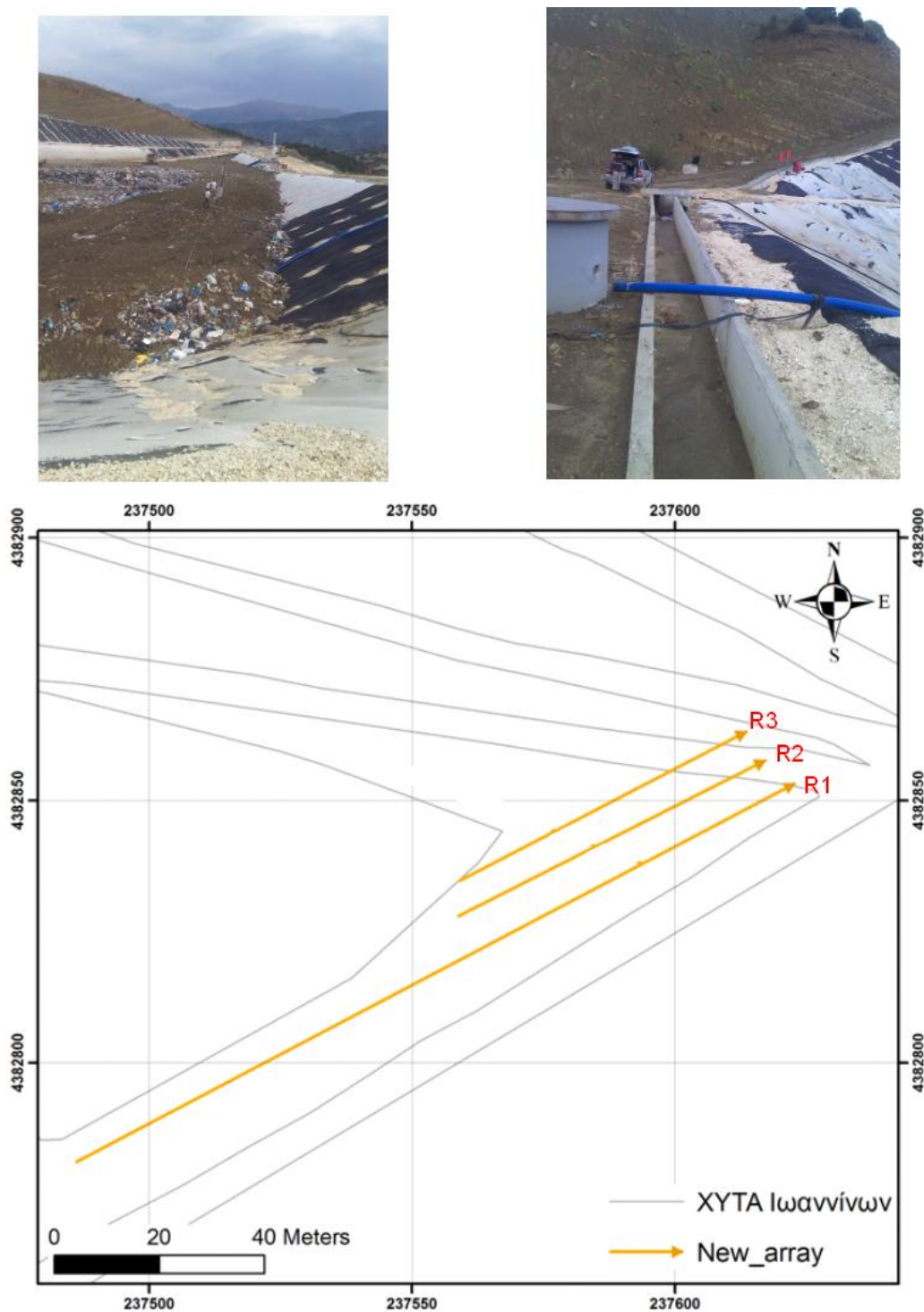
Σχήμα 4.2:Χάρτης μεταβολής του φυσικού δυναμικού στο κύτταρο του ΧΥΤΑ.

Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζεται ο έγχρωμος χάρτης με τις ισοδυναμικές γραμμές που προέκυψαν από τη χαρτογράφηση των μετρήσεων του φυσικού δυναμικού.

