



---

---

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΕ ΡΥΠΑΣΜΕΝΑ ΕΛΑΦΗ**

---

---



Μαυρογεώργης Κωνσταντίνος

1128

Επιβλέπων καθηγητής  
Σουπιός Παντελής

Χανιά  
2016

## **ABSTRACT**

The production of olive oil in the Mediterranean region is of major economic importance. It is one of the leading industries in Greece, with large impact in local and national economy. Olive oil production activities are not regulated, resulting in the production of large waste volume with virtually uncontrolled disposal. The most common disposal practice involves dumping of the waste in open evaporation ponds, leading to significant degradation of the environment. In addition to regulation and adoption of proper waste management processes, there is an urgent need for the development of methods that will allow efficient monitoring of waste management processes, and enable rapid recognition of environmental degradation incidents. Geophysical methods could be used to monitor and characterize olive oil waste management processes. We applied a series of electrical geophysical measurements at an olive oil mill waste (OOMW) site in western Crete. Our results suggest that electrical methods are very efficient in accurately delineating young OOMW plumes due to their conductive signature.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παραγωγή του ελαιολάδου στην περιοχή της Μεσογείου έχει μεγάλη οικονομική σημασία. Είναι μία από τις κορυφαίες βιομηχανίες στην Ελλάδα, με μεγάλο αντίκτυπο στην τοπική και εθνική οικονομία. Οι δραστηριότητες παραγωγής ελαιολάδου δεν ρυθμίζονται, με αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλου όγκου αποβλήτων, με σχεδόν ανεξέλεγκτη διάθεση. Η πιο συνηθισμένη πρακτική διάθεσης περιλαμβάνει την απόθεση των αποβλήτων σε δεξαμενές εξάτμισης, οδηγώντας σε σημαντική υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Εκτός από τη ρύθμιση και την υιοθέτηση των κατάλληλων διαδικασιών διαχείρισης αποβλήτων, υπάρχει επείγουσα ανάγκη για την ανάπτυξη μεθόδων που θα επιτρέψουν την αποτελεσματική παρακολούθηση των διαδικασιών διαχείρισης των αποβλήτων, και να καταστεί δυνατή η ταχεία αναγνώριση των περιστατικών υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Οι γεωφυσικές μέθοδοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον χαρακτηρισμό της διαχείρισης των αποβλήτων ελαιοτριβείων. Εφαρμόσαμε μια σειρά από μετρήσεις ηλεκτρικών μετρήσεων σε μια θέση απόθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείου στη δυτική Κρήτη. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι οι ηλεκτρικές μέθοδοι είναι πολύ αποτελεσματικές στην ακριβή οριοθέτηση διαρροών αποβλήτων ελαιοτριβείων λόγω των υψηλών τιμών αγωγιμότητας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ</b> .....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ</b> .....	6
2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟΥ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΚΑΙ ΤΗΝ Ε.Ε.....	6
2.2 ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ.....	7
<b>2.2.1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ</b> .....	8
<b>2.2.2 ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (ΥΓΡΗ ΠΥΡΗΝΑ) ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ</b> .....	10
<b>2.2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ</b> .....	11
2.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	13
<b>2.3.1 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΕ</b> .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ</b> .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ</b> .....	24
4.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	24
4.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	26
<b>4.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ – ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ</b> .....	26
<b>4.2.2 ΧΡΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ</b> .....	28
4.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ .....	30
4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	32
<b>4.4.1 ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ</b> .....	32
<b>4.4.2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	33
<b>4.4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	34
<b>4.4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ</b> .....	36
4.5 ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	38
4.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....	39
<b>4.6.1 ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ</b> .....	40
<b>4.6.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ</b> .....	50
4.7 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ .....	57
4.8 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.....	58
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΟΥ</b> .....	60
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	71
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	72

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η βιομηχανία ελαιόλαδου είναι ένας από τους σημαντικότερους τομείς της οικονομικής και κοινωνικής ζωής στις χώρες της Μεσογείου. Η Ελλάδα κατέχει την τρίτη θέση στην παραγωγή ελαιολάδου παγκοσμίως (μετά την Ισπανία και την Ιταλία). Ως εκ τούτου, η παραγωγή ελαιολάδου είναι μια σημαντική δραστηριότητα, η οποία είναι ζωτικής σημασίας τόσο για την τοπική και εθνική οικονομία.

Παρά το γεγονός ότι οι ευεργετικές ιδιότητες του ελαιολάδου στην ανθρώπινη υγεία είναι γνωστές από την αρχαιότητα, η διαδικασία παραγωγής του δημιουργεί μεγάλο όγκο αποβλήτων. Τα απόβλητα ελαιοτριβείων (OliveOilMillWastes - OOMW) χαρακτηρίζονται από ένα σκούρο καφέ χρώμα και δυσάρεστη οσμή, αποτελούνται κυρίως από νερό, υψηλές οργανικές (κυρίως φαινόλες και πολυφαινόλες) και ασθενείς ανόργανες ενώσεις (π.χ. κάλιο και φώσφορο) (Κυριάκου κ.ά., 2005).

Η απουσία οποιασδήποτε πολιτικής σχετικά με τη διαχείριση των αποβλήτων, καθώς και η έλλειψη παρακολούθησης από τις τοπικές και κρατικές αρχές, έχει οδηγήσει στη διάθεση των αποβλήτων σε απροστάτευτες λίμνες-δεξαμενές εξάτμισης. Οι τοπικές γεωλογικές συνθήκες (διαπερατά ιζήματα ή / και ρωγμές βράχων) μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλή ευπάθεια μόλυνσης των υπόγειων υδάτων και η υποβάθμιση του εδάφους. Το οργανικό φορτίο, οι τοξικές πολυφαινόλες και οι υψηλές συγκεντρώσεις των ανόργανων στοιχείων των αποβλήτων μπορούν να αλλάξουν δραματικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπεδάφους και να επηρεάσουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητές του (Καβαδίας κ.ά., 2010).

Οι ηλεκτρικές γεωφυσικές μέθοδοι προσφέρουν μια αποτελεσματική, μη επεμβατική, επιλογή για το χαρακτηρισμό και την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών διαδικασιών, σε στατική ή χρονικά μεταβαλλόμενη λειτουργία, στην επιθυμητή χωρική και χρονική ανάλυση.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκαν γεωηλεκτρικά προφίλ σε χώρο απόθεσης ελαιοτριβείου στη δυτική Κρήτη.

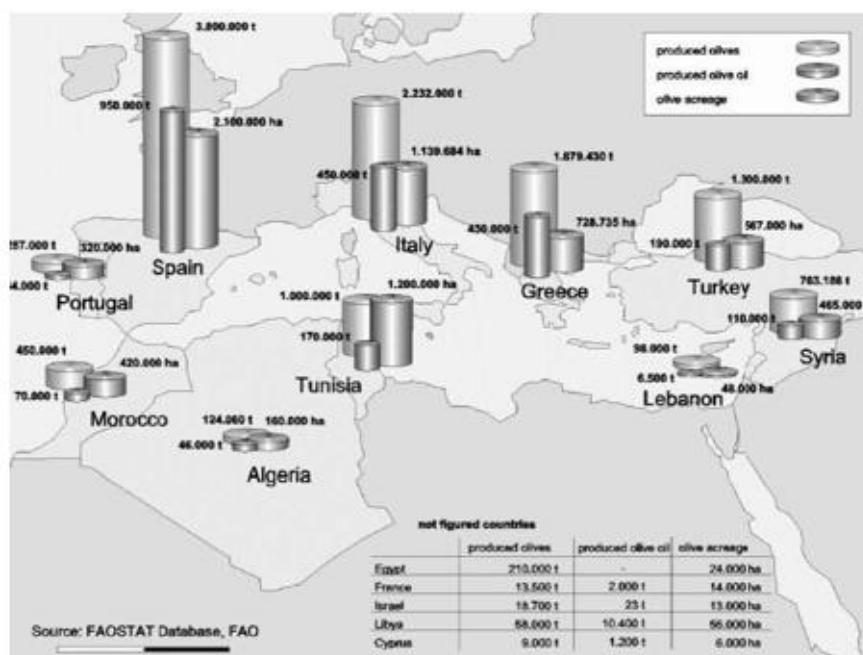
Τα αποτελέσματα δείχνουν μια αγώγιμη ανωμαλία που συνάδει με την ύπαρξη μια διαρροής αποβλήτων προς το υπέδαφος, η οποία εξακριβώθηκε και από άμεση δειγματοληψία. Εκτιμάται ότι η εγγενής βιοδιάσπαση των φρέσκων αποβλήτων επιφέρει την αύξηση αγωγιμότητας στο υπέδαφος, όπως έχει παρατηρηθεί σε διάφορες αναλόγες μελέτες σε χώρους απόθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

### 2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟΥ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ ΚΑΙ ΤΗΝ Ε.Ε.

Η καλλιέργεια του ελαιόδενδρου υπήρξε ανέκαθεν σημαντικό κομμάτι της οικονομικής και κοινωνικής ζωής στις χώρες της Μεσογείου, στις οποίες καλλιεργούνται περίπου 8,5 εκατομμύρια εκτάρια με ελαιόδεντρα, έκταση που αντιστοιχεί στη 98% της παγκόσμιας καλλιέργειας. Η Ισπανία, η Ιταλία και η Ελλάδα είναι οι τρεις μεγαλύτερες ελαιοπαραγωγικές χώρες παγκοσμίως, με ετήσια παραγωγή ελαιολάδου 2,8 εκατομμύρια τόνου, η οποία αντιστοιχεί στο 75% της παγκόσμιας παραγωγής. Η Ισπανία, με 2,47 εκατομμύρια εκτάρια, έχει τη μεγαλύτερη καλλιεργούμενη έκταση, ακολουθούμενη από την Ιταλία (1,16 εκατ. εκτάρια), την Ελλάδα (0,81 εκατ. εκτάρια) και την Πορτογαλία (0,38 εκατ. εκτάρια). Η Γαλλία είναι μικρότερος παραγωγός, με μια περιοχή συγκομιδής περίπου 18,900 εκτάρια. Άλλοι μικρότεροι παραγωγοί είναι η Κύπρος (11,600 εκτάρια), Σλοβενία (800 εκτάρια) και η Μάλτα (λιγότερο από 100 εκτάρια) (LIFE Focus, 2010).

Χώρες με επίσης σημαντική παραγωγή είναι η η Τυνησία, το Μαρόκο, η Αλγερία, η Τουρκία καθώς και χώρες της Μεσης Ανατολής και η Αυστραλία.



Σχήμα 2.1 Παραγωγή ελαιολάδου, ελιών στη Μεσόγειο (πηγή FAOSTAT).

Συνεπώς, η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) κυριαρχεί στη διεθνή αγορά ελαιολάδου. Οι ελαιοκομικές εγκαταστάσεις κυμαίνονται από πολύ μικρές (<0,5 εκτάρια) έως πολύ μεγάλες (>500 εκτάρια) και από τους παραδοσιακούς, χαμηλής δραστηριότητας ελαιώνες έως τις εντατικές, άκρως μηχανοποιημένες δεντρόφυτες εκτάσεις (LIFE Focus, 2010).

Στις ελαιοπαραγωγικές χώρες επικρατούν τα 3-φασικά και 2-φασικά συστήματα παραγωγής ελαιολάδου, ενώ υπάρχει και μικρός αριθμός παραδοσιακών ελαιοτριβείων.

Ο τομέας του ελαιολάδου στη Μεσόγειο περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό από οικογενειακές επιχειρήσεις, οι οποίες δύσκολα μπορούν να θεωρηθούν ως βιομηχανικές εγκαταστάσεις, από την άποψη των ΒΔΤ (Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές), της αδειοδότησης και της επιθεώρησης. Από την άλλη πλευρά, η παραγωγή του ελαιολάδου αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό τομέα της οικονομίας, ζωτικής σημασίας για την τοπική και την εθνική οικονομία.

Σύμφωνα με την Πρότυπη Οδηγία για τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές στις Βιομηχανίες Τροφίμων, Ποτών και Γάλακτος, ο υποτομέας στον οποίο ανήκει η παραγωγή ελαιολάδου είναι τα Φυτικά έλαια και λίπη (IPPCBREF, 2006).

Σύμφωνα με τη μελέτη του Δικτύου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Εφαρμογή και Επιβολή του Περιβαλλοντικού Δικαίου (2003) (IMPEL, 2003):

- Τα ελαιοτριβεία είναι γενικά ΜΜΕ (Μικρο-Μεσαίες Επιχειρήσεις), σε όλες τις χώρες, εκτός της Ισπανίας. Ο αριθμός των ελαιοτριβείων στην Ιταλία, Ελλάδα και Πορτογαλία υπερβαίνει αυτόν της Ανδαλουσίας. Το ποσοστό των μεγάλων ελαιοτριβείων σε αυτές τις χώρες είναι 9, 1, και 11%, αντίστοιχα.
- Τα συστήματα 2 φάσεων έχουν επικρατήσει μόνο στην Ισπανία (98% των εγκαταστάσεων της Ανδαλουσίας) και την Κροατία. Σε όλες τις άλλες χώρες αντιπροσωπεύουν λιγότερο από το 5% των εγκαταστάσεων. Τα συστήματα με μηχανισμούς συμπίεσης κυριαρχούν στην Πορτογαλία, ενώ τα διαχωρισμού 3-φασικά συστήματα διαχωρισμού έχουν επικρατήσει στις άλλες χώρες.
- Εγκαταστάσεις εκχύλισης πυρήνα: Ο αριθμός τέτοιων εγκαταστάσεων είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό των ελαιοτριβείων σε όλες τις χώρες και είναι περίπου ο ίδιος στην Ισπανία, την Ιταλία και την Ελλάδα. Όμως το ποσοστό των "μεγάλων" εγκαταστάσεων είναι υψηλότερο. Παρόλα αυτά, η πλεινότητα αυτών των εγκαταστάσεων είναι ΜΜΕ σε όλες τις χώρες, εκτός της Πορτογαλίας, όπου το 75% των εγκαταστάσεων εκχύλισης χαρακτηρίζονται ως μεγάλα.

## 2.2 ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ

Τα απόβλητα που παράγονται από τον ελαιοκομικό τομέα είναι υγρά και στερεά απόβλητα (όπως φλοιοί ελιάς ή ακατέργαστος ελαιοπολτός). Τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων εξαρτώνται από τη διαδικασία παραγωγής. Μέχρι την εμφάνιση των διαχωριστήρων δύο φάσεων, τόσο τα συστήματα συμπίεσης όσο και τα 3-φασικά συστήματα συστήματα παρήγαγαν στερεό υπόλειμμα (ελαιοπυρήνας) και φυτικό νερό (υγρά απόβλητα). Στις αρχές της δεκαετίας του '90, εμφανίστηκαν οι διαχωριστήρες 2 φάσεων οι οποίοι πρακτικά δεν παράγουν υγρά απόβλητα, αφού δεν

υπάρχει προσθήκη νερού ενώ παράγεται μόνο ένα υπόλειμμα που προκύπτει από τη διαδικασία καθώς το υγρό και στερεό υπόλειμμα ενώνονται, με τη μορφή ιλύος (IMPEL, 2003).

Συγκεκριμένα, εκτός από το ελαιόλαδο:

- Τα παραδοσιακά συστήματα (πίεσης) παράγουν υγρά απόβλητα και πυρηνόξυλο.
- Τα τριφασικά συστήματα παράγουν υγρά απόβλητα και πυρηνόξυλο.
- Τα διφασικά συστήματα παράγουν ένα μίγμα υγρών αποβλήτων και πυρηνόξυλο.

Η σύσταση των αποβλήτων των ελαιοτριβείων δεν είναι ούτε ποιοτικά, ούτε ποσοτικά σταθερή, αλλά εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως:

- Τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τις κλιματικές συνθήκες.
- Την ποικιλία του ελαιόδενδρου.
- Το βαθμό ωρίμανσης του καρπού.
- Τη σύσταση του ελαιοκάρπου.
- Την τεχνολογία παραγωγής του ελαιολάδου.
- Το χρόνο αποθήκευσης του ελαιοκάρπου

Η ποσότητα των παραγόμενων υγρών αποβλήτων σε ένα παραδοσιακό ελαιοτριβείο αντιστοιχεί στο 50-60% του βάρους του ελαιοκάρπου, ενώ στα 3-φασικά ελαιοτριβεία αντιστοιχεί περίπου στο σύνολο του βάρους του ελαιοκάρπου, κυρίως λόγω των μεγάλων ποσοτήτων νερού που προστίθεται στη διάρκεια των διαφόρων σταδίων της ελαιοποίησης.

### **2.2.1 ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ**

Τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων είναι μεταβλητά, και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η μέθοδος ελαιοποίησης, η ποικιλία και η ωριμότητα των καρπών, η περιοχή προέλευσης, οι κλιματικές συνθήκες και οι μέθοδοι καλλιέργειας/επεξεργασίας (LIFEFocus, 2010, Ouzounidou κ.ά., 2010). Είναι μίγμα χυμών του καρπού, νερού που χρησιμοποιείται στα διάφορα στάδια της ελαιοπαραγωγικής διαδικασίας, (π.χ. νερό που προστίθεται κατά τη φυγοκέντριση, νερό από χρησιμοποιείται για το πλύσιμο των καρπών, των χώρων ή των μηχανημάτων) και μαλακών μερών του ελαιοκάρπου.

Τα απόβλητα έχουν έντονο σκούρο καφέ ή μαύρο χρώμα, δυσάρεστη οσμή, αποτελούνται από νερό κατά 80-83%, από οργανικές ενώσεις (κυρίως φαινόλες, πολυφαινόλες και τανίνες) κατά 15-18% και από ανόργανα στοιχεία (όπως άλατα καλίου και φωσφορικά άλατα), τα οποία αποτελούν το υπόλοιπο 2% (LIFEFocus, 2010). Ειδικότερα, τα απόβλητα (ή αλλιώς κατσίγαρος από τα 3-φασικά συστήματα) χαρακτηρίζονται από σκούρο καφέ χρώμα, με χαρακτηριστική οσμή, είναι όξινα (pH



= 4,0 έως 5,5), έχουν υψηλή αγωγιμότητα (6.000-16.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) και παρουσιάζουν υψηλές τιμές  $\text{BOD}_5$  (40-95 g/l), COD (50-180 g/l) ενώ περιέχουν μεγάλες ποσότητες αιωρούμενων στερεών και υψηλές συγκεντρώσεις πολυαρωματικών ενώσεων, π.χ. απλές φαινόλες και φλαβονοειδή, ή πολυφαινόλες (0,5 έως 24 g/l). Τα επίπεδα των φαινολών στα απόβλητα, μπορεί να κυμαίνονται από 1 έως 8 g/l (Nair και Markham, 2008). Επιπλέον, τα απόβλητα, περιέχουν σημαντικές ποσότητες ανόργανων θρεπτικών ουσιών όπως κάλιο ( $\text{K}_2\text{O}$ : 2,4-10,8 g/l) και φώσφορο ( $\text{P}_2\text{O}_5$ : 0,3-1,5 g/l), καθώς και πολλά μικροθρεπτικά συστατικά. Η τοξικότητα των ΑΕ σχετίζεται κυρίως με την υψηλή περιεκτικότητά τους σε φαινολικές ενώσεις, οι οποίες κατανέμονται στο ελαιόλαδο (2%), στα απόβλητα, (53%) και στον πυρήνα (45%) (Rodis κ.ά., 2002).

Τα ΑΕ εμφανίζουν ένα αξιοσημείωτα μεγάλο φορτίο οργανικής ύλης σε σύγκριση με τα τυπικά αστικά λύματα, ενώ η αναερόβια αποσύνθεση/επεξεργασία καταλήγει σε ένα ποσοστό απομάκρυνσης COD της τάξης του 80 έως 90%, οπότε αυτή η επεξεργασία θεωρείται ανεπαρκής ώστε να επιτραπεί η απόρριψη των αποβλήτων πάλι στο περιβάλλον (LIFE Focus, 2010).

Οι ιδιότητες των υγρών αποβλήτων είναι πιθανόν να μεταβληθούν κατά το διάστημα αποθήκευσής τους ή διάθεσής τους σε δεξαμενές εξαιτίας καθίζησης του αδιάλυτου κλάσματος, τη βιομετατροπή της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς και την εξάτμιση του υγρού κλάσματος. Συγκεκριμένα, η συγκέντρωση των εύκολα ζυμώσιμων οργανικών ενώσεων μειώνεται εξαιτίας της δράση μικροοργανισμών οι οποίοι προκαλούν βιοποδόμηση, αποσύνθεση, το pH συνήθως αυξάνεται, ενώ το Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο ( $\text{BOD}_5$ ) και η ποσότητα των αιωρούμενων στερεών μειώνονται.

Από μικροβιολογική άποψη, τα υγρά απόβλητα περιέχουν κυρίως βακτήρια, αλλά και ζύμες και μύκητες, ενώ δεν υπάρχουν σε αυτά παθογόνοι μικροοργανισμοί.

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι μέσες τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων των αποβλήτων των 3-φασικών και παραδοσιακών ελαιοτριβείων.

Παράμετρος	Παραδοσιακό σύστημα	Τριφασικό σύστημα
pH	5.27	5.23
Ξηρή ουσία, g/l	130	61
Ηλεκτρική αγωγιμότητα, dS/m	18	12
Ειδικό βάρος	1.049	1.020
Έλαιο, g/l	2.3	5.8
Αναγωγικά σάκχαρα, g/l	36	16
Ολικές πολυφαινόλες, g/l	6.2	2.7
Στάχτη, g/l	20	6.4
BOD, g $\text{O}_2$ /l	68.7	45.5

COD, g O <sub>2</sub> /l	146	86
Οργανικό άζωτο, mg/l	544	404
Ολικός φώσφορος, mg/l	485	185
Νάτριο, mg/l	110	36
Κάλιο, mg/l	2470	950
Ασβέστιο, mg/l	162	69
Μαγνήσιο, mg/l	194	90
Σίδηρος, mg/l	33	14
Χαλκός, mg/l	3.1	1.6
Ψευδάργυρος, mg/l	3.6	2.06
Μαγγάνιο, mg/l	5.3	1.6

**Πίνακας 2.1** Μέσες τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων αποβλήτων 3-φασικών και παραδοσιακών ελαιολιτριβείων.

### 2.2.2 ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ (ΥΓΡΗ ΠΥΡΗΝΑ) ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ

Η χημική σύσταση της υγρής πυρήνας (στερεό απόβλητο της παραγωγικής διαδικασίας) ποικίλει και εξαρτάται από την ποικιλία, την κατάσταση και την προέλευση του ελαιόκαρπου καθώς και από την τεχνολογία ελαιοποίησης που χρησιμοποιείται.

Η υγρή πυρήνα περιέχει θραύσματα κουκουτσιών, υπολείμματα φλοιού, ελαιοπολτό, νερό καθώς και ποσότητα ελαίου. Χαρακτηρίζεται επίσης από την παρουσία πολυφαινόλων, εμφανίζει φυτοτοξικότητα, υδροφοβικότητα, έχει υψηλή αλατότητα και χαμηλό pH. Η υψηλή φυτοτοξικότητα και η αντιμικροβιακή δράση της υγρής πυρήνας οφείλεται κυρίως στις πολυφαινόλες και στην περιεκτικότητά της σε λιπαρά οξέα.

Από την υγρή πυρήνα με κατεργασία στα πυρηνελαιουργεία παραλαμβάνεται η ποσότητα του περιεχομένου ελαίου (πυρηνέλαιο) ενώ το τελικό στερεό που απομένει (πυρηνόξυλο) είναι ένα ξηρό υλικό με περιεκτικότητα σε υγρασία μεταξύ 8-10% και αποτελείται από θραυσμένα κουκούτσια και πολτό, έχει υψηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη, κυτταρίνη και ημικυτταρίνη.

Στον Πίνακα 2 δίνονται οι μέσες τιμές χαρακτηριστικών παραμέτρων πυρήνας των 3-φασικών και παραδοσιακών ελαιολιτριβείων.

Παράμετρος (%)	Παραδοσιακό σύστημα	Τριφασικό σύστημα
Υγρασία	27,2	50,2
Λίπη και έλαια	8,72	3,89
Πρωτεΐνες	4,77	3,43
Ολικά σάκχαρα	1,38	0,99
Κυτταρίνη	24,1	17,4
Στάχτη	2,36	1,70

Λιγνίνη	14,2	10,2
Αζωτο	0,71	0,51
Φώσφορος(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,07	0,05
Ολικές πολυφαινόλες	1,15	0,33
Κάλιο (K <sub>2</sub> O)	0,54	0,39
Ασβέστιο (CaO)	0,61	0,44
Ολικός άνθρακας	42,9	29,0
λόγος C/N	60,8	57,2
λόγος C/P	588	553

**Πίνακας 2.2** Μέσες τιμές ορισμένων χαρακτηριστικών παραμέτρων πυρήνας 3-φασικών και παραδοσιακών ελαιοτριβείων.

### 2.2.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΩΝ

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ελαιοκαλλιέργειας και της παραγωγής ελαιολάδου είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την Ισπανία, την Ιταλία και την Ελλάδα ως οι σημαντικότεροι παραγωγοί στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

Οι πιο κοινές μέθοδοι διάθεσης των ΑΕ στην Ελλάδα, λόγω έλλειψης συγκεκριμένου νομοθετικού πλαισίου και αποτελεσματικής παρακολούθησης από τις αρμόδιες κυβερνητικές, περιφερειακές και τοπικές αρχές, περιλαμβάνουν την αποθήκευση σε δεξαμενές εξάτμισης, την απόρριψη σε υδατικά συστήματα και τη διασπορά στο έδαφος (Ouzounidou κ.ά., 2010, Kanvadias κ.ά., 2010). Σύμφωνα με τη μελέτη του Δικτύου της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την Εφαρμογή και Επιβολή του Περιβαλλοντικού Δικαίου (IMPEL) η διασπορά στο έδαφος και η χρήση για άρδευση είναι συνήθεις πρακτικές για τα υγρά απόβλητα από ελαιοτριβεία 3 φάσεων και συμπίεσως (παραδοσιακά), ενώ χρησιμοποιούνται επίσης δεξαμενές εξάτμισης. Δεν είναι ασυνήθιστη η απόρριψη σε υδατικά συστήματα χωρίς επεξεργασία ή/και η μη συμμόρφωση με τους περιορισμούς. Τα στερεά απόβλητα από ελαιοτριβεία 3 φάσεων και συμπίεσως γενικά χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή πυρηνελαίου. Η επεξεργασία και η κομποστοποίηση χρησιμοποιούνται εναλλακτικά. Για τα απόβλητα των 2-φασικών συστημάτων, η λιπασματοποίηση (κομποστοποίηση) είναι η κύρια πρακτική στην Ιταλία, ενώ στην Ισπανία χρησιμοποιείται επίσης ως καύσιμη βιομάζα (IMPEL, 2003).

Οι σημερινές πρακτικές διαχείρισης των αποβλήτων των ελαιοτριβείων έχουν ως αποτέλεσμα περιβαλλοντικά προβλήματα όπως ρύπανση/υποβάθμιση του εδάφους, διαρροές στο υπέδαφος, ρύπανση των υδατικών συστημάτων και εκπομπές δυσάρεστων οσμών (Ouzounidou κ.ά., 2010). Οι φαινόλες αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής λόγω της επίδρασής τους σε τρεις από τις βασικές ιδιότητες των αποβλήτων: αντιβακτηριδιακή δράση, φυτοτοξικότητα και σκούρο χρώμα (Cabrera κ.ά., 1996).

