



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ*

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α. ΚΟΝΤΑΞΗΣ**

ΘΕΜΑ

*“Μελέτη της Πολυστρωματικής Δομής  
του Εδάφους”*

**Καθηγητής: Ι.Α. Σταθόπουλος**

**Επιβλέπων: Ι.Φ. Γκόνος**

*Αθήνα, 2002*



111

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

*ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ*

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α. ΚΟΝΤΑΞΗΣ**

ΘΕΜΑ

*“Μελέτη της Πολυστρωματικής Δομής  
του Εδάφους”*

**Καθηγητής: Ι. Α. Σταθόπουλος**

**Επιβλέπων: Ι. Φ. Γκόνος**

*Αθήνα, 2002*

*Σ' όλους εκείνους που αναζητούν  
το νόημα της Ζωής*

« Όλα τελειώνουνε  
κι όλα περνάνε,  
ιδέες βασιλισσες  
κακογερνάνε,  
στις νέες 'ανάγκες σου  
-κόπος βαρής!-  
σκοπούς 'αλάθευτους  
κοίτα να βρείς»

Η Καμπάνα  
Κ. Βάρναλης

## ***Πρόλογος***

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, σε συνεργασία με τον συνάδελφο Δημήτριο Π. Κατενώφ, για την απόκτηση του διπλώματος του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Για το λόγο αυτό, αρχικά, έγινε μία διερεύνηση αντίστοιχων εργασιών, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της αντίστασης του εδάφους, προκειμένου να γίνει επιλογή του κατάλληλου μοντέλου. Στον υπολογισμό των παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο, και ο οποίος συγκρίθηκε με άλλες αλγοριθμικές τεχνικές.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στις γειώσεις. Αναφέρονται τα είδη των γειώσεων και οι μέθοδοι γείωσης. Επίσης περιγράφονται τα είδη των ηλεκτροδίων γείωσης που υπάρχουν, καθώς επίσης και τη σχέση που έχουν με την τιμή της αντίστασης. Ορίζονται οι έννοιες της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αναλύονται οι παράγοντες που τις επηρεάζουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται άρθρα από τη διεθνή βιβλιογραφία που σχετίζεται με τη μοντελοποίηση της δομής του εδάφους και τις μετρήσεις που γίνονται με σκοπό τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτού. Καθώς επίσης, άρθρα που αναφέρονται στην επίδραση που έχουν τα χαρακτηριστικά του εδάφους στον υπολογισμό συστημάτων γείωσης, αλλά και στις μεθόδους υπολογισμού της αντίστασης συστήματος γείωσης τοποθετημένης σε πολυστρωματικό έδαφος.

Στο τρίτο κεφάλαιο διερευνάται η μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους του Wenner. Προσδιορίζεται το μοντέλο γης, και ορίζεται η έννοια της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο του τριστρωματικού εδάφους και, με χρήση κάποιων οριακών συνθηκών παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις, για το διστρωματικό μοντέλο. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου αυτού παραθέτονται οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οκτώ αλγοριθμικές τεχνικές υπολογισμού των παραμέτρων του εδάφους (διστρωματικό μοντέλο), οι οποίες βασίζονται σε πέντε διαφορετικές μεθόδους, που παρουσιάζονται στην ίδια ενότητα. Περιγράφονται οι γενετικοί αλγόριθμοι, και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του γενετικού αλγόριθμου που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο. Εφαρμόστηκε στις ίδιες έξι υποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν οι οκτώ τεχνικές από τον J. L. Alamo, και η σύγκριση έδειξε την σαφή υπεροχή του. Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους για μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε καθώς και για άλλες που είχαμε στη διάθεση μας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα, που εξήχθησαν από την μελέτη της δομής του εδάφους.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, και συγκεκριμένα:

Τον κο I. Α. Σταθόπουλο, καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για την αμέριστη συμπαράσταση του και το άνετο και ευχάριστο εργασιακό περιβάλλον που μας διασφάλισε.

Τον κο. I. Φ. Γκόνο διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τη διαρκή βοήθεια και καθοδήγηση, σε οτιδήποτε αφορούσε τη διπλωματική αυτή εργασία.

Τους κκ. Φ. Β. Τοπαλή και Α. Γ. Κλαδά, αναπληρωτές καθηγητές του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τις γνώσεις που μας μετέδωσαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μας στο ίδρυμα και τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Τον συνάδελφο κο Δημήτριο Κατενώφ, για τη συνεργασία που είχαμε τόσο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όσο και για τις ιδέες που ανταλλάξαμε κατά την συγγραφή της εργασίας.

Τον Αιδεσιμότατο Christopher Miles, που μας επέτρεψε να χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις, που ο ίδιος πραγματοποίησε στην περιοχή Ryarsh Vicarage της Αγγλίας.