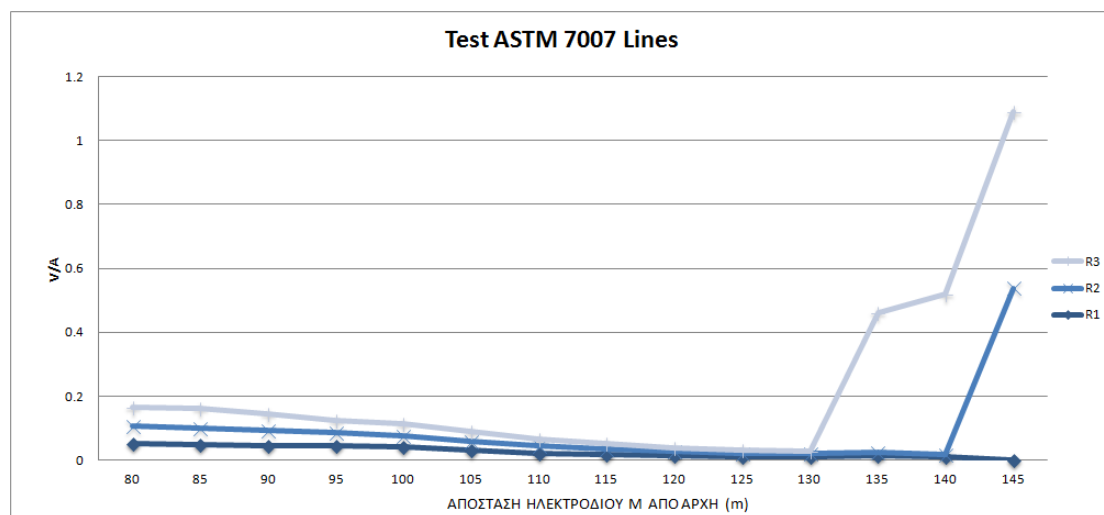
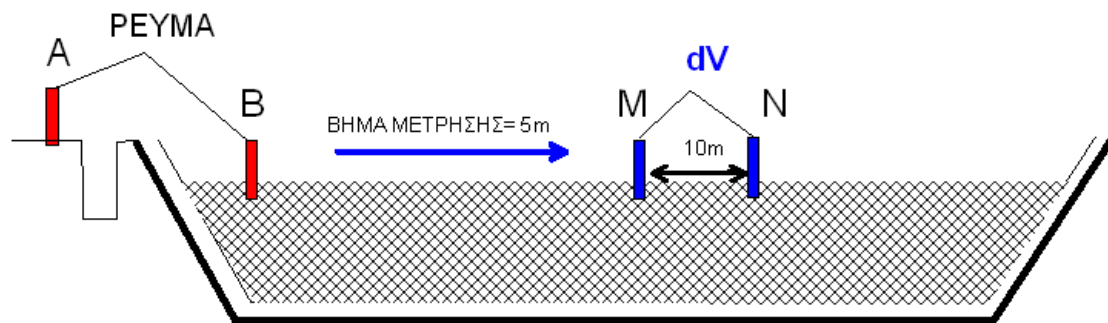
Παρατηρείται μια περιοχή με σχετικά έντονες αρνητικές ανωμαλίες (περιοχή A1 στο Σχ. 4.2). Η θέση αυτή βρίσκεται στα όρια της περιοχής που θεωρείται ύποπτη για ηλεκτρική διαρροή (Σχ.3.18) και συναξιολογείται μαζί με τα γεωηλεκτρικά δεδομένα.

## 4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ASTM 7007

Στο Σχ.4.3 παρουσιάζονται σχετικές φωτογραφίες (επάνω) καθώς και οι θέσεις και των δοκιμαστικών μετρήσεων (κάτω) που έγιναν στο χώρο του ΧΥΤΑ με βάση τη μέθοδο ASTM7007 (βλ. Κεφάλαιο .2.5.1).



**Σχήμα 4.3:** Φωτογραφίες (επάνω) και θέσεις των μετρήσεων ASTM 7007 (κάτω) σε τομές στο κώτταρο του ΧΥΤΑ.



**Σχήμα 4.4:** Διάταξη μέτρησης ASTM 7007 που υλοποιήθηκε στο κώταρο του ΧΥΤΑ (επάνω) και αποτελέσματα των μετρημένων τομών (κάτω).

