



Τ.Ε.Ι. Κρήτης
Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος



ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ ΣΕ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ



Γεωργόπουλος Αλέξανδρος

A.M. 963

Επιβλέπων Καθηγητής
Σουπιός Παντελής

Χανιά
2014

ABSTRACT

This thesis negotiates the execution of geophysical survey in scale and fully controlled environment. For this reason, we used a specially constructed tank, which is at the Technological Educational Institute of Crete, houses in the Department of Natural Resources and Environment.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται την εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπήσεων σε υπό κλίμακα και πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μια ειδικά κατασκευασμένη δεξαμενή, η οποία βρίσκεται στο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης στα Χανιά και συγκεκριμένα στεγαζεται στο Τμήμα Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	6
2.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	6
2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ.....	8
2.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ	10
2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ.....	12
2.4.1 ΒΥΘΟΣΚΟΠΗΣΗ	12
2.4.2 ΟΡΙΖΟΝΤΟΓΡΑΦΙΑ	13
2.4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ.....	14
2.4.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	15
2.5 ΠΙΘΑΝΑ ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	18
2.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	18
2.6.1 ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ.....	19
2.6.2 ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ.....	26
2.6.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	27
2.6.4 ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	31
2.6.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ LANGRAGNIAN.....	32
2.7 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΕΡΜΑΤΙΣΜΟΥ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	34
2.8 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ - ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΣΟΠΟΙΩΣΗΣ	39
4.1 ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	39
4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ - ΣΗΡΑΓΓΑΣ	40
4.3 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	45
5.1 ΑΝΤΙΣΤΑΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟΥ	45
5.2 ΑΓΩΓΙΜΟΣ ΣΤΟΧΟΣ	49
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης με μετρήσεις ηλεκτρικών ιδιοτήτων στην επιφάνειά της.

Με τη χρήση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια και σε υπάρχουσες δομές τεχνητές (σήραγγα, οριζόντια γεώτρηση) ή φυσικές (σπήλαιο) υπάρχει η δυνατότητα διασκόπησης του υπεδάφους με αποτελεσματικό τρόπο αυξάνοντας την διακριτική ικανότητα των παραγόμενων γεωηλεκτρικών εικόνων. Τέτοιοι τύποι μετρήσεων αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία από τους Sasaki and Matsuo (1990) με τη χρήση ηλεκτροδίων μέσα σε σήραγγα σε μεγάλο βάθος, για τον εντοπισμό μεταλλευμάτων και θραυσιγενών ζωνών. Μία εφαρμογή με τη χρήση ηλεκτροδίων μέσα σε σήραγγα πραγματοποιήθηκε από τους Van Schoor και Binley (2010), για τον εντοπισμό διακοπτόμενων μεταλλευτικών γεωλογικών δομών από έγκοιλα. Στην περίπτωση τους δεν χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρόδια στην επιφάνεια αλλά μεταξύ σηράγγων.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων μετρήσεων είναι η αύξηση της ευαισθησίας της διάταξης στο εσωτερικό της γης και κοντά στην οροφή της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διακριτική ικανότητα της μεθόδου στο εσωτερικό του εδάφους και θεωρητικά καθίσταται πιο εύκολος ο εντοπισμός του στόχου σε μεγαλύτερο βάθος, κάτι που ενδεχομένως δεν είναι εφικτό όταν χρησιμοποιούνται μόνο επιφανειακά ηλεκτρόδια.

Η παρούσα εργασία είναι μέρος της διδακτορική διατριβής του Διδάκτορα ΑΠΘ, Κλεάνθη Συμυρδάνη και πραγματεύεται την εφαρμογή μετρήσεων επιφάνειας-σήραγγας κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες σε υπό κλίμακα. Ο συγγραφέας (κ. Α. Γεωργόπουλος) συμμετείχε στις μετρήσεις εργαστηριακής κλίμακας που πραγματοποιήθηκαν σε χώρο του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος του Τ.Ε.Ι Κρήτης και ως εκ τούτου έκανε χρήση και των δεδομένων με την άδεια του Δρ. Κλεάνθη Συμυρδάνη και αφού ολοκλήρωσε και έλαβε το τίτλο του διδάκτορα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ

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 (Griffiths και Barker 1993), εντοπισμό υδροφόρων στρωμάτων (Olayinka 1990), ανίχνευση γεωθερμικών πεδίων (Wright et al. 1985), εντοπισμός ρυπασμένων υπογείων υδάτων και διαρροών αποβλήτων, εύρεση στόχων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Aitken 1974, Tsokas και Roka 1987, Szymanski και Dittmer 1993, Papadopoulos et al. 2006b), στην εύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες έργων υποδομής (Dahlin 1993).

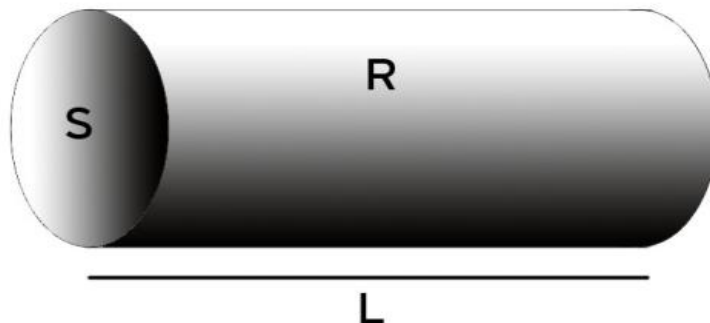
2.1 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η κύρια παράμετρος που υπολογίζεται κατά την ηλεκτρική μέθοδο διασκόπησης είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ) 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 2.1). Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού δίνεται από τη σχέση,

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

όπου

- R τιμή αντίστασης (ohm)
- L μήκος σε μέτρα (m)
- S εμβαδό της διατομής σε τετραγωνικά μέτρα (m²)
- ρ ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ohm-m)



Σχήμα 2.1 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση κυλίνδρου μήκους L , διατομής S και ηλεκτρικής αντίστασης R .

Η αντίσταση, ' ρ ', 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. 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 2.1).

ΥΛΙΚΟ	ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ
ΑΕΡΑΣ	Άπειρη
ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗΣ	3×10^{-1}
ΓΑΛΗΝΙΤΗΣ	2×10^{-3}
ΧΑΛΑΖΙΑΣ	4×10^{10} έως 2×10^{14}
ΑΣΒΕΣΤΙΤΗΣ	1×10^{12} έως 1×10^{13}
ΓΡΑΝΙΤΗΣ	100 έως 1×10^6
ΓΑΒΡΟΣ	1×10^3 έως 1×10^6
ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΣ	50 έως 1×10^7
ΨΑΜΜΙΤΗΣ	1 έως 1×10^8
ΣΧΙΣΤΟΛΙΘΟΙ	20 έως 1×10^3
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 2.1 Τυπικές τιμές αντιστάσεων υλικών (Telfordetal. 1990).

2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗ ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

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

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

όπου,

- J είναι η πυκνότητα του ρεύματος (Amp/m²)
- σ είναι η αγωγιμότητα (1/ρ) (Siemens/m)
- E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (V/m)

Ως ένταση ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται η βαθμίδα του δυναμικού V

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3)$$

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

$$\nabla J = 0 \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (3) και (4) προκύπτει ότι,

$$\nabla(-\sigma \nabla V) = 0 \quad (5)$$

η οποία μπορεί να εκφρασθεί ως,

$$\nabla \sigma \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0 \quad (6)$$

Η σχέση (6) είναι η εξίσωση Poisson που δείχνει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ανομοιογενή γη. Σε περίπτωση ομογενούς γης το πρώτο μέρος της σχέσης (6) είναι μηδενικό καθώς $\nabla \sigma = 0$, οπότε στην περίπτωση αυτή καταλήγουμε στην εξίσωση Laplace,

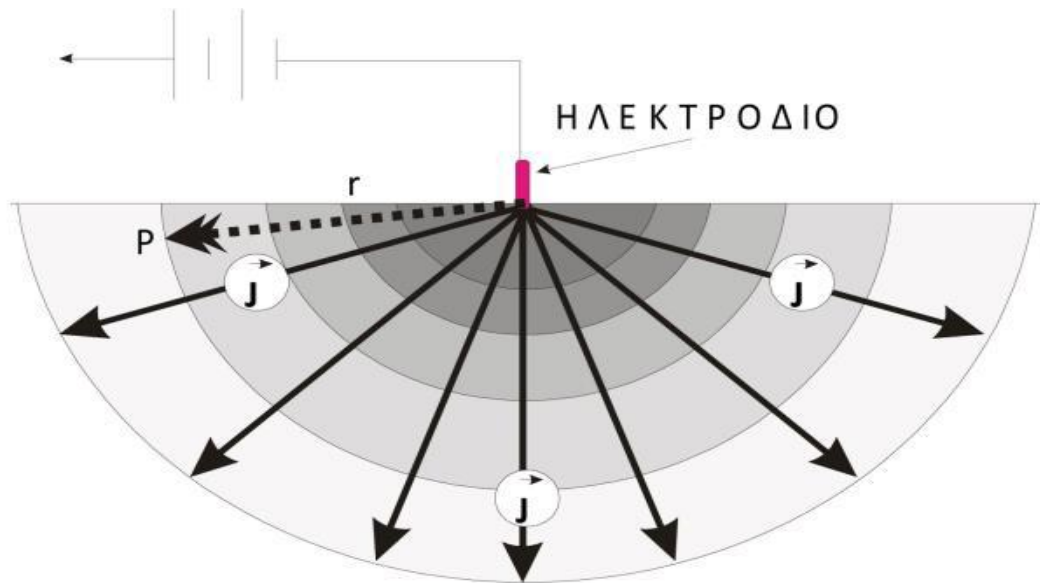
$$\nabla^2 V = 0 \quad (7)$$

Εύκολα αποδεικνύεται στην ιδανική περίπτωση που υπάρχει ένα ηλεκτρόδιο στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 2.2), το δυναμικό σε απόσταση r δίνεται από την σχέση,

$$V = \pm \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (8)$$

Ανάλογα με την πολικότητα του ηλεκτροδίου, στην παραπάνω σχέση

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

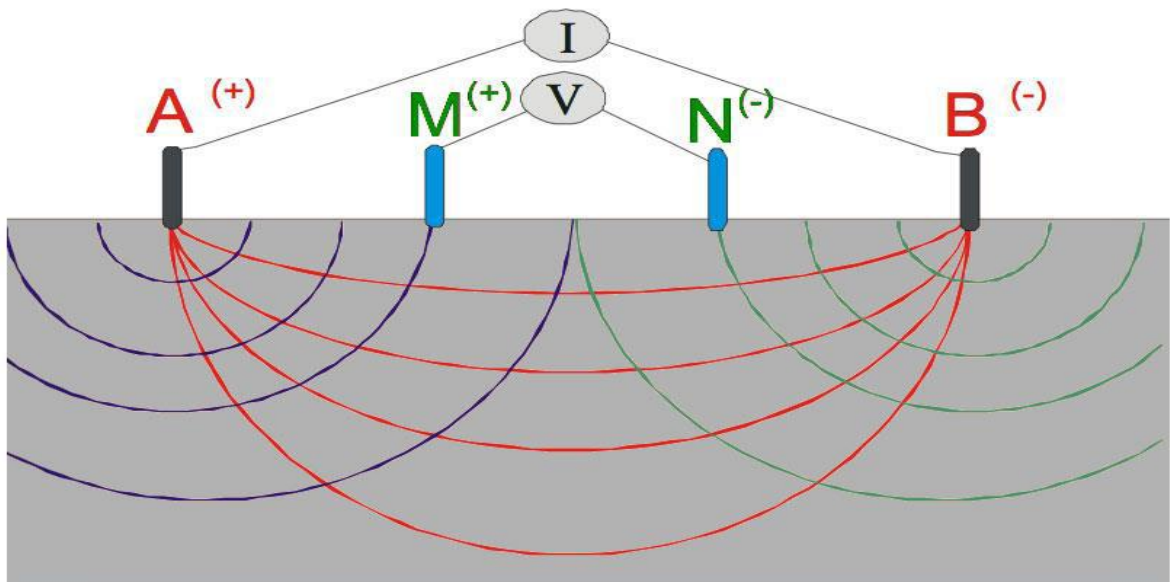


Σχήμα 2.2. Διάδοση ρεύματος από σημειακή πηγή στην επιφάνεια του εδάφους.

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 (8) και είναι,

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{BN} \right) \quad (9)$$

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 2.3).



Σχήμα 2.3 Βασική διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων για τη λήψη των γεωηλεκτρικών μετρήσεων.

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (10)$$

Από τη σχέση (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

$$K = \left(\frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \right) \quad (11)$$

Στην περίπτωση που το μέσο είναι ομογενές, ο πολλαπλασιασμός του γεωμετρικού παράγοντα K με την τιμή του λόγου $\Delta VMN/I$, 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 (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. Οκαθορισμός 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 (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 ΔVMN που θα μετρηθεί δεν θα μεταβληθεί, εφόσον η ένταση του ρεύματος παραμείνει σταθερή. Σύμφωνα με τον Parasnis (1986) αυτό αποτελεί μία ειδική περίπτωση του θεωρήματος της αντιμετάθεσης του Helmholtz, το οποίο ισχύει και στην περίπτωση ανομοιογενούς γης.

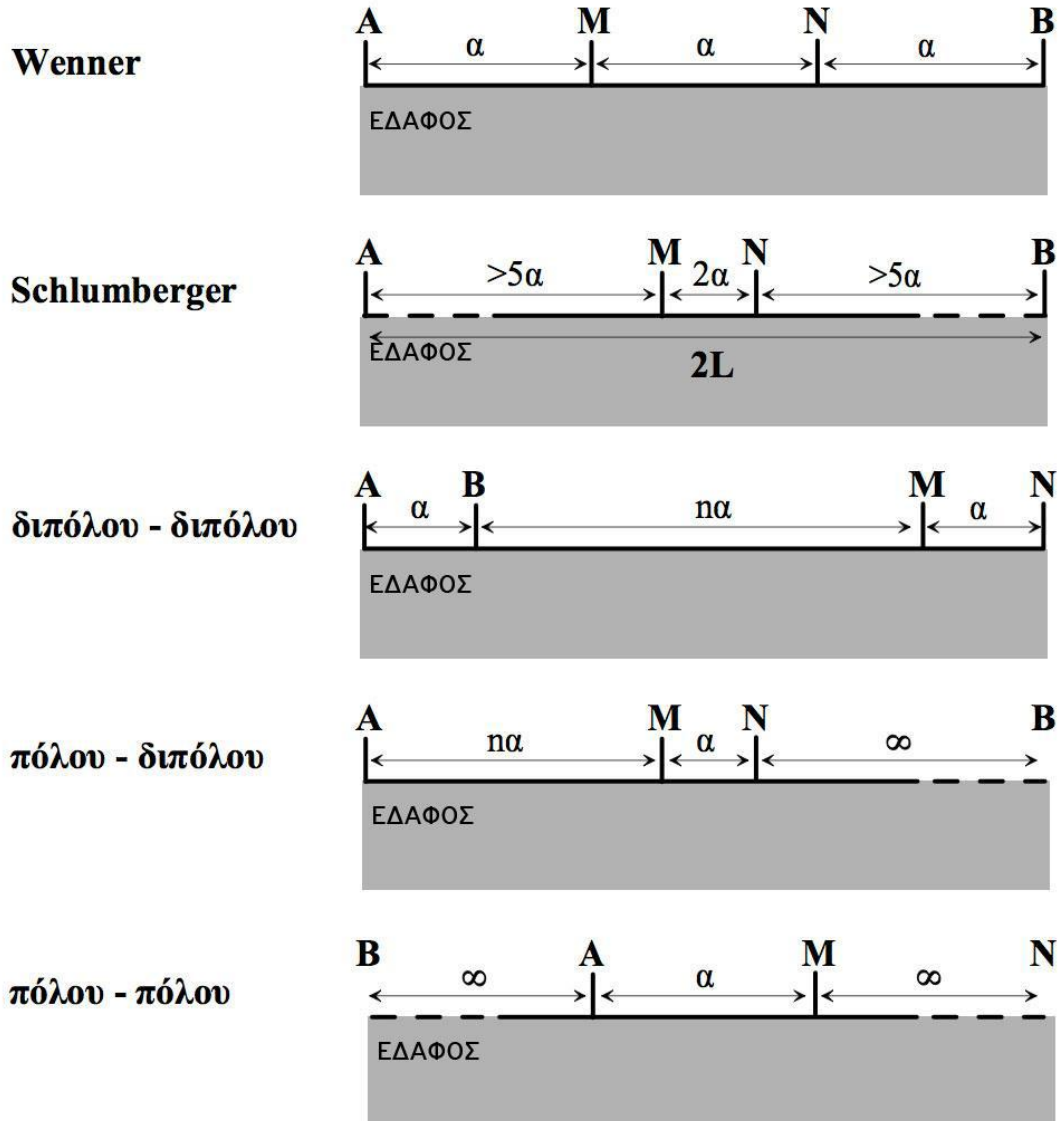
2.3 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

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 2.4).