Την κα Βασιλική Κονταργύρη, υποψήφια διδάκτορα του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τη συνεχή βοήθεια της σε ολόκληρο το χρονικό διάστημα πραγματοποίησης της παρούσας εργασίας.

Όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και ιδιαίτερα τον κο Χρήστο Ηλία και την κα Νικολέτα Ηλία για την υποστήριξη, συνεργασία και προσφορά καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της διπλωματικής εργασίας.

Τους συναδέλφους Κωνσταντίνο Γούτσο και Πέτρο Κωτούλα για τη συμβολή τους στην προσπάθεια ολοκλήρωσης του παρόντος συγγράμματος.

**Περιεχόμενα**

Πρόλογος _____	iv
Περιεχόμενα _____	vii
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή-Γειώσεις _____</b>	<b>1</b>
1.1 Γενικές έννοιες _____	1
1.1.1 Βασικοί ορισμοί _____	3
1.2 Μέθοδοι γείωσης _____	5
1.3 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης _____	7
1.3.1 Γειωτής ράβδου _____	11
1.3.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου _____	11
1.3.3 Γειωτής πλάκας _____	12
1.3.4 Ακτινικός γειωτής _____	12
1.3.5 Γειωτής πλέγματος _____	12
1.3.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής _____	12
1.3.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές _____	13
1.3.8 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης _____	13
1.3.9 Θεμελιακή γείωση _____	13
1.4 Η αντίσταση γείωσης _____	16
1.5 Ειδική Αντίσταση Εδάφους _____	19
1.6 Βιβλιογραφία _____	21
<b>Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση _____</b>	<b>23</b>
2.1 Εισαγωγή _____	23
2.2 Παρουσίαση βιβλιογραφίας _____	25
2.2.1 Μοντελοποίηση της δομής του εδάφους & μετρήσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτού _____	25
2.2.3 Επίδραση των χαρακτηριστικών του εδάφους στον υπολογισμό συστημάτων γείωσης _____	29
2.2.4 Υπολογισμός αντίστασης συστήματος γείωσης τοποθετημένης σε πολυστρωματικό έδαφος _____	34
2.3 Βιβλιογραφία _____	38



<b>Κεφάλαιο 3: Πολυστρωματική δομή του εδάφους-Μετρήσεις με τη μέθοδο του Wenner</b>	<b>41</b>
3.1 Εισαγωγή	41
3.2 Μέθοδος μέτρησης Wenner	42
3.3 Ορισμός της φαινόμενης ειδικής αντίστασης	43
3.4 Προσδιορισμός του μοντέλου γης	44
3.5 Πειραματικές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης εδάφους - επεξεργασία των αποτελεσμάτων	52
3.6 Βιβλιογραφία	62
<b>Κεφάλαιο 4: Υπολογιστικοί &amp; Γενετικοί Αλγόριθμοι</b>	<b>63</b>
4.1 Εισαγωγή	63
4.2 Αλγοριθμικές τεχνικές υπολογισμού των παραμέτρων του εδάφους	64
4.2.1 Γενικά	64
4.2.2 Μεθοδολογία	65
4.2.3 Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν	70
4.2.3.1 Μέθοδος Καθόδου Μέγιστης Κλίσης	70
4.2.3.2 Μέθοδος Newton	71
4.2.3.3 Μέθοδος Levenberg - Marquardt	72
4.2.3.4 Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδος	73
4.2.3.5 Μέθοδος Quasi – Newton	75
4.2.3.6 Σύνοψη επαναληπτικών τύπων	76
4.2.4 Εφαρμογή	76
4.2.4.1 Γενικές Θεωρήσεις	76
4.2.4.2 Περιπτώσεις για επίλυση	77
4.2.4.3 Οκτώ τεχνικές	77
4.2.4.4 Αποτελέσματα	85
4.2.5 Συμπεράσματα	93
4.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι	95
4.3.1 Γενικά	95
4.3.2 Περιγραφή Γενετικών Αλγορίθμων	97
4.3.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Γενετικών αλγορίθμων	98
4.3.4 Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων	100

4.3.5 Λειτουργία γενετικού αλγόριθμου	101
4.3.6 Επίλυση του προβλήματος του διστρωματικού εδάφους με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων	106
4.3.6.1 Υπολογισμός των παραμέτρων	106
4.3.6.2 Προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων	119
4.4 Βιβλιογραφία	123
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα</b>	<b>127</b>
<b>Παράρτημα 1: Γενετικός Αλγόριθμος</b>	<b>134</b>
Π.1.1 Κυρίως Πρόγραμμα Γενετικού Αλγορίθμου	134
Π.1.2 Συνάρτηση Δημιουργίας Γονέων	135
Π.1.3 Συνάρτηση Μετατροπής από Δυαδικό σε Δεκαδικό	136
Π.1.4 Συνάρτηση Μετατροπής από Δεκαδικό σε Δυαδικό	136
Π.1.5 Αντικειμενική Συνάρτηση	137
Π.1.6 Συνάρτηση Δημιουργίας Νέας Γενιάς	137
Π.1.7 Συνάρτηση Διασταύρωσης (Crossover)	138
Π.1.8 Συνάρτηση Δημιουργίας Μετάλλαξης (Mutation)	139
Π.1.9 Συνάρτηση Δημιουργίας Νέας Γενιάς Γονέων	139
<b>Παράρτημα 2: Όργανα Μέτρησης</b>	<b>141</b>
Π.2.1 Γειωσόμετρο LEM / SATURN GEO X	141
Π.2.1.1 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους	144
Π.2.2 Γειωσόμετρο PANTEC / MIT 904	145
Π.2.3 Βιβλιογραφία	147