Οι διάταξη της μέτρησης φαίνεται στο Σχ4.4: η απόσταση του διπόλου μέτρησης δυναμικού MN ήταν 10 μέτρα ώστε να επετεύχθη μεγάλο βάθος διασκόπησης (Para, 1988). Το βήμα μέτρησης ήταν 5 μέτρα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις τρεις τομές παρουσιάζονται στο Σχ.4.4.

Όπως αναμενόταν οι κανονικοποιημένες ως προς την ένταση του ρεύματος μετρήσεις δυναμικού (V/I) παρουσιάζουν μια πτωτική τάση όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή γεγονός που αναμένεται λόγω της γεωμετρικής διασποράς του ρεύματος.

Όταν όμως πλησιάζουν στο τέλος των τομών που συμπίπτει με το τμήμα του δρόμου εισόδου ο οποίος είναι έντονα πακτωμένος οι μετρήσεις της διαφοράς δυναμικού (τομές R2,R3 στο Σχ.4.4) εμφανίζουν πολύ μεγάλη αύξηση. Η αύξηση αυτή πιθανότητα σχετίζεται με την απότομη αύξηση της αντίστασης του υλικού λόγω της πάκτωσης και επομένως δεν μπορεί να αποδοθεί μονοσήμαντα σε ηλεκτρική διαρροή. Λόγω της περιορισμένης διαγνωστικής της αξίας σε λειτουργούντες ΧΥΤΑ οι μετρήσεις περιορίστηκαν σε μόνο λίγες δοκιμαστικές τομές

---

## 5 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Με δεδομένη την έμμεση φύση των γεωφυσικών μετρήσεων οι ερμηνείες των γεωφυσικών δεδομένων και κατά συνέπεια τα συμπεράσματα είναι πιθανό να επαναξιολογηθούν με βάση τα πρόσθετα δεδομένα άμεσης παρατήρησης που συλλέγονται ή θα συλλεχθούν στο μέλλον (π.χ. αποτελέσματα ιχνηθέτησης).

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την γεωφυσική μελέτη συνοψίζονται ως εξής:

- Η γεωφυσική έρευνα απέδωσε την ρεαλιστική γεωηλεκτρική δομή του υπεδάφους. Η τελευταία διακρίνεται σε δύο φάσεις: (α) την γεωλογική δομή που φιλοξενεί το έργο και (β) την περιοχή του ΧΥΤΑ με τον καθορισμό του στρώματος των απορριμμάτων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επαφή του πυθμένα των απορριμμάτων με το μητρικό έδαφος, αφού στόχος της έρευνας είναι πιθανή διαρροή εκκρίματος στο υπέδαφος. Η γεωλογική δομή μελετήθηκε σε χώρο εκτός του ΧΥΤΑ έτσι ώστε να βαθμονομηθούν οι επιμέρους λιθολογικές φάσεις που συνθέτουν τον σχηματισμό του φλύσχη που αποτελεί και την κύρια γεωλογική δομή της περιοχής. Διακρίθηκε η αργιλομαργαϊκή φάση σαν επικείμενη της ψαμμιτικής φάσης του φλύσχη με πιθανή αντικλινική δομή, χωρίς να είναι απόλυτα σαφής η ύπαρξη ρήγματος με διακριτή μετάπτωση και ζώνης ρηγμάτωσης που να έχει ιδιαίτερο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Χαρτογραφήθηκε το πάχος των απορριμμάτων τα οποία με τη σειρά τους διακρίθηκαν σε δύο φάσεις. Η ακόρεστη επιφανειακή ζώνη με αντιστάσεις από 20 έως 40 Ωm και η κορεσμένη (από έκκριμα και συμβολή μετεωρικών κατακρημνισμάτων σε περιόδους βροχόπτωσης) με αντιστάσεις από 5 έως 15Ωm.
- Ιδιαίτερα αγωγίμη περιοχή εντοπίζεται στην νοτιοανατολική γωνία του ΧΥΤΑ, γεγονός αναμενόμενο αφού στο σημείο αυτό προβλέφθηκε και το μεγαλύτερο βάθος όπου καταλήγει με ελεγχόμενη υδραυλική κλίση το έκκριμα με στόχο την τελική συλλογή, άντλησή και μεταφορά του στον βιολογικό καθαρισμό. Το ενδιαφέρον που προκύπτει από την γεωφυσική έρευνα σχετίζεται με το μεγάλο βάθος στο οποίο φαίνεται να εκτείνεται, το οποίο ξεπερνά κατά πολύ το πάχος του στρώματος των απορριμμάτων αφού είναι μεγαλύτερο των 20 μέτρων. Το φαινόμενο αυτό εν δυνάμει μπορεί να σχετίζεται τόσο με ύπαρξη



---

διασταλλαζόντων θεωρείται όμως περισσότερο πιθανό να αντικατοπτρίζει πλευρικές μεταβολές της γεωλογικής δομής τις οποίες ενισχύει η διαδικασία της αντιστροφής.