Σχήμα 2.4 Βασικές επιφανειακές διατάξεις ηλεκτροδίων (τροποποιήθηκε από Tsurlos, 1995).

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

$$K = \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{2\alpha} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (12)$$

και η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (13)$$

- 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 $2a$ και ισχύει $L \gg a$ (στην πράξη $L > 10a$). Στην περίπτωση αυτή, η φαινόμενη αντίσταση είναι

$$\rho_{\alpha} = \frac{\pi L^2}{2a} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (14)$$

- Διάταξη **Διπόλου-Διπόλου**. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτροδιαδυναμικού. 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

$$\rho_{\alpha} = -\pi n(n+1)(n+2)a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (15)$$

- 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

$$\rho_{\alpha} = 2\pi n(n+1)a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (16)$$

- 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:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (17)$$

2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ

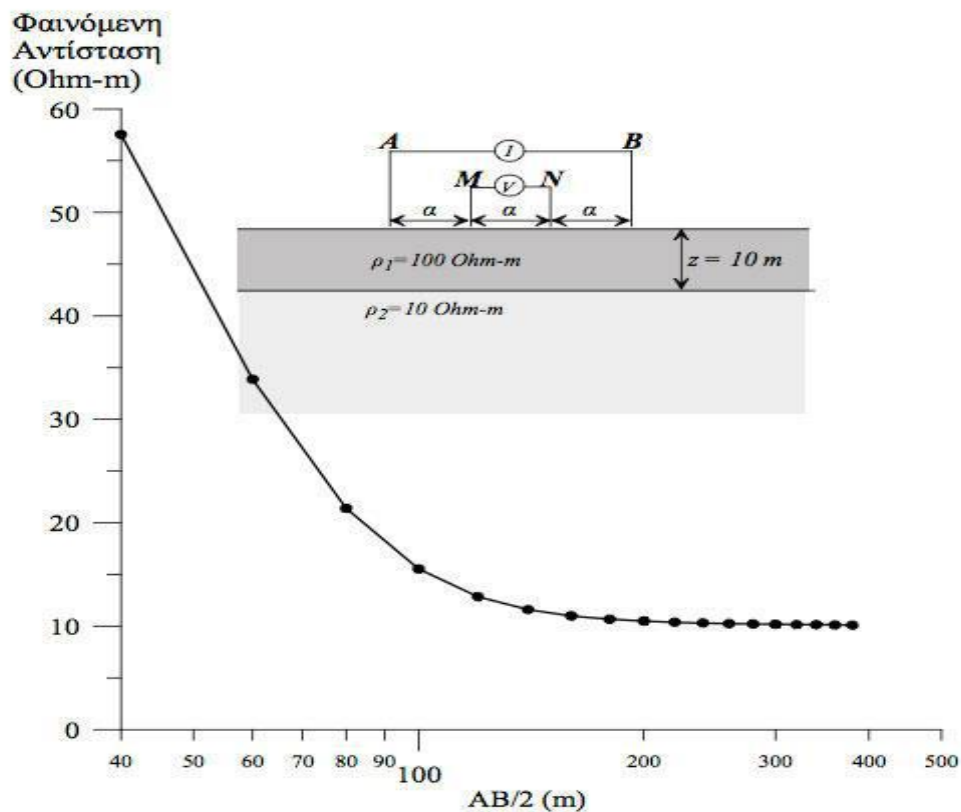
Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνικές μέτρησης για την συλλογή δεδομένων ηλεκτρικής αντίστασης είναι η ηλεκτρική βυθοσκόπηση, η οριζοντιογραφία, η τομογραφία και οι μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων.

2.4.1 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 2.5). 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 διείσδυσης 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.

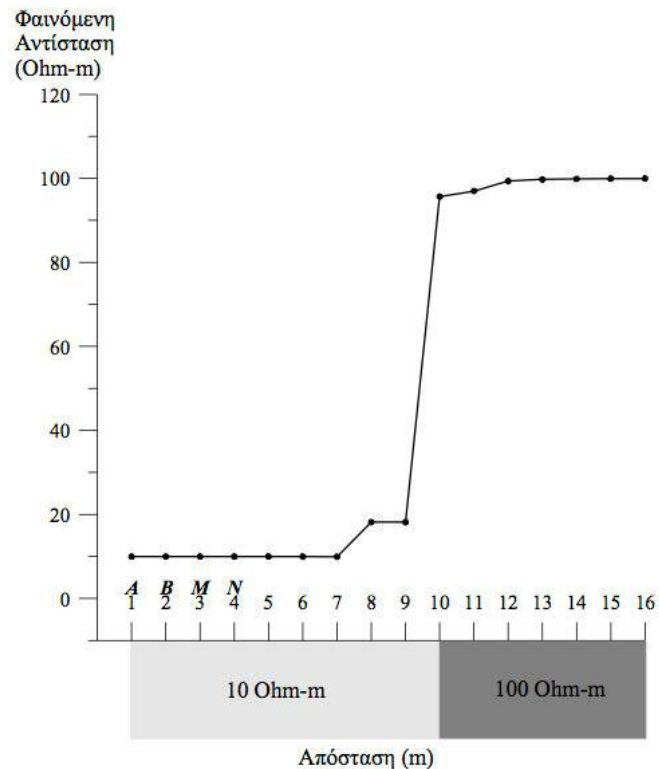
Οι φαινόμενες αντιστάσεις χαρτογραφούνται σε συνάρτηση με την απόσταση των ηλεκτροδίων σε λογαριθμικό χαρτί. Μία αρχική ποσοτική ερμηνεία γίνεται μέσω της ταύτισης των πειραματικών δεδομένων με θεωρητικές καμπύλες δύο ή τριών οριζοντίων στρωμάτων (Telford 1990, Reynolds 1997, Musset και Khan 2000).



Σχήμα 2.5 Εφαρμογή μεθόδου βυθοσκόπησης (Παπαδόπουλος, 2007).

2.4.2 ΟΡΙΖΟΝΤΟΓΡΑΦΙΑ

Με τη μέθοδο της οριζοντιογραφίας εντοπίζονται πλευρικές μεταβολές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (Σχήμα 2.6). 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 κλασσική 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.



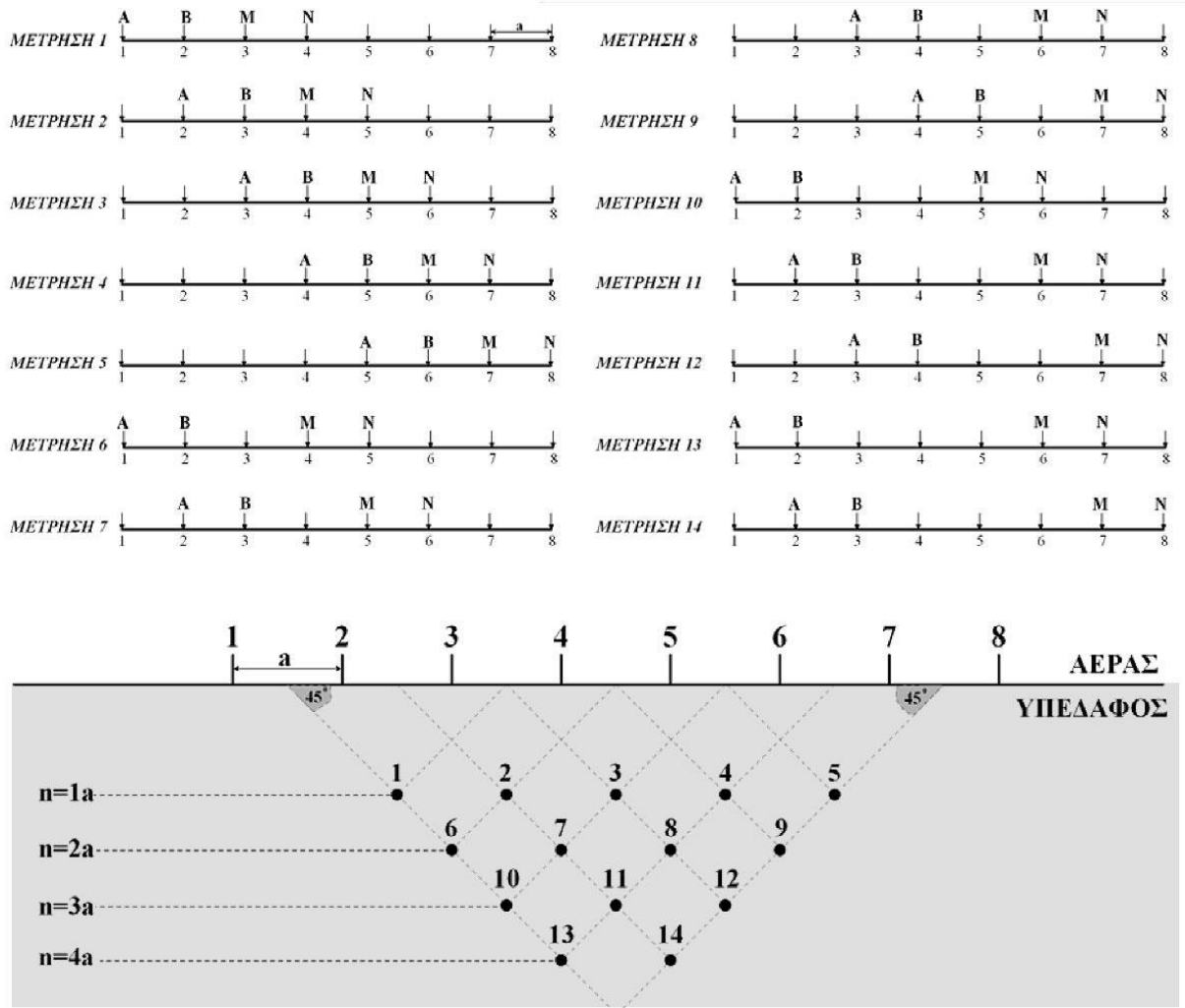
Σχήμα 2.6 Μέθοδος οριζοντιογραφίας για τον εντοπισμό πλευρικής μεταβολής της φαινόμενης αντίστασης (Παπαδόπουλος, 2007).

2.4.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ

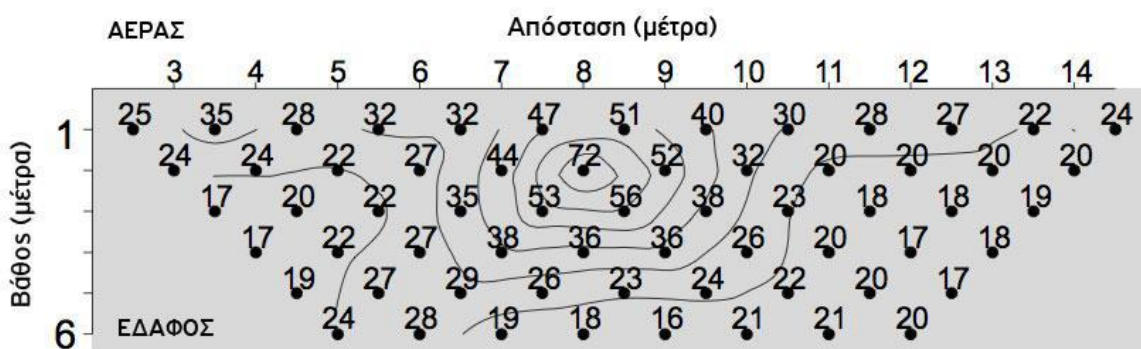
Ο συνδυασμός της μεθόδου βυθοσκόπησης και της οριζοντιογραφίας είναι η ηλεκτρική τομογραφία. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρέχει τη δυνατότητα λήψης πληροφοριών τόσο για την πλευρική, όσο και για την κατακόρυφη μεταβολή της αντίστασης (δισδιάστατη διασκόπηση).

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 2.7 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 διπόλων AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία 45ο με το οριζόντιο επίπεδο. Πρόδρομος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η μέθοδος της «ψευδοτομής» (Hallof, 1957) (Σχήμα 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 2.7 Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστη απόσταση μεταξύ των διπόλων $n=4$ (Tsourlos, 1995).



Σχήμα 2.8 «Ψευδοτομή» με καμπύλες ίσης φαινόμενης αντίστασης (Tsourlos, 1995).

2.4.4 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 2001, Bing και Greenhalgh 2000).

Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται όλοι οι ανεξάρτητοι συνδυασμοί 2, 3 και 4 ηλεκτροδίων (ρεύματος A, B και δυναμικού M, N), καθώς και στα σχήματα Σχήμα 9, Σχήμα 10 και Σχήμα 11 γίνεται γραφική απεικόνιση αυτών.

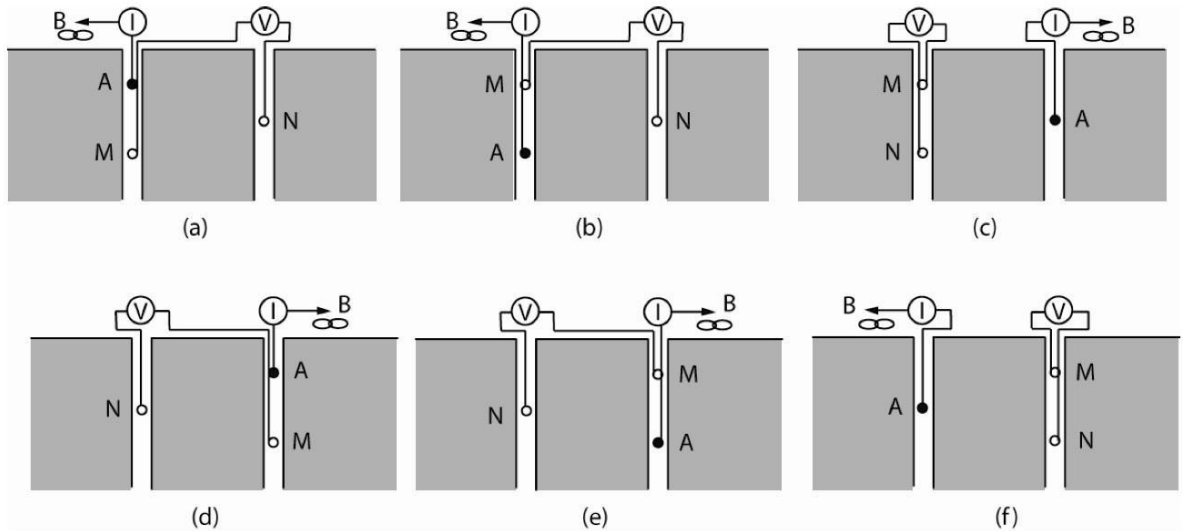
Διάταξη Ηλεκτροδίων	Σύνολο Δυνατών Διατάξεων	Σύνολο Ανεξάρτητων Διατάξεων	Ανεξάρτητες Διατάξεις	Ρα διατάξεις με αδυναμία μέτρησης
Πόλου-Πόλου	2	1	A-M	
Πόλου-Διπόλου	12	6	AM-N, MA-N, MN-A, N-AM, N-MA, A-MN	A-MN, MN-A
Διπόλου-Πόλου	12	6	AM-B, MA-B, AB-M, B-AM, B-MA, M-AB	AB-M, M-AB
Διπόλου-Διπόλου	24	3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

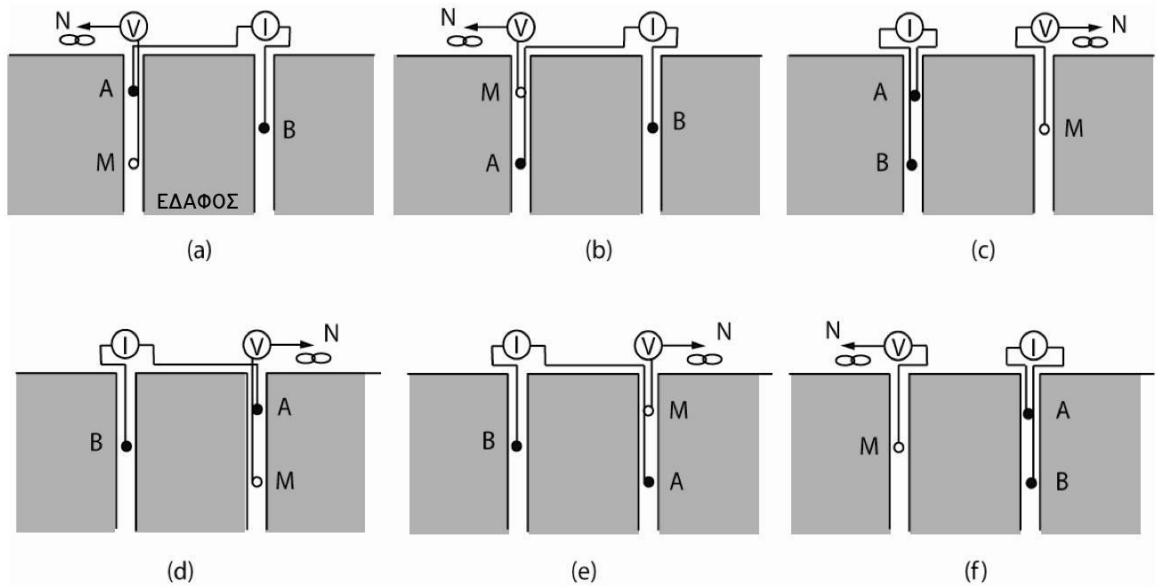
Πίνακας 2.2 Πιθανοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων για μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων (Bing και Greenhalgh, 2000).