Η απόρριψη ανεπεξέργαστων ή μερικώς επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων ελαιοτριβείου σε υδατικά συστήματα μπορεί να οδηγήσει σε ταχεία αύξηση του BOD και του COD με αποτέλεσμα διαταραχές στην ισορροπία ολόκληρων οικοσυστημάτων (LIFEFocus, 2010). Τα ΑΕ, ακόμη και πολύ αραιωμένα, έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην υδρόβια πανίδα και την οικολογική κατάσταση των ποτάμιων οικοσυστημάτων. Οι τοξικές επιδράσεις των αποβλήτων και του πολυφαινολικού τους κλάσματος στους υδρόβιους οργανισμούς, τα βακτήρια και τις ζύμες και στη βλάστηση των σπόρων έχουν κατά καιρούς μελετηθεί και αποδειχθεί και είναι πλέον καλά τεκμηριωμένες (Kapellakis κ.ά., 2008). Οι φαινόλες μπορούν να έχουν άμεση επίδραση σε πολλά είδη ψαριών. Για παράδειγμα το είδος *Gambusiaaffinis* και το καρκινοειδές *Daphniamagna* υφίστανται σοβαρή τοξική προσβολή από τα παράγωγα φαινόλης (40 mg/L) μετά από 15-λεπτη έκθεση. Χαρακτηριστικό είναι ότι αυτή η συγκέντρωση (40 mg/L) μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη 1 L αποβλήτων, σε 100.000 λίτρα νερού (Stamatakis, 2010).

Επιπλέον, το πολύ υψηλό BOD<sub>5</sub> και COD, το οποίο δεν μπορεί να μειωθεί σε κατάλληλα επίπεδα ούτε με αναερόβια χώνευση, αποτελεί άλλη μία απειλή για τους αποδέκτες (LIFEFocus, 2010). Πρόσθετοι προβληματισμοί προκαλούνται από τις υψηλές συγκεντρώσεις φωσφόρου στα απόβλητα, οι οποίες είναι δυνατόν να προακλέσουν φαινόμενα ευτροφισμού σε υδατικά συστήματα. Τα απόβλητα, μπορεί να είναι τοξικά για τα αναερόβια βακτήρια, και μπορεί να προκαλέσουν αναστολή της μικροβιακής δραστηριότητας σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας βιολογικού καθαρισμού (Karaouzas κ.ά., 2011).

Τα ΑΕ έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζουν τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του εδάφους καθώς και της μικροβιακής του κοινότητας, ενώ αρκετές μελέτες έχουν αποδείξει τις φυτοτοξικές τους επιδράσεις και την αντιμικροβιακή τους δράση.

Η διασπορά στο έδαφος και η επεξεργασία σε δεξαμενές εξάτμισης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε προβλήματα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων καθώς μελέτες έχουν δείξει ότι η οι φαινολικές ουσίες μπορεί να φθάσουν ακόμα και στα υπόγεια ύδατα. Κατά τη διάρκεια παραμονής των αποβλήτων στη δεξαμενή εξάτμισης, μπορεί να διαρρεύσουν φαινολικές ουσίες προς τα κάτω σε βαθύτερους ορίζοντες και πλευρικά, μακριά από την αρχική θέση, μέσα από τις διαπερατές στρώσεις του υπεδάφους (Shabou κ.ά., 2009).

Άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από τα ΑΕ είναι (LIFEFocus, 2010, Stamatakis, 2010, Kapellakis κ.ά., 2008, NairandMarkham, 2008):

- Τα λιπίδια, τα οποία παράγουν μία αδιαπέραστη στρώση στην επιφάνεια των ποταμών, τις όχθες τους και τις γύρω γεωργικές εκτάσεις η οποία εμποδίζει το φως του ήλιου και το οξυγόνο να φτάσουν στους μικροοργανισμούς, πράγμα που οδηγεί σε μειωμένη φυτική ανάπτυξη στα εδάφη της όχθης του ποταμού και επακόλουθα σε διάβρωση του εδάφους,

- Η υψηλή αναλογία C:N (άνθρακα:αζώτου) και το χαμηλό pH των ΑΕ είναι γνωστό ότι προκαλούν ακινητοποίηση του αζώτου στο έδαφος,
- Οξέα, ανόργανα και οργανικά, μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς την ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων του εδάφους που είναι μέτρο της γονιμότητας των εδαφών,
- Δυσάρεστες, και σε μεγάλες αποστάσεις, οσμές μπορεί να δημιουργηθούν από τη ζύμωση του αποβλήτων που απορρίπτονται στο φυσικό περιβάλλον, καθώς εκπέμπεται μεθάνιο και άλλα οσμηρά αέρια, όπως υδρόθειο,
- Χρώση των φυσικών υδάτων. Η αλλαγή του χρώματος των φυσικών υδάτων μπορεί να αποδοθεί στην οξείδωση και μετέπειτα πολυμερισμό των τανινών προς παραγωγή σκουρόχρωμων πολυφαινολών, οι οποίες είναι δύσκολο να απομακρυνθούν.

### 2.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Το έδαφος είναι ένας ζωντανός και δυναμικός πόρος, ο οποίος χρειάζεται τις ελάχιστες και τις κατάλληλες συνθήκες για να φέρει σε πέρας τις απαραίτητες λειτουργίες για τη διατήρησή του, για την παραγωγή υλικών ανάπτυξης και για την υποστήριξη της ποιότητας του περιβάλλοντος (Doran και Parkin, 1996). Χαρακτηρίζεται από διαφορετικές ιδιότητες, οι οποίες προσδιορίζουν την ποιότητά του και οι οποίες μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τους διάφορους παράγοντες, όπως το κλίμα, το μητρικό υλικό, τους μικροοργανισμούς, τις ανθρώπινες γεωργικές πρακτικές, κ.α.

Η έννοια της ποιότητας του εδάφους εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, και ο πρώτος επίσημος ορισμός όπως προτάθηκε το 1997 (Karlen κ.ά., 1997) είναι : “ποιότητα δάφους είναι η ικανότητα λειτουργίας ενός συγκεκριμένου τύπου εδάφους, στα φυσικά ή ελεγχόμενα όρια του οικοσυστήματος, για τη διατήρηση της παραγωγικότητας των φυτών και των ζώων, τη διατήρηση ή βελτίωση της ποιότητας του νερού και του αέρα, και την υποστήριξη της υγείας και της κατοίκησης του ανθρώπου”.

Σύμφωνα με τη Θεματική Στρατηγική για την Προστασία του Εδάφους (COM 2006) όλες οι δράσεις και τα μέσα που χρησιμοποιούνται/εφαρμόζονται στο έδαφος θα πρέπει να είναι προσανατολισμένα στη διασφάλιση της αειφόρου χρήσης του εδάφους. Στο πλαίσιο αυτό, η Επιτροπή θεωρεί ότι “χρειάζεται ολοκληρωμένη στρατηγική της ΕΕ για την προστασία του εδάφους. Η στρατηγική αυτή θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις διαφορετικές λειτουργίες που μπορούν να εκτελέσουν τα εδάφη, τη μεταβλητότητα και πολυπλοκότητά τους και το εύρος των διαφόρων διεργασιών υποβάθμισης τις οποίες μπορεί να υφίστανται, λαμβάνοντας επίσης υπόψη και τις κοινωνικο-οικονομικές πτυχές.

Ο γενικός στόχος είναι η προστασία και η αειφόρος χρήση του εδάφους με βάση τις ακόλουθες κατευθυντήριες αρχές:

- Πρόληψη της περαιτέρω υποβάθμισης του εδάφους και διατήρηση των λειτουργιών του:
  - ✓ Όταν το έδαφος χρησιμοποιείται και οι λειτουργίες του αξιοποιούνται, πρέπει να αναληφθεί δράση για τη χρήση του εδάφους και τα διαχειριστικά σχέδια, και
  - ✓ Όταν το έδαφος λειτουργεί ως αποδέκτης των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων ή των περιβαλλοντικών φαινομένων, η δράση πρέπει να αναληφθεί στην πηγή.
- Αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών σε τέτοιο βαθμό λειτουργικότητας ώστε να εξυπηρετούνται τρέχουσες και μελλοντικές χρήσεις, ενώ παράλληλα θα συνεκτιμώνται οι επιπτώσεις του κόστους της αποκατάστασης του εδάφους”.

Αφού εξέτασε διάφορες επιλογές, η Επιτροπή προτείνει μια Οδηγία Πλαίσιο ως το καλύτερο μέσο για να εξασφαλισθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την προστασία του εδάφους, ενώ παράλληλα σέβεται πλήρως τις δευτερεύουσες επιλογές. Τα Κράτη Μέλη θα πρέπει να λάβουν συγκεκριμένα μέτρα για την αντιμετώπιση των εδαφικών απειλών, αλλά η Οδηγία αφήνει μεγάλη ελευθερία στο πώς να εφαρμόσουν αυτή την απαίτηση. Αυτό σημαίνει ότι η αποδοχή του κινδύνου, το επίπεδο της φιλοδοξίας όσον αφορά τους στόχους που πρέπει να επιτευχθούν και η επιλογή των μέτρων για την επίτευξη των στόχων αυτών επαφίεται στα Κράτη Μέλη. Σύμφωνα με την Οδηγία, ορισμένες απειλές κατά του εδάφους, όπως η διάβρωση, η μείωση της οργανικής ουσίας, η ρύπανση, που μπορεί να εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές κινδύνου, πρέπει να προσδιοριστούν.

Ειδικά για τη ρύπανση του εδάφους, μια εθνική ή περιφερειακή προσέγγιση προτείνεται ως πιο κατάλληλη. Η πρόταση καθορίζει ένα πλαίσιο για τη θέσπιση, στο κατάλληλο γεωγραφικό και διοικητικό επίπεδο, σχεδίων προς αντιμετώπιση των απειλών εκεί όπου εμφανίζονται. Όσον αφορά τη διαχείριση της ρύπανσης, εξετάζεται μια προσέγγιση που βασίζεται στο ακόλουθο Σχεδιάγραμμα (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Διαχείριση της ρύπανσης του εδάφους

Σύμφωνα με την Οδηγία, η διαχείριση των ρυπασμένων περιοχών πρέπει να υλοποιηθεί με βάση τις απαιτήσεις:

- Αναγνώριση και καταγραφή των ρυπασμένων περιοχών.
- Θέσπιση εθνικής στρατηγικής αποκατάστασης.
- Πρόληψη της ρύπανσης μέσω απαίτησης για τον περιορισμό της εισόδου επικίνδυνων ουσιών στο έδαφος.

Σε όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου, ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν ειδικοί νόμοι ή όχι, η ανεξέλεγκτη διάθεση ΑΕ δεν επιτρέπεται. Έτσι, πριν από τη διάθεση στο έδαφος, τα ΑΕ θα πρέπει να υφίστανται προ-επεξεργασία σύμφωνα με τις οδηγίες που περιγράφονται στο εθνικό νομοθετικό πλαίσιο. Εάν δεν υπάρχει νομοθετικό πλαίσιο, τότε ένα ελάχιστο απαιτούμενο μέτρο θα μπορούσε να είναι η επεξεργασία των αποβλήτων με άσβεστο ώστε να αυξηθεί το pH, να μειωθεί το οργανικό φορτίο και τα ολικά στερεά.

Προκειμένου να επιτευχθεί συνεχής και αποτελεσματικός έλεγχος των περιοχών διάθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείων, όσον αφορά το έδαφος, απαιτείται :

- Καταγραφή των περιοχών διάθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείων και εισαγωγή τους σε μία εθνική βάση δεδομένων.
- Χαρακτηρισμός των περιοχών διάθεσης-Εκτίμηση κινδύνου.

- Αξιολόγηση του επιπέδου κινδύνου.
- Καθορισμός των όρων διάθεσης των ΑΕ στο έδαφος.
- Ανάπτυξη σχεδίου παρακολούθησης της ποιότητας του εδάφους στις περιοχές διάθεσης (π.χ. σχέδιο και συχνότητα δειγματοληψιών, υπεύθυνοι φορείς αξιολόγησης του επιπέδου κινδύνου, σχέδιο αντιμετώπισης φαινομένων ρύπανσης, κ.α.).

### **2.3.1 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΑΕ**

Είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι περιοχές διάθεσης ΑΕ και να καταγραφούν σε εθνική απογραφή καθώς οι περισσότερες από αυτές αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για το έδαφος και το περιβάλλον της περιοχής γενικότερα. Αν και τοπικό πρόβλημα, εν τούτοις ο πολύ μεγάλος αριθμός των ελαιοτριβείων καθιστά το πρόβλημα σημαντικό. Ο εθνικός αυτός κατάλογος θα περιέχει όλες τις περιοχές με άδεια διάθεσης και όσο το δυνατόν περισσότερες μη-αδειοδοτημένες. Τοπικοί κατάλογοι θα πρέπει να δημιουργηθούν ως ένα πρώτο βήμα υπό την ευθύνη των τοπικών ή περιφερειακών αρχών, οι οποίοι στη συνέχεια θα ενσωματωθούν σε ένα εθνικό κατάλογο υπό την ευθύνη των κυβερνητικών φορέων. Προτείνεται οπωσδήποτε χαρτογράφηση με χρήση Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (GIS) των περιοχών διάθεσης και η δημιουργία μιας ψηφιακής βάσης δεδομένων.

#### *2.3.1.1 Χαρακτηρισμός των περιοχών διάθεσης-Εκτίμηση Κινδύνου*

Ως επόμενο βήμα, οι κυβερνητικές και τοπικές αρχές θα πρέπει να προχωρήσουν στον πλήρη και λεπτομερή χαρακτηρισμό των περιοχών διάθεσης και την εκπόνηση μελετών εκτίμησης κινδύνου.

Οι καταγεγραμμένοι χώροι διάθεσης ΑΕ θα πρέπει να χαρακτηριστούν λαμβάνοντας υπόψη την τοποθεσία, την υδρογεωλογία, τη φυσιογραφία, τη γεωμορφολογία, τη χρήση της γης, τη δομή του εδάφους, την υφή, την υδατοπερατότητα, το συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (κορεσμένη ή ακόρεστη), το πορώδες, την παρουσία και το βάθος των αδιαπέραστων στρωμάτων του εδάφους. Επιπλέον, τα δεδομένα που θα συλλεχθούν μπορεί να περιλαμβάνουν, το ιστορικό της τοποθεσίας, την έκταση και το είδος των ρύπων που μπορεί να υπάρχουν, τις υδρογεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες για την ευρύτερη περιοχή, τη γνωστή/αναμενόμενη παρουσία και συμπεριφορά των αποδεκτών, αποτελέσματα δειγματοληψιών εδάφους και υπόγειων υδάτων: σύγκριση με γενικές κατευθυντήριες τιμές ή πρότυπα ποιότητας, μοντελοποίηση, για συγκεκριμένο τόπο, της πορείας, μεταφοράς και έκθεσης και σύγκριση με τοξικολογικές τιμές, καθώς και άλλες παραμέτρους που μπορούν να θεωρηθούν αναγκαίες για τον πλήρη χαρακτηρισμό της περιοχής. Ένας τέτοιος χαρακτηρισμός θα επιτρέψει λεπτομερή και ακριβή διεξαγωγή μελέτης αξιολόγησης κινδύνου στην περιοχή και τον εντοπισμό των περιοχών που αποτελούν κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου και το περιβάλλον.



Γενικά, για να υπάρχει κίνδυνος πρέπει να υπάρχει μια πηγή (ή πηγή κινδύνου ή πίεση), μια διαδρομή και ένας αποδέκτης (ή στόχος). Αυτή είναι η βάση για το εννοιολογικό μοντέλο Πηγή-Διαδρομή-Αποδέκτης (Π-Δ-Υ) για την περιβαλλοντική διαχείριση. Ένα εννοιολογικό μοντέλο παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την οριοθέτηση του πεδίου εφαρμογής οποιασδήποτε έρευνας καθώς εντοπίζει τις περιοχές που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο κίνδυνο για το περιβάλλον και τον άνθρωπο, αλλά και προσδιορίζει τις σχέσεις μεταξύ ΠΔΥ που συνδέουν τον υψηλότερο κίνδυνο με αυτά (Daly, 2004). Έτσι, οι λεπτομερείς πληροφορίες που λαμβάνονται με την αξιολόγηση θα βοηθήσουν περαιτέρω στην απόφαση σχετικά με την έκταση των μέτρων, τα οποία απαιτούνται για τη διαχείριση του κινδύνου, που μπορεί να περιλαμβάνει διακοπή της διαδρομής ή απομάκρυνση της πηγής ή παρακολούθηση του αποδέκτη.

Ενδεικτικά, μια μελέτη αξιολόγησης κινδύνου θα μπορούσε να περιλαμβάνει:

- Προκαταρκτική έρευνα (μελέτη γραφείου, αναγνώριση χώρου και μερικές φορές περιορισμένη διερευνητική επιθεώρηση). Ο στόχος της παρούσας προκαταρκτικής φάσης είναι να εκτιμηθεί αν έχουν πραγματοποιηθεί ενδεχομένως δραστηριότητες στην τοποθεσία οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση, εάν εικάζεται ότι υπάρχει ρύπανση του εδάφους και/ή των υδάτων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να επιβεβαιωθεί η ύπαρξη της ρύπανσης. Εν ολίγοις, αυτή η φάση επικεντρώνεται στην ταυτοποίηση του κινδύνου.
- Λεπτομερή έρευνα. Οι στόχοι στο κεντρικό στάδιο διερεύνησης της τοποθεσίας είναι (α) να καθοριστεί η έκταση και ο βαθμός της ρύπανσης, (β) να αξιολογηθούν οι κίνδυνοι που συνδέονται με αναγνωρισμένες πηγές κινδύνου και αποδέκτες και (γ) να προσδιοριστεί η ανάγκη για αποκατάσταση, προκειμένου να μειωθούν ή να εξαιρεθούν οι κίνδυνοι για τους ρυπασμένους και άλλους πιθανούς αποδέκτες.
- Συμπληρωματικές ή έρευνες σκοπιμότητας για να καθοριστεί καλύτερα η ανάγκη και το είδος των διορθωτικών μέτρων ή της παρακολούθησης. Ο στόχος μπορεί να είναι η αξιολόγηση της σκοπιμότητας των διαφόρων τεχνικών αποκατάστασης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει πιο λεπτομερή φυσικό και χημικό χαρακτηρισμό των εδαφών και των υπόγειων υδάτων. Συμπληρωματικές έρευνες μπορούν επίσης να σχεδιαστούν ώστε να βελτιώσουν την κατανόηση της φύσης, της έκτασης και της συμπεριφοράς των ρύπων.

Στην περίπτωση των ΑΕ, η αξιολόγηση των κινδύνων δεν θα πρέπει να περιορίζεται στα τοξικά συστατικά των αποβλήτων, όπως οι πολυφαινόλες, οι οποίες μπορούν πράγματι να αποτελέσουν απειλή για την υγεία ανθρώπων και ζώων, αλλά να εξεταστεί επίσης η ενδεχόμενη προοδευτική υποβάθμιση των εδαφών λόγω της παρουσίας στον κατσίγαρο (ΑΕ) άλλων λιγότερο επικίνδυνων ή μη επικίνδυνων συστατικών, όπως θρεπτικά συστατικά και άλλα ανόργανα συστατικά των

αποβλήτων. Αυτός ο παράγοντας συχνά υποτιμάται και η πλειονότητα των μελετών εκτίμησης κινδύνου επικεντρώνεται στην τοξικότητα, η οποία μπορεί να προκληθεί στο έδαφος και στους ανθρώπους από τις πολυφαινόλες. Έτσι, αν προγραμματίζεται διάθεση στο έδαφος, το οργανικό φορτίο και οι τοξικές ουσίες (πολυφαινόλες) δεν θα πρέπει να είναι τα μονο ανησυχητικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων. Ειδική μέριμνα πρέπει να ληφθεί και για τα ανόργανα συστατικά (π.χ. K, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, P, Mg, Fe, Zn και άλλα), αφού οι πολύ υψηλές συγκεντρώσεις που απορρίπτονται στο έδαφος αλλάζουν δραστικά τα ποιοτικά του χαρακτηριστικά, ενώ οι συγκεντρώσεις τους στο έδαφος, καθώς και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους παραμένουν υψηλά ακόμη και πολλά χρόνια μετά από την τελευταία διάθεση. Για το σκοπό αυτό, συνιστάται η εκπόνηση μιας πλήρους φυσικοχημικής ανάλυσης του εδάφους και η αναγνώριση των οργανικών και των ανόργανων συστατικών του εδάφους. Προτείνεται επίσης ο προσδιορισμός της φυτοτοξικότητας.

Ο κίνδυνος για κάθε πιθανή Διαδρομή θεωρείται ότι είναι ένας συνδυασμός της πιθανότητας ένας κίνδυνος θα φτάσει το στόχο (π.χ. υψηλή συγκέντρωση πολυφαινολών στο έδαφος λόγω διάθεσης ΑΕ), και του μεγέθους της βλάβης, αν ο στόχος εκτεθεί στον κίνδυνο (π.χ. φυτοτοξικότητα). Η πιθανότητα να φτάσει ένας ρυπαντικός παράγοντας στο στόχο σε επαρκή συγκέντρωση ώστε να προκαλέσει βλάβη μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά σύμφωνα με την κλίμακα: υψηλή (βέβαιο ή σχεδόν βέβαιο ότι θα συμβεί), μέτρια (λογικά πιθανό ότι θα συμβεί), χαμηλή (σπάνια πιθανότητα να συμβεί) ή αμελητέα (καμία πιθανότητα να συμβεί). Το μέγεθος της βλάβης εκτιμάται ως: σοβαρό (ανθρώπινος θάνατος ή ανεπανόρθωτη βλάβη στο οικοσύστημα), μέτριο (π.χ. ανθρώπινη ασθένεια ή τραυματισμός, αρνητικές επιπτώσεις στη λειτουργία του οικοσυστήματος), ήπιο (μικρή ανθρώπινη ασθένεια ή τραυματισμός, μικρές αλλαγές στο οικοσύστημα) ή αμελητέο (ενόχληση και όχι βλάβη στον άνθρωπο και το οικοσύστημα). Το ποιοτικό επίπεδο του κινδύνου που συνδέεται με κάθε διαδρομή ρύπου προσδιορίζεται στη συνέχεια από τον συνδυασμό της προαναφερθείσας πιθανότητας με το μέγεθος της βλάβης. Έτσι, αφού προσδιοριστούν όλες οι κρίσιμες παράμετροι ο κίνδυνος θα πρέπει να αξιολογηθεί σύμφωνα με τον πίνακα Πίνακας 3 (Modis κ.ά., 2008).

	Μέγεθος			
Πιθανότητα	Σοβαρό	Μέτριο	Ήπιο	Αμελητέο
Υψηλή	Υψηλό	Υψηλό	Μέτριο/Χαμηλό	Σχεδόν μηδενικό
Μεσαία	Υψηλό	Μεσαίο	Χαμηλό	Σχεδόν μηδενικό
Χαμηλή	Υψηλό/Μέτριο	Μέτριο/Χαμηλό	Χαμηλό	Σχεδόν μηδενικό
Αμελητέα	Υψηλό/Μέτριο/Χαμηλό	Μέτριο/Χαμηλό	Χαμηλό	Σχεδόν μηδενικό

**Πίνακας 2.3** Αξιολόγηση εκτίμησης κινδύνου

### 2.3.1.2 Αξιολόγηση του επιπέδου κινδύνου

Το τρίτο βήμα είναι να αξιολογηθεί το επίπεδο κινδύνου των ύποπτων περιοχών και να αποκλειστεί η περαιτέρω μελλοντική διάθεση ΑΕ σε όλες τις περιοχές που χαρακτηρίζονται *υψηλού κινδύνου*. Για αυτές τις περιοχές θα πρέπει να αναπτυχθεί και να εφαρμοστεί άμεσα ένα σχέδιο αποκατάστασης. Για τις περιοχές με *μέτριο κίνδυνο*, συνιστάται οπωσδήποτε η περαιτέρω εκτίμηση του είδους της απειλής και της πιθανής έκτασης προκειμένου να αποφασιστούν οι όροι διάθεσης των αποβλήτων ή ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενεργειών αποκατάστασης. Στις περιπτώσεις αυτές, οι αποφάσεις θα πρέπει να λαμβάνονται με γνώμονα τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της μελέτης αξιολόγησης των κινδύνων όπως προτείνεται. Για τις περιοχές με *χαμηλό ή σχεδόν μηδενικό κίνδυνο*, θα πρέπει να αναπτυχθεί ένα σχέδιο διαχείρισης για την ασφαλή διάθεση των αποβλήτων και να εφαρμοστεί υπό την εποπτεία των τοπικών αρχών και των αρμόδιων κυβερνητικών φορέων.

#### *2.3.1.3 Καθορισμός των όρων διάθεσης των ΑΕ στο έδαφος*

Είναι πολύ πιθανό, ορισμένες περιοχές, αν και διατρέχουν χαμηλό ή αμελητέο κίνδυνο ρύπανσης/υποβάθμισης, να είναι ακατάλληλοι να δεχτούν, λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών τους, διάθεση ΑΕ απευθείας στο έδαφος. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής διάθεση των ΑΕ, τα ειδικά χαρακτηριστικά του εδάφους και της περιοχής πρέπει να ληφθούν υπόψη σε συνδυασμό με τις βιοκλιματικές συνθήκες και τις πρακτικές διαχείρισης. Ο τελικός στόχος πρέπει να είναι η διασπορά των ΑΕ στο έδαφος να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε αυτό είτε να φιλτράρει τα ενδεχόμενα τοξικά στοιχεία αποτελεσματικά, είτε να τα απορροφήσει ηλεκτροχημικά ή να τα αποσυνθέσει έτσι ώστε τελικά να διέρχεται μέσα από τη μάζα του εδάφους ένα καθαρό διάλυμα. Το έδαφος δεν πρέπει να επιβαρύνεται με ανόργανα συστατικά και πρέπει να διατηρεί όλες τις λειτουργίες του και την ικανότητα απορρόφησής του ώστε να εξασφαλιστεί ένα βιώσιμο σύστημα.

#### *2.3.1.4 Ανάπτυξη σχεδίου παρακολούθησης της ποιότητας του εδάφους στις περιοχές διάθεσης*

Οι αρμόδιες αρχές θα πρέπει να καθορίσουν μια στρατηγική περιοδικής παρακολούθησης των περιοχών διάθεσης αποβλήτων, προκειμένου να είναι σε θέση να προσδιορίσουν τους πιθανούς κινδύνους ανά πάσα στιγμή. Το σχέδιο αυτό δράσης θα πρέπει να περιλαμβάνει σχέδια και συχνότητα δειγματοληψιών, παραμέτρους εδάφους προς παρακολούθηση, όρια παραμέτρων για την αξιολόγηση πιθανού κινδύνου. Θα πρέπει επίσης να καθορίζονται σαφώς οι υπεύθυνοι φορείς για την έλεγχο και την εκτέλεση του σχεδίου. Κρίνεται επίσης αποτελεσματική η δημιουργία ειδικού καταλόγου (βάση δεδομένων) για κάθε χώρο διάθεσης η οποία θα ενημερώνεται σε ετήσια βάση. Αυτό θα διευκολύνει την άμεση αναγνώριση των επικίνδυνων περιοχών, και θα παρέχει στοιχεία για το ιστορικό της περιοχής, τα συγκεκριμένα τοπικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τις ποσότητες των αποβλήτων που έχουν διατεθεί κάθε χρόνο, τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των αποβλήτων και του εδάφους και οποιαδήποτε άλλα δεδομένα

θεωρούνται χρήσιμα και αναγκαία για την αποτελεσματική προστασία της ποιότητας του εδάφους και της λειτουργίας του.

Ιδιαίτερα αποτελεσματικό μέτρο για την παρακολούθηση της ποιότητας του περιβάλλοντος είναι η θέσπιση δεικτών ποιότητας περιβάλλοντος. Στην περίπτωση του εδάφους αυτό μεταφράζεται στον προσδιορισμό παραμέτρων κατάλληλων να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες ποιότητας. Με τον τρόπο αυτό, οι αρχές θα είναι σε θέση, με την εκτέλεση μικρού σχετικά αριθμού χημικών αναλύσεων να έχουν εκτίμηση του κινδύνου για το έδαφος. Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού Έργου LIFE PROSODOL “Στρατηγικές για την προστασία και τη βελτίωση του εδάφους από τη διάθεση αποβλήτων ελαιοτριβείων στις Μεσογειακές χώρες” προσδιορίστηκε μία σειρά τέτοιων δεικτών, οι οποίοι, μέσα από συνεχή παρακολούθηση περιοχών διάθεσης αποβλήτων, τεκμηριώθηκαν και τελικά προτάθηκαν. Πρόκειται για 8 εδαφικές παραμέτρους: την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την οργανική ουσία, τις πολυφαινόλες, το ολικό άζωτο, το διαθέσιμο φώσφορο, το ανταλλάξιμο κάλιο, τον διαθέσιμο σίδηρο και το pH.