- Υλοποιήθηκε εφαρμογή της διαδικασίας λήψης μετρήσεων με πρωτόκολλα διαφορετικών διατάξεων με στόχο την μελέτη των συνθηκών ομογένειας και ισοτροπίας του εδάφους στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος (διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου σε δύο διευθύνσεις). Δεδομένου ότι -όπως αναλυτικά περιγράφεται στην αντίστοιχη ενότητα- τα παραγόμενα γεωηλεκτρικά μοντέλα οφείλουν να αποδώσουν κοινή γεωηλεκτρική εικόνα με μικρές διαφοροποιήσεις, εντοπίστηκε συγκεκριμένη περιοχή όπου η εικόνα ήταν εντελώς αντίστροφη. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται μόνο με τη θεώρηση «δευτερογενούς» ηλεκτροδίου ρεύματος. Δεδομένου ότι η γεωμεμβράνη παρ' ότι επιτρέπει στον αναγκαίο για την δυνατότητα λήψης μετρήσεων βαθμό της διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος θεωρείται γενικά ιδιαίτερα μονωτικό υλικό ένα τέτοιο 'ηλεκτρόδιο' μπορεί να είναι σημείο λύσης της συνοχής της από όπου και σημαντική ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που παροχετεύεται στο ηλεκτρόδιο του 'άπειρου' (διάταξη πόλου-διπόλου) μπορεί να εισρεύσει αλλοιώνοντας έτσι το μετρούμενο δυναμικό στα δίπολα δυναμικού. Συνέπεια του φαινομένου αυτού είναι ο 'λάθος' υπολογισμός της τιμής της φαινόμενης ηλεκτρικής αντίστασης στον οποίο χρησιμοποιείται ο γεωμετρικός παράγοντας που θεωρεί ότι το ηλεκτρόδιο βρίσκεται πραγματικά στο 'άπειρο' και όχι σε θέση πολύ κοντά στην διάταξη. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στην διαδικασία εντοπισμού της θέσης του φανταστικού δευτερογενούς ηλεκτροδίου, το οποίο πιθανά σχετίζεται με λύση της συνέχειας της γεωμεμβράνης. Η ακριβής θέση δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με απόλυτη ακρίβεια, η περιοχή όμως που πρέπει να βρίσκεται ορίζεται στη νοτιοανατολική γωνία του ΧΥΤΑ και σημειώνεται στον αντίστοιχο χάρτη (Σχ. 3.18).

---

Με βάση τα αποτελέσματα της ερμηνείας των γεωφυσικών δεδομένων προκύπτει ότι:

- οι επαφές των υλικών στα χαρτογραφημένα τμήματα της γεωφυσικών τομών εμφανίζονται να είναι κατά τόπους αρκετά οριζόντιες και δεν δείχνουν έντονους τεκτονικούς επηρεασμούς χωρίς βέβαια να αποκλείεται η σύνδεση των γεωφυσικών αυτών δομών με τεκτονικά στοιχεία (π.χ. πτυχή, ρήγματα).
- Σε κάθε περίπτωση η ευρύτατη παρουσία αργιλικού υλικού και οι αντιστάσεις που μετρήθηκαν συνάδουν απόλυτα με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών (φλύσχης) που συνθέτουν το υδρογεωλογικό περιβάλλον και δεν ευνοούν την ανάπτυξη σημαντικών συστημάτων υπόγειας υδροφορίας
- Η παραπάνω γεωλογική-υδρογεωλογική δομή όπως προκύπτει από τις μέχρι τώρα γεωφυσικές εικόνες δεν καθιστά εφικτή την άμεση διασύνδεση πιθανής διαρροής στο ΧΥΤΑ με τη ρύπανση μακριά από το χώρο του ΧΥΤΑ (πηγή στη λεύκα).