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.

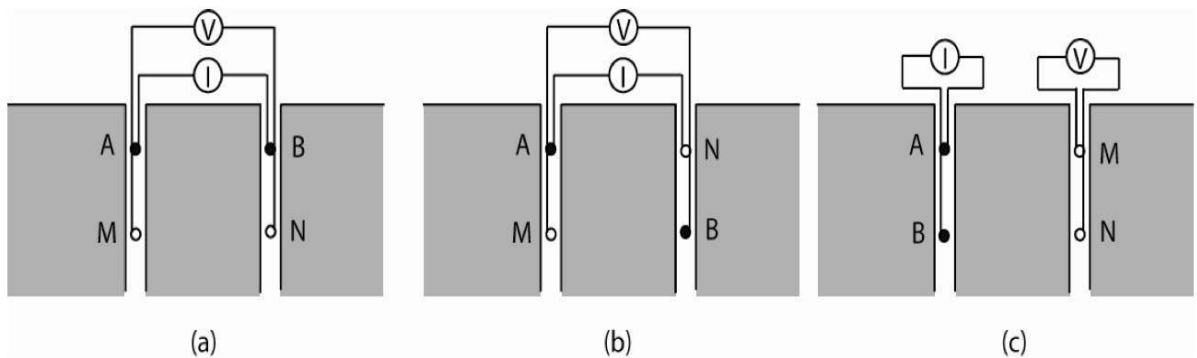
Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι οι ακόλουθες έξι διατάξεις: A-MN, MN-A, AB-M, M-AB, AB-MN και MN-AB έχουν για κάποιες θέσεις μέτρησης πρόβλημα αοριστίας με τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης (προκύπτει μηδενική τιμή στο δυναμικό για ομογενή γη και ο γεωμετρικός παράγοντας δεν ορίζεται).



Σχήμα 2.9 Συνδυασμοί ηλεκτροδίων πόλου-διπόλου μέσα σε γεωτρήσεις (Bing και Greenhalgh, 2000).



Σχήμα 2.10 Συνδυασμοί ηλεκτροδίων διπόλου-πόλου μέσα σε γεωτρήσεις (Bing και Greenhalgh, 2000).



Σχήμα 2.11 Συνδυασμοί ηλεκτροδίων διπόλου-διπόλου μέσα σε γεωτρήσεις (Bing και Greenhalgh, 2000).

2.5 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. 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 (Tsourlosetal. 1999, Loke 2001, 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, 2001).

2.6 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η ερμηνεία των μετρήσεων πραγματοποιείται με την επίλυση του αντιστρόφου ηλεκτρικού προβλήματος είτε με τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων π.χ. μέθοδος Bristow , μέθοδος Zhody-Barker (Zhody 1989, Barker 1989), 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, 1992, 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

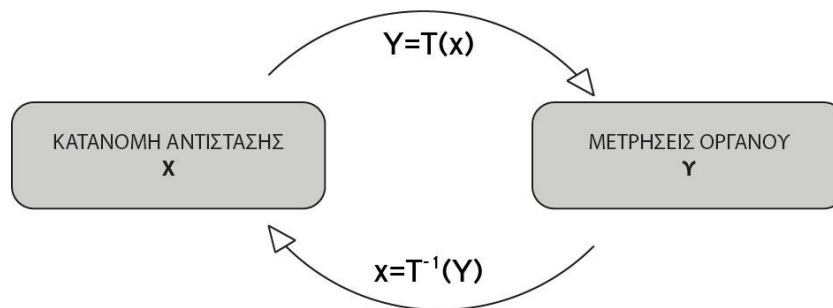
είναι αρχικά η επίλυση του ευθέος προβλήματος, δηλαδή η εύρεση των συνθετικών φαινομένων αντιστάσεων με γνωστή την κατανομή των πραγματικών αντιστάσεων.

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 ευθέος προβλήματος αφορά την εύρεση του μετασχηματισμού T (γραμμικού ή μη-γραμμικού), που συνδέει τη γνωστή κατανομή της αντίστασης x με τις άγνωστες μετρήσεις y .

$$y = T(x) \quad (18)$$

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 1.12).

$$x = T^{-1}(y) \quad (19)$$



Σχήμα 2.12 Σχηματική αναπαράσταση του ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος.

2.6.1 ΕΥΘΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑ

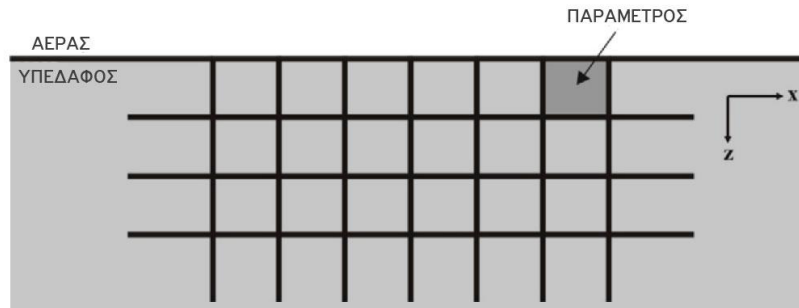
Κατά την επίλυση του ευθέος προβλήματος υπολογίζεται η φαινόμενη αντίσταση που θα προέκυπτε από την διεξαγωγή μίας γεωφυσικής έρευνας αν ήταν γνωστή η πραγματική κατανομή της αντίστασης του υπεδάφους και ο τρόπος λήψης των μετρήσεων (διάταξη ηλεκτροδίων). Για τον υπολογισμό των τιμών αυτών υπάρχουν δύο 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, 1966), 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:

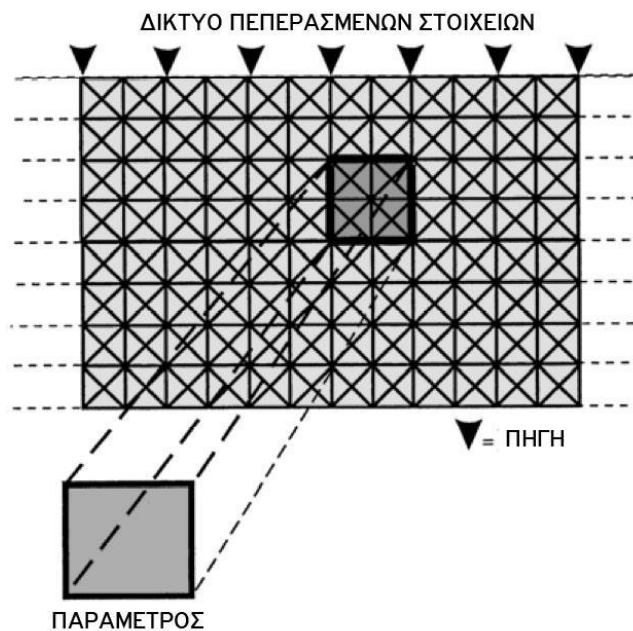
1. **Μέθοδοι ολοκληρωτικών εξισώσεων.** Η λύση αυτών, βρίσκεται στην επιφάνεια γεωηλεκτρικών ασυνεχειών και οι αριθμητικοί υπολογισμοί βασίζονται στη χρήση των συναρτήσεων του Green. Ουσιαστικά, υποτίθεται ότι η ύπαρξη μιας δομής διαφορετικής αντίστασης από το περιβάλλον είναι ισοδύναμη με μια κατανομή 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 2.13).



Σχήμα 2.13 Διακριτοποίηση του ημιχώρου σε παραμέτρους διαφορετικής αντίστασης (Tsourlos, 1995).

Η διαφορά των δύο αυτών τεχνικών βασίζεται στο ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Dey και Morrison 1979a,b) χωρίζει το υπέδαφος σε ένα μεγάλο αριθμό ορθογώνιων κελιών, ενώ στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Coggon 1971, Silvester και Ferrari 1990) χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία (Σχήμα 2.14).



Σχήμα 2.14 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.

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,

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = \nabla J \quad (20)$$

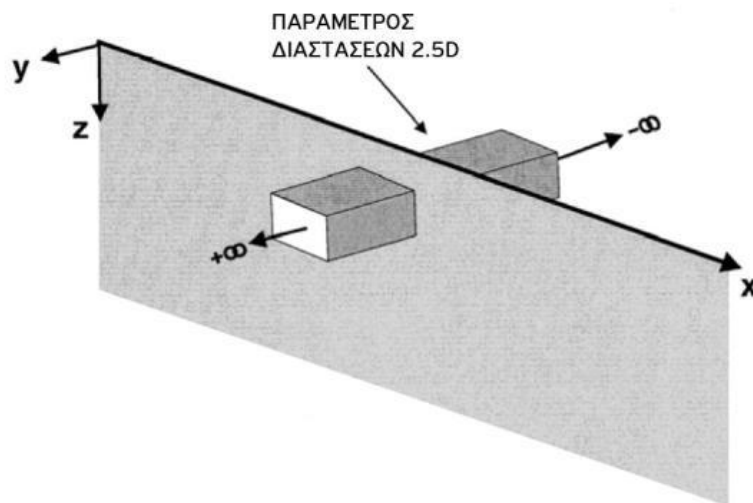
όπου

- σ αγωγιμότητα
- V δυναμικό
- J πυκνότητα ρεύματος

Ο όρος ∇V της σχέσης (20) περιγράφει τις πηγές ρεύματος και στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να αντικατασταθεί από μια συνάρτηση Dirac (δ) και μία σημειακή πηγή ρεύματος I . Εάν x_s, y_s, z_s είναι οι συντεταγμένες της πηγής, τότε η εξίσωση (20) γίνεται,

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla V) = I \delta_{(x)} \delta_{(y)} \delta_{(z)} \quad (21)$$

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 2.15). 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 2.15 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:

$$\tilde{V}(x, k, z) = \int_0^\infty V(x, y, z) \cos(ky) dy \quad (22)$$

οπότε η σχέση (21) γίνεται

$$\nabla \cdot (-\sigma_{(x,z)} \nabla V_{(x,k,z)}) = I \delta(x) \delta(z) \quad (23)$$

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 2.16). 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,

$$V' = \sum_{i=1}^N n_i a_i \quad i=1, 2, \dots, N \quad (24)$$

όπου

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

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

$$A_j = x_k z_m - x_m x_k$$

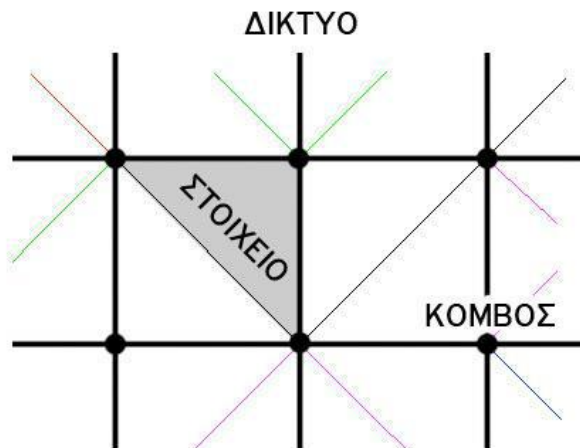
$$B_j = z_k - z_m$$

$$C_j = x_m - x_k$$

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

$$j, k, m = 1, 2, 3 \quad (25)$$

όπου Δ είναι το εμβαδό της περιοχής του στοιχείου.



Σχήμα 2.16 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 (21) για κάθε ένα στοιχείο γίνεται:

$$-\sigma \nabla^2 \tilde{V} = f \quad (26)$$

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 (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 (26) γίνεται για κάποιο σημείο e

$$-\sigma \iint e \left[\frac{\theta^2 \tilde{V}}{\theta^2 x} n_i + \frac{\theta^2 \tilde{V}}{\theta^2 z} n_i \right] dx dz + \sigma \iint e k^2 \tilde{V} n_i dx dz - \iint e f n_i dx dz = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (1.24) στην σχέση (1.27) και ολοκληρώνοντας κατά μέρη προκύπτει

$$\sum_j^N \sigma_e \iint_{\varepsilon} \left(\frac{\theta n_i}{\theta_x} \frac{\theta n_i}{\theta_x} + k^2 n_j n_i + \frac{\theta n_i}{\theta_z} \frac{\theta n_i}{\theta_z} \right) dx dz - \iint_e f n_i dx dz = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

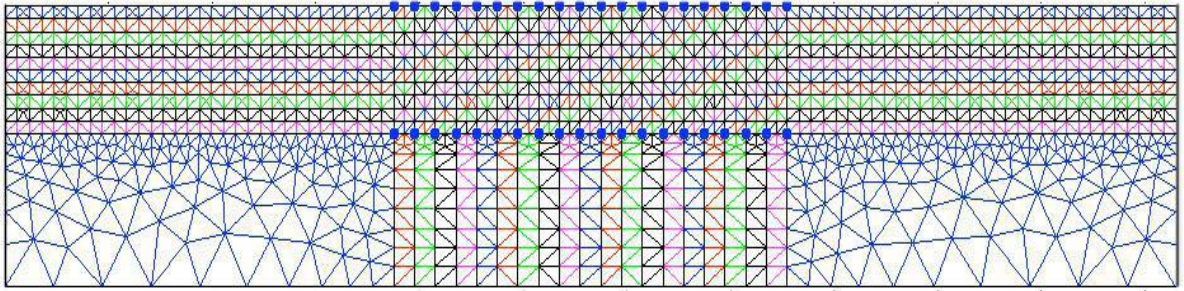
Υπολογίζοντας τα παραπάνω ολοκληρώματα με αναλυτικό τρόπο προκύπτει, με τη μορφή πινάκων, η σχέση που περιγράφει το κάθε σημείο για το 2.5 διαστάσεων γεωηλεκτρικό πρόβλημα,

$$\frac{\sigma_e}{4\Delta} \left(\begin{bmatrix} B_1 B_1 + C_1 C_1 & B_1 B_2 + C_1 C_2 & B_1 B_3 + C_1 C_3 \\ B_2 B_1 + C_2 C_1 & B_2 B_2 + C_2 C_2 & B_2 B_3 + C_2 C_3 \\ B_3 B_1 + C_3 C_1 & B_3 B_2 + C_3 C_2 & B_3 B_3 + C_3 C_3 \end{bmatrix} + \frac{\sigma_{ek2\Delta}}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Τα στοιχεία του συνολικού διανύσματος φορτίου F στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης (29) είναι μηδέν όταν καμία πηγή ηλεκτρικού ρεύματος δεν συμπίπτει με κάποιους από τους 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 2.17) 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

$$K = A \cdot F \quad (30)$$

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 30) πρέπει να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες (BC) Neumann και Dirichlet.



Σχήμα 2.17 Πλέγμα (mesh) διακριτοποίησης του ημιχώρου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

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.