Αν, για οποιοδήποτε λόγο, παρατηρηθεί ότι κάποια περιοχή διάθεσης διατρέχει κίνδυνο υποβάθμισης του εδάφους, τότε, μετά από αξιολόγηση του επιπέδου κινδύνου, μπορούν να προταθούν αλλαγές στα σχέδια διαχείρισης και παρακολούθησης της περιοχής ή οι αρχές μπορούν να απαιτήσουν την ανάπτυξη και την εφαρμογή μιας στρατηγικής αποκατάστασης.

#### *2.3.1.5 Παρακολούθηση των δεικτών του εδάφους-Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων*

Λόγω της απλότητάς τους και της ευκολίας στην ανάλυση, οι προτεινόμενοι δείκτες ποιότητας εδάφους θα πρέπει να παρακολουθούνται μία φορά το χρόνο και κατά προτίμηση πριν από τη διάθεση ΑΕ. Αυτό απαιτεί ετήσια δειγματοληψία εδάφους και χημική ανάλυση στο πλαίσιο μιας καθορισμένης στρατηγικής ελέγχου την οποία οι χρήστες γης ή οι ιδιοκτήτες ελαιοτριβείων πρέπει να ακολουθήσουν. Η δειγματοληψία και η προσκόμιση των εδαφικών δειγμάτων σε εργαστήριο θα πρέπει να είναι υπό την ευθύνη του ιδιοκτήτη της γης. Τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης θα πρέπει να αξιολογούνται από ειδικό (π.χ. γεωπόνο) και θα πρέπει να υποβάλλεται τεχνική έκθεση στις αρμόδιες αρχές. Η έκθεση, εκτός από τα αξιολογημένα αποτελέσματα της ανάλυσης του εδάφους και των αποβλήτων, θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει μια λεπτομερή περιγραφή του σχεδίου διάθεσης των αποβλήτων (ποσότητα, περίοδο, χρήση εξοπλισμού). Οι αρμόδιες αρχές για τη συλλογή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα μπορούσαν να είναι είτε τοπικές είτε περιφερειακές, ανάλογα με τις αποφάσεις που ελήφθησαν από τα Κράτη Μέλη.

Η αξιολόγηση των δεικτών ποιότητας του εδάφους μέσα σε μια συγκεκριμένη οικολογική ζώνη απαιτεί:

- Κατεύθυνση της μεταβολής – θετική ή αρνητική, αύξηση ή μείωση, κλπ

- Μέγεθος της μεταβολής – μεταβολή επί τοις εκατό πάνω από τα ΠΠΠ ή τις βασικές τιμές της περιοχής.
- Χρόνος μεταβολής: μήνες, χρόνια.
- Έκταση της μεταβολής – ποσοστό της περιοχής που παρακολουθείται, δηλαδή τι ποσοστό της περιοχής αυτής έχει αλλάξει σε σχέση με τον επιλεγμένο δείκτη κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

Ανάλογα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, οι αρμόδιες αρχές μπορούν να επιτρέψουν ή να απαγορέψουν τη διάθεση ΑΕ, ενώ σε περίπτωση συνέχισης της διάθεσης στο έδαφος, η μέγιστη ποσότητα θα πρέπει να καθοριστεί λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο κινδύνου της περιοχής.

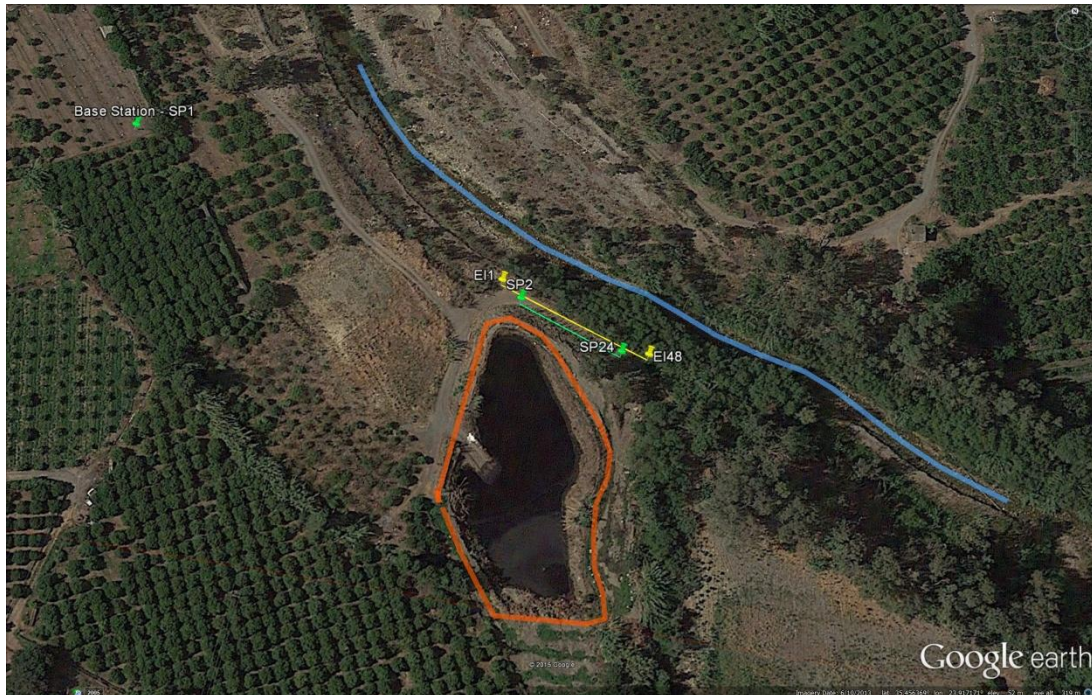
Δείκτης	Φυσιολογική τιμή	Υψηλή- Πολύ υψηλή τιμή	Υπερβολική τιμή
Οργανική Ουσία, %	3.4-5.0	(>) 5.0	
Πολυφαινόλες, mg/kg	(<) 40		
Ηλεκτρική Αγωγιμότητα, mS/cm	(<) 2.0	2.0 – 4.0	(>) 4.0
Ολικό Άζωτο, %	(<) 0.3	(>) 0.3	
Διαθέσιμος Φώσφορος, mg/kg	12-28	40-50	
Ανταλλάξιμο Κάλιο, cmol/kg	(μ) 1.2	1.2-2.2	(>) 2.2
Διαθέσιμος Σίδηρος, mg/kg	(<) 50	50-100	(>) 100
pH	6-8		

(<) μικρότερο από; (>)μεγαλύτερο από

**Πίνακας 2.4** Όρια τιμών για τους οκτώ δείκτες ποιότητας εδάφους.

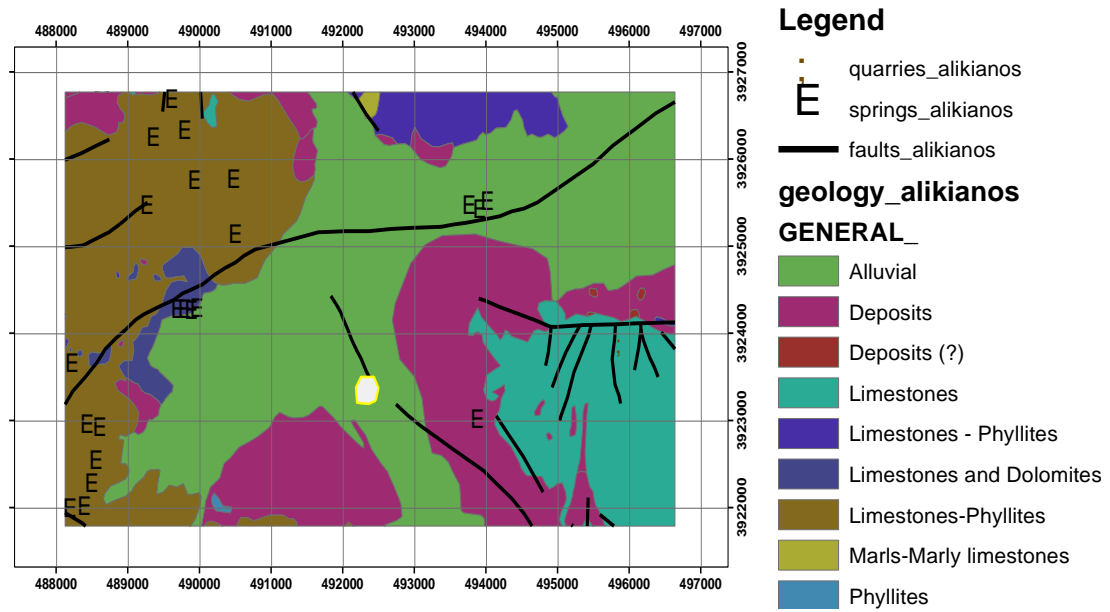
### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένας χώρος διάθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείων μέσα σε μια ιδιωτική περιουσία που βρίσκεται έξω από το χωριό Αλικιανός, περίπου 13 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης των Χανίων στο δυτικό τμήμα του νησιού για να αντλήσουμε τις ιδιότητες του υπεδάφους που σχετίζονται με τα απόβλητα ελαιοτριβείων και να χαρτογραφήσουμε την έκταση της ρύπανσης που προκαλείται από τα απόβλητα αυτά σε χώρο δοκιμών στη δυτική Κρήτη.



**Σχήμα 3.1** Περιοχή μελέτης. Με μπλε γραμμή απεικονίζονται οι όχθες του ποταμού Κερίτη. Με πράσινη και κίτρινη γραμμή απεικονίζονται κάποια προφίλ γεωφυσικών μετρήσεων. Με πορτοκαλή γραμμή απεικονίζονται τα όρια της δεξαμενής απόθεσης αποβλήτων.

Η περιοχή αποτελείται από προσχώσεις με μεταβλητή υδραυλική διαπερατότητα, κυρίως χαλαρό υλικό αμμώδη-πηλό, κοκκινόχωμα με στρογγυλεμένα και γωνιακά χαλίκια σε μικρές εσωτερικές λεκάνες και ελυμια υλικό μανδύα.



Σχήμα 3.2 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΜΕΘΟΔΟΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης είναι από τις περισσότερο διαδεδομένες γεωφυσικές μεθόδους και σκοπό έχει τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους και έμμεσα καθορίζονται οι δομές ενδιαφέροντος του υπεδάφους μιας και διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Οι ηλεκτρικές γεωφυσικές διασκοπήσεις έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία για την επίλυση πολλών γεωλογικών προβλημάτων, όπως π.χ. χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων (Vandenberghe 1982; Olesen et al. 1992; Griffiths και Barker 1993; Çaglar και Duvarci 2001; Atzemoglou et al. 2003), εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων (Flathe 1955; Van Dam 1976; Rijs et al. 1977; Aubert et al. 1984; Olayinka και Barker 1990; Dahlin και Owen 1998), ανίχνευση γεωθερμικών πεδίων (Wright et al. 1985; Thanassoulas και Tsokas 1987), εντοπισμός ρυπασμένων υπογείων υδάτων (Rodgers και Kean 1980; Fikose et al. 2002; Van et al. 1992) και διαρροών αποβλήτων (Van et al. 1992), εύρεση στόχων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Aitken 1974; Hesse et al. 1986; Tsokas και Roka 1987; Orlando et al. 1987; Szymanski και Dittmer 1992; Papadopoulou et al. 2006a), στην εύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες έργων υποδομής (Habberjam 1975; Smith 1986; Butler και Llopis 1990; Dahlin et al. 1994).

### 4.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

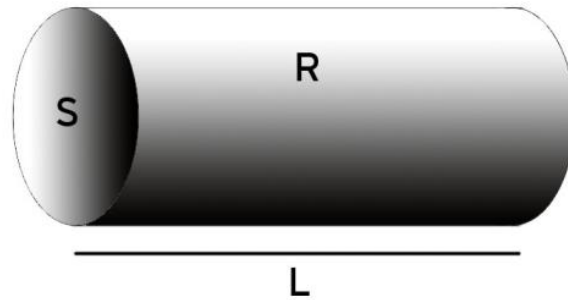
Η κύρια παράμετρος που υπολογίζεται κατά την ηλεκτρική μέθοδο διασκόπησης είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ( $\rho$ ) εκφράζει τη δυσκολία με την οποία ένα υλικό συγκεκριμένων διαστάσεων άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Έστω σώμα κυλινδρικού σχήματος μήκους  $L$  και εμβαδού διατομής  $S$  με αντίσταση  $R$  (Σχήμα 4.1). Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού δίνεται από τη σχέση

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (4.1)$$

όπου

- $R$  τιμή αντίστασης (ohm)
- $L$  μήκος σε μέτρα (m)
- $S$  εμβαδό της διατομής σε τετραγωνικά μέτρα (m<sup>2</sup>)
- $\rho$  ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ohm-m)





**Σχήμα 4.1** Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλίνδρου μήκους  $L$ , διατομής  $S$  και ηλεκτρικής αντίστασης  $R$ .

Η αντίσταση,  $\rho$ , εξαρτάται γενικά από τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, τη χημική σύσταση του νερού και τη συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων σε αυτό, το μέγεθος των πόρων των σχηματισμών, τις πιθανές διαρρήξεις και διακλάσεις, τη θερμοκρασία και την πίεση (Tagg 1964; McNeil 1980). Οι παράγοντες που επηρεάζουν και κατά συνέπεια ρυθμίζουν την ηλεκτρολυτική αγωγή, άρα και την αντίσταση του υπεδάφους είναι ευμετάβλητοι αφού εξαρτώνται από το ποσοστό και τη σύσταση του νερού που κυκλοφορεί στο πορώδες (πρωτογενές ή δευτερογενές) των πετρωμάτων του υπεδάφους.

Το πλήθος των παραγόντων, αλλά και η συχνή μεταβολή κάποιων από αυτούς, έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης, ακόμα και μέσα στον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία έχουν μεγαλύτερο πορώδες και ενδεχομένως φιλοξενούν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν γενικά σχετικά χαμηλές αντιστάσεις. Τα συμπαγή πετρώματα έχουν ενδιάμεσες και μεγαλύτερες τιμές αντιστάσεων και η τελική τους τιμή εξαρτάται από τον βαθμό καταπόνησης τους (τεκτονισμός, αποσάθρωση κλπ) και το νερό που περιέχουν στο πρωτογενές αλλά και στο δευτερογενές πορώδες τους (Πίνακας 4.1).

ΥΛΙΚΟ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
ΑΕΡΑΣ	Άπειρη
ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ	$3 \times 10^{-1}$
ΓΑΛΗΝΙΤΗΣ	$2 \times 10^{-3}$
ΧΑΛΑΖΙΑΣ	$4 \times 10^{10}$ έως $2 \times 10^{14}$
ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	$1 \times 10^{12}$ έως $1 \times 10^{13}$
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	100 έως $1 \times 10^6$
ΓΑΒΡΟΣ	$1 \times 10^3$ έως $1 \times 10^6$
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	50 έως $1 \times 10^7$
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	1 έως $1 \times 10^8$
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	20 έως $1 \times 10^3$
ΔΟΛΟΜΙΤΗΣ	100 έως $10^4$
ΑΜΜΟΣ	1 έως 1.000
ΑΡΓΙΛΟΣ	1 έως 100
ΥΠΟΓΕΙΟ ΝΕΡΟ	0.5 έως 300
ΘΑΛΑΣΣΙΝΟ ΝΕΡΟ	0.2

Πίνακας 4.1 Τυπικές τιμές αντιστάσεων υλικών (Telfordetal. 1990).

## 4.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

### 4.2.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ – ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΑΠΟ ΣΗΜΕΙΑΚΗ ΠΗΓΗ

Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό της γης καθορίζεται από το νόμο του Ohm

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4.2)$$

όπου,

- $J$  είναι η πυκνότητα του ρεύματος (Amp/m<sup>2</sup>)
- $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα ( $1/\rho$ ) (Siemens/m)
- $E$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

Ως ένταση ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται η βαθμίδα του δυναμικού  $V$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4.3)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας ρεύματος  $J$  είναι μηδέν, όταν δεν υπάρχουν πηγές στο χώρο κάτι που ισχύει γενικά για τη γη, δηλαδή

$$\nabla J = 0 \quad (4.4)$$

Από τις σχέσεις (4.3) και (4.4) προκύπτει ότι

$$\nabla(-\sigma \nabla V) = 0 \quad (4.5)$$

η οποία μπορεί να εκφρασθεί ως

$$\nabla \sigma \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (4.6)$$

Η σχέση (4.6) είναι η εξίσωση Poisson που δείχνει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Σε περίπτωση ομογενούς γης το πρώτο μέρος της σχέσης (4.6) είναι μηδενικό καθώς  $\nabla \sigma = 0$ , οπότε στην περίπτωση αυτή καταλήγουμε στην εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 V = 0 \quad (4.7)$$

Εύκολα αποδεικνύεται στην ιδανική περίπτωση που υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 4.2), το δυναμικό σε απόσταση  $r$  δίνεται από την σχέση

$$V = \pm \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4.8)$$

Ανάλογα με την πολικότητα του ηλεκτροδίου, στην παραπάνω σχέση

- $I$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος,
- $r$  η απόσταση από την πηγή.



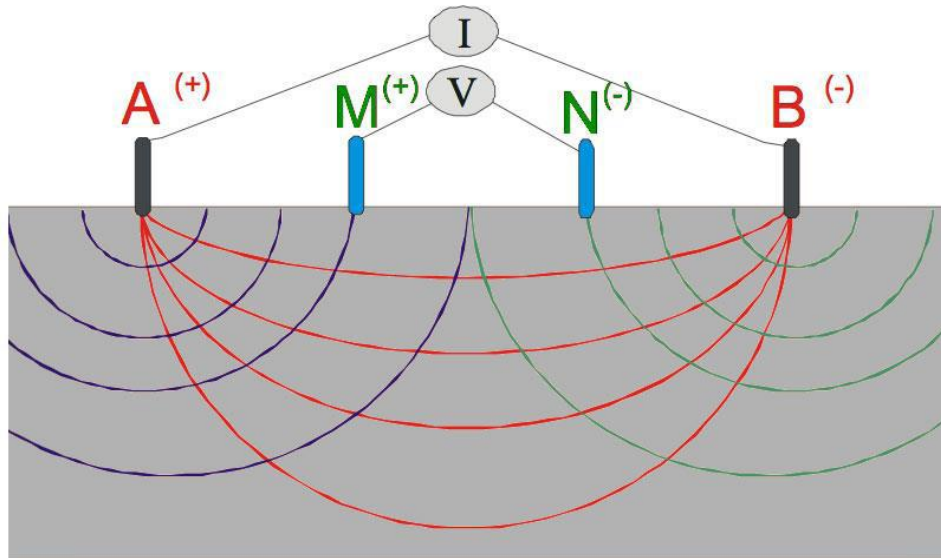
**Σχήμα 4.2.** Διάδοση ρεύματος από σημειακή πηγή στην επιφάνεια του εδάφους.

#### 4.2.2 ΧΡΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Η διαφορά δυναμικού  $V_{MN}$ , που θα μετρηθεί μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού  $M$  και  $N$  εξαιτίας του ρεύματος,  $I$ , που εισάγεται στο έδαφος από τα ηλεκτρόδια  $A$  και  $B$ , προκύπτει από τη σχέση (4.8) και είναι

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{Ip}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \quad (4.9)$$

όπου  $AM$ ,  $AN$  είναι οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων δυναμικού  $M$  και  $N$  από τον θετικό ηλεκτρικό πόλο  $A$  και  $BM$ ,  $BN$  οι αντίστοιχες αποστάσεις από τον αρνητικό ηλεκτρικό πόλο  $B$  (Σχήμα 4.3).



**Σχήμα 4.3** Βασική διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων για τη λήψη των γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (4.10)$$

Από τη σχέση (4.10), φαίνεται ότι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του εδάφους εξαρτάται από την διαφορά δυναμικού που προκαλεί η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα συγκεκριμένο μέσο και από την γεωμετρική θέση που διατάσσονται τα τέσσερα ηλεκτρόδια στον χώρο.

Η εξάρτηση αυτής της τιμής της αντίστασης σε σχέση με την γεωμετρική θέση των ηλεκτροδίων εκφράζεται με τον γεωμετρικό παράγοντα

$$K = \left( \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (4.11)$$

Στην περίπτωση που το μέσο είναι ομογενές, ο πολλαπλασιασμός του γεωμετρικού παράγοντα K με την τιμή του λόγου  $\Delta V_{MN}/I$ , θα είναι σταθερός και θα ισούται με την τιμή της πραγματικής αντίστασης του μέσου.

Στην περίπτωση ανομοιογενούς υλικού, όπως συμβαίνει κατά κανόνα σε πραγματικές συνθήκες, η ποσότητα που υπολογίζεται από τη σχέση (4.10) δεν είναι η πραγματική ειδική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά μια φυσική ποσότητα η οποία ονομάζεται ‘φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση’ (‘ρα’) η οποία αντικατοπτρίζει την ανομοιογένεια του υλικού (Clark, 1990). Η τιμή της δεν είναι σταθερή, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ομογενούς γης, αλλά εξαρτάται από τις θέσεις των ηλεκτροδίων και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Η εξάρτηση αυτή είναι και ο λόγος για

τον οποίο ονομάζεται φαινόμενη αντίσταση, αφού μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας σταθμισμένος όρος των πραγματικών τιμών της αντίστασης του ανομοιογενούς εδάφους σε διαφορετικά βάθη και θα αντιπροσώπευε την πραγματική τιμή αντίστασης του εδάφους εφόσον αυτό ήταν ομογενές. Ο καθορισμός της πραγματικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η λύση του αντιστρόφου προβλήματος, για το οποίο θα γίνει λόγος παρακάτω.

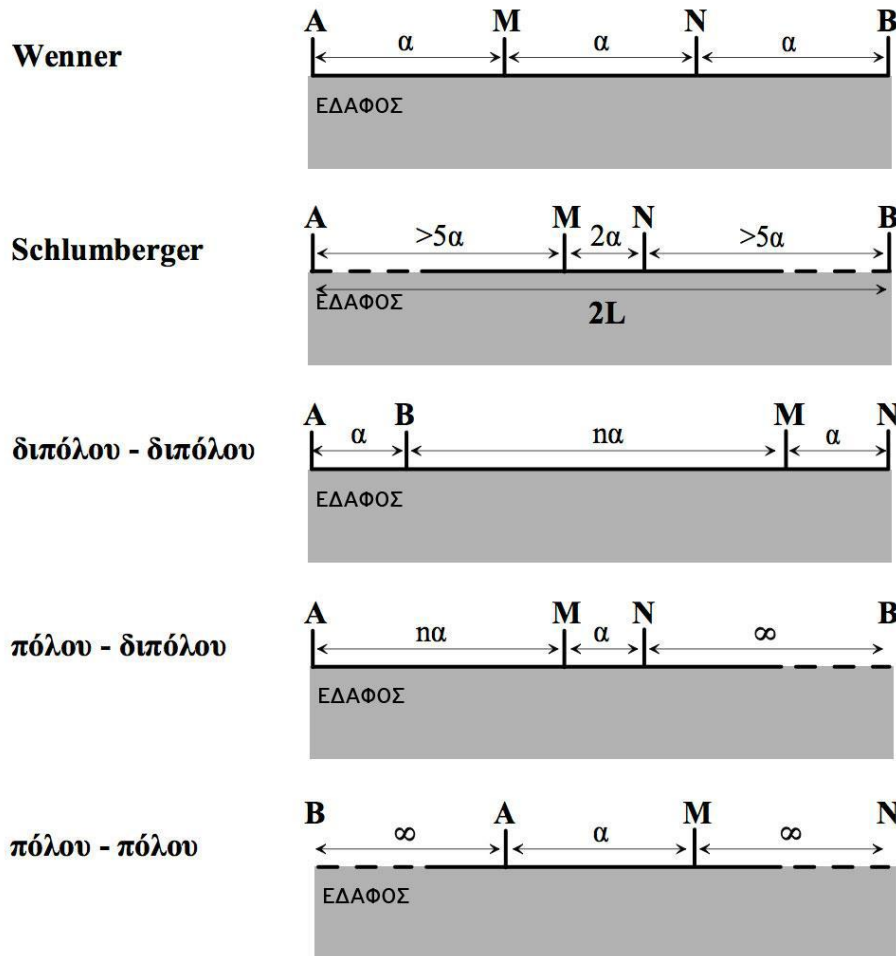
Από την εξίσωση (4.9) φαίνεται ότι ακόμα και εάν αλλαχθούν αμοιβαία οι θέσεις των ηλεκτροδίων A, B με τις θέσεις των δυναμικών M, N, η τιμή του γεωμετρικού παράγοντα K θα παραμείνει η ίδια. Έτσι για ομογενή γη η διαφορά δυναμικού  $\Delta VMN$  που θα μετρηθεί δεν θα μεταβληθεί, εφόσον η ένταση του ρεύματος παραμείνει σταθερή. Σύμφωνα με τον Parasnis (1990) αυτό αποτελεί μία ειδική περίπτωση του θεωρήματος της αντιμετάθεσης του Helmholtz, το οποίο ισχύει και στην περίπτωση ανομοιογενούς γης.

### 4.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Ο τρόπος με τον οποίο διατάσσονται τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού στον χώρο για την μέτρηση της φαινόμενης αντίστασης ονομάζεται ‘ηλεκτρική διάταξη’. Θεωρητικά υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους τα τέσσερα ηλεκτρόδια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους για την πραγματοποίηση της μέτρησης. Για λόγους απλότητας και ευκολίας τόσο στην πρακτική εφαρμογή όσο και στην ερμηνεία των δεδομένων, χρησιμοποιούνται κυρίως γραμμικές διατάξεις στις οποίες τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται πάνω σε μία νοητή γραμμή με καθορισμένες μεταξύ τους αποστάσεις.

Η χρήση μιας συγκεκριμένης διάταξης για την διασκόπηση μίας συγκεκριμένης περιοχής εξαρτάται από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της έρευνας, το είδος των στόχων που αναζητούνται, το μέγιστο βάθος των υπό εξέταση δομών, τη μέγιστη επιθυμητή κατακόρυφη και οριζόντια ανάλυση, τη διαφορετική ευαισθησία που επιδεικνύει κάθε διάταξη στα διαφορετικά περιβάλλοντα, το λόγο σήματος προς θόρυβο της κάθε διάταξης και την δυνατότητα πρόσβασης και τοποθέτησης ηλεκτροδίων στις επιθυμητές θέσεις (π.χ. στην οροφή μίας σήραγγας). Ο λόγος σήματος προς θόρυβο συνδέεται άμεσα με τον γεωμετρικό παράγοντα καθώς οι τιμές του K αντανακλούν το εύρος των διαφορών δυναμικού που μπορούν να μετρηθούν με μία συγκεκριμένη διάταξη. Μικρές τιμές K σημαίνει μεγάλες τιμές δυναμικού άρα και καλός λόγος σήματος προς θόρυβο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, από τα βασικά χαρακτηριστικά των διατάξεων είναι ο γεωμετρικός παράγοντας, ο οποίος σχετίζεται μονοσήμαντα με τις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Οι επιφανειακές διατάξεις είναι οι πιο απλές διατάξεις με ηλεκτρόδια τοποθετημένα πάνω στην επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 4.4).