**ΠΡΟΤΑΣΗ:** η μελέτη της γεωλογικής-υδρογεωλογικής δομής και της σύνδεσης ή μη της πηγής με το χώρο του ΧΥΤΑ απαιτεί πρόσθετες γεωφυσικές μετρήσεις. Η γεωφυσική έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί περιμετρικά του χώρου των πηγών ώστε να διερευνηθεί ο μηχανισμός τροφοδοσίας τους. Πιστεύεται ότι συμπληρωματικές μετρήσεις μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην μελέτη της υπόγειας υδροφορίας, στην εξήγηση του φαινομένου της ρύπανσης αλλά και στη βέλτιστη σχεδίαση μέτρων προστασίας των υπόγειων νερών και των πηγών.

- Στον ΧΥΤΑ, η μόνη περιοχή που φαίνεται ως πιθανή για επικοινωνία με το εξωτερικό περιβάλλον τουλάχιστον σε ότι αφορά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, εντοπίζεται στην νοτιοανατολική γωνία του χώρου όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 3.18. Τονίζεται ότι η περιοχή αυτή αποτελεί ένα σημείο ηλεκτρικής διαρροής που μπορεί να οφείλεται:
  - ✓ σε διαρροή εκκρίματος από τον ΧΥΤΑ
  - ✓ στη λειτουργία των σωληνώσεων άντλησης των στραγγισμάτων (Σχ.3.19α) ως σημεία διαφυγής του ρεύματος (π.χ. συρματόσχοινο ανύψωσης).

- 
- ✓ Στη λειτουργία του δρόμου εισόδου (Σχ. 3.19α) ως σημείο ηλεκτρικής επικοινωνίας με την εκτός ΧΥΤΑ περιοχή.
  - Στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής δεν εντοπίζεται θέση στην οποία τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας δημιουργούν υποψία λύσης της συνέχειας της γεωμεμβράνης. Με άλλα λόγια δεν προέκυψε άλλη περιοχή "ύποπτη" για διαρροή μέσα στο κύτταρο.

**ΠΡΟΤΑΣΗ:** προτείνεται η προβλεπόμενη ιχνηθέτηση να επικεντρωθεί στην περιοχή που υποδεικνύεται στον χάρτη του σχήματος 3.18. με δεδομένο ότι αποτελεί τον μόνο ύποπτο για διαρροή χώρο βάσει των γεωφυσικών μετρήσεων

---

## **6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- ASTM D 7007-03. Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earth Materials. ASTM International, 2004.
- Athanasίου, Ε., Τσουρλος Ρ., Παπαζαχος C and Tsokas G., 2006. Combined weighted inversion of electrical resistivity data arising from different array types”, J. Appl. Geophys., vol. 62, issue 2, pp 124-140.
- Aristodemou E, Thomas-Betts A, 2000. DC resistivity and induced polarization investigations at a waste disposal site and its environments. J Appl Geophys 44:275–302
- Bernstone C, Dahlin T, Ohlsson T, Hogland W, 2000. DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excavation surveys. Environ Geol 39:3–4
- Βαργεμέζης Γ., Τσουρλος, Π, 2006. Διερεύνηση Γεωλογικών Συνθηκών Περιοχής Νότια Του Χ.Υ.Τ.Α. Ταγαράδων Με Εφαρμογή Γεωηλεκτρικών Τομογραφιών. Έκθεση ΑΠΘ.
- Binley, A.; Daily, W. 2003. The performance of electrical methods for assessing the integrity of geomembrane liners in landfill caps and waste storage ponds. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 8, No. 4, 2003, p. 227-237.
- Binley, A., Daily, W., and Ramirez, A., 1997, Detecting leaks from environmental barriers using electrical current imaging: J Env. and Eng. Geophysics, 2(1) 11-19.
- Bishop, I., 2002, Electrical leak location testing of geomembranes: Environment Agency R&D Technical Report P1-419/TR, Environment Agency, Bristol, UK, 120 pp.
- Carpenter PJ, Calkin SF, Kaufmann RS (1991) Assessing fractured landfill cover using electrical resistivity and seismic refraction techniques. Geophysics 56(11):1896–1904
- Colucci, P., Darilek, G.T., Laine, D.L., and Binley, A., 1999, Locating landfill leaks covered with waste : in Proc. Sardinia '99 : 7th International Waste Management and Landfill Symposium, CIS A, Cagliari, Italy, 4-8 October 1999, 137-140.
- Constable, S. C., R. L. Parker, and C. G. Constable (1987). Occam’s inversion - A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, Geophysics, 52 (03), 289–300.