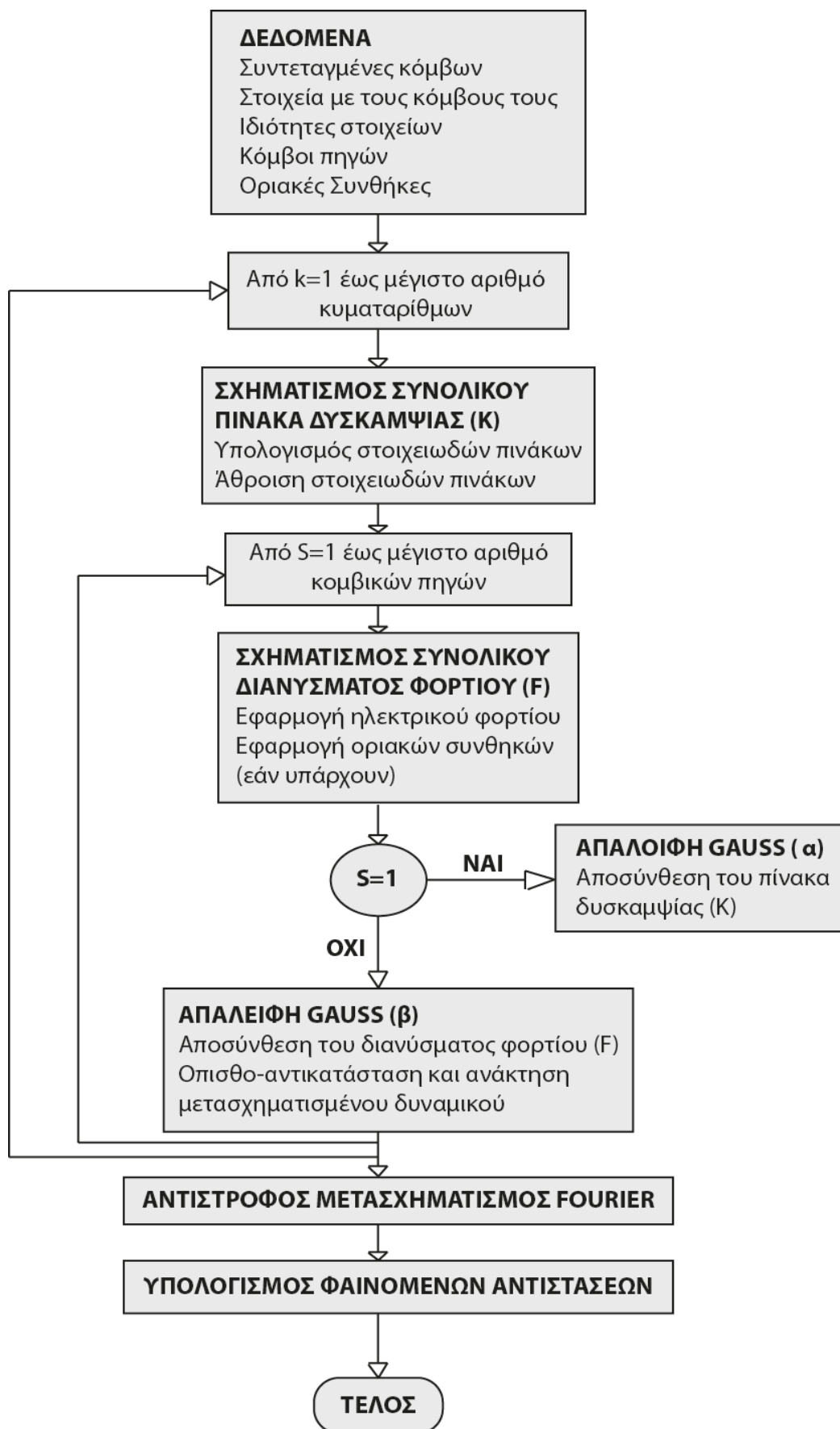
Οι οριακές συνθήκες Neumann εφαρμόζονται αυτόματα μέσω των στοιχειωδών γραμμικών εξισώσεων (σχέση 29), ενώ οι ομογενείς οριακές συνθήκες Dirichlet εφαρμόζονται με τη μορφή περιορισμών στο συνολικό γραμμικό σύστημα (σχέση 30).

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 K . Εφόσον λυθεί η εξίσωση (30) για k κυματαρίθμους, το συνολικό δυναμικό ανακτάται με τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier.

$$V_{(x,y,z)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \tilde{V}_{(x,k,z)} \cos(ky) dk \quad (31)$$

Επομένως, εάν το μετασχηματισμένο δυναμικό υπολογισθεί για αρκετές τιμές k , το δυναμικό $V(x,y,z)$ μπορεί να ληφθεί ολοκληρώνοντας αριθμητικά την εξίσωση (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 2.18 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής του αλγορίθμου 2.5 διαστάσεων των πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε παραπάνω.



Σχήμα 2.18 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου 2.5 διαστάσεων του ευθέος προβλήματος (Tsourlos, 1995).

2.6.2 ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ

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

$$I_{ij} = \frac{\partial d_i}{\partial p_j} \quad (32)$$

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 p_{ai} , τότε η εξίσωση (32) μπορεί να γραφεί ως

$$I_{ij} = \frac{\partial p_{ai}}{\partial p_j} = -\frac{\partial p_{ai}}{\partial p_j} = \frac{2\pi}{KI} \frac{\partial \Delta V_i}{\partial p_j} \quad (33)$$

Στην εξίσωση (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

$$\frac{\partial V_0}{\partial \sigma_j} = \int_D [k^2 \psi_j V V' + \psi_j \frac{\partial V'}{\partial x} \frac{\partial V'}{\partial x} + \psi_j \frac{\partial V'}{\partial z} \frac{\partial V'}{\partial z}] dx dz \quad (34)$$

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 ψ_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 (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 (34) γίνεται

$$\frac{\partial V_{nm}}{\partial \sigma^{(e)}} = \int_{\Delta^{(e)}} [k^2 V_n^{(e)} V_m^{(e)} + \psi_j \frac{\partial V_n^{(e)}}{\partial x} \frac{\partial V_m^{(e)}}{\partial x} + \psi_j \frac{\partial V_n^{(e)}}{\partial z} \frac{\partial V_m^{(e)}}{\partial z}] \quad (35)$$

όπου V_{nm} είναι το δυναμικό 'n' λόγω της πηγής του ηλεκτρικού ρεύματος στο 'm' και $V_m^{(e)}$, $V_n^{(e)}$ είναι το δυναμικό στους κόμβους του στοιχείου e εξαιτίας των πηγών στους κόμβους m, n αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (34) και (35) και χρησιμοποιώντας τις αριθμητικές τριγωνικές συναρτήσεις παρεμβολής (σχέση 24), το ολοκλήρωμα του δεξιού σκέλους της σχέσης (35) παίρνει τη μορφή

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_{nm}}{\partial \sigma^{(e)}} = K^2 \Delta^{(e)} & \frac{\sum_{j=1}^3 a_{jm}^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jn}^{(e)} a_{1m}^{(e)} a_{1n}^{(e)} a_{2m}^{(e)} a_{2n}^{(e)} a_{3m}^{(e)} a_{3n}^{(e)}}{12} \\ & + \frac{\sum_{j=1}^3 a_{jm}^{(e)} B_j^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jn}^{(e)} B_j^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jm}^{(e)} C_j^{(e)} \sum_{j=1}^3 a_{jn}^{(e)} C_j^{(e)}}{4\Delta^{(e)}} \end{aligned} \quad (36)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (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 παραγωγούς του κάθε στοιχείου που ανήκει στη συγκεκριμένη παράμετρο

$$\frac{\partial V}{\partial \sigma_p} = \sum_{i=1}^q \frac{\partial V}{\partial \sigma_i} \quad (37)$$

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 (33).

2.6.3 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 αντίστροφου προβλήματος είναι:

η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (Lines και Treitel 1984),
 η μέθοδος των ιδιοτιμών (Lawson και Hanson 1974),
 η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με απόσβεση και η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής (Tikhonov και Glasko 1965, Constable et al 1987).

Με τη μέθοδο της εξομαλυσμένης αντιστροφής Occam (Constable et al. 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 (Tsourlos 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 (Constable et al. 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 18) που πρέπει να αντιστραφεί είναι

$$f(x) = y \quad (38)$$

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 αντίστροφου 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

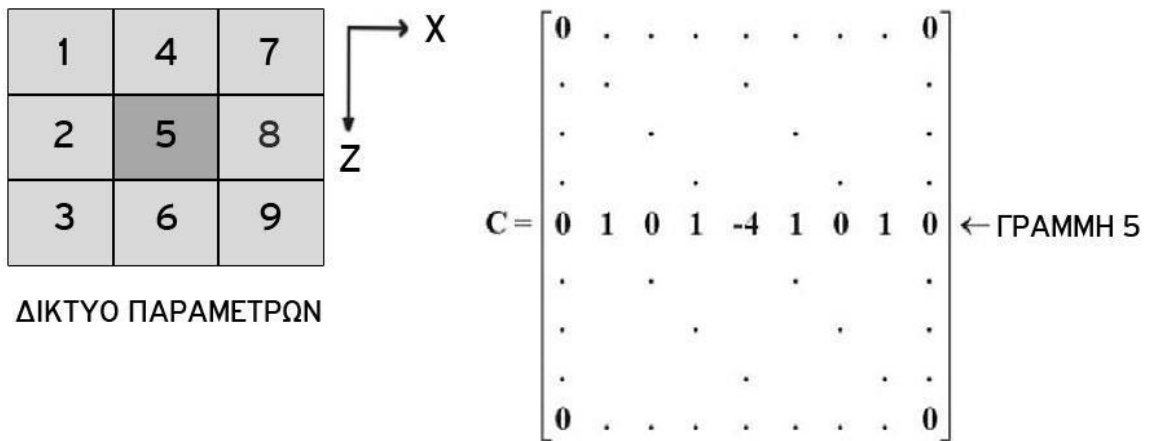
$$f(x_i + dx_i) = f(x_i) + \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} dx_i + O((dx_i)^2) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (39)$$

όπου N είναι ο αριθμός των παραμέτρων του διανύσματος κατανομής της αντίστασης, $O((dx_i)^2)$ 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 (1.39) μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή

$$(x + dx) \approx f(x) + J dx \quad (40)$$

Λόγω του ότι η σχέση (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 (40) και γνωρίζοντας όλα τα υπόλοιπα στοιχεία της εξίσωσης, μπορεί τώρα να καθοριστεί μια επαναληπτική διαδικασία επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος.



Σχήμα 2.19 Μοντέλο 9 παραμέτρων και πίνακας εξομάλυνσης C (Tsourlos, 1995).

Ορίζεται ο πίνακας εξομάλυνσης C μεταξύ των παραμέτρων (Σχήμα 2.19) και ζητείται η ελαχιστοποίηση του λάθους dy σε συνδυασμό με τη μέγιστη εξομάλυνση

$$S = (Wady)^T(Wady) \rightarrow 0$$

$$dR = (Cdx)^T(Cdx) \rightarrow \text{μέγιστη} \tag{41}$$

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 φαινόμενων 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 m_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

$$X_{k+1} = X_k + dX_k + [(W_d J_k)^T W_d J_k + \mu_k C^T C]^{-1} (W_d J_k)^T W_d dy_k \quad (42)$$

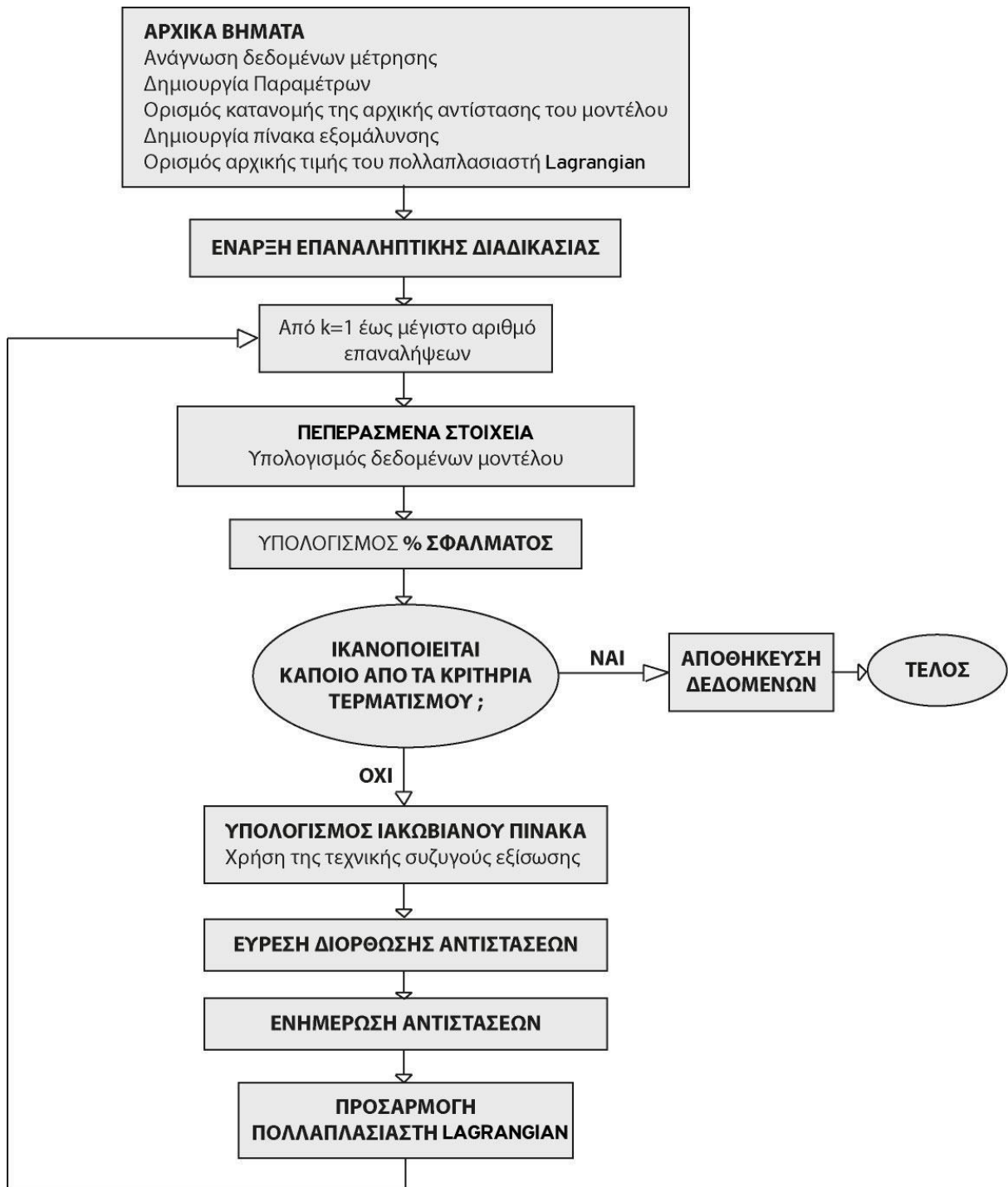
όπου

- J_k είναι η εκτίμηση του Ιακωβιανού πίνακα που αντιστοιχεί στην κατανομή των αντιστάσεων
- μ_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

$$dy_k = y - (x_k) \quad (43)$$

- Ορίζονται οι νέες εκτιμήσεις των αντιστάσεων από X_k σε $X_{k+1} = X_k + dX_k$ και υπολογίζεται, μέσω της επίλυσης του ευθέως 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^ο βήμα).

Στο Σχήμα 2.20 φαίνεται ένα διάγραμμα ροής που περιγράφει τον αλγόριθμο επίλυσης δισδιάστατου αντίστροφου ηλεκτρικού προβλήματος.



Σχήμα 2.20 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επίλυσης του αντιστρόφου γεωηλεκτρικού προβλήματος (Tsourlos, 1995).

2.6.4 ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

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

α) 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.

β) 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 .