**Σχήμα 4.4** Βασικές επιφανειακές διατάξεις ηλεκτροδίων (τροποποιήθηκε από Tsourlos, 1995).

- Διάταξη **Wenner**. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού M, N τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων A, B. Οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ίσες με  $\alpha$ . Ο γεωμετρικός παράγοντας καθορίζεται από τη σχέση

$$K = \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (4.12)$$

και η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_{\alpha} = 2\pi\alpha \frac{\Delta V}{I} \quad (4.13)$$

- Διάταξη **Schlumberger**. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι τοποθετημένα σε απόσταση μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού. Έστω  $2L$  η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, η απόσταση ηλεκτροδίων δυναμικού είναι  $2\alpha$  και ισχύει  $L \gg \alpha$  (στην πράξη  $L > 10\alpha$ ). Στην περίπτωση αυτή, η φαινόμενη αντίσταση είναι

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2\alpha} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4.14)$$

- Διάταξη **Διπόλου-Διπόλου**. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Τα δύο δίπολα έχουν σταθερή απόσταση και ίση με  $a$  ( $AB=MN=a$ ), ενώ η απόσταση μεταξύ τους είναι  $na$ . Η φαινόμενη αντίσταση για αυτή τη διάταξη είναι

$$\rho_{\alpha} = -\pi n(n+1)(n+2)a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4.15)$$

- Διάταξη **Πόλου-Πόλου**. Τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, αλλά ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, συνήθως το Β, είναι τοποθετημένο σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα τρία ηλεκτρόδια. Έτσι, οι αποστάσεις ΒΜ και ΒΝ θεωρούνται άπειρες και συνεπώς οι όροι  $1/BM$  και  $1/BN$  είναι πρακτικά μηδέν. Αν η απόσταση ΜΝ είναι ίση με  $a$  και η απόσταση ΑΜ είναι ίση με  $na$ , τότε η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_{\alpha} = 2\pi n(n+1)a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4.16)$$

- Διάταξη **Πόλου-Πόλου**. Η διάταξη αυτή λαμβάνεται με μετακίνηση εκτός από το ηλεκτρόδιο ρεύματος Β και ενός από τα ηλεκτρόδια δυναμικού, έστω Ν, σε άπειρη απόσταση από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια Α, Μ. Σε αυτή τη διάταξη η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4.17)$$

#### 4.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές μέτρησης για την συλλογή δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης είναι η ηλεκτρική βυθοσκόπηση, η οριζοντιογραφία, η τομογραφία και οι μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων.

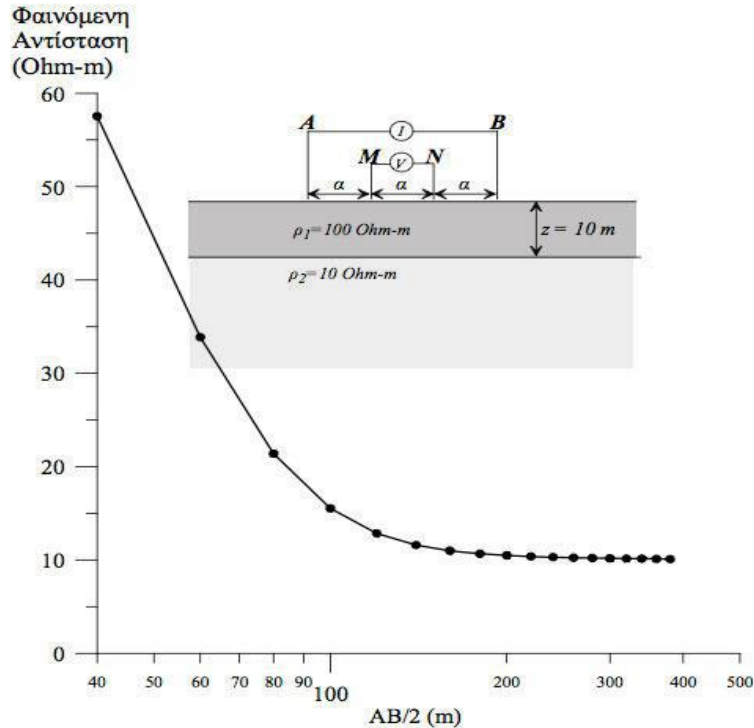
##### 4.4.1 ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ

Με τη μέθοδο βυθοσκόπησης καθορίζεται η κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος, θεωρώντας ότι το υπέδαφος έχει οριζόντια στρωματογραφία (μονοδιάστατη διασκόπηση) (Σχήμα 4.5). Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής χρησιμοποιείται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά η διάταξη Schlumberger. Λαμβάνεται μία σειρά μετρήσεων με συνεχώς αυξανόμενες τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων ρεύματος σε σχέση με ένα σταθερό κέντρο, ενώ τα ηλεκτρόδια δυναμικού είναι σταθερά. Καθώς αυξάνεται η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διεύθυνσης του ρεύματος, οπότε λαμβάνονται πληροφορίες για την



κατακόρυφη κατανομή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε μία στήλη κάτω από το κέντρο της διάταξης. Βασικό πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αυτής αποτελεί η έρευνα για τον εντοπισμό υδροφόρων σχηματισμών.

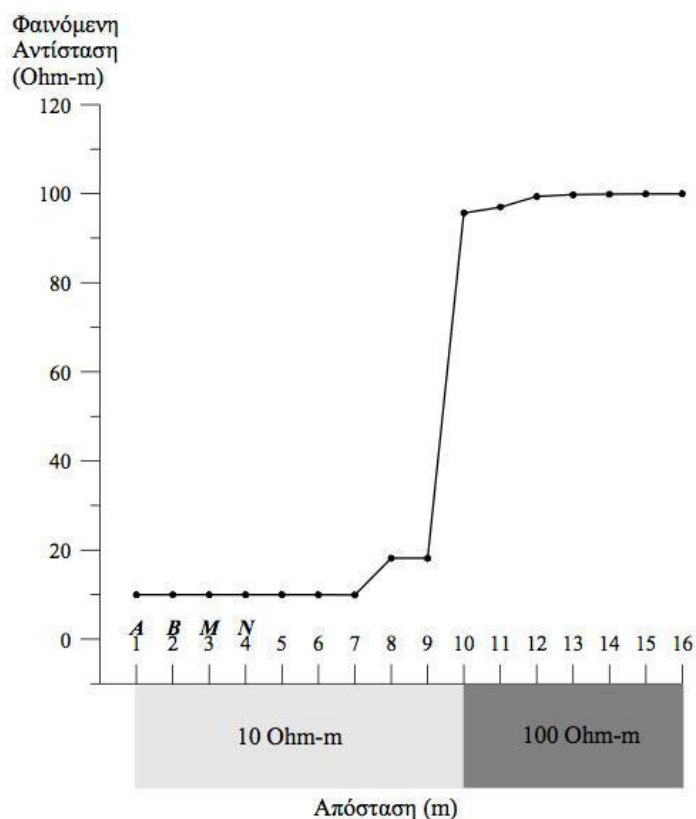
Οι φαινόμενες αντιστάσεις χαρτογραφούνται σε συνάρτηση με την απόσταση των ηλεκτροδίων σε λογαριθμικό χαρτί. Μία αρχική ποσοτική ερμηνεία γίνεται μέσω της ταύτισης των πειραματικών δεδομένων με θεωρητικές καμπύλες δύο ή τριών οριζοντίων στρωμάτων (Telford 1990, Reynolds 1997, Musset και Khan 2000).



Σχήμα 4.5 Εφαρμογή μεθόδου βυθοσκόπησης (Παπαδόπουλος, 2007).

#### 4.4.2 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ

Με τη μέθοδο της οριζοντιογραφίας εντοπίζονται πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 4.6). Στην περίπτωση αυτή, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μία σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων με σταθερό βήμα. Έτσι, χαρτογραφούνται οι μεταβολές της αντίστασης σε σταθερό βάθος σε μία έκταση ή ευθεία και εντοπίζονται οι δομές που παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση με το περιβάλλον τους. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι: Wenner, διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στον εντοπισμό ρηγμάτων ενώ αποτελεί κλασική μέθοδο χαρτογράφησης των αρχαιολογικών χώρων για τον εντοπισμό θαμμένων αρχαιοτήτων. Γενικά το σχήμα της παραγόμενης ανωμαλίας εξαρτάται από την γεωμετρία της διάταξης, τα χαρακτηριστικά της θαμμένης δομής και την αντίθεση αντίστασης του σώματος με τον περιβάλλοντα χώρο.



**Σχήμα 4.6** Μέθοδος οριζοντιογραφίας για τον εντοπισμό πλευρικής μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης (Παπαδόπουλος, 2007).

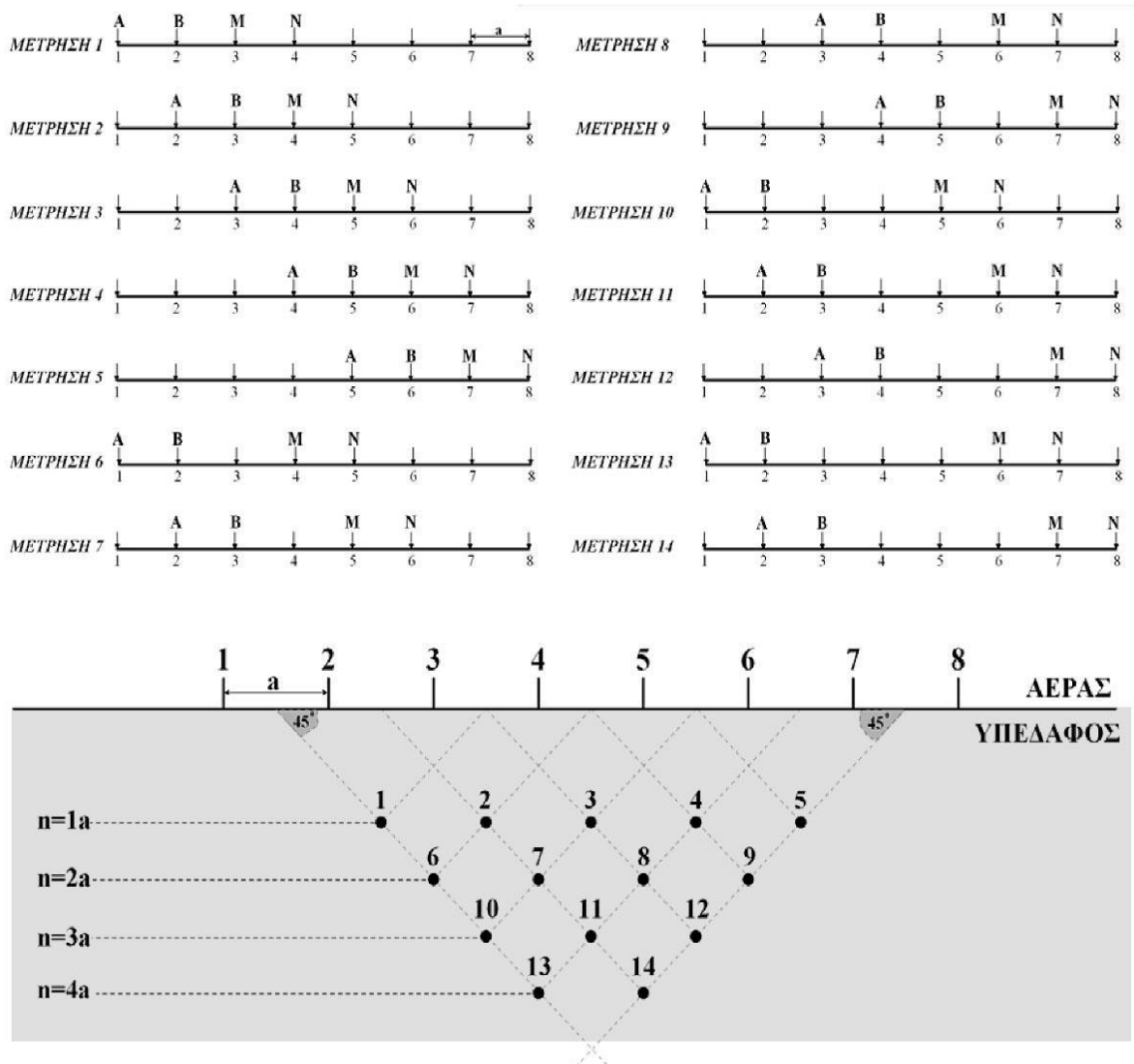
#### 4.4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

Ο συνδυασμός της μεθόδου βυθοσκόπησης και της οριζοντιογραφίας είναι η ηλεκτρική τομογραφία. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα λήψης πληροφοριών τόσο για την πλευρική, όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης (δισδιάστατη διασκόπηση).

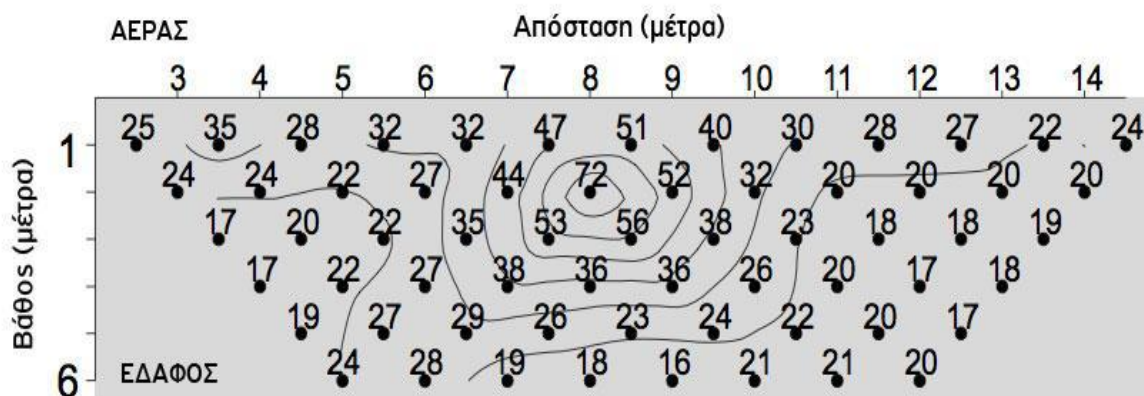
Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου είναι ότι λαμβάνεται μεγάλος αριθμός μετρήσεων που περιέχουν χρήσιμη πληροφορία. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και η χωρική ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Ο αυξημένος αριθμός μετρήσεων καθιστά ιδιαίτερα χρονοβόρα την χειροκίνητη επιλογή των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και γι' αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών.

Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται ο τρόπος διεξαγωγής μιας δισδιάστατης διασκόπησης με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για μία διάταξη 8 ηλεκτροδίων, καθώς και η απεικόνιση των δεδομένων σε δύο διαστάσεις. Κάθε τιμή της αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή το κέντρο των διπλών AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 45ο με το οριζόντιο επίπεδο.

Πρόδρομος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η μέθοδος της «ψευδοτομής» (Hallof, 1967) (Σχήμα 4.8), όπου τα δεδομένα απεικονίζονται σαν κατακόρυφες τομές του εδάφους με τη μορφή καμπύλων ίσης φαινόμενης αντίστασης. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στη χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977). Στην διαδικασία της «ψευδοτομής» μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-πόλου). Η ηλεκτρική τομογραφία όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις, καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις (Shima 1992) ή σήραγγα (Sasaki 1990).



**Σχήμα 4.7** Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστη απόσταση μεταξύ των διπόλων  $n=4$  (Tsourlos, 1995).



Σχήμα 4.8 «Ψευδοτομή» με καμπύλες ίσης φαινόμενης αντίστασης (Tsourlos, 1995).

#### 4.4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Ένας από τους σημαντικότερους περιορισμούς των ηλεκτρικών διασκοπήσεων κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους είναι η μείωση της διακριτικής ικανότητας των παραγόμενων εικόνων με το βάθος. Θεωρητικά, ο μόνος τρόπος να βελτιωθεί η ανάλυση σε μεγάλο βάθος είναι να τοποθετηθούν οι αισθητήρες (δηλαδή τα ηλεκτρόδια) πιο κοντά στις δομές που θέλουμε να εξετάσουμε. Αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, αλλά όταν υπάρχουν γεωτρήσεις, οι διασκοπήσεις μεταξύ γεωτρήσεων μπορούν να δώσουν περισσότερο ακριβή αποτελέσματα από τις επιφανειακές διασκοπήσεις (Loke 2004, Bing και Greenhalgh 2000).

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται όλοι οι ανεξάρτητοι συνδυασμοί 2, 3 και 4 ηλεκτροδίων (ρεύματος A, B και δυναμικού M, N), καθώς και στα σχήματα Σχήμα 4.9, Σχήμα 4.10 και Σχήμα 4.11 γίνεται γραφική απεικόνιση αυτών.

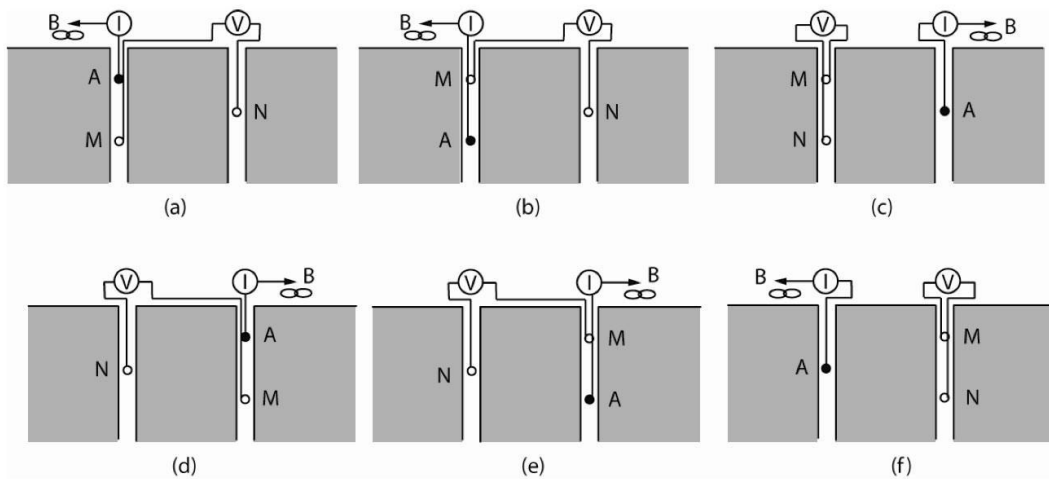
Διάταξη Ηλεκτροδίων	Σύνολο Δυνατών Διατάξεων	Σύνολο Ανεξάρτητων Διατάξεων	Ανεξάρτητες Διατάξεις	$\rho_a$ διατάξεις με αδυναμία μέτρησης
Πόλου-Πόλου	2	1	A-M	
Πόλου-Διπόλου	12	6	AM-N, MA-N, MN-A, N-AM, N-MA, A-MN	A-MN, MN-A
Διπόλου-Πόλου	12	6	AM-B, MA-B, AB-M, B-AM, B-MA, M-AB	AB-M, M-AB
Διπόλου-Διπόλου	24	3	AM-BN, AM-NB, AB-MN	AB-MN, MN-AB

Ισοδύναμη Διάταξη: Πόλου-Διπόλου: AM-N, MA-N και MN-A= Διπόλου-Πόλου: MA-B, AM-B και AB-M

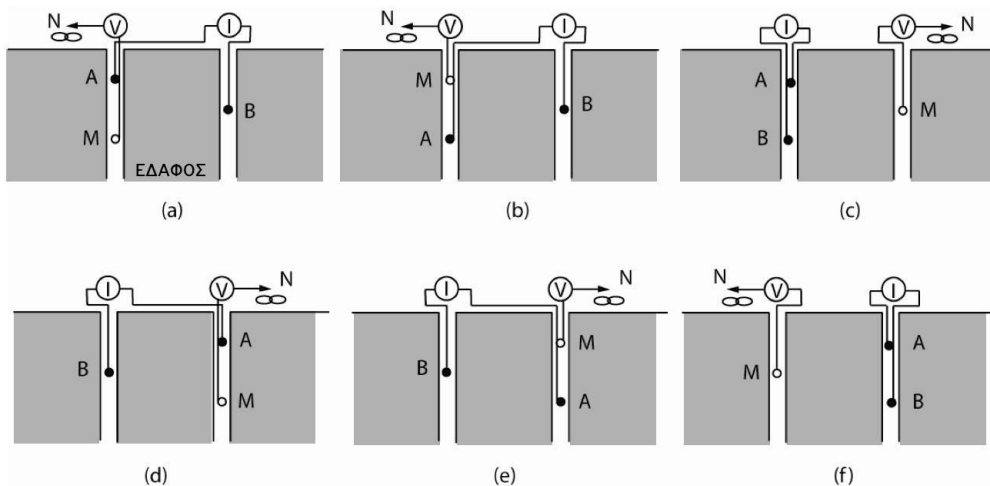
Πίνακας 4.2 Πιθανοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων για μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων (Bing και Greenhalgh, 2000).

Οι Bing και Greenhalgh (2000) έχουν αποδείξει ότι οι ανεξάρτητες διατάξεις μεταξύ γεωτρήσεων έχουν διαφορετικές εικόνες ευαισθησίας και επομένως δίνουν διαφορετικές ηλεκτρικές εικόνες του υπεδάφους. Για παράδειγμα, επιλέγοντας δύο ή τρεις αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων A και M (ή M και A) στις διατάξεις AM-N (MA-N), AM-B (MA-B) και AM-BN (MA-BN) και μετακινώντας τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια της άλλης γεώτρησης από πάνω προς τα κάτω, μπορούμε να πετύχουμε διαφορετικές οριζόντιες ευαισθησίες, ώστε να συλλέξουμε πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές αλλαγές στην περιοχή μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.

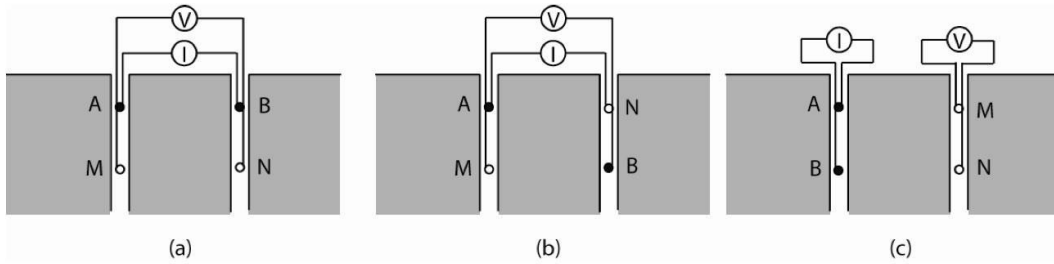
Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι οι ακόλουθες έξι διατάξεις: A-MN, MN-A, AB-M, M-AB, AB-MN και MN-AB έχουν για κάποιες θέσεις μέτρησης πρόβλημα αοριστίας με τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης (προκύπτει μηδενική τιμή στο δυναμικό για ομογενή γη και ο γεωμετρικός παράγοντας δεν ορίζεται).



**Σχήμα 4.9** Συνδυασμοί ηλεκτροδίων πόλου-διπόλου μέσα σε γεωτρήσεις (Bing και Greenhalgh, 2000).



**Σχήμα 4.10** Συνδυασμοί ηλεκτροδίων διπόλου-πόλου μέσα σε γεωτρήσεις (Bing και Greenhalgh, 2000).



**Σχήμα 4.11** Συνδυασμοί ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου μέσα σε γεωτρήσεις (Bing και Greenhalgh, 2000).

#### 4.5 ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η ποιότητα των δεδομένων της αντίστασης που συλλέγονται σε μία περιοχή εξαρτάται από την αξιοπιστία του οργάνου μέτρησης της αντίστασης, αλλά και από μία σειρά άλλων παραγόντων που «μολύνουν» με θόρυβο τα δεδομένα (Tsourlos, 1995). Ένας από τους παράγοντες που προκαλούν θόρυβο στα δεδομένα της φαινόμενης αντίστασης μπορεί να είναι η εσφαλμένη τοποθέτηση των ηλεκτροδίων, καθώς ο λανθασμένος υπολογισμός του γεωμετρικού παράγοντα θα επηρεάσει και τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης. Επιπλέον σφάλματα στις μετρήσεις του δυναμικού μπορούν να προκληθούν από πολλούς παράγοντες, όπως κακή επαφή ή/και υψηλές αντιστάσεις επαφής των ηλεκτροδίων με το έδαφος, κακής ποιότητας ή κατεστραμμένα καλώδια, εξωγενή περιβαλλοντικό θόρυβο (τελλουρικά ρεύματα και ηλεκτροφόρα καλώδια). Κάποιοι από τους προαναφερθέντες λόγους μπορεί να είναι εντελώς τυχαίοι, οπότε τα σφάλματα στις μετρήσεις του δυναμικού ενδέχεται να μην παρουσιάζουν μία συγκεκριμένη κατανομή.

Ένας επιπλέον παράγοντας μπορεί να είναι η ηλεκτρομαγνητική σύζευξη. Όταν ένας πομπός ρεύματος αλλάξει ή διακοπεί η λειτουργία του τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μεταξύ των καλωδίων που εκπέμπουν και λαμβάνουν το σήμα (Ward, 1989). Η σύζευξη αυξάνεται με την συχνότητα, την διάταξη των ηλεκτροδίων, το μήκος των καλωδίων και την αγωγιμότητα του εδάφους. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούν διαφορετικά καλώδια για την εκπομπή και την λήψη του σήματος επηρεάζονται λιγότερο από το φαινόμενο (π.χ. διπόλου-διπόλου και πόλου-διπόλου).

Οι έντονες τοπογραφικές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν διασπορά ή συγκέντρωση των γραμμών ρεύματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πλασματικά περιοχές χαμηλής και υψηλής αντίστασης αντίστοιχα. Έτσι, περιοχές με κλίση μεγαλύτερη των 10ο μπορεί να προκαλέσουν σημαντικά σφάλματα στις μετρήσεις. Η επίδραση της τοπογραφίας στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό, μπορεί να μοντελοποιηθεί και να ληφθεί υπόψη κατά την επεξεργασία των δεδομένων (Fox et al. 1980, Holcombe και Jiracek 1984, Tong και Yang 1990, Tsourlosetal. 1999, Loke 2000, Yietal. 2001).

Η πόλωση που παρατηρείται στα ηλεκτρόδια ρεύματος μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλέσει μία ανώμαλη μέτρηση δυναμικού, όταν τα ίδια ηλεκτρόδια ρεύματος χρησιμοποιηθούν αμέσως μετά ως ηλεκτρόδια δυναμικού. Το φαινόμενο αυτό εντοπίζεται κυρίως στις μετρήσεις της αντίστασης που πραγματοποιούνται με ένα αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφής. Για να αντιμετωπισθεί αυτό το πρόβλημα θα πρέπει ο σχεδιασμός της διάταξης που θα μετρηθεί με το πολυπλεκτικό όργανο μέτρησης της αντίστασης να είναι τέτοιος ώστε έτσι να αποφεύγεται να μετριέται το δυναμικό σε ένα ηλεκτρόδιο, το οποίο αμέσως προηγουμένως είχε χρησιμοποιηθεί για να εισάγει ηλεκτρικό ρεύμα στο υπέδαφος (Dahlin, 2000).

#### 4.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η ερμηνεία των μετρήσεων πραγματοποιείται με την επίλυση του αντιστρόφου ηλεκτρικού προβλήματος είτε με τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων π.χ. μέθοδος Bristow (Bristow, 1966), μέθοδος Zhody-Barker (Zhody 1989, Barker 1992), μέθοδος οπισθοπροβολής (Tsourlos et al. 1993), είτε με τη χρήση υπαρχόντων μη γραμμικών τεχνικών αντιστροφής (π.χ. Tripp et al. 1984) που προσαρμόζονται στο πρόβλημα της ηλεκτρικής τομογραφίας (Shima, 1990, Tsourlos et al., 1995).