- 
- Darilek, G. , 2007. Leak Location Surveys for Geomembrane Liners. Internet location: <http://deq.state.wy.us/shwd/SW/Presentations/Geomembrane%20leak%20detection.pdf>
- Grellier S, Gu erin R., Robain H., Bobachev A. et al. Monitoring of Leachate Recirculation in a Bioreactor Landfill by 2-D Electrical Resistivity Imaging. J ENVIRON ENG GEOPHYS, 2008,. 13, 351-359
- Frangos, W. , 1997, Electrical detection of leaks in lined waste disposal ponds : Geophysics , 62 , 1737-1744 .
- Kim J-H, 2010. Dc2Dpro - 2D Inversion of ERT data. User's Manual, KIGAM, Korea
- Karlik G, Kaya A (2001) Investigation of groundwater contamination using electric and electromagnetic methods at an open waste-disposal site: a case study from Isparta, Turkey Environ Geol 40(6):34-42
- Kuniansky EL (ed) 2001, US Geological Survey Karst Interest Group Proceedings, Water-Resources Investigations Report 01-4011, pp 107-115
- Laine, D.L., 1991 , Analysis of pinhole seal leaks located in geomembrane liners using the electrical location method: case histories: in Proc. Geosynthetic s '91 Conference, Atlanta , Georgia , USA, Feb . 26-28 , 1991 , 239-253 .
- Laine, D.L., Binley , A.M. , and Darilek, G.T., 1997, How to locate leaks under waste : Geotechnical Fabrics Report , 15(6) , 34-36 .
- Loke M.H. 2004. Res2Dinv: 2D Resistivity and IP inversion Software.
- Nimmer R and Osiensky J, 2002. Direct current and self potential monitoring of an evolving plume in partially saturated fractured rock J. Hydrol., 267 (2002), pp. 258-272.
- Nyquist J and Corry C, 2002. Self-potential: the ugly duckling of environmental geophysics. Lead. Edge, 21 (2002), pp. 446-451
- Nosko, V., 1996, Underliner electrode rapid reading damage detection system—SENSOR DDS : in Geosynthetics : Applications design and construction, by de Groot , M.B. , den Hoedt, G, and Termaat , R.J . (eds.) , Balkema , Rotterdam , 691-695.
- Para , J.O., 1988, Electrical response of a leak in a geomembrane liner : Geophysics , 53 , 1445-1452 .
- Parra, J. O., and Owen, T. E., 1988, Model studies of electrical leak detection surveys in geomembrane-lined impoundments: Geophysics, 53, 1453-1458.

- 
- Porsani JL, Filhob WM, Vagner RE, Shimelesa F, Douradob JC, Moura HP (2004) The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *J Appl Geophys* 55:199–209
- Powers CJ, Wilson J, Haeni FP, Johnson CD (1999) Surface-geophysical investigation of the University Of Connecticut Landfill, Storrs, Connecticut, Water-Resources Investigations Report 99- Soupios P, Papadopoulos N, Papadopoulos I, Kouli M, Vallianatos F, Sarris A, Manios Thr, 2007, Application of Integrated Methods in Mapping Waste Disposal Areas, *Environ Geol.*, Vol. 53(3), pp.661-675
- Stanton GP, Schrader TP (2001) Surface geophysical investigation of a chemical waste landfill in northwestern arkansas, U.S. Geological Survey, 401 Hardin Road, Little Rock, AR72211. In: 4211, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey with the University of Connecticut
- Tsourlos P. (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Data. D.Phil Thesis, University of York (315 p.)
- Tsourlos P. and Ogilvy R. (1998). An algorithm for the 3-D Inversion of Tomographic Resistivity and Induced Polarisation data: Preliminary Results. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 2, 30-45.
- Tsourlos P., Szymanski J. and Tsokas G. (1999). The Effect of Terrain Topography on Commonly Used Resistivity Arrays. *Geophysics*, 64, 1357-1363.
- Vogeslang, D., 1995. *Environmental Geophysics — A Practical Guide*. Springer-Verlag, Berlin.
- Yi M-J and Kim J-H, 2010. Dc3Dpro - 2D Inversion of ERT data. User's Manual, KIGAM, Korea