Το τετράγωνο του σφάλματος των ελαχίστων τετραγώνων, στην περίπτωση χρήσης λογαρίθμων γίνεται $dy' = Tdy$, 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

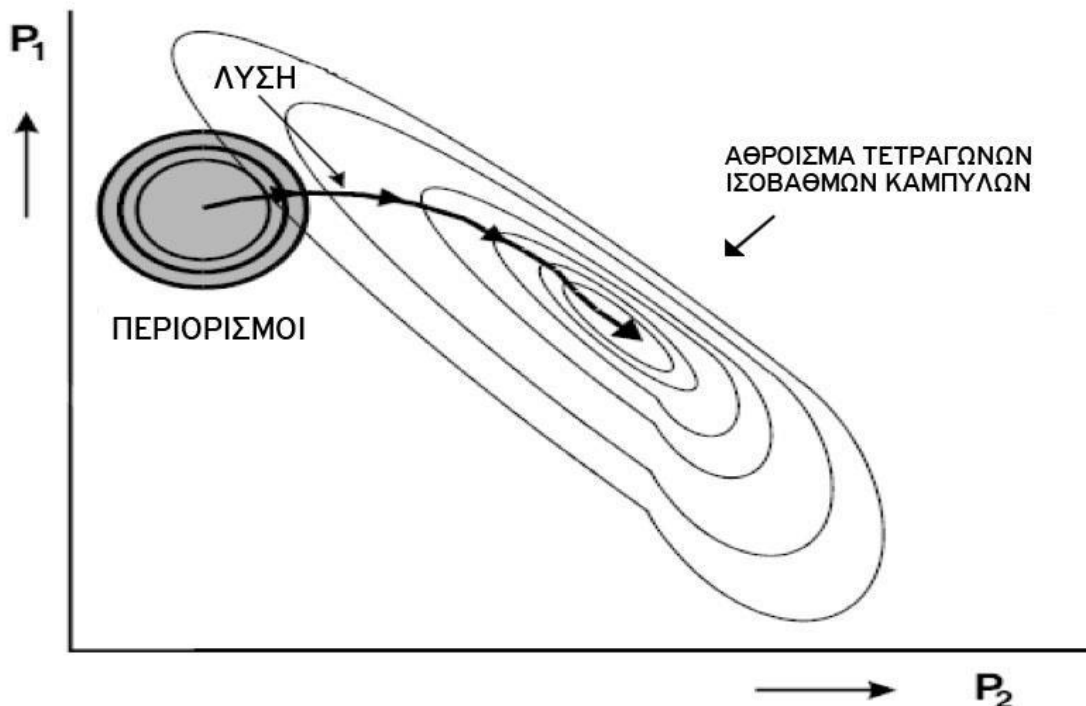
$$dp = (J'^T J')^{-1} J'^T dy' \quad (44)$$

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

$$x_{k+1} = x_k + dp_k \quad (45)$$

2.6.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ LANGRAGNIAN

Για την επίλυση της σχέσης (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 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 2.21 Αναπαράσταση λύσης ελαχίστων τετραγώνων δύο παραμέτρων P_1 και P_2 (Box και Kanemasu, 1972).

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 .

Οι Yietal. (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 .

Ειδικότερα ως πίνακας ανάλυσης (resolutionmatrix) του μοντέλου R ορίζεται

$$R = J^+ J \quad (46)$$

όπου J^+ είναι ο ψευδοαντίστροφος

$$J^+ = [J^T J + \mu C^T C]^{-1} J^T \quad (47)$$

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 2.22).

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

Σχήμα 2.22 Πίνακας ανάλυσης μοντέλου 5 παραμέτρων.

Γενικά το άθροισμα των στοιχείων κάθε γραμμής του πίνακα ανάλυσης πρέπει να είναι ίσο με 1. Οι Yietal. (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

$$SP_i = \sum_j^N (W_d (1 - S_{ij}) R_{ij})^2 \quad (48)$$

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 ‘μ’ γίνεται με ένα αρχικό υπολογισμό του πίνακα ανάλυσης μοντέλου με κάποιο μικρό αρχικά πολλαπλασιαστή Lagrangian (συνήθως 0.01). Στη συνέχεια μετατρέπεται η συνάρτηση διασποράς σε μεταβαλλόμενο πολλαπλασιαστή μεταξύ δύο προαποφασισμένων ορίων (μ_{min} και μ_{max}), σε λογαριθμική κλίμακα σύμφωνα με τον παρακάτω αλγόριθμο (Yietal. 2003)

$$\log(\mu_i) = \log(\mu_{min}) + \frac{\log(\mu_{max}) - \log(\mu_{min})}{\log(SP_{max}) - \log(SP_{min})} (\log(SP_i) - \log(SP_{min})) \quad (49)$$

όπου μ_i είναι ο πολλαπλασιαστής της παραμέτρου i , SP_i είναι η συνάρτηση διασποράς της παραμέτρου i , μ_{min} και μ_{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.

2.7 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

$$\%RMS_{error} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{(d_i^{obs} - d_i^{calc})^2}{(d_i^{obs})^2}} \quad (50)$$

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 οριστεί σε 6.

2.8 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 (46) χρησιμοποιείται η διαγώνιος του πίνακα ευκρίνειας (κάθε τιμή της διαγώνιου αντιστοιχεί και σε μία παράμετρο) για να προσδιοριστεί η παράμετρος j σύμφωνα με τη σχέση

$$R = (J_{ij}^T J_{ij} + C)^{-1} J_{ij}^T J_{ij} \quad (51)$$

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).

- Μέτροστήλης 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

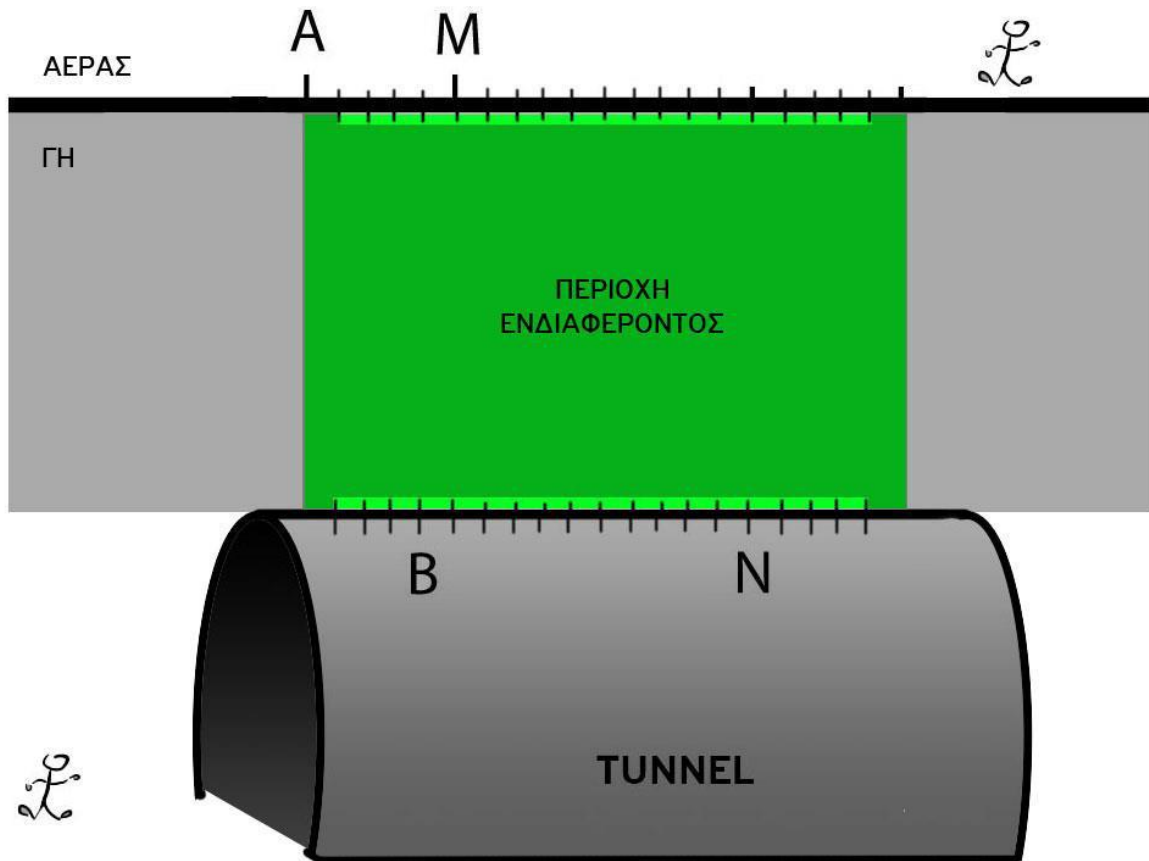
$$cumulative = \sum_{i=1}^N |J_{ij}| \quad (52)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ - ΣΗΡΑΓΓΑΣ

Οι μετρήσεις με ηλεκτρόδια μόνο στην επιφάνεια του εδάφους έχουν υψηλή διακριτική ικανότητα κοντά στα ηλεκτρόδια, η οποία και μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί με ηλεκτρόδια τοποθετημένα μέσα σε γεωτρήσεις βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό την διακριτική ικανότητα. Ωστόσο για να προκύψουν ικανοποιητικές μετρήσεις καθίσταται απαραίτητη η εγκατάσταση πολλών γεωτρήσεων σε μικρή μεταξύ τους απόσταση. Ένας εναλλακτικός τρόπος χρήσης ηλεκτροδίων μέσα στη γη, εκτός από τη χρήση ηλεκτροδίων μέσα σε γεωτρήσεις, είναι η υπόγεια εγκατάσταση ηλεκτροδίων είτε μέσα σε σήραγγα ή φυσικά έγκοιλα μέσα στη γη έτσι ώστε να τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια πλησιέστερα στον στόχο.

Με τη χρήση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια και σε υπάρχουσες δομές τεχνητές (σήραγγα, οριζόντια γεώτρηση) ή φυσικές (σπήλαιο) υπάρχει η δυνατότητα διασκόπησης του υπεδάφους με αποτελεσματικό τρόπο αυξάνοντας την διακριτική ικανότητα των παραγόμενων γεωηλεκτρικών εικόνων. Τέτοιοι τύποι μετρήσεων αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία από τους Sasaki and Matsuo (1993) με τη χρήση ηλεκτροδίων μέσα σε σήραγγα σε μεγάλο βάθος, για τον εντοπισμό μεταλλευμάτων και θραυσιγενών ζωνών.

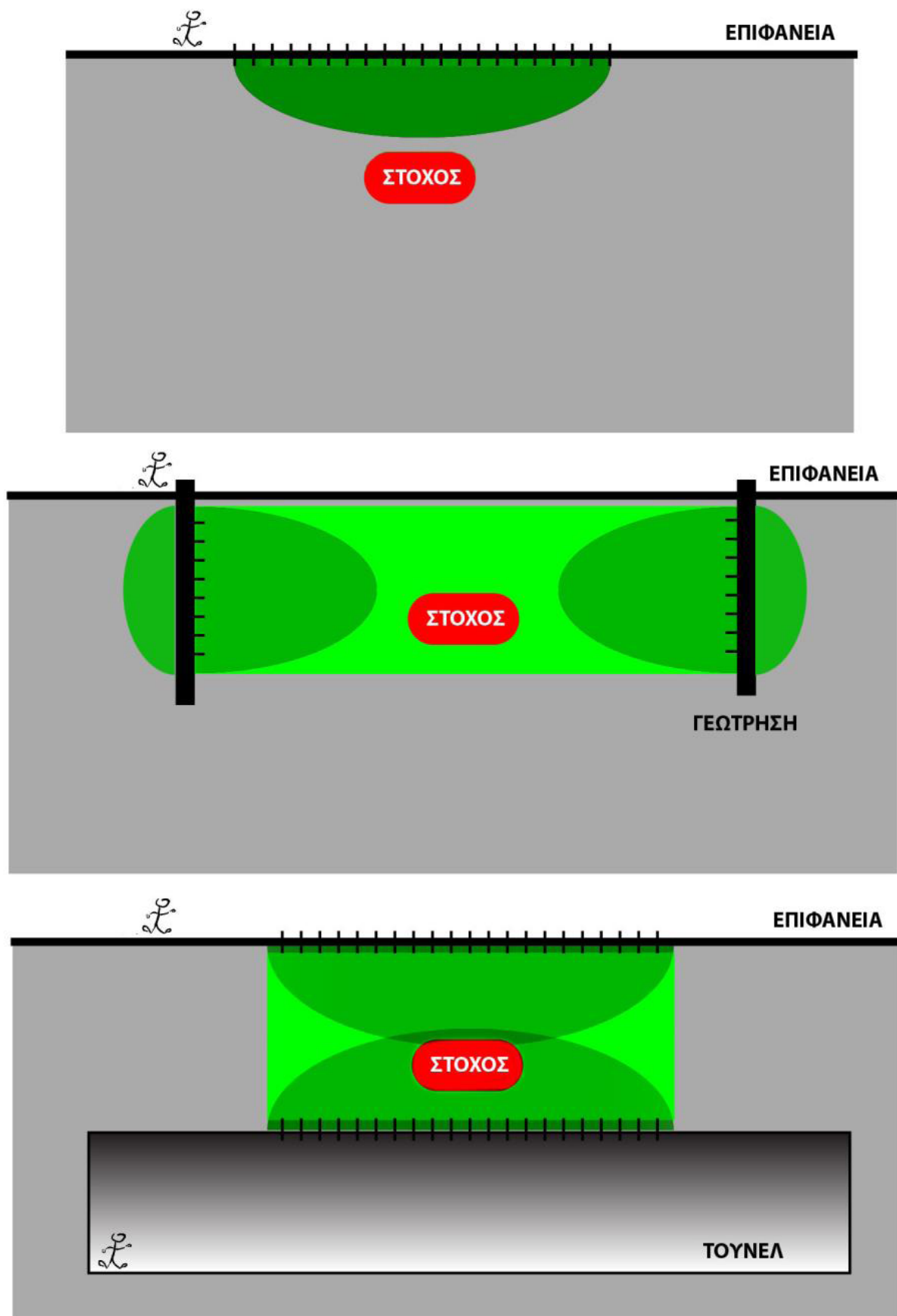
Ένα βασικό πλεονέκτημα των συγκεκριμένων μετρήσεων είναι η αύξηση της ευαισθησίας της διάταξης στο εσωτερικό της γης και κοντά στην οροφή της σήραγγας. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διακριτική ικανότητα της μεθόδου στο εσωτερικό του εδάφους και θεωρητικά καθίσταται πιο εύκολος ο εντοπισμός του στόχου σε μεγαλύτερο βάθος, κάτι που ενδεχομένως δεν είναι εφικτό όταν χρησιμοποιούνται μόνο επιφανειακά ηλεκτρόδια.



Σχήμα 3.1 Εφαρμογή μετρήσεων επιφάνειας-σήραγγας.

Στο σχήμα που ακολουθεί, αναπαρίσταται σχηματικά η περιοχή ευαισθησίας για τους διαφορετικούς τύπους μετρήσεων, επιφάνειας, μεταξύ γεωτρήσεων και επιφάνειας-σήραγγας. Θεωρητικά αναμένεται ότι η χρήση ηλεκτροδίων μέσα σε σήραγγα θα βελτιώσει την δυνατότητα εντοπισμού στόχων που βρίσκονται μεταξύ της επιφάνειας και της σήραγγας, πολύ περισσότερο από τις επιφανειακές ή τις μετρήσεις μεταξύ γεωτρήσεων.

Η εγκατάσταση ηλεκτροδίων στο εσωτερικό ενός χώρου μέσα στη γη μπορεί να γίνει είτε χρησιμοποιώντας φυσικές σήραγγες (π.χ. σπήλαια) είτε ανθρωπογενείς σήραγγες, είτε μέσα σε γεωτρήσεις. Η τελευταία περίπτωση είναι πλέον εφικτή καθώς η διάτρηση οριζοντίων γεωτρήσεων είναι τεχνικά εφικτή και οικονομικά προσιτή. Η μελέτη των μετρήσεων επιφάνειας-σήραγγας απαιτεί τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης το οποίο να υποστηρίζει την μοντελοποίηση και επεξεργασία τέτοιου τύπου μετρήσεων.



Σχήμα 3.2 Περιοχή ευαισθησίας για διαφορετικούς τύπους μετρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΡΟΣΟΠΟΙΩΣΗΣ

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Διδάκτορα ΑΠΘ, Κλεάνθη Συμυρδάνη, κρίθηκε απαραίτητο πριν την εφαρμογή ηλεκτρικών μεθόδων διασκόπησης με τη χρήση μιας ιδιαίτερης διάταξης ηλεκτροδίων, όπου μια σειρά ηλεκτροδίων τοποθετείται στην επιφάνεια του εδάφους και μια σειρά ηλεκτροδίων τοποθετείται στο εσωτερικό της γης, να εφαρμοσθεί η τεχνική σε πραγματικές, αλλά υπό κλίμακα και πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μία ειδικά κατασκευασμένη δεξαμενή, η οποία βρίσκεται στο ΤΕΙ Κρήτης στα Χανιά και συγκεκριμένα στεγάζεται στο Τμήμα Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος.

4.1 ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ



Σχήμα 4.1 Δεξαμενή για τη λήψη δεδομένων προσομοίωσης (Τμήμα Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Τ.Ε.Ι Κρήτης Χανιά).