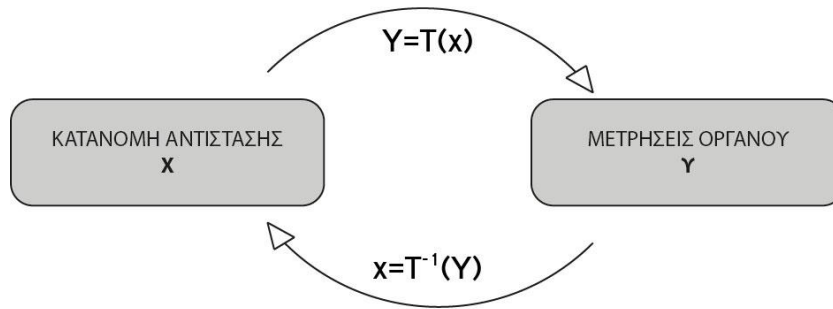
Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αναπαράσταση της πραγματικής εικόνας της ηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης η απόκριση του οποίου (συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις) να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές φαινόμενες τιμές. Απαραίτητη προϋπόθεση γι' αυτό είναι αρχικά η επίλυση του ευθέως προβλήματος, δηλαδή η εύρεση των συνθετικών φαινόμενων αντιστάσεων με γνωστή την κατανομή των πραγματικών αντιστάσεων.

Συγκεκριμένα, έστω ότι μεταβλητή  $x$  δίνει την κατανομή των πραγματικών τιμών της αντίστασης και με  $y$  συμβολίζονται οι πραγματικές φαινόμενες μετρήσεις. Τότε η επίλυση του ευθέως προβλήματος αφορά την εύρεση του μετασχηματισμού  $T$  (γραμμικού ή μη-γραμμικού), που συνδέει τη γνωστή κατανομή της αντίστασης  $x$  με τις άγνωστες μετρήσεις  $y$ .

$$y = T(x) \quad (4.18)$$

Η επίλυση του αντίστροφου προβλήματος αφορά την εύρεση του αντίστροφου μετασχηματισμού  $T^{-1}$  που συνδέει το γνωστό διάνυσμα των μετρήσεων  $y$  με την άγνωστη κατανομή της αντίστασης  $x$  (Σχήμα 4.12).

$$x = T^{-1}(y) \quad (4.19)$$



**Σχήμα 4.12** Σχηματική αναπαράσταση του ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος.

#### 4.6.1 ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Κατά την επίλυση του ευθέος προβλήματος υπολογίζεται η φαινόμενη αντίσταση που θα προέκυπτε από την διεξαγωγή μίας γεωφυσικής έρευνας αν ήταν γνωστή η πραγματική κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους και ο τρόπος λήψης των μετρήσεων (διάταξη ηλεκτροδίων). Για τον υπολογισμό των τιμών αυτών υπάρχουν δύο μέθοδοι:

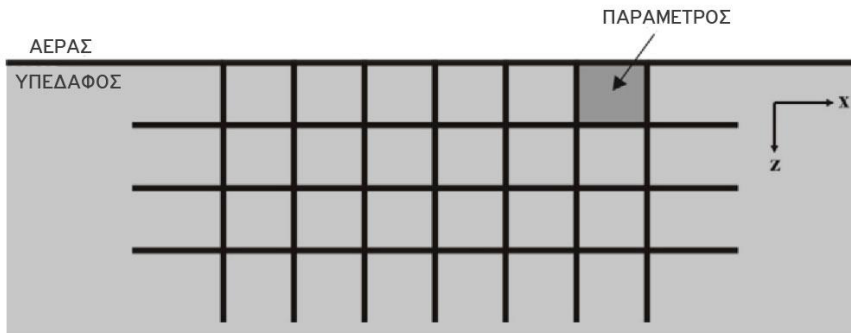
- **Αναλυτικές Μέθοδοι.** Βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν το πεδίο. Είναι οι πιο ακριβείς, αλλά περιορίζονται στην επίλυση μόνο απλών δομών και μοντέλων, όπως σφαιρικές ή κυλινδρικές (Cook και Van Nostrand, 1954), δύο οριζοντίων ή κατακόρυφων στρωμάτων (Telford, 1990), κλπ.
- **Αριθμητικές μέθοδοι.** Αποτελούν μαθηματικές διαδικασίες που βασίζονται σε αριθμητικούς χειρισμούς που διεξάγονται πρακτικά μόνο με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στις μεθόδους αυτές πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος έκφρασης της λύσης των εξισώσεων συνεχούς πεδίου με έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών σημείων.

Οι αριθμητικές μέθοδοι με την σειρά τους χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:

1. **Μέθοδοι ολοκληρωτικών εξισώσεων.** Η λύση αυτών, βρίσκεται στην επιφάνεια γεωηλεκτρικών ασυνεχειών και οι αριθμητικοί υπολογισμοί βασίζονται στη χρήση των συναρτήσεων του Green. Ουσιαστικά, υποτίθεται ότι η ύπαρξη μιας δομής διαφορετικής αντίστασης από το περιβάλλον είναι ισοδύναμη με μια κατανομή στοιχειωδών ηλεκτροστατικών πηγών στην επιφάνειά του.
2. **Διαφορικές μέθοδοι.** Η προς επίλυση περιοχή διακριτοποιείται σε μικρότερα τμήματα και περιορίζεται με την εισαγωγή τεχνητών ορίων. Η λύση υπολογίζεται για κάθε ένα διακριτό τμήμα της περιοχής μελέτης. Έτσι, μια διαφορετική τιμή αντίστασης μπορεί να δοθεί σε κάθε ένα διακριτό τμήμα και συνεπώς οι διαφορικές μέθοδοι μπορούν να επιλύσουν οποιαδήποτε κατανομή αντίστασης, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα αυτής της κατανομής. Οι γνωστότερες τεχνικές των διαφορικών μεθόδων είναι οι μέθοδοι των πεπερασμένων στοιχείων και των πεπερασμένων διαφορών. Αυτές

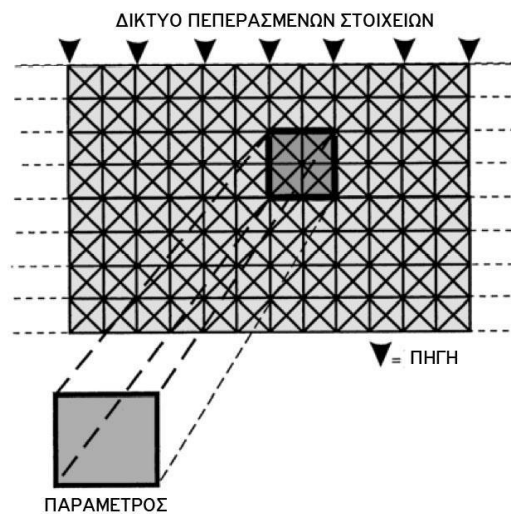


υποδιαιρούν το υπέδαφος σε κελιά διαφορετικής αντίστασης (παράμετροι). Η τιμή της αντίστασης σε κάθε κελί θεωρείται σταθερή (Σχήμα 4.13).



**Σχήμα 4.13** Διακριτοποίηση του ημιχώρου σε παραμέτρους διαφορετικής αντίστασης (Tsourlos, 1995).

Η διαφορά των δύο αυτών τεχνικών βασίζεται στο ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Mufti 1976, Dey και Morrison 1979a,b) χωρίζει το υπέδαφος σε ένα μεγάλο αριθμό ορθογωνίων κελιών, ενώ στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Coggon 1971, Silvester και Ferrari 1990) χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία (Σχήμα 4.14).



**Σχήμα 4.14** Κάθε παράμετρος χωρίζεται σε τριγωνικά στοιχεία (elements) στις κορυφές (nodes) των οποίων υπολογίζεται το δυναμικό (Tsourlos, 1995).

Όλες οι μέθοδοι μπορούν να ανταποκριθούν στην επίλυση δικτύων που περιέχουν στοιχεία με ποικίλα μεγέθη. Όμως μόνο η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να επιλύσει περιορισμένες δομές ακανόνιστου σχήματος. Αυτό το πλεονέκτημα είναι πολύ σημαντικό όταν πρέπει να επιλύσουμε κατανομές αντίστασης, σε περιοχές με τοπογραφία, διότι η αντίσταση είναι ευαίσθητη σε τοπογραφικές διακυμάνσεις. Με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων το δίκτυο των στοιχείων μπορεί να προσαρμοστεί στην τοπική γεωμορφολογία,

δίνοντας έτσι τη δυνατότητα εντοπισμού και απομόνωσης του ψευδοθορύβου που οφείλεται στις τοπογραφικές μεταβολές (Fox et al. 1980, Molano et al. 1990).

Στη συγκεκριμένη διατριβή έχει επιλεγθεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση του ευθέως προβλήματος, ενώ η μοντελοποίηση του υπεδάφους ακολουθεί μοντέλο δύο και μισό διαστάσεων (2.5D) (Tsourlos et al., 1999). Η τεχνική αυτή της επίλυσης του ευθέως προβλήματος αναζητά μια λύση της διαφορικής εξίσωσης Poisson που διέπει τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος στο υπέδαφος

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = \nabla J \quad (4.20)$$

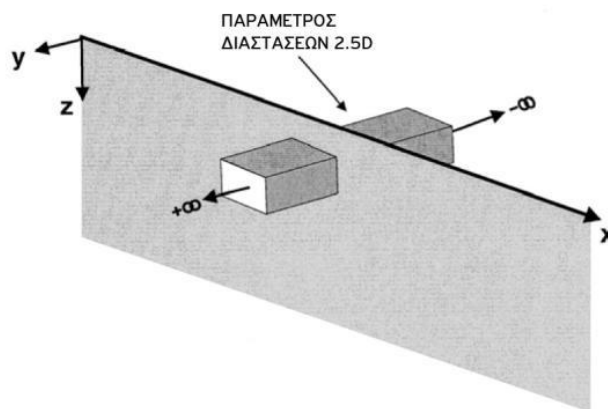
όπου

- $\sigma$  αγωγιμότητα
- $V$  δυναμικό
- $J$  πυκνότητα ρεύματος

Ο όρος  $\nabla J$  της σχέσης (4.20) περιγράφει τις πηγές ρεύματος και στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να αντικατασταθεί από μια συνάρτηση Dirac ( $\delta$ ) και μία σημειακή πηγή ρεύματος  $I$ . Εάν  $x_s$ ,  $y_s$ ,  $z_s$  είναι οι συντεταγμένες της πηγής, τότε η εξίσωση (4.20) γίνεται

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = I \delta_{(x)} \delta_{(y)} \delta_{(z)} \quad (4.21)$$

Στο μοντέλο 2.5 διαστάσεων, το ρεύμα διαδίδεται στο χώρο (σε 3 διαστάσεις), ενώ η μεταβολή της αντίστασης θεωρείται ότι είναι δύο διαστάσεων (παραμένει σταθερή στην τρίτη διάσταση) (Σχήμα 4.15). Διαφορετικά, οι μετρούμενες τιμές ανταποκρίνονται σε ένα τριών διαστάσεων ημιχώρο, στον οποίο η αντίσταση μπορεί να μεταβάλλεται μόνο κατά τις δύο διαστάσεις, ενώ παραμένει σταθερή κατά τη διεύθυνση της τρίτης διάστασης.



Σχήμα 4.15 Παράμετρος 2.5 διαστάσεων (Tsourlos, 1995).

Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής των 2.5 διαστάσεων είναι ότι αποτελεί μια ρεαλιστική απεικόνιση της κατανομής των αντιστάσεων, περιλαμβάνοντας μια πλήρη, τριών διαστάσεων κατανομή των δυναμικών, με τη χρήση γεωμετρίας δύο διαστάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται οι δυσκολίες επίλυσης του προβλήματος (όπως χρόνος υπολογισμού και απαιτήσεις υπολογιστικής μνήμης) σε σύγκριση με τις δυσκολίες που θα αντιμετωπίζαμε αν χρησιμοποιούσαμε μια προσέγγιση τριών διαστάσεων.

Για να ληφθεί υπόψη η μεταβλητότητα και των τριών συντεταγμένων, η διαφορά δυναμικού μετασχηματίζεται κατά Fourier ως προς τη διεύθυνση  $y$  και το μετασχηματισμένο δυναμικό δίνεται ως:

$$\tilde{V}(x, k, z) = \int_0^\infty V(x, y, z) \cos(ky) dy \quad (4.22)$$

οπότε η σχέση (4.21) γίνεται

$$\nabla \cdot (-\sigma_{(x,z)} \nabla V_{(x,k,z)}) = I \delta_{(x)} \delta_{(z)} \quad (4.23)$$

Η βασική ιδέα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η υποδιαίρεση της περιοχής μελέτης σε τριγωνικές υποπεριοχές (στοιχεία), όπου η άγνωστη τιμή δυναμικού  $V$  προσεγγίζεται από απλές συναρτήσεις παρεμβολής (shape ή trial functions) που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένα σημεία του στοιχείου, τα οποία ονομάζονται 'κόμβοι' (Σχήμα 4.16). Κάθε ένα από τα τριγωνικά αυτά στοιχεία (κάθε στοιχείο έχει τρεις κόμβους στις κορυφές του) αντιπροσωπεύει μια ομογενή και ισότροπη περιοχή του υπεδάφους με σταθερή τιμή αντίστασης. Η προσεγγιστική τιμή του δυναμικού  $V'$  δίνεται από την σχέση (Pridmore, 1978)

$$V' = \sum_{i=1}^N n_i a_i \quad i=1,2, \dots, N \quad (4.24)$$

όπου

- $a_i$  δυναμικό στους τρεις κόμβους
- $n_i$  συναρτήσεις παρεμβολής, οι οποίες για ένα τριγωνικό στοιχείο έχουν την παρακάτω μορφή.

$$n_j = \frac{A_j B_j C_j z}{2\Delta}, \quad j=1, 2, 3,$$

$$A_j = x_k z_m - x_m x_k$$

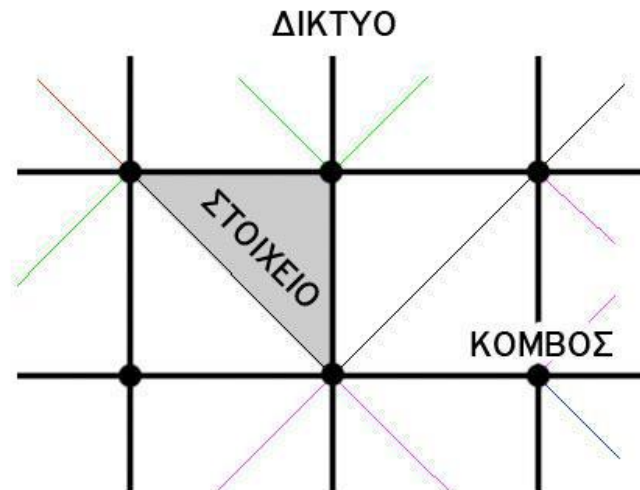
$$B_j = z_k - z_m$$

$$C_j = x_m - x_k$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

$$j, k, m = 1, 2, 3 \quad (4.25)$$

όπου  $\Delta$  είναι το εμβαδό της περιοχής του στοιχείου.



**Σχήμα 4.16** Στοιχεία (elements) και κόμβοι (nodes) συνθέτουν το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM).

Σύμφωνα με παραδοχές που έχουν γίνει κατά τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ομογενή και ισότροπα στοιχεία), η αρχική σχέση (4.21) για κάθε ένα στοιχείο γίνεται:

$$-\sigma \nabla^2 \tilde{V} = f \quad (4.26)$$

όπου η συνάρτηση  $f$  είναι  $I\delta(x)\delta(z)$  ή μηδέν, ανάλογα με το αν το συγκεκριμένο στοιχείο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα ή όχι. Στη συνέχεια ορίζεται ένα κριτήριο βελτιστοποίησης προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ του προσεγγιστικού και του «πραγματικού» δυναμικού. Το πιο διαδεδομένο και γενικό κριτήριο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι το κριτήριο Galerkin του σταθμισμένου σφάλματος (Burnett, 1989), σύμφωνα με το οποίο το σφάλμα μεταξύ προσεγγιστικού και «πραγματικού» δυναμικού πρέπει να είναι ορθογώνιο προς τις συναρτήσεις παρεμβολής για κάθε στοιχείο.

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του κριτηρίου Galerkin είναι πολύ σημαντικά, καθώς το πρόβλημα επίλυσης της αρχικής διαφορικής εξίσωσης (4.20), της οποίας η αναλυτική λύση είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί, μετασχηματίζεται σε ένα ισοδύναμο σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο μπορεί να λυθεί με συγκεκριμένες αριθμητικές μεθόδους. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο ελαχιστοποίησης Galerkin, η σχέση (3.26) γίνεται για κάποιο σημείο  $e$

$$-\sigma \iint e \left[ \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial x^2} n_i + \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial z^2} n_i \right] dx dz + \sigma \iint e k^2 \tilde{V} n_i dx dz - \iint e f n_i dx dz = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.27)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4.24) στην σχέση (4.27) και ολοκληρώνοντας κατά μέρη προκύπτει

$$\sum_j^N \sigma_e \iint_{\varepsilon} \left( \frac{\theta n_i}{\theta_x} \frac{\theta n_i}{\theta_x} + k^2 n_j n_i + \frac{\theta n_i}{\theta_z} \frac{\theta n_i}{\theta_z} \right) dx dz - \iint_{\varepsilon} f n_i dx dz = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.28)$$

Υπολογίζοντας τα παραπάνω ολοκληρώματα με αναλυτικό τρόπο προκύπτει, με τη μορφή πινάκων, η σχέση που περιγράφει το κάθε σημείο για το 2.5 διαστάσεων γεωηλεκτρικό πρόβλημα

$$\frac{\sigma_e}{4\Delta} \left( \begin{bmatrix} B_1 B_1 + C_1 C_1 & B_1 B_2 + C_1 C_2 & B_1 B_3 + C_1 C_3 \\ B_2 B_1 + C_2 C_1 & B_2 B_2 + C_2 C_2 & B_2 B_3 + C_2 C_3 \\ B_3 B_1 + C_3 C_1 & B_3 B_2 + C_3 C_2 & B_3 B_3 + C_3 C_3 \end{bmatrix} + \frac{\sigma_e k^2 \Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Τα στοιχεία του συνολικού διανύσματος φορτίου F στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης (4.29) είναι μηδέν όταν καμία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος δεν συμπίπτει με κάποιους από του κόμβους του στοιχείου, αλλιώς θα έχουν τιμή 2I, όπου I είναι η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος. Εφόσον τα στοιχεία είναι κομμάτι ενός πλέγματος (Σχήμα 4.17) και έχουν κοινούς κόμβους, οι εξισώσεις που περιγράφουν κάθε ένα στοιχείο μπορούν να ενωθούν σε ένα μοναδικό σύνολο γραμμικών εξισώσεων. Το συνολικό γραμμικό σύστημα που προκύπτει θα έχει τη μορφή

$$K=A \cdot F \quad (4.30)$$

όπου ο πίνακας K περιέχει τους όρους δυσκαμψίας (όροι που σχετίζονται με τις συντεταγμένες των κόμβων) και είναι συμμετρικός, ταινιωτός και αραιός (με πολλά μηδενικά), το διάνυσμα A περιέχει τα άγνωστα δυναμικά των κόμβων και το διάνυσμα F περιλαμβάνει τις πηγές ρεύματος και τους όρους των ορίων. Μετά τη δημιουργία του συνολικού γραμμικού συστήματος (σχέση (4.30)) πρέπει να εφαρμοσθούν οι οριακές συνθήκες (BC) Neumann και Dirichlet.

**Οριακές συνθήκες Neumann.** Στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα-εδάφους δεν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος κάθετη στο όριο.

**Ομογενείς οριακές συνθήκες Dirichlet.** Η τιμή του δυναμικού στις οριακές επιφάνειες (πλευρές και βάση) είναι μηδέν.

Οι οριακές συνθήκες Neumann εφαρμόζονται αυτόματα μέσω των στοιχειωδών γραμμικών εξισώσεων (σχέση (4.29)), ενώ οι ομογενείς οριακές συνθήκες Dirichlet εφαρμόζονται με τη μορφή περιορισμών στο συνολικό γραμμικό σύστημα (σχέση (4.30)).

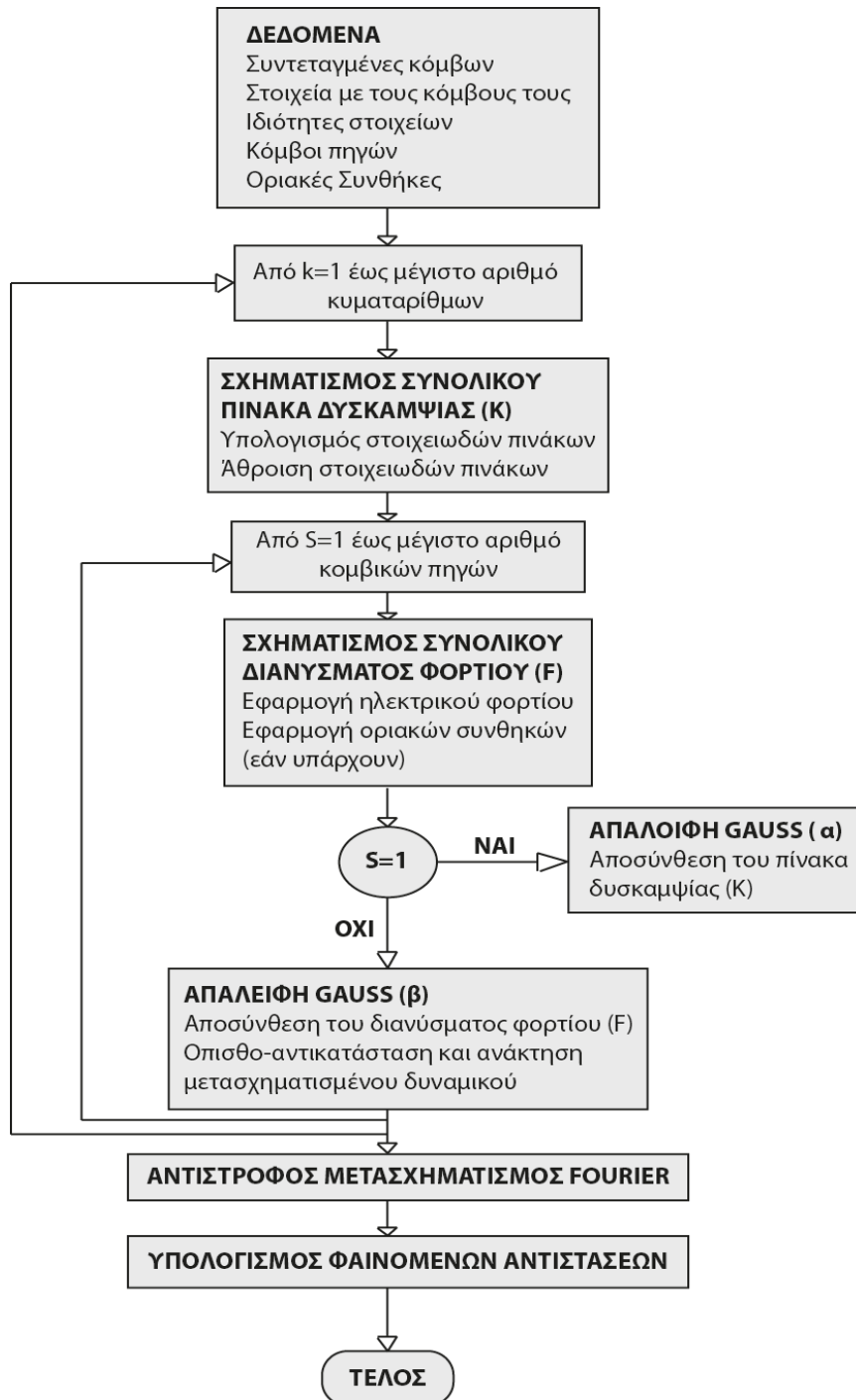
Στη συνέχεια, μετά την εφαρμογή των οριακών συνθηκών, το σύστημα που προκύπτει μπορεί να λυθεί με τη βοήθεια τυποποιημένων μεθόδων, οι οποίες είναι γνωστές για την καλύτερη εφαρμογή τους σε αραιά και με πολλά μηδενικά συστήματα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η χρήση της μεθόδου απαλοιφής του Gauss, δίνοντας το μετασχηματισμένο δυναμικό για τις καθορισμένες τιμές του

Κ. Εφόσον λυθεί η εξίσωση (4.30) για  $k$  κυματαρίθμους, το συνολικό δυναμικό ανακτάται με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

$$V_{(x,y,z)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \tilde{V}_{(x,k,z)} \cos(ky) dk \quad (4.31)$$

Επομένως, εάν το μετασχηματισμένο δυναμικό υπολογισθεί για αρκετές τιμές  $k$ , το δυναμικό  $V(x,y,z)$  μπορεί να ληφθεί ολοκληρώνοντας αριθμητικά την εξίσωση (4.31). Εφόσον τα δυναμικά των κόμβων είναι γνωστά, οι διαφορές δυναμικού μεταξύ δύο σημείων και οι αντίστοιχες φαινόμενες αντιστάσεις είναι εύκολο να υπολογισθούν.

Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής του αλγορίθμου 2.5 διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε παραπάνω.



**Σχήμα 4.18** Διάγραμμα ροής αλγορίθμου 2.5 διαστάσεων του ευθέος προβλήματος (Tsourlos, 1995).

#### 4.6.1.1 Ιακωβιανός Πίνακας

Το πρόβλημα της αντιστροφής περιλαμβάνει τον υπολογισμό της κατανομής της αντίστασης που παράγεται από ένα σύνολο συνθετικών δεδομένων που προσομοιάζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες. Η κατανομή της αντίστασης αποτυπώνεται ως σύνολο ομογενών παραμέτρων, όπου η τιμή της αντίστασης μιας παραμέτρου μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα από τις τιμές

αντίστασης των άλλων ομογενών παραμέτρων του μοντέλου. Στις περισσότερες μεθόδους αντιστροφής είναι απαραίτητη η χρήση ενός πίνακα που ονομάζεται ‘Ιακωβιανός πίνακας’ (J) και ο οποίος συνδέει τις μεταβολές των ανωτέρων παραμέτρων με τις μεταβολές των ιδιοτήτων των παρατηρούμενων δεδομένων.

Έστω ‘n’ ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος ‘ρ’ της παραμέτρου του προβλήματος (ειδική αντίσταση) και ‘m’ ο αριθμός των στοιχείων του διανύσματος ‘d’ των φαινόμενων αντιστάσεων, τότε ο Ιακωβιανός πίνακας έχει διαστάσεις  $m \times n$  και το  $i,j$  στοιχείο του J ( $J_{ij}$ ) δίνεται από τη σχέση

$$I_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial p_j} \quad (4.32)$$

όπου  $d_i$  είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση της παραμέτρου  $p_j$ . Ο Ιακωβιανός πίνακας είναι γνωστός και ως ‘πίνακας ευαισθησίας’, αφού εκφράζει την ευαισθησία της μέτρησης (i) της φαινόμενης αντίστασης σε μικρές μεταβολές των πραγματικών αντιστάσεων μιας παραμέτρου (j) του μοντέλου. Εάν τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι φαινόμενες αντιστάσεις  $r_{ai}$ , τότε η εξίσωση (4.32) μπορεί να γραφεί ως

$$I_{ij} = \frac{\partial p_{ai}}{\partial p_j} = -\frac{\partial p_{ai}}{\partial p_j} = \frac{2\pi}{KI} \frac{\partial \Delta V_i}{\partial p_j} \quad (4.33)$$

Στην εξίσωση (4.33), ο γεωμετρικός παράγοντας K και η ένταση του ρεύματος I που εισάγεται στη γη είναι γνωστές ποσότητες, οπότε ο Ιακωβιανός πίνακας μπορεί να βρεθεί με τον υπολογισμό του ρυθμού μεταβολής του δυναμικού προς τη μεταβολή της αγωγιμότητας  $\partial \Delta V_i / \partial \sigma$ .

Είναι προφανές ότι ο υπολογισμός του Ιακωβιανού πίνακα συνδέεται άμεσα με την επίλυση του ευθέως προβλήματος. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, τότε κάθε παράμετρος συνήθως αποτελείται από περισσότερα τριγωνικά υποστοιχεία. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του Ιακωβιανού πίνακα ονομάζεται ‘τεχνική συζυγούς εξίσωσης’ (McGillivray και Oldenburg, 1990) και ενσωματώθηκε στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων έτσι ώστε να υπολογιστεί ο Ιακωβιανός πίνακας ή πίνακας ευαισθησίας J (Tsourlos, 1995).

Μετά από υπολογισμούς μετασχηματισμού μπορεί να αποδειχθεί ότι για την περίπτωση του ηλεκτρικού προβλήματος, η ευαισθησία αποτελεί μια συνάρτηση της αρχικής διαφορικής εξίσωσης και των συζυγών συναρτήσεων Green. Εφόσον η λύση του ηλεκτρικού προβλήματος είναι αυτοσυζυγής, η ίδια η λύση του ευθέως προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση τόσο των αρχικών όσο και των συζυγών συναρτήσεων. Οι McGillivray και Oldenburg (1990) εξήγησαν την γενικευμένη μορφή της ευαισθησίας του αντίστοιχου μετασχηματισμένου δυναμικού για την περίπτωση του 2.5 διαστάσεων ηλεκτρικού προβλήματος. Η τελική εξίσωση



που δίνει την ευαισθησία του μετασχηματισμένου δυναμικού παίρνει τελικά τη μορφή

$$\frac{\partial V_0}{\partial \sigma_j} = \int_D [k^2 \psi_j VV' + \psi_j \frac{\partial V'}{\partial x} \frac{\partial V'}{\partial x} + \psi_j \frac{\partial V'}{\partial z} \frac{\partial V'}{\partial z}] dx dz \quad (4.34)$$

όπου  $\partial \Delta V / \partial \sigma_j$  είναι η μερική παράγωγος της μέτρησης του μετασχηματισμένου δυναμικού ως προς την παράμετρο  $j$ ,  $V$  και  $V'$  είναι τα μετασχηματισμένα δυναμικά λόγω πηγής ρεύματος στο  $(x,z)$  και το  $\psi_j$  είναι το 1 όταν οι συντεταγμένες  $(x,z)$  βρίσκονται μέσα στα όρια της παραμέτρου  $j$ , αλλιώς είναι μηδέν (0).

Με τη χρήση της σχέσης (4.34) το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί μέσα στα πλαίσια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Υποθέτοντας ότι αναζητάται η ευαισθησία του μετασχηματισμένου δυναμικού (στον κόμβο 'n' εξαιτίας της πηγής που βρίσκεται στον κόμβο 'm') ως συνάρτηση της διαταραχής της αγωγιμότητας του στοιχείου 'e', τότε η εξίσωση (3.34) γίνεται

$$\frac{\partial V_{nm}}{\partial \sigma^{(e)}} = \int_{\Delta^{(e)}} [k^2 Vn^{(e)} Vm^{(e)} + \psi_j \frac{\partial Vn^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial Vm^{(e)}}{\partial x} + \psi_j \frac{\partial Vn^{(e)}}{\partial z} \frac{\partial Vm^{(e)}}{\partial z}] \quad (4.35)$$

όπου  $V_{nm}$  είναι το δυναμικό 'n' λόγω της πηγής του ηλεκτρικού ρεύματος στο 'm' και  $Vn^{(e)}$ ,  $Vm^{(e)}$  είναι το δυναμικό στους κόμβους του στοιχείου e εξαιτίας των πηγών στους κόμβους m, n αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (4.34) και (4.35) και χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές τριγωνικές συναρτήσεις παρεμβολής (σχέση (4.24)), το ολοκλήρωμα του δεξιού σκέλους της σχέσης (4.35) παίρνει τη μορφή

$$\frac{\partial V_{nm}}{\partial \sigma^{(e)}} = K^2 \Delta^{(e)} \frac{\sum_{j=1}^3 a_{jm}^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jn}^{(e)} a_{1m}^{(e)} a_{1n}^{(e)} a_{2m}^{(e)} a_{2n}^{(e)} a_{3m}^{(e)} a_{3n}^{(e)}}{12} + \frac{\sum_{j=1}^3 a_{jm}^{(e)} B_j^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jn}^{(e)} B_j^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jm}^{(e)} C_j^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jn}^{(e)} C_j^{(e)}}{4\Delta^{(e)}} \quad (4.36)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.36) μπορεί να υπολογισθεί η ευαισθησία οποιασδήποτε μέτρησης δυναμικού που προήλθε από τη διαταραχή της αγωγιμότητας οποιουδήποτε στοιχείου. Παρατηρείται ότι η ευαισθησία είναι ουσιαστικά μία συνάρτηση των συντεταγμένων των κόμβων και των μετασχηματισμένων δυναμικών των κόμβων του στοιχείου εξαιτίας των πηγών στις θέσεις του πομπού και του δέκτη. Εφόσον είναι γνωστές οι μερικές παράγωγοι του μετασχηματισμένου δυναμικού σε συνάρτηση με τις μεταβολές στην αγωγιμότητα του κάθε στοιχείου, η παράγωγος του μετασχηματισμένου δυναμικού για κάθε παράμετρο  $p$  υπολογίζεται προσθέτοντας τις επιμέρους μερικές παραγώγους του κάθε στοιχείου που ανήκει στη συγκεκριμένη παράμετρο

$$\frac{\partial V}{\partial \sigma_p} = \sum_{i=1}^q \frac{\partial V}{\partial \sigma_i} \quad (4.37)$$

όπου  $I=1,2,\dots,q$  είναι ο αριθμός των τριγωνικών στοιχείων που απαρτίζουν την περιοχή κάθε παραμέτρου. Επομένως, οι μερικές παράγωγοι του συνολικού δυναμικού ανακτώνται με την εφαρμογή του αντιστρόφου μετασχηματισμού Fourier με τον τρόπο που περιγράφηκε προηγουμένως. Τέλος, τα στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα μπορούν να υπολογισθούν με βάση τη σχέση (4.33).

#### 4.6.2 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος είναι ακριβώς η αντίστροφη διαδικασία από αυτή του ευθέως προβλήματος που περιγράφηκε παραπάνω. Δηλαδή, μετρώντας τη φαινόμενη αντίσταση που προκύπτει από μία γεωφυσική έρευνα να προσδιοριστεί η κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους.

Η δυσκολία των αντίστροφων προβλημάτων μπορεί να συνοψιστεί στους παρακάτω παράγοντες:

- **Ύπαρξη Λύσης.** Είναι δυνατόν να μην υπάρχει κανένα μοντέλο που να επαληθεύει πλήρως τα δεδομένα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην προσεγγιστική λύση για την εύρεση του μοντέλου, στην ύπαρξη θορύβου στα δεδομένα και στο σφάλμα του μοντέλου.
- **Μοναδικότητα.** Εάν υπάρχει λύση, αυτή μπορεί να μην είναι και η μοναδική.
- **Αστάθεια** - Κακώς ορισμένο πρόβλημα. Η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων σε ένα αντίστροφο πρόβλημα, είναι εξαιρετικά ασταθής, με αποτέλεσμα μια μικρή αλλαγή στα δεδομένα (που μπορεί να οφείλεται π.χ. στο θόρυβο) μπορεί να προκαλέσει τεράστιες αλλαγές στη λύση του εκτιμώμενου μοντέλου.

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος είναι: η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Lines και Treitel 1984), η μέθοδος των ιδιαιζουσών τιμών (Lancos 1960, Golub και Reinsh 1970, Lawson και Hanson 1974, Strang 1998), η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με απόσβεση (Lavenberg 1944, Marquat 1965, Franklin 1970) και η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής (Tikhonov 1963, Tikhonov και Glasko 1965, Constableetal 1987, deGroot-Hedlin και Constable 1990).

Με τη μέθοδο της εξομαλυσμένης αντιστροφής Occam (Constableetal. 1987), το αντίστροφο πρόβλημα αντιμετωπίζεται συντηρητικά, δηλαδή αναζητούμε ένα μοντέλο το οποίο θα είναι πιο εξομαλυσμένο, δηλαδή θα ερμηνεύει τα δεδομένα με τον απλούστερο δυνατό τρόπο. Το αποτέλεσμα της εξομαλυσμένης αντιστροφής δεν θα είναι απαραίτητα η καλύτερη λύση, αλλά σίγουρα θα αποτελεί μια απλοποιημένη και λογική αναπαράσταση της πραγματικότητας (Tsouflos 1995). Συγχρόνως, η εξαναγκασμένη εξομάλυνση εγγυάται σταθερότητα κατά τη διαδικασία της αντιστροφής και την εξαγωγή ενός τελικού μοντέλου, που η μορφή ή η φύση της εξομάλυνσης του δεν θα έχει επιλεγεί αυθαίρετα, αλλά θα έχει καθοριστεί από τον χρήστη (Constableetal. 1987).

Έστω ότι η κατανομή της αντίστασης δίνεται από ένα διάνυσμα  $x$  που έχει  $N$  παραμέτρους  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  και οι  $M$  μετρήσεις συμβολίζονται με ένα διάνυσμα  $y$ , τότε η γενική μορφή της εξίσωσης του ευθέως προβλήματος (σχέση (4.18)) που πρέπει να αντιστραφεί είναι

$$f(x) = y \quad (4.38)$$

Λόγω της μη γραμμικότητας της συνάρτησης  $f$ , η παραπάνω εξίσωση δεν μπορεί να λυθεί με απ' ευθείας αντιστροφή. Όμως, οι τεχνικές αντιστροφής μπορούν να χειριστούν ένα μη γραμμικό πρόβλημα αναγάγοντάς το σε μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης των επιμέρους γραμμικών προβλημάτων. Ένας τυπικός αλγόριθμος επίλυσης του μη γραμμικού αντιστρόφου ηλεκτρικού προβλήματος ξεκινάει υποθέτοντας ένα αρχικό γραμμικό μοντέλο αντίστασης  $x_0$ , το οποίο συνεχώς βελτιώνεται μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία, έως ότου οι συνθετικές φαινόμενες αντιστάσεις  $f(x_{\text{τρέχον}})$ , δηλαδή τα δεδομένα που ανταποκρίνονται στο τρέχον ηλεκτρικό μοντέλο, να προσεγγίζουν τις μετρήσεις  $y$ . Θεωρώντας μια πολύ μικρή μεταβολή της αντίστασης  $dx$ , η συνάρτηση  $f(x)$  μπορεί να αναπτυχθεί χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor

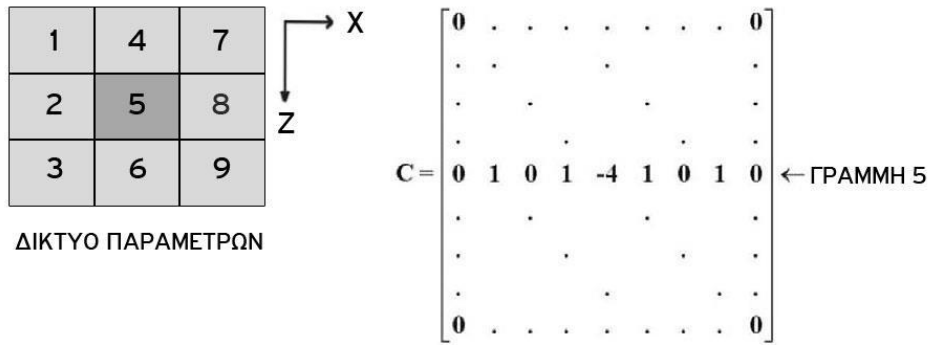
$$f(x_i + dx_i) = f(x_i) + \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} dx_i + 0((dx_i)^2) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.39)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των παραμέτρων του διανύσματος κατανομής της αντίστασης,  $0((dx_i)^2)$  είναι οι όροι μεγαλύτερης τάξης, οι οποίοι μπορούν να αγνοηθούν εφ' όσον η μεταβολή  $dx$  είναι πολύ μικρή σε σχέση με το  $x$  και ο  $m \times n$  πίνακας των πρώτων όρων  $\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i}$  ισούται με τον Ιακωβιανό πίνακα  $J$ . Επομένως, η εξίσωση (4.39) μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή

$$(x + dx) \approx f(x) + Jdx \quad (4.40)$$

Λόγω του ότι η σχέση (3.40) είναι προσεγγιστική (επειδή παραλείπονται οι όροι ανώτερης τάξης), η επίλυσή της γίνεται ακολουθώντας επαναληπτική διαδικασία, θεωρώντας κάθε νέο μοντέλο  $(x+dx)$  ως αρχικό στην επόμενη επανάληψη.

Έχοντας προκαθορίσει τα κριτήρια τερματισμού για την εύρεση της βέλτιστης λύσης του  $dx$  από την εξίσωση (4.40) και γνωρίζοντας όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της εξίσωσης, μπορεί τώρα να καθοριστεί μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος.



**Σχήμα 4.19** Μοντέλο 9 παραμέτρων και πίνακας εξομάλυνσης C (Tsourlis, 1995).

Ορίζεται ο πίνακας εξομάλυνσης C μεταξύ των παραμέτρων (Σχήμα 4.19) και ζητείται η ελαχιστοποίηση του λάθους  $dy$  σε συνδυασμό με τη μέγιστη εξομάλυνση

$$S = (W_d dy)^T (W_d dy) \rightarrow 0$$

$$dR = (C dx)^T (C dx) \rightarrow \text{μέγιστη} \quad (4.41)$$

όπου

- $dy = y - f(x)$
- $Wd$  είναι ο πίνακας στατιστικών βαρών των δεδομένων
- C είναι ο πίνακας εξομάλυνσης
- $dx$  είναι το διάνυσμα διόρθωσης των αντιστάσεων του μοντέλου και
- $dy$  είναι η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων  $y$  και των συνθετικών φαινομένων αντιστάσεων  $f(x)$ .

Συγκεκριμένα, με γνωστό ένα σύνολο μετρήσεων  $d_i$

- Προσδιορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου
- Παράγεται ο πίνακας C που περιγράφει τον τρόπο εξομάλυνσης του μοντέλου.
- Προσδιορίζεται ο πίνακας στατιστικών βαρών W που είναι ένας διαγώνιος πίνακας, ο οποίος περιγράφει το σφάλμα των μετρήσεων.
- Προσδιορίζεται μία αρχική εκτίμηση της κατανομής της αντίστασης  $X_0$  και υπολογίζεται η απόκριση του μοντέλου  $f(X_0)$ .
- Υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας  $J_0$  που αντιστοιχεί στην κατανομή αντιστάσεων  $X_0$ .
- Ορίζεται η αρχική τιμή  $\mu_0$  του πολλαπλασιαστή Lagrangian, με τον οποίο ελέγχεται η εξομάλυνση του μοντέλου αντιστροφής. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του πολλαπλασιαστή Lagrangian, τόσο πιο εξομαλυμένο είναι το μοντέλο αντιστροφής.
- Ορίζονται τα κριτήρια τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας.

**Βήματα Αλγορίθμου**

Στην  $k$  επανάληψη, το διάνυσμα διόρθωσης των αντιστάσεων του μοντέλου  $dx_k$  δίνεται ως

$$X_{k+1} = X_k + dX_k + [(W_d J_k)^T W_d J_k + \mu_k C^T C]^{-1} (W_d J_k)^T W_d dy_k \quad (4.42)$$

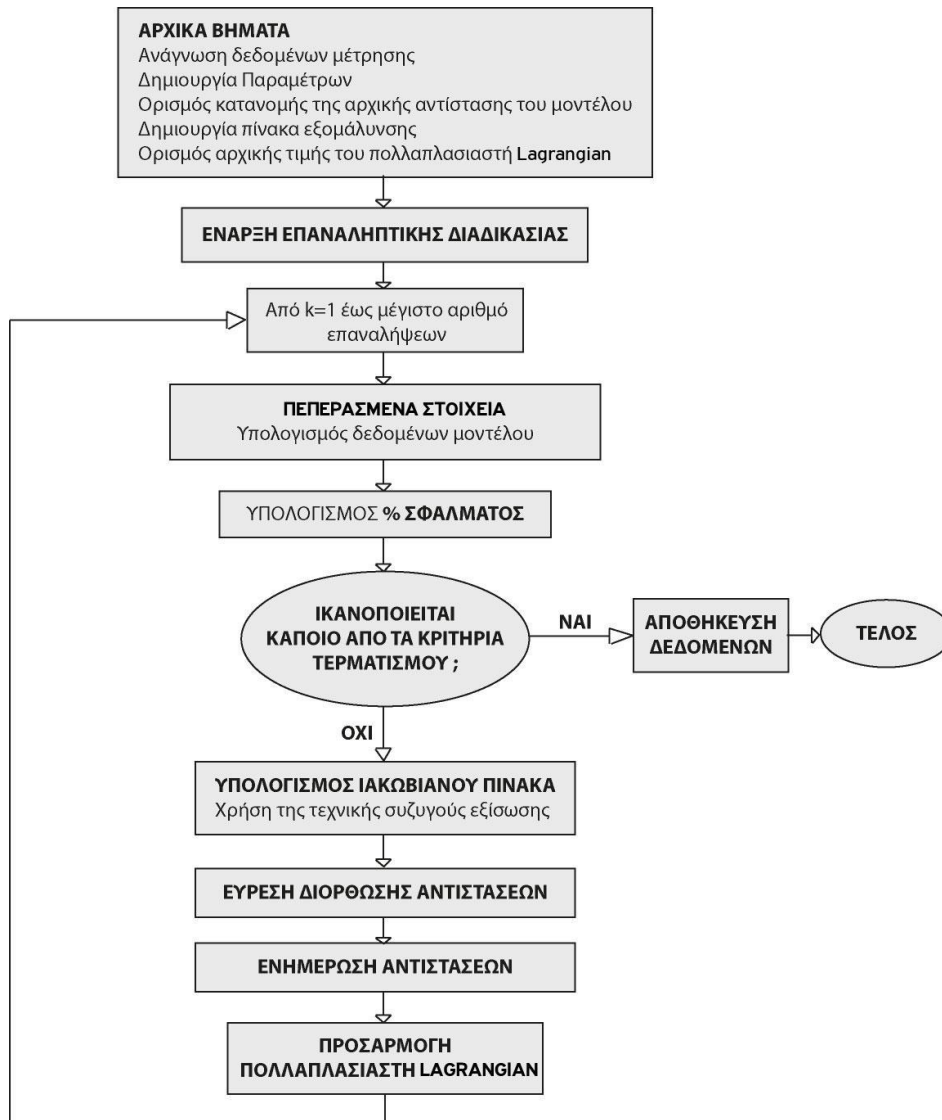
όπου

- $J_k$  είναι η εκτίμηση του Ιακωβιανού πίνακα που αντιστοιχεί στην κατανομή των αντιστάσεων
- $\mu_k$  είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrangian για την  $k$  επανάληψη,
- $C$  είναι ο πίνακας εξομάλυνσης,
- $W_d$  είναι ο πίνακας στατιστικών βαρών και
- $T$  σημαίνει ανάστροφος μετασχηματισμό και όπου

$$dy_k = y - (x_k) \quad (4.43)$$

- Ορίζονται οι νέες εκτιμήσεις των αντιστάσεων από  $X_k$  σε  $X_{k+1} = X_k + dX_k$  και υπολογίζεται, μέσω της επίλυσης του ευθέος προβλήματος, η νέα απόκριση του μοντέλου  $F(x_{k+1})$ .
- Εάν ικανοποιείται ένα από τα κριτήρια τερματισμού, η διαδικασία τελειώνει, αλλιώς υπολογίζεται η νέα εκτίμηση του Ιακωβιανού πίνακα  $J_{k+1}$  και η διαδικασία επαναλαμβάνεται (επιστροφή στο 1<sup>ο</sup> βήμα).

Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει τον αλγόριθμο επίλυσης δισδιάστατου αντίστροφου ηλεκτρικού προβλήματος.



**Σχήμα 4.20** Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επίλυσης του αντιστρόφου γεωηλεκτρικού προβλήματος (Tsourlos, 1995).

#### 4.6.2.1 Χρήση Λογαριθμικής Κλίμακας στην Επίλυση Συστημάτων

Στις μεθόδους αντιστροφής των γεωηλεκτρικών δεδομένων είναι συχνή η χρήση λογαριθμικής κλίμακας των φαινομένων και πραγματικών αντιστάσεων. Οι λόγοι είναι:

- Η χρήση λογαρίθμων υποχρεώνει τις παραμέτρους να παίρνουν μόνο θετικές τιμές και αποφεύγονται έτσι μη ρεαλιστικές λύσεις του αντιστρόφου προβλήματος, που θα περιέχουν αρνητικές αντιστάσεις (Sasaki 1982).
- Λόγω του μεγάλου δυναμικού εύρους των τιμών που μπορεί να έχουν οι τιμές των ηλεκτρικών αντιστάσεων των παραμέτρων, η χρήση λογαρίθμων μπορεί να επιταχύνει το ρυθμό σύγκλισης της επαναληπτικής διαδικασίας (Park και Van 1991).

Το τετράγωνο του σφάλματος των ελαχίστων τετραγώνων, στην περίπτωση χρήσης λογαρίθμων γίνεται  $q' = dy' T dy'$ , όπου  $dy' = \ln(y) - \ln(f(x))$ . Το διάνυσμα των παραμέτρων  $x$  γίνεται  $p_i$ , όπου  $p_i = x_i$  και  $i=1,2,\dots,n$ . Η λύση του συστήματος είναι

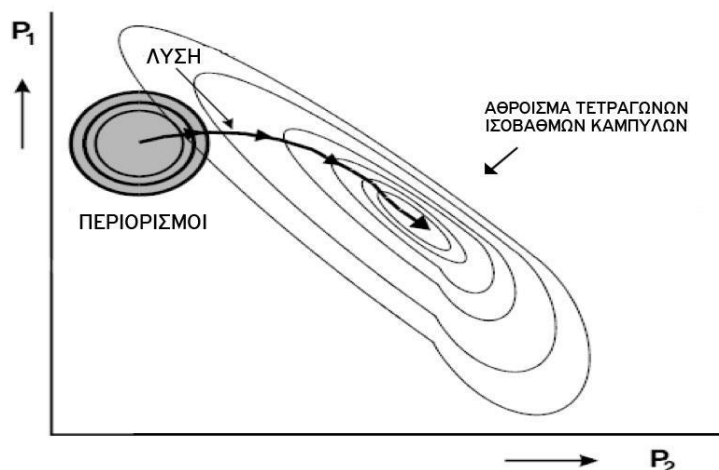
$$dp = (J'^T J')^{-1} J'^T dy' \quad (4.44)$$

όπου ο  $J'$  έχει στοιχεία  $J'_{ij} = \frac{\partial \ln y_i}{\partial p_j}$  (Tsourlos, 1995) και οι νέες εκτιμήσεις των αντιστάσεων, στην  $k$  επανάληψη, δίνονται από τη σχέση

$$x_{k+1} = x_k + dp_k \quad (4.45)$$

#### 4.6.2.2 Υπολογισμός Συντελεστή Lagrangian

Για την επίλυση της σχέσης (4.42) είναι απαραίτητη η εύρεση μιας τιμής για τον συντελεστή Lagrangian. Γενικότερα η εύρεση αυτού του πολλαπλασιαστή είναι ένα πρόβλημα προς επίλυση σε κάθε εξομαλυμένη αντιστροφή. Μεγάλες τιμές οδηγούν σε υπερβολικά εξομαλυμένα μοντέλα, ενώ μικρές τιμές οδηγούν σε αστάθεια της λύσης. Η συνηθέστερη μέθοδος που ακολουθείται είναι η αρχική χρήση μιας μεγάλης τιμής, για να αποτραπεί η αστάθεια και όσο η λύση πλησιάζει την πραγματική, να ελαττώνεται ο πολλαπλασιαστής. Μία γεωμετρική αναπαράσταση της τεχνικής αυτής (Σχήμα 4.21), έγινε από τους Box και Kanemasu (1972). Η λύση αυτή συνήθως απαιτεί ένα πλήθος δοκιμών, καθώς δεν είναι δυνατή η εξαρχής γνώση της αρχικής τιμής. Ο Tsourlos (1995) προτείνει κάποια αρχική εμπειρική τιμή ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο εξομάλυνσης και σταδιακή ελάττωση σε κάθε νέα επανάληψη.



**Σχήμα 4.21** Αναπαράσταση λύσης ελαχίστων τετραγώνων δύο παραμέτρων  $P_1$  και  $P_2$  (Box και Kanemasu, 1977).

Έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι εύρεσης του συντελεστή Lagrangian που βασίζονται σε ανάλυση των ιδιοτιμών του αντίστροφου πίνακα με τη βοήθεια της

ανάλυσης SVD. Οι τεχνικές αυτές εξασφαλίζουν μία μαθηματική λύση και δεν απαιτείται αρχική εμπειρική τιμή (Karaoulis, 2007).

Οι Yieta. (2003) πρότειναν τη μέθοδο της ενεργού εξισορρόπησης με περιορισμούς (ActiveConstrainedBalancing, ACB) με την εύρεση διαφορετικού πολλαπλασιαστή για κάθε παράμετρο, βασιζόμενοι σε μελέτη του πίνακα ανάλυσης του μοντέλου. Η μέθοδος αυτή βρίσκει πολύ καλή εφαρμογή σε όλα τα είδη μετρήσεων. Στην παρούσα διατριβή ακολουθήθηκε η μέθοδος αυτή καθώς από τις δοκιμές φαίνεται να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα (Karaoulis, 2007).

Ειδικότερα ως πίνακας ανάλυσης (resolutionmatrix) του μοντέλου R ορίζεται

$$R = J^+ J \quad (4.46)$$

όπου  $J^+$  είναι ο ψευδοαντίστροφος

$$J^+ = [J^T J + \mu C^T C]^{-1} J^T \quad (4.47)$$

Ο πίνακας ανάλυσης δείχνει πόσο καλά είναι προσδιορισμένη μία παράμετρος. Αν μία παράμετρος είναι τέλεια προσδιορισμένη, πρέπει η αντίστοιχη τιμή του πίνακα ανάλυσης να έχει την τιμή 1 για την παράμετρο αυτή ( $R_{ii}=1$ ) και μηδέν (0) σε όλες τις άλλες θέσεις. Αντίθετα, αν μία παράμετρος δεν είναι καλά προσδιορισμένη, η αντίστοιχη γραμμή του πίνακα ανάλυσης θα έχει τιμές σε όλες τις θέσεις χωρίς να παίρνει την τιμή 1 στην αντίστοιχη θέση ( $R_{ii}$ ). Για παράδειγμα σε σύστημα 5 παραμέτρων ο πίνακας R θα έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4.22).

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.2 & 0.1 & 0.42 & 0.19 & 0.09 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

**Σχήμα 4.22** Πίνακας ανάλυσης μοντέλου 5 παραμέτρων.

Γενικά το άθροισμα των στοιχείων κάθε γραμμής του πίνακα ανάλυσης πρέπει να είναι ίσο με 1. Οι Yieta. (2003) θεωρούν ότι μια καλά προσδιορισμένη παράμετρος χρειάζεται μικρή τιμή του πολλαπλασιαστή, ενώ αντίθετα μια όχι καλά προσδιορισμένη παράμετρος απαιτεί μεγάλη τιμή του πολλαπλασιαστή, έτσι ώστε η αυξημένη εξομάλυνση να απαγορεύει στην παράμετρο να πάρει υψηλές τιμές. Η ποσοτικοποίηση της παραπάνω έκφρασης γίνεται με τη συνάρτηση διασποράς Backus-Gilbert (Menke, 1984), η οποία υπολογίζει την πλευρική κατανομή των γραμμών του πίνακα ανάλυσης. Μεγάλη τιμή της συνάρτησης διασποράς σημαίνει



ότι η παράμετρος είναι φτωχά προσδιορισμένη και το αντίστροφο. Ο υπολογισμός της συνάρτησης διασποράς για την  $i$  παράμετρο γίνεται ως εξής

$$SP_i = \sum_j^N (W_d(1 - S_{ij})R_{ij})^2 \quad (4.48)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των παραμέτρων,  $W_d$  ο πίνακας στατιστικών βαρών, που υπολογίζεται από τις πλευρικές χωρικές αποστάσεις της παραμέτρου  $i$  με όλες τις υπόλοιπες  $j$ . Ο πίνακας  $S$  χρησιμοποιείται ώστε στον υπολογισμό να λαμβάνεται υπόψη και ο πίνακας συνάφειας. Το στοιχείο  $S_{ij}$  είναι 1 όταν το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα συνάφειας  $C_{ij}$  είναι μη μηδενικό και μηδέν (0) σε όλες τις άλλες θέσεις.