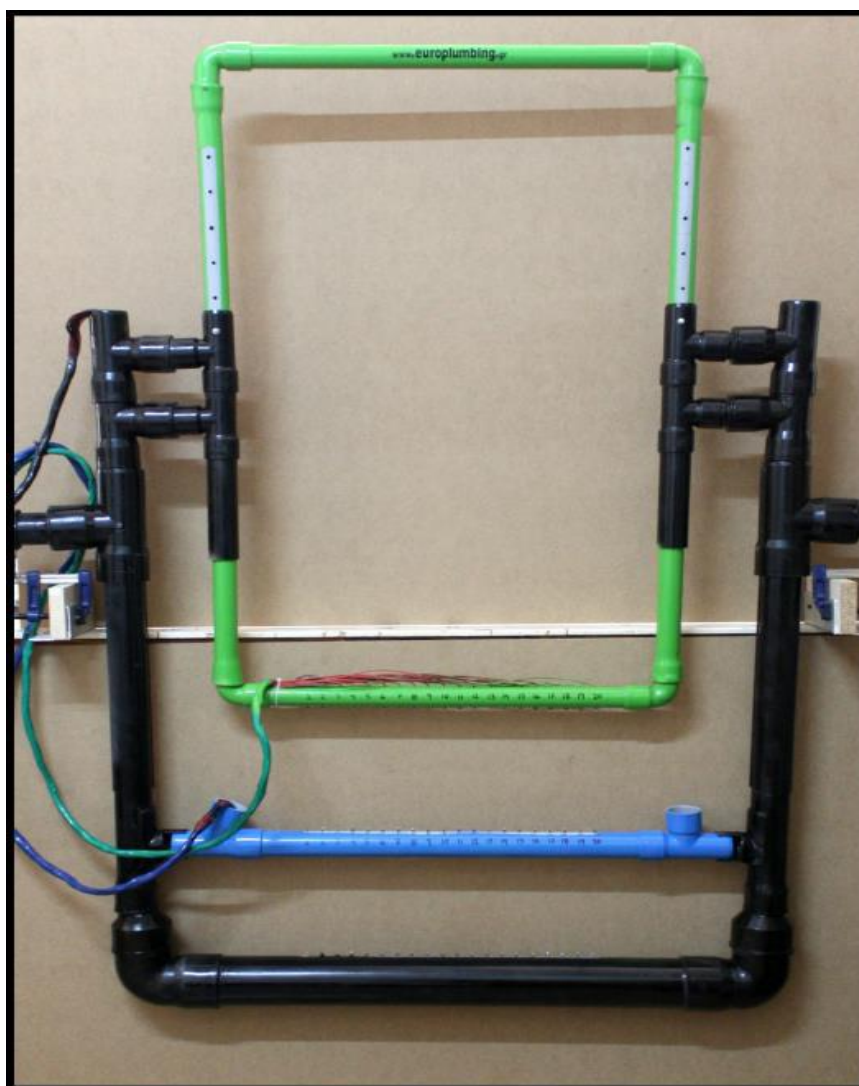
Η δεξαμενή είναι κατασκευασμένη από ειδικό πλεξιγκλάς (πάχους 1.5 εκατοστού). Το πλεξιγκλάς είναι πολυανθεκτικό υλικό με το πλεονέκτημα της διαφάνειας (είναι ορατός ο στόχος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων). Η χωρητικότητα είναι 1m³ και μπορεί να συγκρατήσει βάρος περισσότερο από 2.5 τόνους μιας και το πλεξιγκλάς είναι τοποθετημένο σε ειδικό μεταλλικό πλαίσιο, για την κατασκευή του οποίου έχειπραγματοποιηθεί ειδική στατική μελέτη. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων η δεξαμενή ήταν πληρωμένη μεπόσιμο ή απιονισμένο νερό, έτσι ώστε η αγωγιμότητα του μέσου να μεταβάλλεται κατά βούληση. Η τιμήαντίστασης του πόσιμου νερού μετρήθηκε στα 34 ohm-m. Όσον αφορά την τιμή αγωγιμότητας του καθαρούαπιονισμένου νερού έγιναν δοκιμές ώστε να είναι δυνατή η διάδοση του ρεύματος, μιας και για υψηλές τιμέςαντίστασης το ρεύμα αδυνατούσε να διαδοθεί μέσα από το υγρό. Έτσι αναγκαστικά έγινε μίξη πόσιμου καιαπιονισμένου νερού μέχρι να μπορεί να διαρρέεται από ρεύμα. Η τιμή της αντίστασης που τελικά επιλέχθηκεμετρήθηκε στα 100 ohm-m. Το γέμισμα της δεξαμενής γινόταν με λάστιχο και το άδειασμα μεειδικές βαλβίδες αποστράγγισης που είναι τοποθετημένες στο κάτω μέρος της δεξαμενής.



Σχήμα 4.2 Ειδικό όργανο υπολογισμού της αγωγιμότητας του μέσου (Consort, C532).

4.2 ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ - ΣΗΡΑΓΓΑΣ

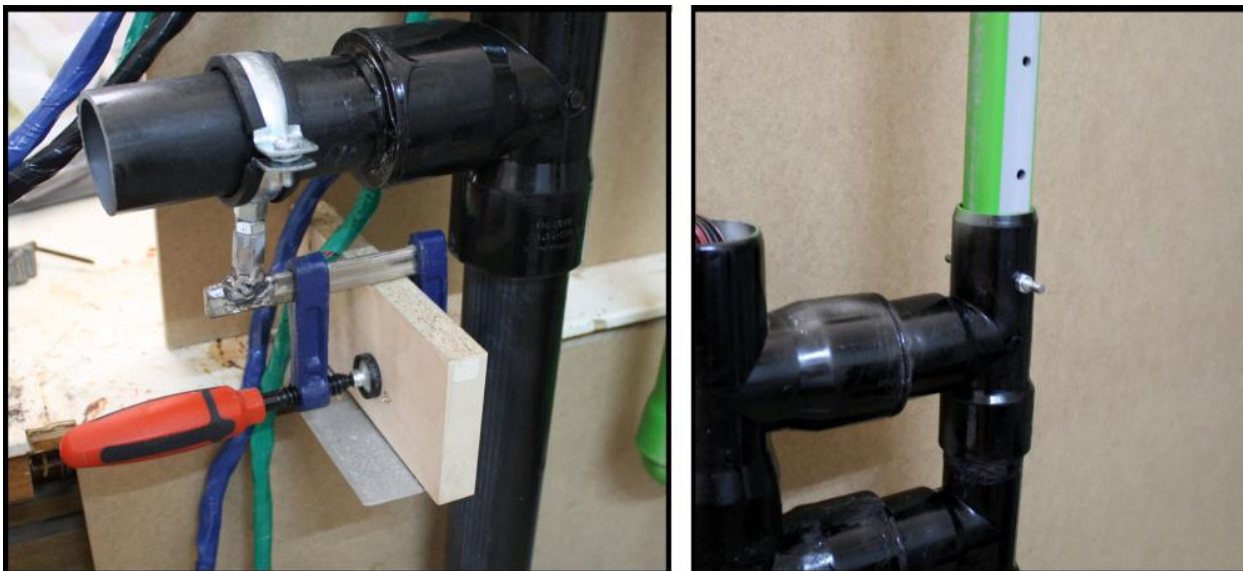
Για την λήψη των μετρήσεων και ταυτόχρονα την τοποθέτηση των στόχων με ακρίβεια κατασκευάστηκε απόειδικό τεχνητή διάταξη η οποία τοποθετήθηκε πάνω στη δεξαμενή. Η διάταξη είναι εξολοκλήρουκατασκευασμένη από μη μεταλλικά μέρη (για λόγους μηδενικής αγωγιμότητας) και από πλαστικά βαρέωςτύπου (για λόγους στιβαρότητας και ακαμψίας).



Σχήμα 4.3 Ιδιοκατασκευή για τη λήψη δεδομένων της προσομοιωμένης κατάστασης ‘επιφάνειας-σήραγγας’. Ταυτόχρονα αποτελεί και στήριγμα για ασφαλή τοποθέτηση στόχου μέσα στη δεξαμενή.

Η διάταξη τοποθετείται πάνω στη δεξαμενή και στερεώνεται σταθερά σε αυτή με ειδικό βραχίονα έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η θέση του στόχου καθ’ όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η διάταξη αποτελείται από 3 μέρη τα οποία είναι χρωματισμένα για λόγους ευκρίνειας. Τα τρία μέρη φέρουν 20 ισαπέχοντα ηλεκτρόδια με σταθερή απόσταση μεταξύ τους 2 εκατοστά (συνολικά 60 ηλεκτρόδια) και υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής της κατακόρυφης μεταξύ τους απόστασης απόσταση κατά βούληση του χειριστή (από 5 έως 25 εκατοστά). Κατά τη διάρκεια της κατασκευής έχει δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα στην σωστή ευθυγράμμιση των ηλεκτροδίων μεταξύ των τριών σκελών, ακόμα και όταν μεταβάλλεται η μεταξύ τους απόσταση (με τη χρήση σωλήνων ‘οδηγών’).

Το πάνω σκέλος (πράσινο χρώμα) προσομοιάζει τα επιφανειακά ηλεκτρόδια και γι’ αυτό φροντίζουμε ώστε τα ηλεκτρόδια να βρίσκονται πάντα στο όριο ημιχώρου (νερού) και αέρα. Αυτό είναι εφικτό αφενός μεν γιατί η στάθμη του νερού επιλέγεται κατά βούληση αλλά και επειδή το σκέλος αυτό έχει ειδικές «οπές» σε ισαπέχοντα διαστήματα των 5 εκατοστών που με τη χρήση πύρων ασφαλιζείται η θέση στο επιθυμητό ύψος.



Σχήμα 4.4(Αριστερά) Βραχίονας για σταθερό στήριγμα της διάταξης με τη δεξαμενή, (Δεξιά) Τρύπες ανά ισαπέχοντα διαστήματα (5 εκατοστά) ώστε να επιλέγεται η απόσταση μεταξύ των σκελών της διάταξης με χρήση πύρων.

Το μεσαίο σκέλος (μπλε χρώμα) προσομοιάζει τα ηλεκτρόδια που είναι τοποθετημένα μέσα στον ημιχώρο. Το συγκεκριμένο σκέλος έχει την επιπρόσθετη δυνατότητα να μετατοπίζεται κατά την οριζόντια διεύθυνση έτσι ώστε να μην είναι πλήρως ευθυγραμμισμένο με τα υπόλοιπα και να είναι δυνατή η μελέτη της ανακρίβουσθέσης των ηλεκτροδίων.

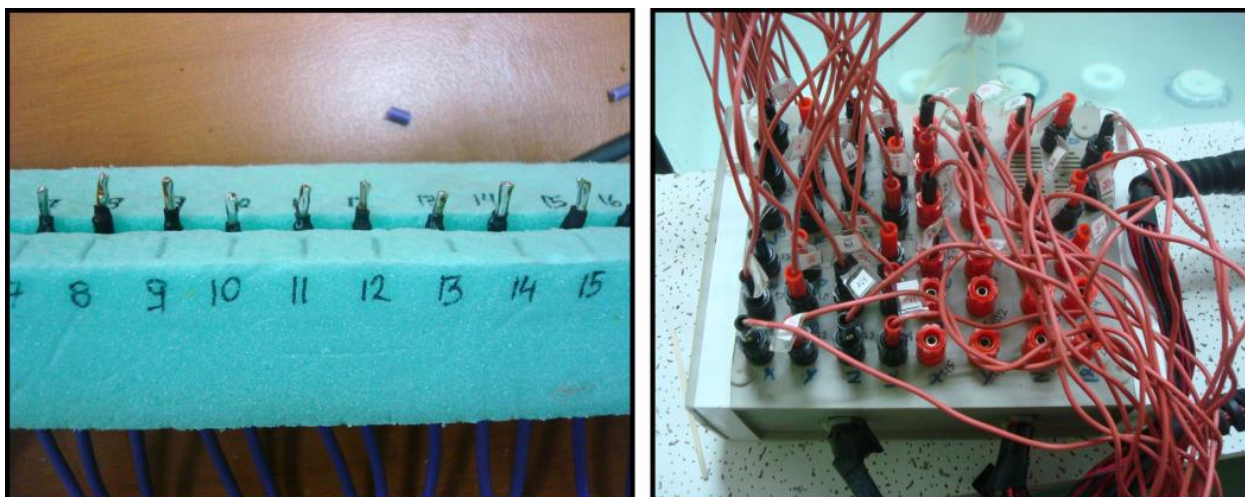
Το κατώτερο σκέλος (μαύρο χρώμα) προσομοιάζει τη παρουσία μίας σήραγγας, αφού είναι πλήρως μονωμένοεξωτερικά (δεν γεμίζει με νερό) με αποτέλεσμα να έχει αέρα στο εσωτερικό του. Τα ηλεκτρόδια που είναιτοποθετημένα στο πάνω μέρος του σωλήνα θεωρείται ότι είναι τοποθετημένα στην οροφή μίας σήραγγας. Ηδιάμετρος της σωλήνας είναι 7 εκατοστά.



Σχήμα 4.5 Τα τρία μέρη της διάταξης (διαφορετικά χρώματα) το καθένα από τα οποία έχει και διαφορετική χρήση.

Ως ηλεκτρόδια χρησιμοποιήθηκαν οι άκρες (απολήξεις) των χάλκινων πολύκλωνων καλωδίων και από την άλλη άκρη καταλήγουν σε ειδικά βύσματα ώστε να συνδεθούν με τον πολυπλέκτη του οργάνου μέτρησης.

Σε αυτό το σημείο καλό είναι να επισημανθεί ότι κατά τη διαδικασία αντιστροφής των δεδομένων από την δεξαμενή πρέπει να γίνει η κατάλληλη διόρθωση των αποτελεσμάτων λόγω των ορίων της δεξαμενής σε σχέση με τη θέση των ηλεκτροδίων και τα όρια του πλεξιγκλάς. Κατά την αντιστροφή θεωρείται ότι η περιοχή μελέτης βρίσκεται αρκετά απομακρυσμένη από τα όρια της δεξαμενής όπου το ρεύμα δεν μπορεί να διαδοθεί (όριονερού και αέρα). Αυτή όμως η παραδοχή δεν ισχύει στην πράξη αφού η απόσταση της διάταξης από τα όρια είναι 30-50 εκατοστά περίπου. Αυτή η απόσταση είναι πρακτικά αρκετά μικρή με αποτέλεσμα να έχει επίδραση στα αποτελέσματα και οφείλουμε να την λάβουμε υπόψη κατά την αντιστροφή των δεδομένων.



Σχήμα 4.6 Ακρες απολήξεις καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν ως ηλεκτρόδια (αριστερά) τα οποία με ειδικά βύσματα κατέληγαν στον πολυπλέκτη που ήταν συνδεδεμένος με το όργανο (δεξιά).

4.3 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

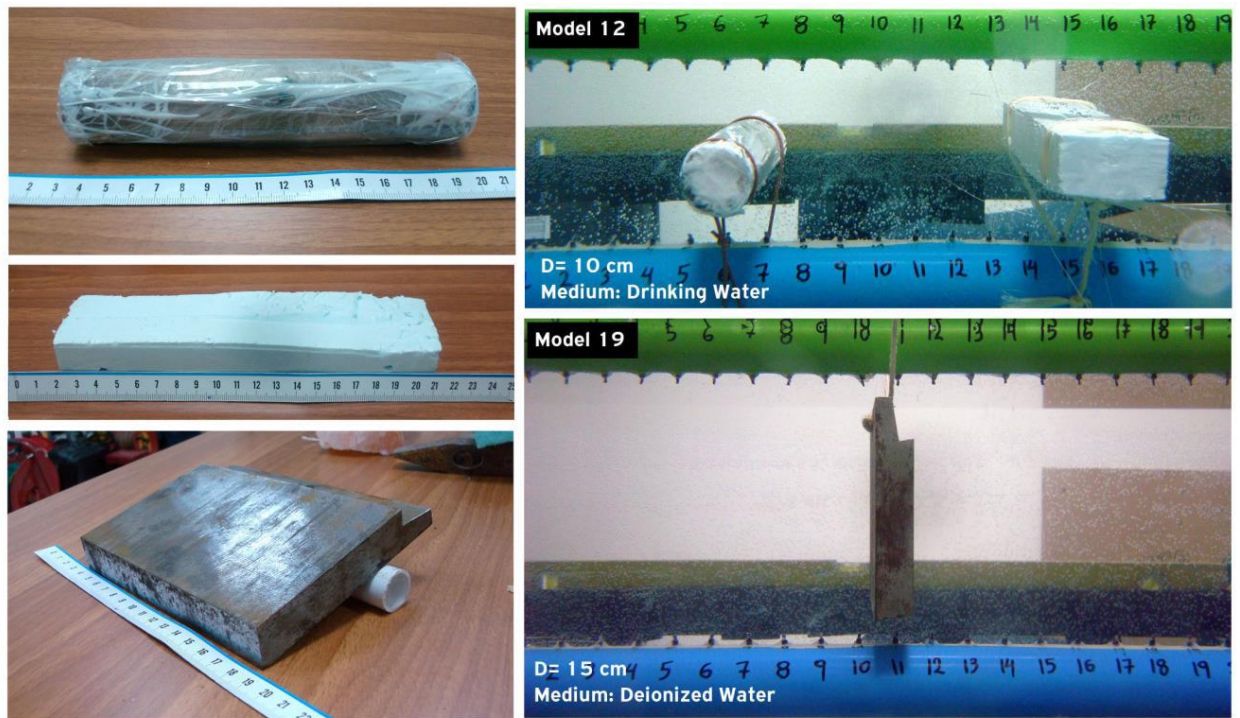
Για την λήψη των δεδομένων στη δεξαμενή χρησιμοποιήθηκε το SyscalR1 Plus από την ‘IrisInstruments’, το οποίο έχει τη δυνατότητα χρήσης 48 ηλεκτροδίων και χρησιμοποιεί ένα κανάλι για τη λήψη των δεδομένων.



Σχήμα 4.7 Μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη μετρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την επαλήθευση των θεωρητικών αποτελεσμάτων της διάταξης επιφάνειας-σήραγγας χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι στόχοι (Μοντέλο 12 και 19) στην πειραματική δεξαμενή. Ανάμεσα στην ‘επιφανειακή’ διάταξη (πράσινο χρώμα) και την ‘εσωτερική’ (μπλε χρώμα) ή την διάταξη ‘σήραγγας’ (μαύρο χρώμα) επιλέχθηκαν αποστάσεις $D=10$ και 15 εκατοστά, αντίστοιχα. Ως μέσο πλήρωσης της δεξαμενής επιλέχθηκε πόσιμο νερό (34 ohm-m) για τους αντιστατικούς στόχους και μίγμα πόσιμου και απιονισμένου (100 ohm-m) για τον αγώγιμο στόχο.



Σχήμα 5.1 (Μοντέλο 12) Αντιστατικοί στόχοι διαφορετικού μεγέθους, σχήματος και τιμής αντίστασης (κύλινδρος και πολυστυρένιο) μέσα σε πόσιμο νερό. (Μοντέλο 19) Αγώγιμος στόχος αποτελούμενος από μεταλλική πλάκα τοποθετημένος μέσα σε απιονισμένο νερό.

5.1 ΑΝΤΙΣΤΑΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟΥ

Στο μοντέλο 12, ως αντιστατικός στόχος χρησιμοποιήθηκε ένας πλαστικός σωλήνας μήκους 16 εκατοστών και διατομής 3.5 εκατοστών του οποίου τα άκρα έχουν μονωθεί με σιλκόνη και ένα κομμάτι πολυστυρένιου διαστάσεων $3 \times 5 \times 19$ εκατοστών. Οι στόχοι τοποθετήθηκαν ανάμεσα στο $6^\circ-7^\circ$ και $14^\circ-16^\circ$ επιφανειακό ηλεκτρόδιο, αντίστοιχα.

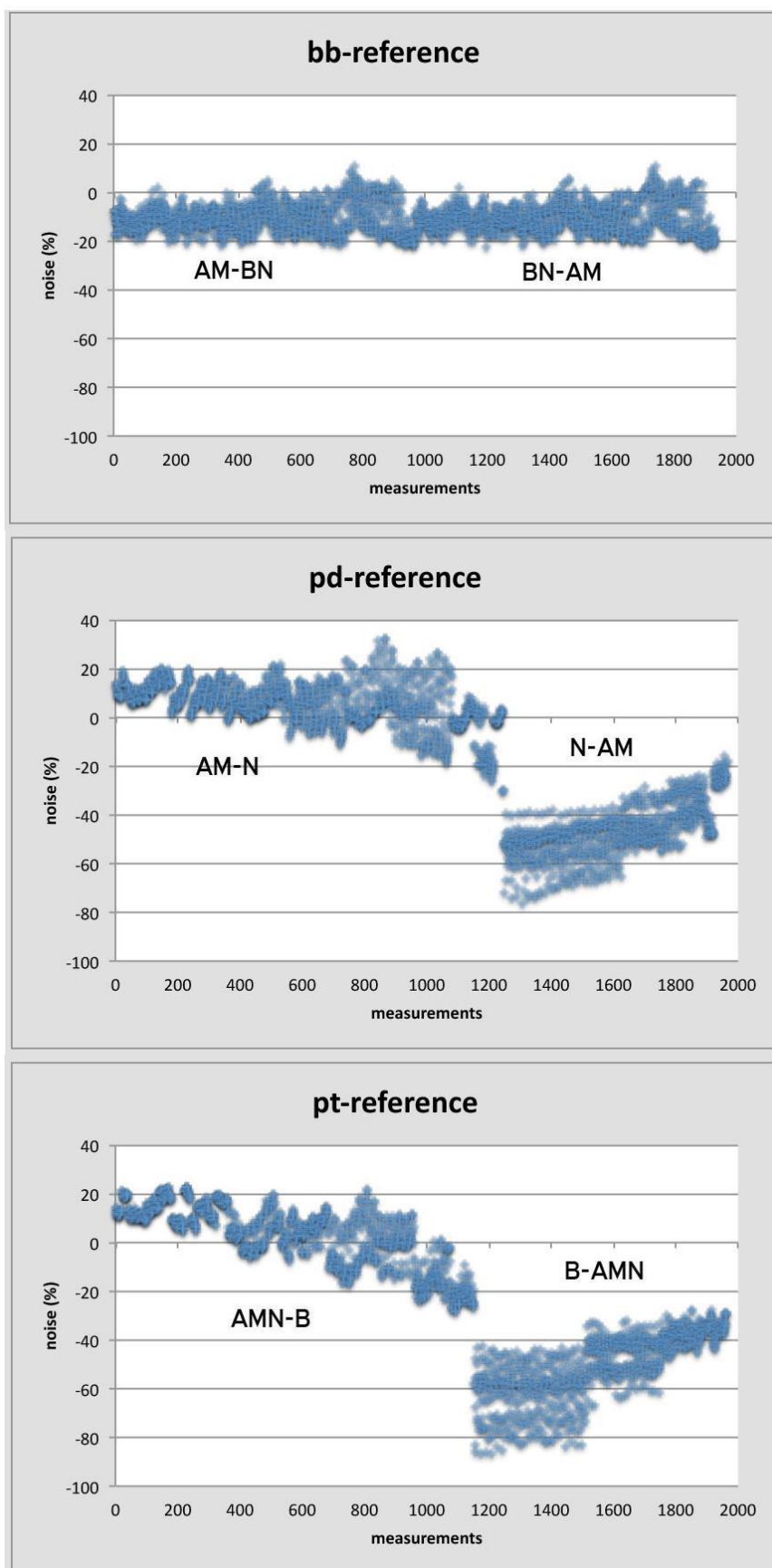
Πριν τις μετρήσεις παρουσία στόχου υπολογίστηκε ο επί τις εκατό θόρυβος που υπεισέρχεται σε κάθε μέτρηση λόγω των ορίων της δεξαμενής (Λεονταράκης, 2011). Αυτό είναι εφικτό αφού γνωρίζοντας ότι ο ημιχώρος έχει αντίσταση $\rho_{\text{homog}}=34 \text{ ohm-m}$ αρχικά ελήφθησαν μετρήσεις ‘αναφοράς’ (μετρήσεις χωρίς τον στόχο) έτσι ώστε να εκτιμηθεί αριθμητικά η απόκλιση της φαινόμενης αντίστασης από την θεωρητικά αναμενόμενη αντίσταση του ημιχώρου. Αυτή η απόκλιση είναι ο επί τοις εκατό εκτιμώμενος θόρυβος βάσει ομογενούς μέσου και δίνεται από την σχέση

$$\text{noise}_{\text{meas}} (\%) = \frac{P_{\text{homog}} - P_{\text{meas}}}{P_{\text{homog}}} \times 100$$

Ο θόρυβος αυτός ‘μολύνει’ τα δεδομένα και μπορεί να αφαιρεθεί από τις μετρήσεις που προκύπτουν με την παρουσία του στόχου μέσα στον ημιχώρο, σύμφωνα με τη σχέση

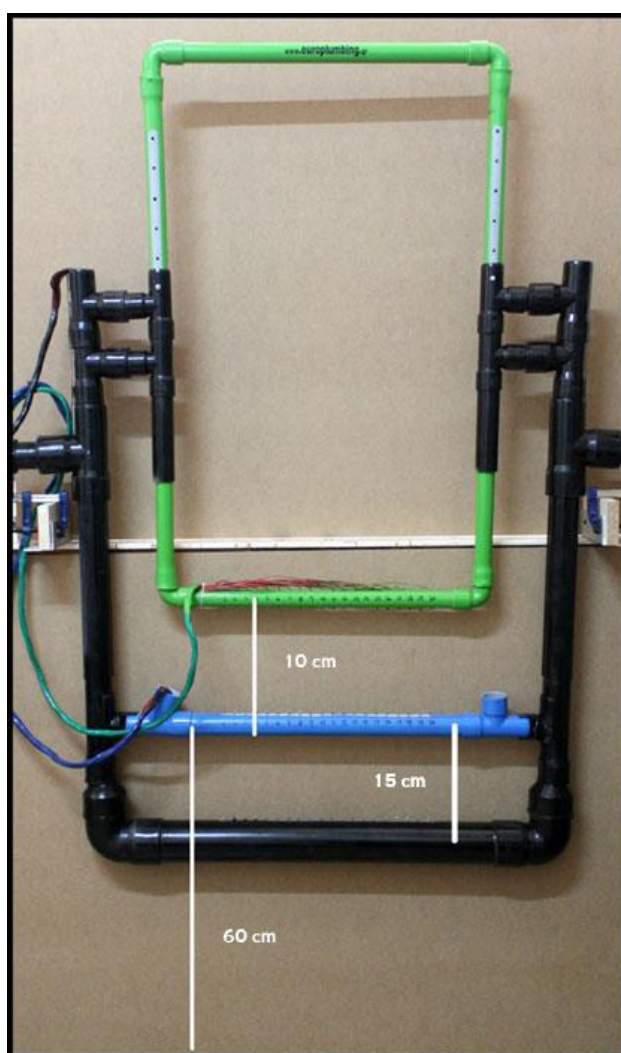
$$p_{\text{corr}} = p_{\text{meas}} + (\text{noise}_{\text{meas}} \times p_{\text{meas}})$$

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο επί τοις εκατό(%) θόρυβος βάσει του ομογενούς μέσου για το συγκεκριμένο μοντέλο από ταπειραματικά δεδομένα της δεξαμενής και για τα τρία πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν (‘bipole-bipole’, ‘pole-dipole’ και ‘pole-tripole’). Στα πειραματικά δεδομένα παρατηρείται ότι το πρωτόκολλο ‘bb’ έχει το μικρότερο ποσοστό θορύβου (από -20% έως 10%) συγκριτικά με τα άλλα δύο πρωτόκολλα (από -80% έως 30%). Στο σχήμα φαίνεται ότι στα πρωτόκολλα ‘rd’ και ‘rt’ το μεγαλύτερο ποσοστό θορύβου εμπεριέχεται στο συνδυασμό των ηλεκτροδίων N-AM και B-AMN.



Σχήμα 5.2(Μοντέλο 12) Ποσοστό % θορύβου υπολογιζόμενο βάσει ομογενούς μέσου από τα πειραματικά δεδομένα της δεξαμενής για τα τρία πρωτόκολλα των επιφάνεια-σήραγγας μετρήσεων.

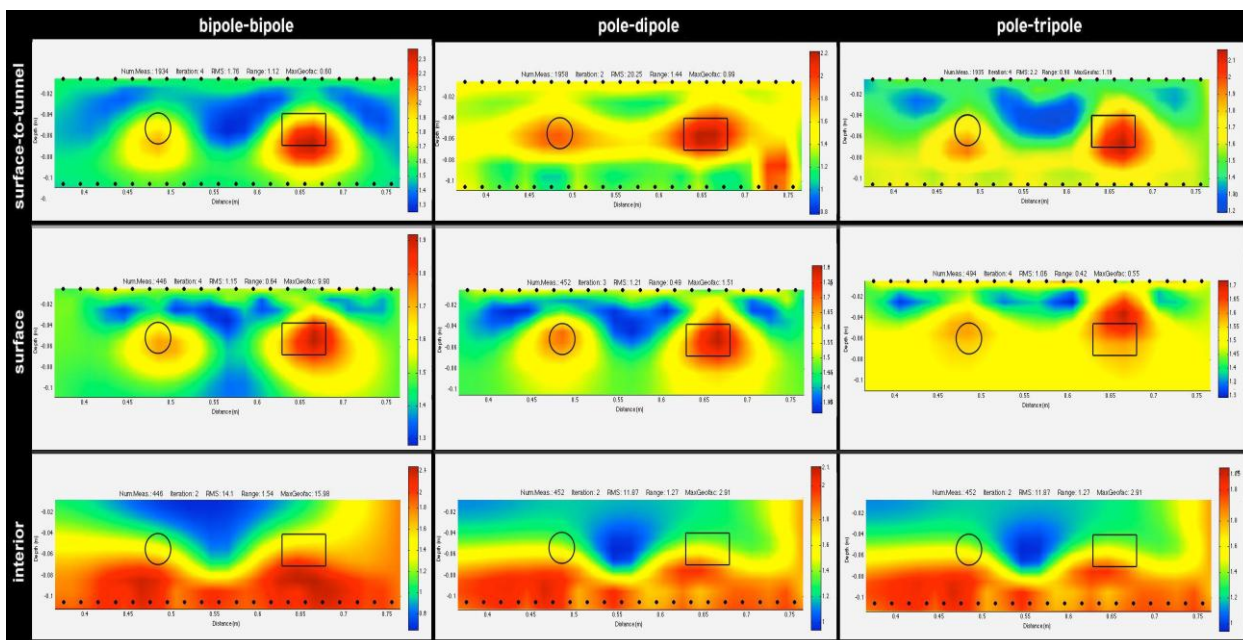
Ο θόρυβος αυτός κατά κύριο λόγο οφείλεται στα πεπερασμένα όρια των τοιχωμάτων της δεξαμενής, τα οποία επηρεάζουν τις μετρήσεις. Ένας επιπρόσθετος παράγοντας θορύβου μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία της ανενεργού σωλήνα που προσομοιάζει τη 'σήραγγα', όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η συγκεκριμένη σωλήνα απέχει 15 εκατοστά από το κάτω μέρος της 'εσωτερικής' διάταξης, που για κατασκευαστικούς λόγους δεν ήταν δυνατό να απομακρυνθεί κατά την διαδικασία των πειραμάτων. Όταν το ηλεκτρόδιο ρεύματος Αβρίσκεται στα κάτω ηλεκτρόδια (μπλε διάταξη) μαζί με το ηλεκτρόδιο M ('pd') ή MN ('pt'), τότε κατά την διάδοση του ρεύματος, αυτό συναντάει την υψηλή αντίσταση της σωλήνας (αφού περιέχει αέρα) με αποτέλεσμα να εισέρχεται μεγάλο ποσοστό θορύβου στις μετρήσεις. Αντίθετα, στο πρωτόκολλο 'bb' λόγω συμμετρίας της διάταξης το ρεύμα 'περιορίζεται' ανάμεσα στα 'επιφανειακά' και 'εσωτερικά' ηλεκτρόδια, περιορίζοντας αντίστοιχα και το ποσοστό του ρεύματος που 'συναντάει' την μαύρη σωλήνα. Επιπλέον, θόρυβος εισάγεται από την επίδραση των τοιχωμάτων της δεξαμενής.



Σχήμα 5.3 Αποστάσεις ανάμεσα στις διατάξεις της ιδιοκατασκευής.

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι εικόνες αντιστροφής των δεδομένων και των τριών διατάξεων μετά από διόρθωση για μετρήσεις 'επιφανειακής-σήραγγας', 'επιφανειακές' και 'εσωτερικές' μετρήσεις.

Στις περισσότερες περιπτώσεις οι στόχοι ανιχνεύονται και διακρίνονται μεταξύ τους. Οι μετρήσεις ‘επιφάνειας-σήραγγας’ δίνουν καθαρή εικόνα των στόχων και σχετικά καλύτερη από αυτή των επιφανειακών μετρήσεων και σαφώς καλύτερη από αυτή των ‘εσωτερικών’ μετρήσεων. Βέβαια σημειώνεται ότι η εικόνα των επιφανειακών μετρήσεων δεν υστερεί σημαντικά, καθώς οι δύο στόχοι είναι σχετικά κοντά στην επιφάνεια. Από τη σύγκριση μεταξύ των διατάξεων το ‘bb’ και το ‘rt’ αναδεικνύονται τα καλύτερα.