Η διαδικασία υπολογισμού του διαγώνιου πίνακα ‘ $\mu$ ’ γίνεται με ένα αρχικό υπολογισμό του πίνακα ανάλυσης μοντέλου με κάποιο μικρό αρχικά πολλαπλασιαστική Lagrangian (συνήθως 0.01). Στη συνέχεια μετατρέπεται η συνάρτηση διασποράς σε μεταβαλλόμενο πολλαπλασιαστική μεταξύ δύο προαποφασισμένων ορίων ( $\mu_{\min}$  και  $\mu_{\max}$ ), σε λογαριθμική κλίμακα σύμφωνα με τον παρακάτω αλγόριθμο (Yietal. 2003)

$$\log(\mu_i) = \log(\mu_{\min}) + \frac{\log(\mu_{\max}) - \log(\mu_{\min})}{\log(SP_{\max}) - \log(SP_{\min})} (\log(SP_i) - \log(SP_{\min})) \quad (4.49)$$

όπου  $\mu_i$  είναι ο πολλαπλασιαστής της παραμέτρου  $i$ ,  $SP_i$  είναι η συνάρτηση διασποράς της παραμέτρου  $i$ ,  $\mu_{\min}$  και  $\mu_{\max}$  τα κάτω και άνω όρια των πολλαπλασιαστών (ενδεικτικές τιμές 0.01 και 0.5) και  $SP_{\min}$ ,  $SP_{\max}$  το ελάχιστο και μέγιστο της συνάρτησης διασποράς, αντίστοιχα.

#### 4.7 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Κάθε επαναληπτικός αλγόριθμος αντιστροφής τερματίζεται με βάση κάποια προκαθορισμένα κριτήρια σύγκλισης και τερματισμού. Τα κριτήρια αυτά αναφέρονται παρακάτω και στηρίζονται στην έκφραση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMS μεταξύ των πραγματικών και των συνθετικών δεδομένων, το οποίο υπολογίζεται κάθε φορά που βρίσκεται το βελτιωμένο μοντέλο αντίστασης και είναι

$$\%RMS_{error} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(d_i^{obs} - d_i^{calc})^2}{(d_i^{obs})^2}} \quad (4.50)$$

όπου  $m$  είναι ο αριθμός των μετρήσεων,  $d_i^{obs}$  είναι ο παρατηρούμενος λογάριθμος της  $i$  μέτρησης και  $d_i^{calc}$  είναι ο υπολογιζόμενος λογάριθμος της  $i$  μέτρησης. Η αντιστροφή θα τερματιστεί αν ισχύει ένα από τα παρακάτω κριτήρια:

**Απόκλιση.** Ο αλγόριθμος τερματίζεται αν το RMS αυξηθεί με την πρόοδο των επαναλήψεων. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται σχετικά σπάνια, κυρίως σε περιπτώσεις που ο θόρυβος των δεδομένων είναι πολύ μεγάλος ή όταν η αρχική επιλογή του συντελεστή εξομάλυνσης δεν ήταν η βέλτιστη δυνατή (πολύ μικρή τιμή).

**Μικρός ρυθμός σύγκλισης.** Ο αλγόριθμος τερματίζεται αν ο ρυθμός μεταβολής του RMS είναι μικρός μεταξύ διαδοχικών επαναλήψεων (π.χ. λιγότερο από 5%). Στην περίπτωση αυτή, οι μεταβολές του μοντέλου προσπαθούν να ερμηνεύσουν μικρής τάξης μεταβολές των δεδομένων, που συνήθως αντιστοιχούν σε θόρυβο και υπάρχει κίνδυνος να αρχίσουν τα δεδομένα να ερμηνεύουν το θόρυβο. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και όταν ο ρυθμός σύγκλισης είναι μεγάλος.

**Σφάλμα σύγκλισης μικρότερο από το σφάλμα των δεδομένων.** Αυτό το κριτήριο ενεργοποιείται όταν είναι διαθέσιμα τα σφάλματα των δεδομένων. Εάν το σφάλμα της αντιστροφής είναι μικρότερο από τα τυπικά σφάλματα των δεδομένων, τότε οι μεταβολές του μοντέλου έχουν ερμηνεύσει μεταβολές των δεδομένων που αντιστοιχούν σε θόρυβο. Για να μη συμβεί αυτό, η διαδικασία της αντιστροφής τερματίζεται και η αντίσταση που υπολογίστηκε από την προηγούμενη επανάληψη υιοθετείται ως το τελικό μοντέλο.

**Ολοκλήρωση του αριθμού των επαναλήψεων.** Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν ο προκαθορισμένος μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων έχει ολοκληρωθεί. Στην παρούσα διατριβή ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει ορισθεί σε 6.

#### 4.8 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ

Για την ποιοτική εκτίμηση του πόσο καλά ορισμένες είναι οι παράμετροι έγινε χρήση του πίνακα ευκρίνειας και του Ιακωβιανού πίνακα.

- Πίνακας Ευκρίνειας (ResolutionMatrix)

Σύμφωνα με τη σχέση (4.46) χρησιμοποιείται η διαγώνιος του πίνακα ευκρίνειας (κάθε τιμή της διαγωνίου αντιστοιχεί και σε μία παράμετρο) για να προσδιοριστεί η παράμετρος  $j$  σύμφωνα με τη σχέση

$$R = (J_{ij}^T J_{ij} + C)^{-1} J_{ij}^T J_{ij} \quad (4.51)$$

όπου

- $J_{ij}$  είναι η τιμή ευαισθησίας σε λογάριθμο της  $i$  μέτρησης σε μία μικρή αλλαγή μεταβολής στην

αντίσταση της  $j$  παραμέτρου

- $C$  είναι ο πίνακας που περιέχει τους συντελεστές απόσβεσης, τους περιορισμούς και τα χωρικά φίλτρα που σταθεροποιούν την διαδικασία αντιστροφής

Οι παράμετροι που είναι πολύ καλά προσδιορισμένες έχουν τιμή διαγωνίων στοιχείων του  $R$  που πλησιάζει το 1, και όσο μειώνεται η ποιότητα της παραμέτρου η τιμή αυτή πλησιάζει την τιμή μηδέν (0).

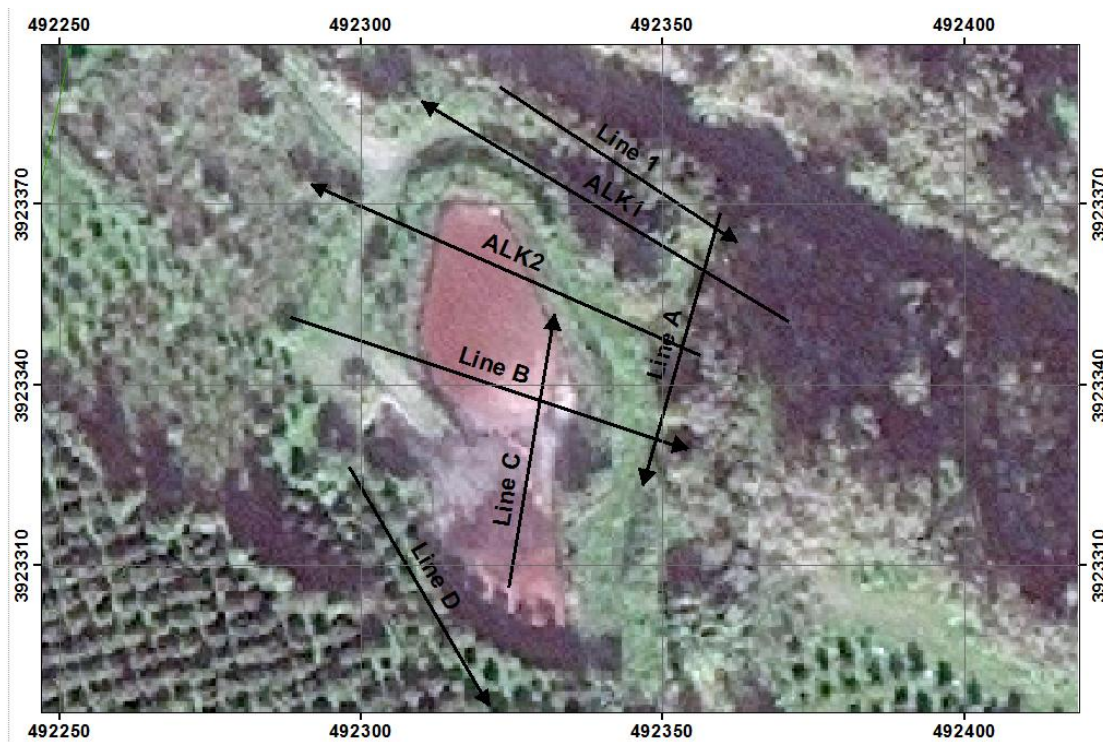
- Μέτρο στήλης Ιακωβιανού πίνακα (CumulativeJacobianMatrix)

Ένα επιπλέον κριτήριο για να ελεγχθεί πόσο καλά ορισμένη είναι μία παράμετρος χωρίς την διαδικασία της αντιστροφής είναι το μέτρο της στήλης του Ιακωβιανού πίνακα, το οποίο προκύπτει από το άθροισμα κατ' απόλυτη τιμή όλων των μετρήσεων  $N$  των τιμών ευαισθησίας του Ιακωβιανού πίνακα σε κάθε μία παράμετρο  $j$

$$cumulative = \sum_{i=1}^N |J_{ij}| \quad (4.52)$$

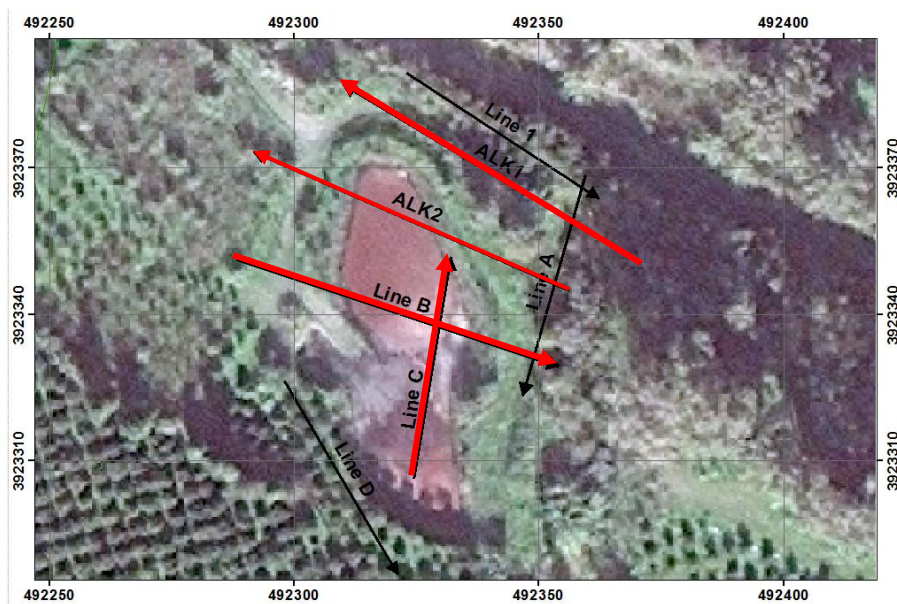
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΔΙΟΥ

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων από 9 τομές όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.1.



**Σχήμα 5.1** Χωρική κατανομή προφίλ γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης.

Η γραμμή C, ορίζεται εντός της δεξαμενής προκειμένου να απεικονιστεί το πάχος των αποθέσεων των αποβλήτων και η αντίσταση του ρυπαντή. Τρεις γραμμές (ALK1, ALK2, B) διέσχισαν το εσωτερικό της δεξαμενής αποβλήτων σε μια προσπάθεια να καταγράψει η τιμή αντίστασης των αποβλήτων σε σχέση με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής έρευνας. Η γραμμή D που ορίζεται ΝΔ της δεξαμενής ήταν η γραμμή αναφοράς.



Σχήμα 5.2 Απεικόνιση των τομών που διέρχονται μέσα στη δεξαμενή απόθεσης.

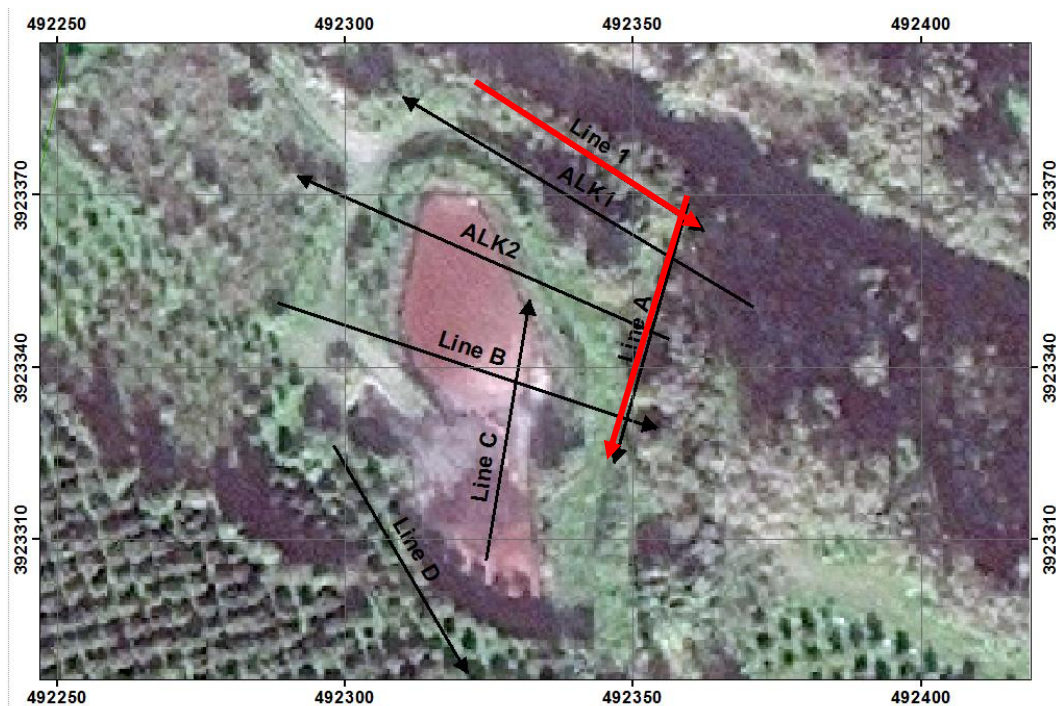


Σχήμα 5.3 Τομή B (δεξιά) και τομή ALK2 (αριστερά)



Σχήμα 5.4 Τομή C για την απεικόνιση του πάχους των αποθέσεων (δεξιά) και τομή αναφοράς D (αριστερά).

Οι γραμμές 1 και A επιλέχθηκαν για την συνεχή παρακολούθηση κάτω από την επιφάνεια των αποβλήτων λόγω της θέσης τους προς την κατεύθυνση της ροής των επιφανειακών υδάτων που φτάνει σε επίπεδα χειμάρρων εποχιακά ακριβώς στα βόρεια της Γραμμής 1. Από τον Ιούνιο του 2013 γίνονται ηλεκτρικές τομογραφίες ανά μήνα στις Γραμμές 1 και A αντίστοιχα. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης επιλέχθηκαν οι διατάξεις διπόλου-διπόλου και Wenner-Schlumberger για την καταγραφή των δεδομένων της ηλεκτρικής αντίστασης, που συνδυάζουν την οριζόντια και κάθετη ανάλυση.

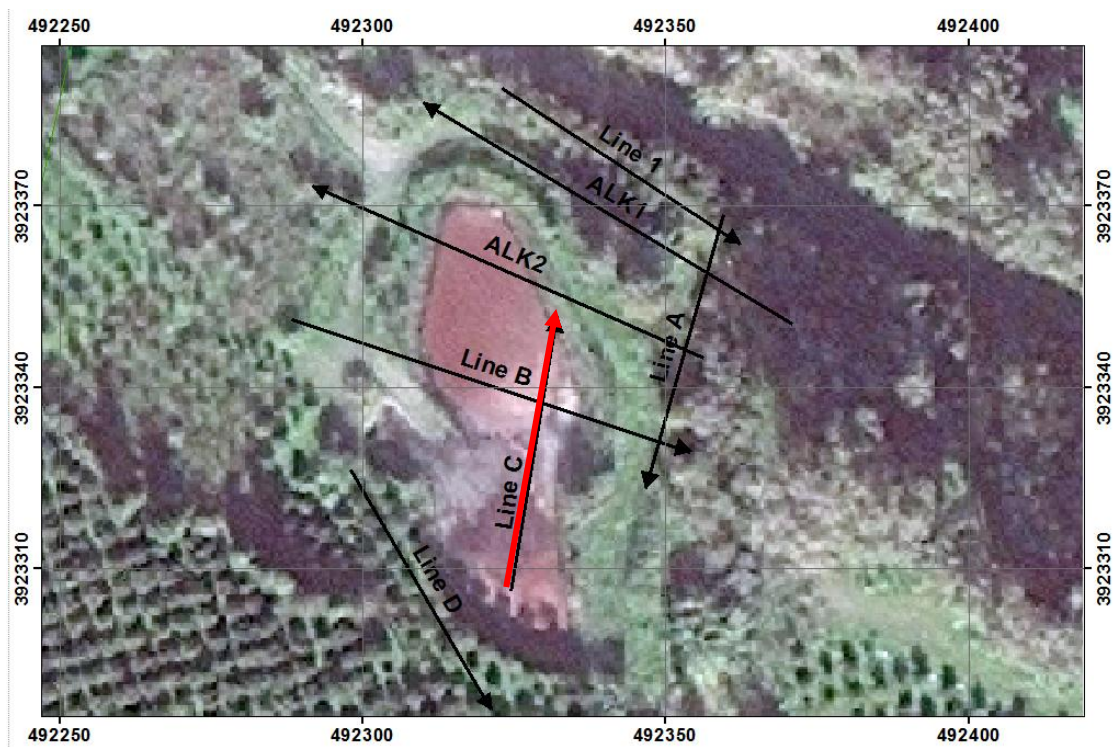


Σχήμα 5.5 Απεικόνιση γραμμών A και 1 με κόκκινες έντονες γραμμές.



Σχήμα 5.6 Απεικόνιση διαφορετικών περιβάλλοντων για τις τομές 1 και A αντίστοιχα.

Η τομή C, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσιάζει ένα στρώμα 5-6 μέτρων που αποτελείται από απόβλητα ελαιοτριβείων και επιβεβαίωσε την θεωρητική τιμή της αντίστασης του ρύπου.

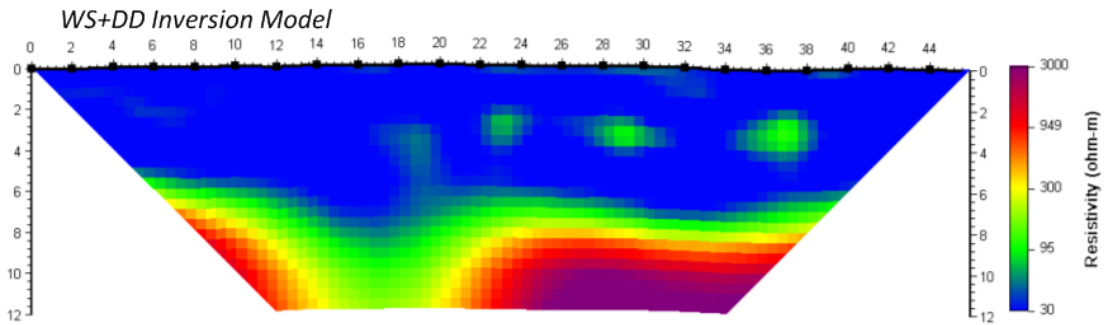


**Σχήμα 5.7** Γραμμή C για την απεικόνιση του πάχους του στρώματος απόθεσης των αποβλήτων.



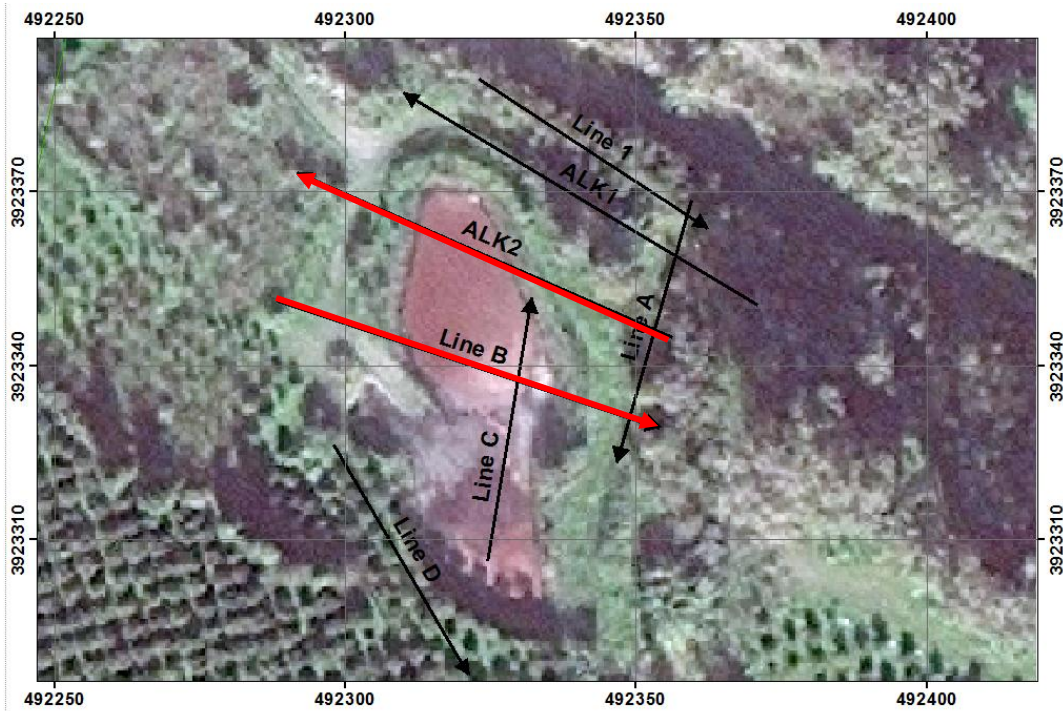
**Σχήμα 5.8** Τομή εντός της δεξαμενής απόθεσης αποβλήτων.

**a. Line C, 6 Iterations, RMS=1.8%**



**Σχήμα 5.92** Δμοντέλο κατανομής αντιστάσεων για την γραμμή C (συνθετικό μοντέλο διατάξεων Wenner-Schlumberger και διπόλου-διπόλου).

Οι γραμμές B και ALK2 είναι παράλληλες και έχουν 20 μέτρα απόσταση μεταξύ τους. Λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη της πολύ αγωγίμης ζώνης στο κέντρο, το βάθος της απόθεσης των αποβλήτων των ελαιοτριβείων φαίνεται να κατεβαίνει σε τουλάχιστον περίπου 6-7 μέτρα. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι η αγωγίμη ζώνη που εκτείνεται προς βαθύτερο βάθος και κάτω από τη ζώνη αντίστασης (Σχήμα 5.12), ξεκινώντας από το όριο της λίμνης αποβλήτων σε 44 μέτρα κατά μήκος της γραμμής. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται με τη διάχυση των αποβλήτων εντός των γύρω γεωλογικών σχηματισμών, έξω από τα όρια της δεξαμενής. Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται από παρόμοιες παρατηρήσεις που έχουν προκύψει από την γραμμή B.

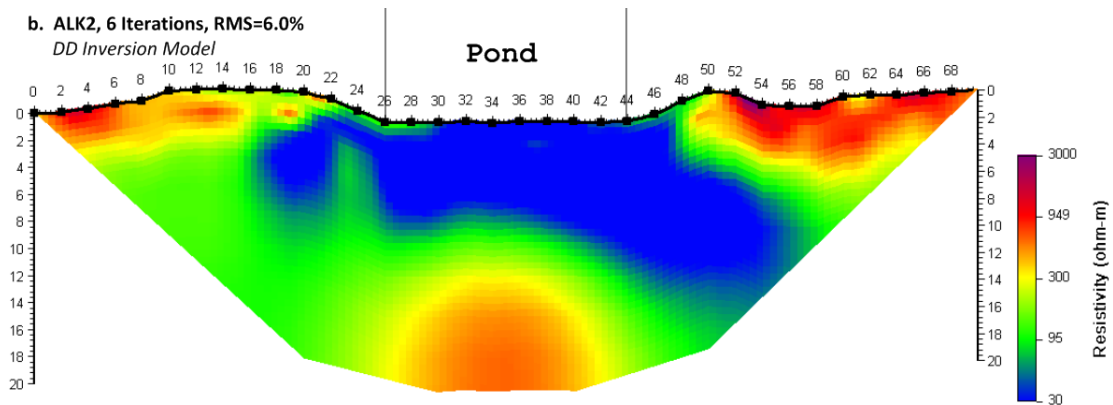


**Σχήμα 5.10** Γραμμές B και ALK2.



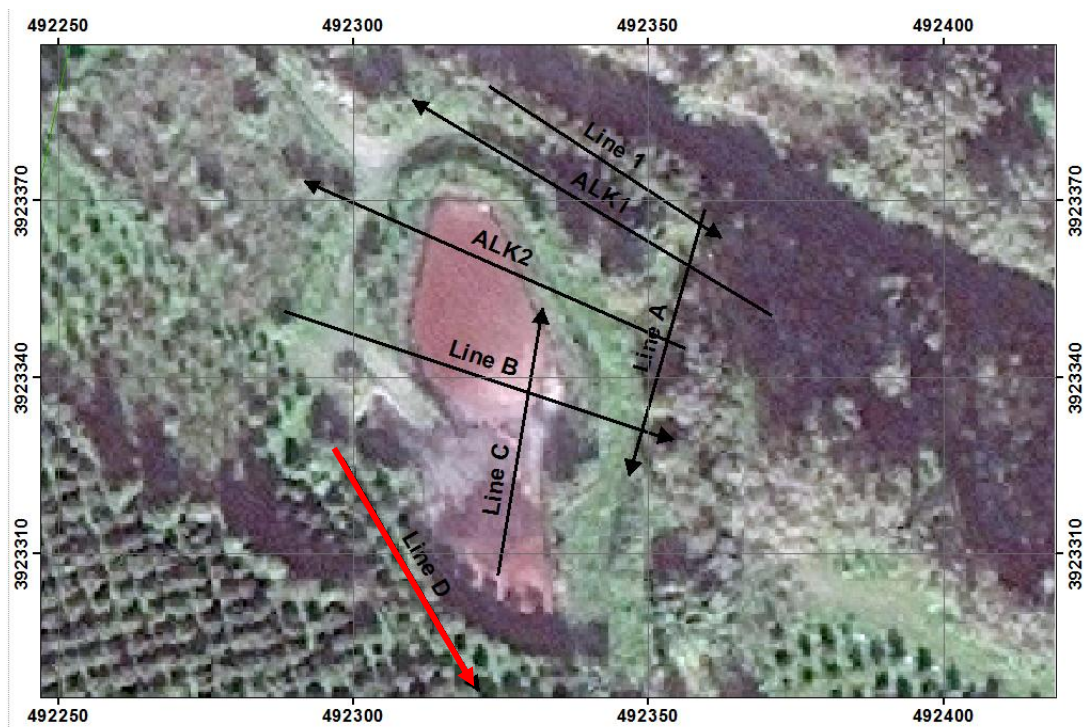


Σχήμα 5.11 Γραμμές Β και ALK2 που διασχίζουν την δεξαμενή απόθεσης αποβλήτων ελαιολιτριβείων.