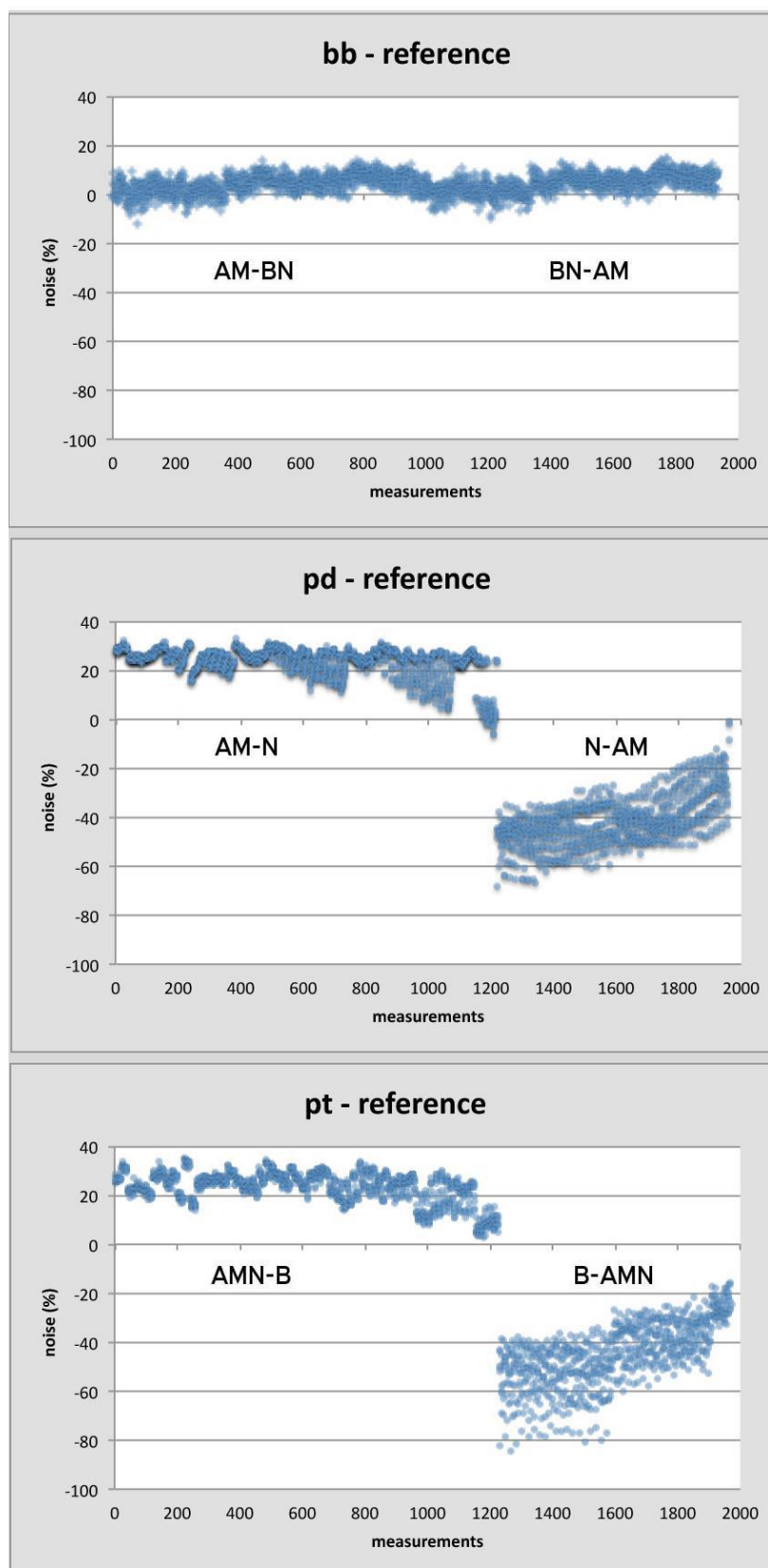


Σχήμα 5.4(Μοντέλο 12) Εικόνες αντιστροφής δεδομένων μετά από διόρθωση χρησιμοποιώντας τα πρωτόκολλα 'bb', 'pd' και 'rt' (στήλες) με δύο αντιστατικούς στόχους διαφορετικού μεγέθους, σχήματος και τιμής αντίστασης με επιφάνειας-σήραγγας, επιφάνειας και εσωτερικές μετρήσεις. Η κλίμακα απεικόνισης των τιμών αντίστασης είναι λογαριθμική.

5.2 ΑΓΩΓΙΜΟΣ ΣΤΟΧΟΣ

Ως αγωγίμος στόχος επιλέχθηκε μία ατσάλινη πλάκα, διαστάσεων 2x11.5x15 εκατοστών, η οποία τοποθετήθηκε μέσα στη δεξαμενή κατακόρυφα στο 11^ο ηλεκτρόδιο με τη μεγαλύτερη διάσταση κάθετα στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο σειρές ηλεκτροδίων. Η δεξαμενή έχει πλέον πληρωθεί και με απιονισμένο νερό, για να αυξηθεί η αντίσταση του μέσου και να επιτευχθεί μεγαλύτερη αντίθεση αντίστασης ανάμεσα στον αγωγίμο στόχο και τον ημιχώρο.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ο επί τοις εκατό εκτιμώμενος θόρυβος βάσει ομογενούς μέσου που υπεισέρχεται στις μετρήσεις από πραγματικά δεδομένα δεξαμενής. Σημειώνεται ότι σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο οι αποστάσεις μεταξύ των δύο διατάξεων έχουν αυξηθεί κατά 50% και άρα ο θόρυβος πρέπει να επανεκτιμηθεί. Όπως και στον αντιστατικό έτσι και στον αγωγίμο στόχο το πρωτόκολλο 'bb' έχει το μικρότερο ποσοστό θορύβου ($\pm 10\%$). Επιπλέον το μεγαλύτερο σφάλμα στις μετρήσεις για τα πρωτόκολλα 'pd' και 'rt' υπεισέρχεται από τους συνδυασμούς ηλεκτροδίων N-AM και B-AMN, αντίστοιχα (από -80% έως 40%).

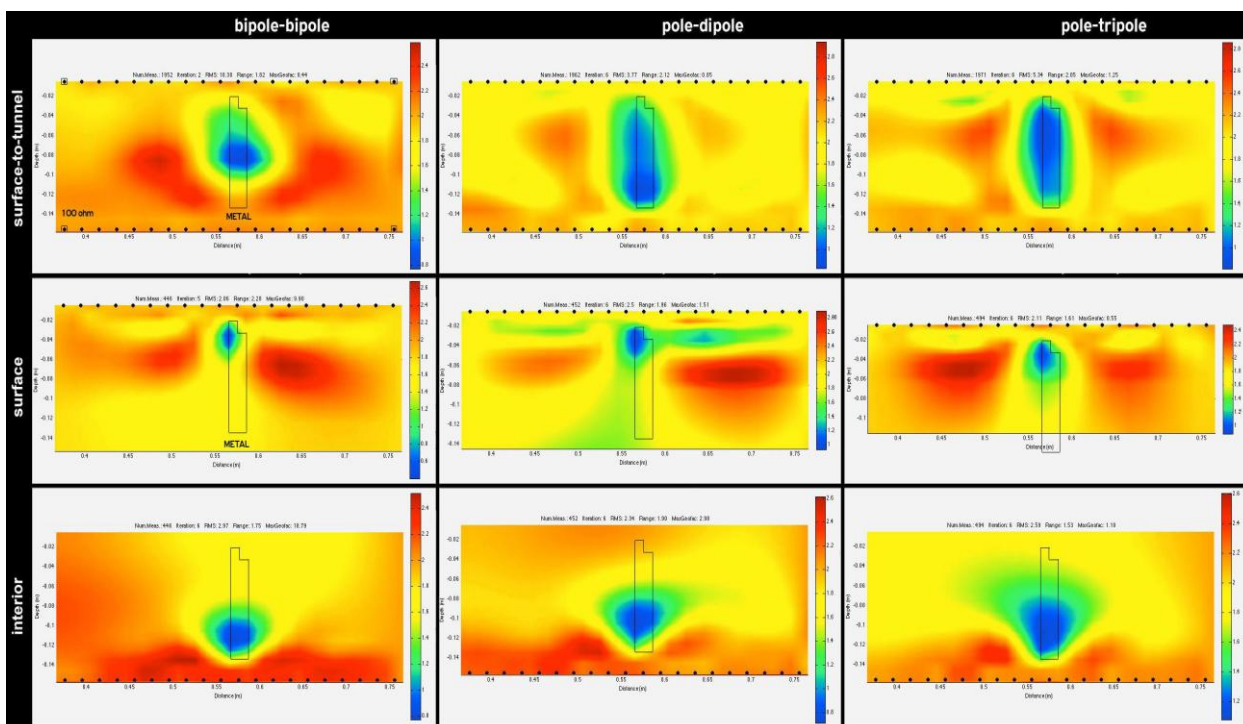


Σχήμα 5.5(Μοντέλο 19) Ποσοστό % θορύβου υπολογιζόμενο βάσει ομογενούς μέσου από πραγματικά δεδομένα δεξαμενής για τα τρία πρωτόκολλα των επιφάνεια-σήραγγας μετρήσεων.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι εικόνες αντιστροφής από όλα τα πρωτόκολλα και όλες τις μετρήσεις(‘επιφάνεια-σήραγγα’, ‘επιφάνεια’, ‘εσωτερικές’) πρωτογενών δεδομένων. Μία πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι ότι όταν χρησιμοποιούνται ‘επιφανειακές’

μετρήσεις εντοπίζεται μόνο το πάνω μέρος του στόχου και αντίστοιχα στις ‘εσωτερικές’ μετρήσεις εντοπίζεται μόνο το κάτω μέρος. Το πλεονέκτημα των μετρήσεων ‘επιφανειακής-σήραγγας’ φαίνεται για άλλη μια φορά στο συγκεκριμένο παράδειγμα αφού έχουμε αρκετή ‘πληροφορία’ ανάμεσα στα ‘επιφανειακά’ και στα ηλεκτρόδια που βρίσκονται σε βάθος ώστε να γίνει η ανακατασκευή του στόχου σε μεγαλύτερη έκταση.

Όσον αφορά τώρα τη σύγκριση μεταξύ των πρωτοκόλλων, θα λέγαμε ότι το ‘rt’ αναδεικνύει πολύ καλύτερα τον στόχο (τον περιγράφει σε μεγαλύτερη έκταση). Κάτι που καταφέρνει και το ‘rd’ αλλά σε μικρότερο βαθμό. Το ‘bb’ ενώ εντοπίζει στην σωστή θέση τον στόχο, υστερεί στην συνολική αναδόμηση του και κυρίως στη ανακατασκευή των άκρων. Πρέπει να επισημανθεί ότι το % RMS σφάλμα στο πρωτόκολλο ‘bb’ είναι μεγάλο (10.4%), ενώ στα άλλα πρωτόκολλα (‘rd’ και ‘rt’) είναι μικρότερο (2.1% και 5.3%, αντίστοιχα).



Σχήμα 5.6(Μοντέλο 19) Εικόνες αντιστροφής όπου ανακατασκευάζεται αγωγίμος στόχος με τη χρήση των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιήθηκαν. Η εφαρμογή των πρωτοκόλλων πραγματοποιήθηκε τόσο στις επιφανειακής-σήραγγας όσο και στις επιφανειακές και εσωτερικές μετρήσεις. Η κλίμακα απεικόνισης των τιμών αντίστασης είναι λογαριθμική.

Από το σύνολο των πειραματικών δεδομένων προκύπτει ότι οι μετρήσεις ‘επιφανειακής-σήραγγας’ υπερτερούν σε σχέση με τις ‘επιφανειακές’ ή τις ‘εσωτερικές’ μετρήσεις, κάτι που αποδείχθηκε και με τα συνθετικά δεδομένα προσομοίωσης. Όσον αφορά τα πρωτόκολλα, το ‘bb’ και το ‘rt’ είναι σε θέση να ανακατασκευάσουν καλύτερα τον στόχο όταν είναι ανιστατικός. Στην περίπτωση που έχουμε αγωγίμο στόχο, το πρωτόκολλο ‘rt’ απεικονίζει τον στόχο καλύτερα (δηλαδή σε όλη την έκτασή του) από τα υπόλοιπα πρωτόκολλα. Το πρωτόκολλο ‘rd’ υστερεί σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα και αυτό μπορεί να ερμηνευθεί από το γεγονός ότι το απομακρυσμένο ηλεκτρόδιο δεν βρίσκεται μακριά από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια, όπως θα έπρεπε, και επιπλέον βρίσκεται πολύ κοντά στο τοίχωμα της δεξαμενής (όριο νερού και αέρα).

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βασίλης Κ. Παπαζάχος, Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη 1996
- [2] Ιωάννης Φ. Λούης, Σημειώσεις Τομέα Γεωφυσικής & Γεωθερμίας ‘Εισαγωγικά μαθήματα στη διερευνητική γεωφυσική’, Αθήνα 2004
<http://www.geophysicsonline.gr/eisagogika.pdf>
- [3] 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
- [4] Aitken M. (1974), Physics and archaeology. Clarendon Press, Oxford.
- [5] Barker, R.D. (1989). Depth of investigation of collinear symmetrical four electrode arrays. Geophysics, 54, 1031-1037.
- [6] 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.
- [7] Burnett D.S. (1989). Finite element analysis. Addison-Wesley Publishing Co.
- [8] Clark, A. (1990). Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology. B. T. Batsford Ltd, London.
- [9] Coggon, J.H. (1971). Electromagnetic and electrical modelling by the finite element method. Geophysics, 36, 132-155.
- [10] 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.
- [11] Dahlin, T. (1993). On the Automation of 2D Resistivity Surveying for Engineering and Environmental Applications. PhD Thesis, Lund University, Sweden.
- [12] Dahlin, T., (2001). The Development of Electrical Imaging Techniques. Computers and Geosciences, 27(9), 1019-1029.
- [13] Danielsen B.E., Dahlin T. (2010). Numerical modelling of resolution and sensitivity of ERT in horizontal boreholes. Journal of Applied Geophysics, 70, 245-254.
- [14] Dey A. and Morrison H.F. (1979a). Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures. Geophysical Prospecting, 27, 106-136.
- [15] Edwards L.S. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. Geophysics, 42, 1020-1036.
- [16] George Frank Tagg (1964). Earth Resistances, Pitman Publishing Corporation
- [17] Griffiths D. and Barker R. (1993). Two dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics, 19, 211-226.

- [18] Griffiths, D., Turnbull, J. and Olayinka, A. (1990). Two-Dimensional Resistivity Mapping with a Computer- Controlled Array. *First Break*, 8, 121-129.
- [19] Hallof, P.G. (1957). On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. Ph.D., Thesis, Cambridge, MIT.
- [20] Lawson C. and Hanson R. (1974). Solving least squares problems. Pentice-Hall.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Loke (2001). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geoelectrical*.
- [24] Menke,W. (1984). *Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory*. Academic Press, London.
- [25] Musset, A.E. and Aftab Khan, M. (2000). *Looking into the Earth. An Introduction to Geological Geophysics*. Cambridge University Press.
- [26] Papadopoulos N. (2007). Algorithm development for the 3-D inversion of geoelectrical data coming from archaeological areas. Ph.D. thesis, Aristotle University of Thessaloniki.
- [27] 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
- [28] Parasnis, D, (1986). *Principles of applied geophysics*. Chapman and Hall.
- [29] Peter P. Silvester and Ronald L. Ferrari (1990). *Finite Elements for Electrical Engineers*
- [30] 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.
- [31] Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons Ltd.
- [32] Roka A. and Tsokas G. (1987). Field investigation of aMacedonian tumulus by resistivity soundings. *Geoexploration*, 24, 99-108.
- [33] Sasaki Y., Matsuo K. (1990). Surface-to-Tunnel resistivity tomography at a copper mine. 550-553.
- [34] Shima H. (1992). 2-D and 3-D resistivity image reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, 1270-1291.
- [35] Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*. Second edition. Cambridge University Press

- [36] 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.
- [37] Tripp A., Hohmann G. and Swift C. (1984). Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, 49, 1708-1717.
- [38] Tsourlos P.I. (1995). Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York.
- [39] 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.
- [40] Tsourlos P., Szymanski J. and Tsokas G. (1999). The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays. *Geophysics*, 64, 1357-1363.
- [41] Van Nostrand, Robert Caige, Cook, Kenneth L. (1966). Interpretation of resistivity data, U.S. Geological Survey, p. 310.
- [42] 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.
- [43] Wright J.B. et al., *Geology and mineral resources of West Africa*, Allen & Unwin, 1985
- [44] 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.
- [45] 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
- [46] Zhody, A. (1989). A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54, 245-253.
- [47] Zhou Bing and S.A. Greenhalg (2000). Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, 887-912