Σχήμα 5.12 2D μοντέλο κατανομής αντιστάσεων της τομής ALK2.

Η γραμμή D βρίσκεται έξω από τη δεξαμενή αποβλήτων και το επιφανειακό στρώμα εδάφους έχει αρκετά υψηλή αντίσταση. Κατά την συνδυασμένη αντιστροφή των διατάξεων Wenner-Schlumberger και διπόλου-διπόλου, το μοντέλο που προέκυψε αναπαριστά στο κέντρο της γραμμής ένα αγωγίμο υλικό που έχει την αντίσταση περίπου 30 Ohm-m που αναπτύσσεται κάτω από το βάθος των 6 μ από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι αυτό το στρώμα χαμηλής αντίστασης θα μπορούσε να είναι η επέκταση του απόβλητου υλικού σε μεγάλο βάθος και εκτός της δεξαμενής αποβλήτων προς τα νοτιοδυτικά.

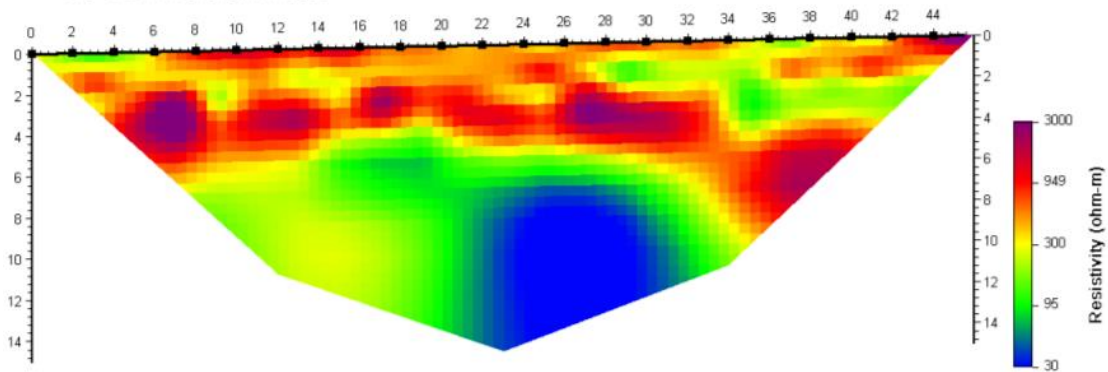


Σχήμα 5.13 Τομή D.



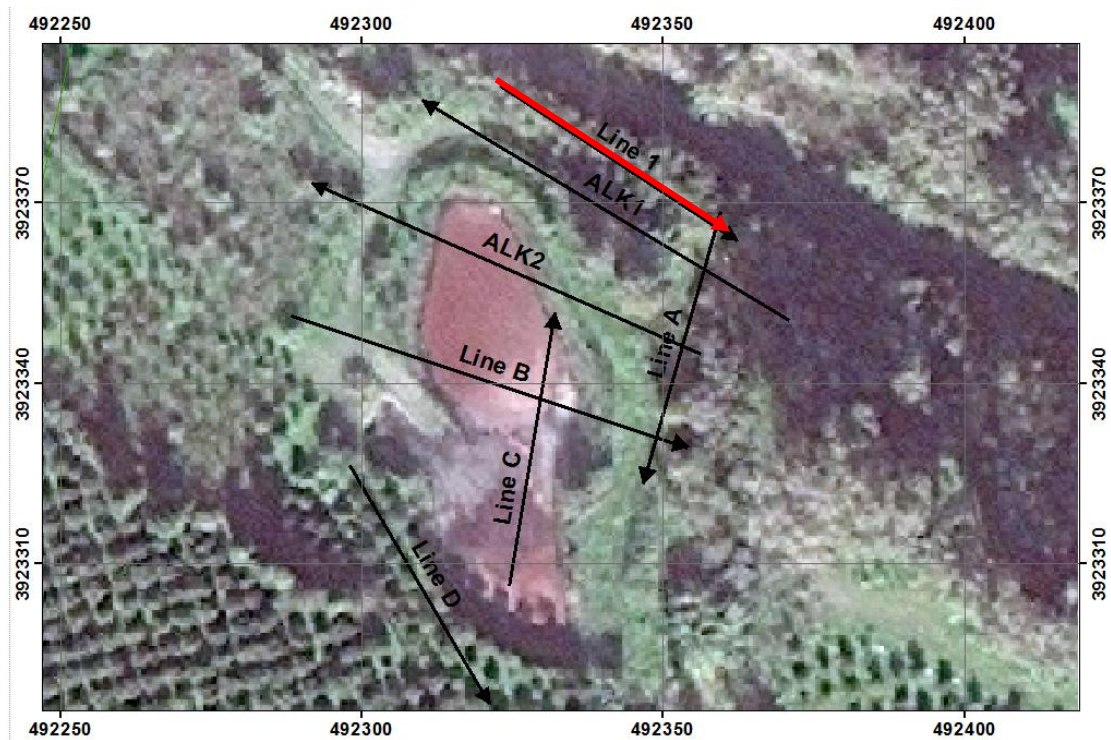
Σχήμα 5.14 Περιβάλλον τομής D.

d. Line D, 6 Iterations, RMS=2.6%  
WS+DD Inversion Model



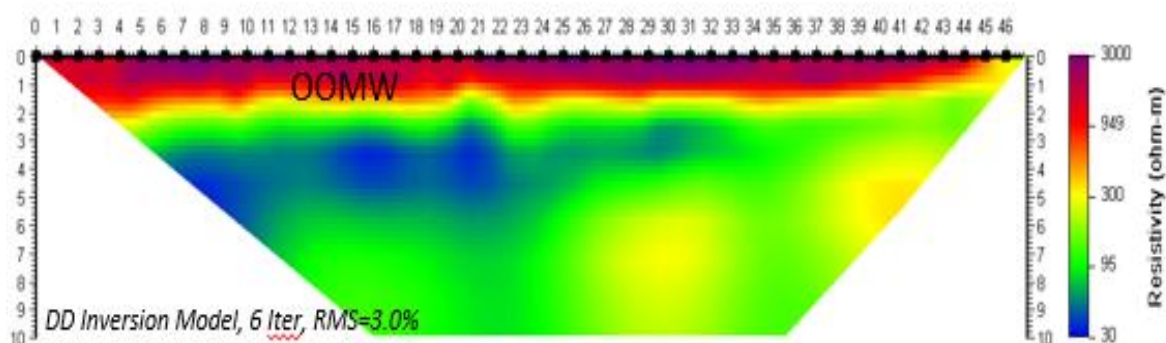
Σχήμα 5.15 2D μοντέλο κατανομής αντιστάσεων για την γραμμή D (συνθετικό μοντέλο διατάξεων Wenner-Schlumberger και διπόλου-διπόλου).

Η δομή κάτω από την επιφάνεια, κατά μήκος γραμμής 1 μπορεί να προσεγγιστεί ως τριών στρώσεων γη. Το ανώτερο στρώμα εμφανίζει υψηλές τιμές αντίστασης πάνω από 500 Ohm-m και σχετίζεται με ένα αμμώδες υλικό με βότσαλα και χαλίκια. Η πράσινη και μπλε ζώνη είναι πιο κυρίαρχη στο αριστερό μέρος από ό, τι στο δεξί μέρος (Σχήμα 5.17). Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ότι τα απόβλητα επηρέασαν την ανάπτυξη αυτής της χαμηλής αντίστασης δομή του δεύτερου στρώματος προς το αριστερό μέρος του τμήματος.

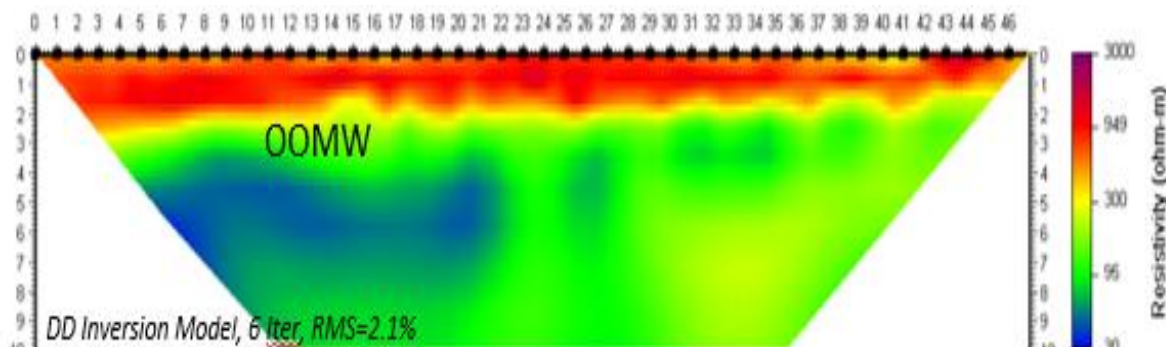


Σχήμα 5.16 Τομή 1.

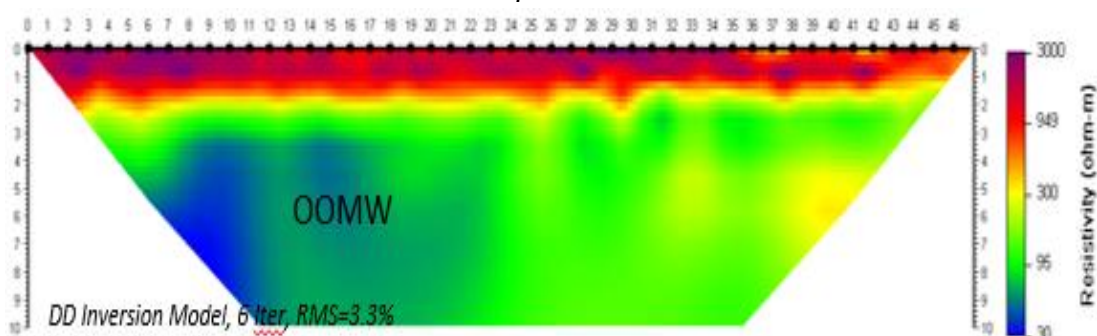
8 Ιουνίου 2013



29 Ιανουαρίου 2014



30 Απριλίου 2014

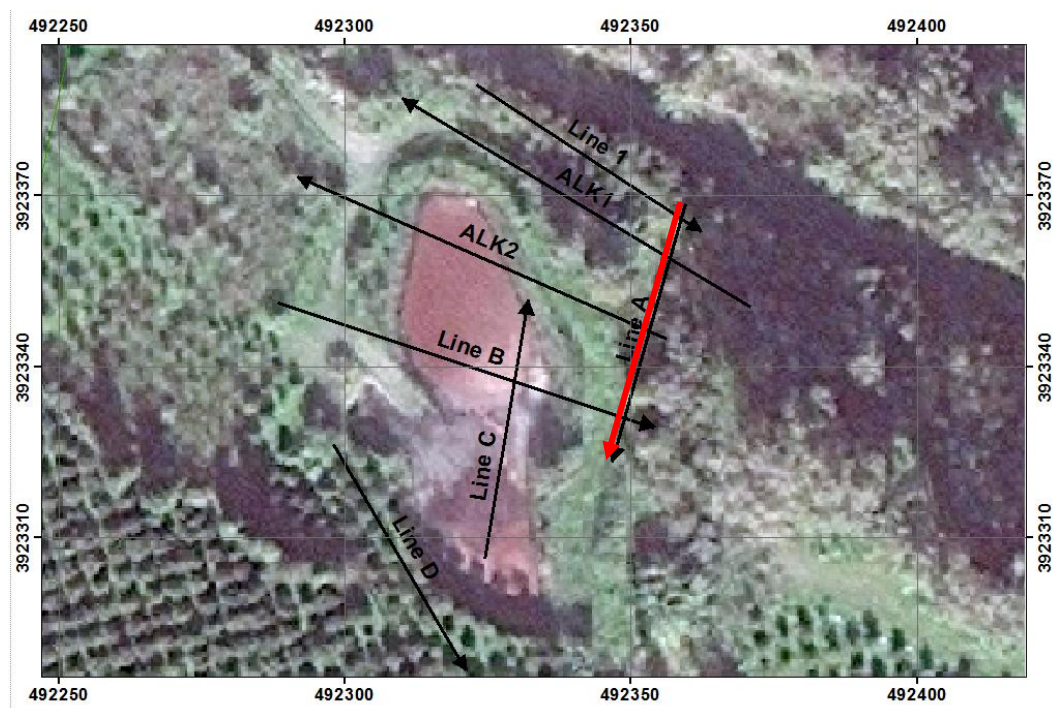


**Σχήμα 5.172** Δμοντέλο κατανομής αντιστάσεων για την γραμμή 1 με διάταξη διπόλου-διπόλου κατά τρεις διαφορετικές περιόδους.

Κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης από το καλοκαίρι του 2013 (πριν από την περίοδο συγκομιδής), μέχρι την άνοιξη του 2014 που η παραγωγή ελαιολάδου έχει ολοκληρωθεί, μπορούμε να δούμε ότι τα ορυπαντής στο αριστερό μέρος του τμήματος της γεωηλεκτρικής τομής παρουσιάζει μια κίνηση προς τα κάτω φτάνοντας περίπου το βάθος των 10 μέτρων κάτω από το έδαφος.

Το δεξιό τμήμα της γραμμής A είναι πιο κοντά στην δεξαμενή των αποβλήτων από την αριστερή πλευρά. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι η ζώνη με πράσινη χρωματική απόχρωση ενδέχεται να έχει επηρεαστεί από τα απόβλητα. Σε σύγκριση με την αντίσταση της Γραμμής 1 σε παρόμοιο βάθος, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση είναι μεγαλύτερη από τη Γραμμή 1. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι τα απόβλητα των

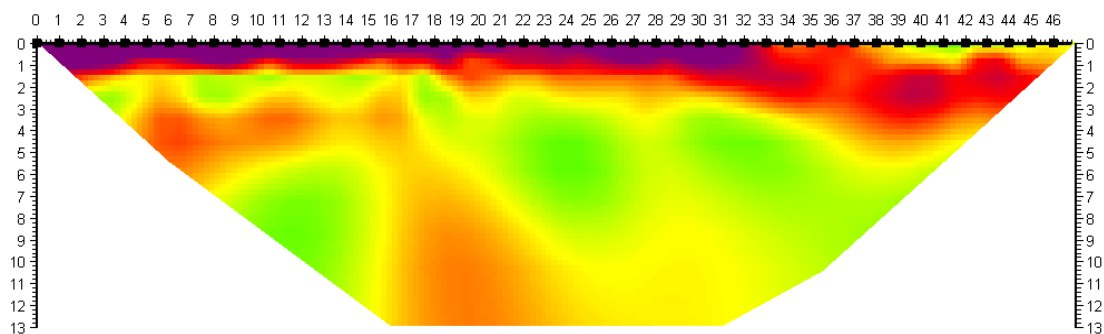
ελαιοτριβείων μπορεί να έχουν διαχυθεί στο έδαφος προς τα βόρεια (προς τον ποταμό) από ό, τι προς την Ανατολή.



Σχήμα 5.18 Γραμμή Α.



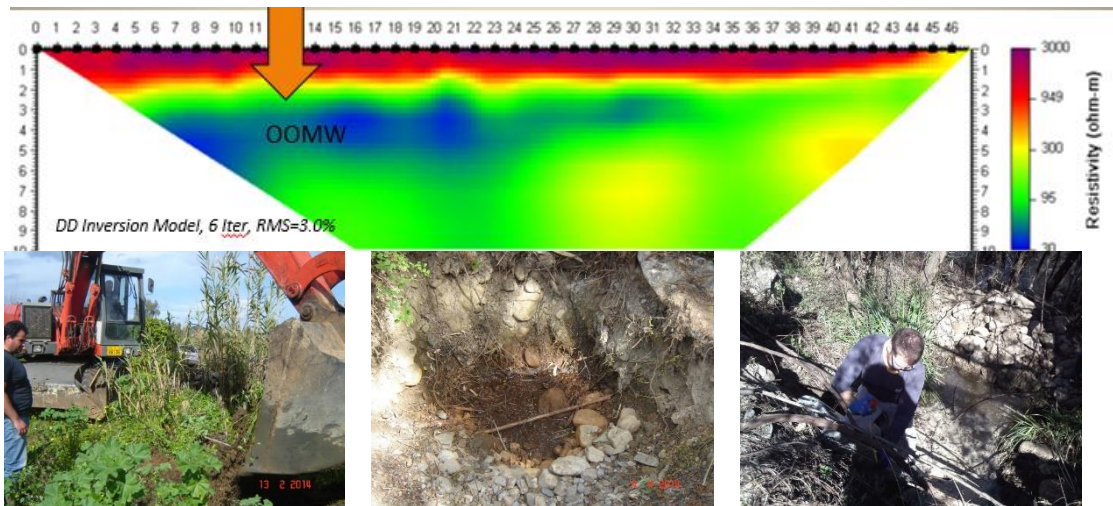
Σχήμα 5.19 Γραμμή Α, κάθετα στην κοίτη και στην γραμμή 1.



**Σχήμα 5.202** Δμοντέλο κατανομής αντιστάσεων για την γραμμή 1 με διάταξη διπόλου-διπόλου.

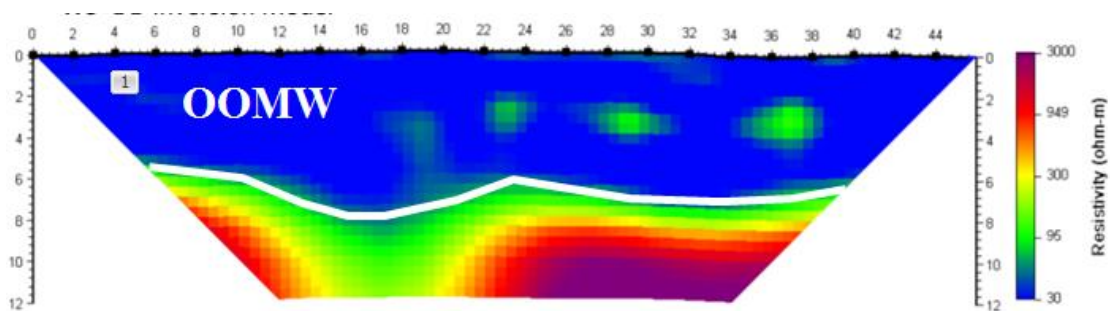
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Μετά τα πρώτα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών μετρήσεων, έπρεπε να επιβεβαιωθεί η καταλληλότητα της μεθόδου για την παρακολούθηση των αποθέσεων των αποβλήτων. Έτσι ανοίξαμε φρεάτια κατά μήκος των γραμμών 1 και Α, όπου το έδαφος έχει μολυνθεί και υπήρχε μια εμφανή ροή των αποβλήτων στα σημεία που είχε υποδείξει η γεωηλεκτρική έρευνα.



Σχήμα 6.1 Διάνοιξη φρεατίων όπου είχε υποδείξει η γεωηλεκτρική ενέργεια.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν ότι τα απόβλητα των ελαιοτριβείων μια έχουν μια χαρακτηριστική αγωγή υπογραφή που μπορεί να απεικονιστεί αποτελεσματικά μέσω της μεθόδους των ηλεκτρικών διασκοπήσεων.



Σχήμα 6.22D μοντέλο κατανομής αντιστάσεων σε χώρο απόθεσης αποβλήτων ελαιοτριβείων.

Η μέτρηση των αντιστάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου "εργαλείου παρακολούθησης του περιβάλλοντος" για τη μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αποβλήτων ελαιοτριβείων και να καθορίσει ένα στρατηγικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aitken M. (1974), *Physics and archaeology*. Clarendon Press, Oxford.
- Barker, R.D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four electrode arrays. *Geophysics*, 54, 1031-1037.
- Box, G.E.P. and Kanemasu, H. (1972). Topics in model building, Part II: On non-linear least squares. Technical Report No. 321, Department of Statistics, University of Wisconsin.
- Burnett D.S. (1989). *Finite element analysis*. Addison-Wesley Publishing Co.
- Cabrera F., Lopez R., Martinez-Borditi A., Dupuy de Lome E., Murillo J.M. (1996), Land Treatment of Olive Oil Mill Wastewater, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 215-225.
- Clark, A. (1990). *Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology*. B. T. Batsford Ltd, London.
- Coggon, J.H. (1971). Electromagnetic and electrical modelling by the finite element method. *Geophysics*, 36,132-155.
- Constable S., Parker R. and Constable C. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52, 289- 300.
- Dahlin, T. (1993). *On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications*. PhD Thesis, Lund University, Sweden.
- Dahlin, T., (2001). The Development of Electrical Imaging Techniques. *Computers and Geosciences*, 27(9), 1019-1029.
- Danielsen B.E., Dahlin T. (2010). Numerical modelling of resolution and sensitivity of ERT in horizontal boreholes. *Journal of Applied Geophysics*, 70, 245-254.
- Dey A. and Morrison H.F. (1979a). Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting*, 27, 106-136.
- Doran, J.W., Parkin, T.B. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J.W., Jones, A.J. (eds.). *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 25-38.
- Edwards L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- George Frank Tagg (1964). *Earth Resistances*, Pitman Publishing Corporation.
- Griffiths D. and Barker R. (1993). Two dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 19, 211-226.



- Griffiths, D., Turnbull, J. and Olayinka, A. (1990). Two-Dimensional Resistivity Mapping with a Computer- Controlled Array. *First Break*, 8, 121-129.
- Hallof, P.G. (1957). On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. Ph.D., Thesis, Cambridge, MIT.
- IMPEL (2003), Olive Oil Project, European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law (IMPEL), EU.
- IPPC BREF (2006) Integrated Pollution Prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the, Food, Drink and Milk Industries, European Commission.
- Kapellakis I.E., Tsagarakis K.P., Crowther J.C. (2008), Olive oil history, production and by-product management, *Rev Environ Sci Biotechnol*, 7:1–26.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 4–10.
- Karaouzas I., Skoulikidis N.T., Giannakou U., Albanis T.A. (2011), Spatial and temporal effects of olive mill wastewaters to stream macroinvertebrates and aquatic ecosystems status, *Water Research* 45.
- Kavvadias V., Doula M.K., Komnitsas K., Liakopoulou N. (2010), Disposal of olive oil mill wastes in evaporation ponds: Effects on soil properties, *Journal of Hazardous Materials* 182, 144–155.
- Kyriacou, A., K.E. Lasaridi, M. Kotsou, C. Balis, G. Pilidis (2005). Combined bioremediation and advanced oxidation of green table olive processing wastewater, *Clay Miner.* 40,1401–1408.
- Lawson C. and Hanson R. (1974). Solving least squares problems. Pentice-Hall.
- LIFE Focus (2010), LIFE among the olives, Good practice in improving environmental performance in the olive oil sector, European Commission Environment, Directorate-General.
- Lile O.B., Backe K.R., Elvebakk H., Buan J.E. (1994). Resistivity measurements on the sea bottom to map fracture zones in the bedrock underneath sediments. *Geophysical Prospecting*, 42, 813-825.
- Lines, L.R. and Treitel, S. (1984). Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, 32, 159-186.
- Loke (2001). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geoelectrical*.
- Menke,W. (1984). Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press, London.

- Modis, K., Papantonopoulos, G., Komnitsas, K., Papaodysseus, K. 2008. Mapping optimization based on sampling in earth related and environmental phenomena. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 22, 83-93.
- Musset, A.E. and Aftab Khan, M. (2000). *Looking into the Earth. An Introduction to Geological Geophysics.* Cambridge University Press.
- Nair N.G, Markham D.J. (2008), *Recycling Solid Waste from the Olive Oil Extraction Process*, RIRDC Pub. No. 08/165, Rural Industries Research and Development Corporation, Australian Government.
- Ouzounidou G., Zervakis G.I., Gaitis F. (2010), *Raw and Microbiologically Detoxified Olive Mill Waste and their Impact on Plant Growth, Terrestrial and Aquatic Environmental Toxicology*, Global Science Books.
- Papadopoulos N. (2007). *Algorithm development for the 3-D inversion of geoelectrical data coming from archaeological areas.* Ph.D. thesis, Aristotle University of Thessaloniki.
- Papadopoulos, N. G., Tsourlos, P., Tsokas, G. N. and Sarris, A. (2006b). Two-dimensional and threedimensional resistivity imaging in archaeological site investigation. *Archaeological Prospection*, 13, 163-181.
- Parasnis, D, (1986). *Principles of applied geophysics.* Chapman and Hall.
- Peter P. Silvester and Ronald L. Ferrari (1990). *Finite Elements for Electrical Engineers.*
- P. R. McGillivray and D.W. Oldenburg (1990). Methods for calculating frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: a comparative study. *Geophysical Prospecting*, 38, 499-524.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics.* John Wiley and Sons Ltd.
- Rodis, P.S., Karathanos, V.T., Mantzavinou, A. (2002), Partitioning of olive oil antioxidants between oil and water phases. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50, 596-601.
- Roka A. and Tsokas G. (1987). Field investigation of aMacedonian tumulus by resistivity soundings. *Geoexploration*, 24, 99-108.
- Sasaki Y., Matsuo K. (1990). Surface-to-Tunnel resistivity tomography at a copper mine. 550-553.
- Shabou R., Zairi M., Kallel A., Aydi A., Dhia H.B. (2009), Assessing the effect of an olive mill wastewater evaporation pond in Sousse, Tunisia, *Environ Geol*, 58:679–686.

- Shima H. (1992). 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, 1270-1291.
- Stamatakis G. (2010), Energy and geo-environmental applications for Olive Mill Wastes. A review, *Hellenic Journal of Geosciences*, vol. 45, 269-282.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press.
- Tikhonov A.N. and Glasko V.B. (1965). Application of a regularization method to nonlinear problems. *J.Comp. Math. and Math. Physics*, 5, no. 3.
- Tripp A., Hohmann G. and Swift C. (1984). Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.
- Tsourlos P.I. (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York.
- Tsourlos P., Szymanski J., Dittmer J. and Tsokas G. (1993). The use of back-projection for fast inversion of 2-D resistivity data. *Proceedings of the 2nd congress of the Greek Geophysical Union, Florina Greece, 5-7 May, Vol. 1, 71-81.*
- Tsourlos P., Szymanski J. and Tsokas G. (1999). The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64, 1357-1363.
- Van Nostrand, Robert Caige, Cook, Kenneth L. (1966). Interpretation of resistivity data, U.S. Geological Survey, p. 310.
- Van Schoor M., Binley A. (2010). In-mine (tunnel-to-tunnel) electrical resistance tomography in South African platinum mines. *Near Surface Geophysics*, 8, 563-574.
- Wright J.B. et al., *Geology and mineral resources of West Africa*, Allen & Unwin, 1985.
- Yi M.J., Kim J.H., Chung S.H. (2003): Enhancing the resolving power of least-squares inversion with active constraint balancing. *Geophysics*, 68, No.3: 931-941.
- Yi. M.J., Kim, J.H., Song, Y., Cho, S.J., Chung, S.H. and Suh, J.H. (2001). Three-Dimensional Imaging of Subsurface Structures using Resistivity Data. *Geophysical Prospecting*, 49, 483-497.
- Zhody, A. (1989). A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54, 245-253.
- Zhou Bing and S.A. Greenhalg (2000). Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, 887-912.

Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, 1991. Γεωλογικοί Χάρτης, Φύλλο Πέραμα.

Ιωάννης Φ. Λούης, Σημειώσεις Τομέα Γεωφυσικής & Γεωθερμίας ‘Εισαγωγικά μαθήματα στη διερευνητική γεωφυσική’, Αθήνα 2004  
<http://www.geophysicsonline.gr/eisagogika.pdf>

Σιμυρδάνης Κλεάνθης, Ανάπτυξη Τομογραφικών Γεωφυσικών Τεχνικών για τη Μελέτη Γεωτεχνικών και Περιβαλλοντικών Προβλημάτων, Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη 2013.  
[https://www.dropbox.com/s/cb8orkwri8muawu/Diatrivi\\_Simyrdanis.pdf](https://www.dropbox.com/s/cb8orkwri8muawu/Diatrivi_Simyrdanis.pdf)