## Περίληψη

Κύριο αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της συμβολής της δομής του εδάφους στη τιμή της αντίστασης γείωσης. Το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος τοποθέτησης του ηλεκτροδίου γείωσης εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και την επιδιωκόμενη αντίσταση γείωσης. Η τιμή της ειδικής αντίστασης εξαρτάται από την πυκνότητα, την υγρασία, τη σύσταση και το είδος του εδάφους. Επομένως, είναι απαραίτητο, προτού προχωρήσουμε στο σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης, να μετρήσουμε την ειδική αντίσταση του εδάφους, και να το μοντελοποιήσουμε υπολογίζοντας παράλληλα τις παραμέτρους του. Έτσι με σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, που θα προκύψουν, οδηγούμαστε στη βέλτιστη, κατασκευαστικά και οικονομικά, λύση, όπως για παράδειγμα το ιδανικό βάθος τοποθέτησης των μεταλλικών κατασκευών του συστήματος.

Όλα αυτά οδήγησαν στην ανάπτυξη τεχνικών, στις οποίες έγιναν διάφορες παραδοχές, προκειμένου να προσεγγισθούν, όσο το δυνατόν καλύτερα, οι πραγματικές καταστάσεις. Η πιο απλή προσέγγιση είναι να θεωρήσουμε το έδαφος ομογενές, με μία ενιαία τιμή ειδικής αντίστασης. Αντιθέτως, η πιο πολύπλοκη είναι να θεωρήσουμε τη δομή του εδάφους ως πολυστρωματική. Η μοντελοποίηση γίνεται χωρίζοντας το σε πολλά οριζόντια στρώματα όπου το κάθε στρώμα έχει την ίδια τιμή ομογενούς ειδικής αντίστασης.

Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, οι οποίες είναι διαθέσιμες στη διεθνή βιβλιογραφία, προσομοιώνονται συνήθως με το διστρωματικό μοντέλο προσέγγισης του εδάφους. Σειρές μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο του Wenner προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά άλλων ερευνητών που χρησιμοποίησαν την ίδια μέθοδο. Τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζουν άριστα τα θεωρητικά αποτελέσματα, που ελήφθησαν με χρήση του διστρωματικού μοντέλου.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους έχουν αναπτυχθεί και δημοσιευθεί στη διεθνή βιβλιογραφία οκτώ αλγοριθμικές τεχνικές, οι οποίες βασίζονται σε πέντε διαφορετικές μαθηματικές μεθόδους. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζουμε μία ένατη τεχνική, η οποία αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. και στηρίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες υπολογιστικές μεθόδους. Κωδικοποιούν το φυσικό σύνολο των παραμέτρων του προβλήματος υπό τη μορφή συμβολοσειράς, όπως στη βιολογία γίνεται αναπαράσταση των μεταβλητών με τη μορφή γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα. Η χρησιμοποίηση γενετικών αλγόριθμων αποτελεί συμφέρουσα λύση, καθώς είναι υπολογιστικά απλοί και ισχυροί στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης (αναζήτηση ελαχίστου ή μεγίστου). Επιπλέον, δεν περιορίζονται ουσιαστικά από υποθέσεις για το χώρο αναζήτησης (υποθέσεις σχετικά με τη συνέχεια, την ύπαρξη παραγώγων και την ύπαρξη ενός μόνο μεγίστου). Ακόμα δεν παγιδεύονται όταν βρεθούν ανάμεσα σε τοπικά ακρότατα όπως άλλες επαναληπτικές μέθοδοι.

Η κριτική θεώρηση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας έδειξε ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, οι λύσεις που προκύπτουν με τη χρήση του γενετικού αλγόριθμου είναι ακριβέστερες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν μια από οποιαδήποτε άλλη από τις υπόλοιπες διαθέσιμες οκτώ τεχνικές.

Στο τέλος παρατίθενται καμπύλες της ετήσιας μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συναρτήσει α) του χρόνου, β) της θερμοκρασίας και γ) της υγρασίας, οι οποίες κάνουν εμφανή την εξάρτηση της από τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες.

### Summary

The main object of this thesis is to study the contribution of the earth structure on the value of the ground resistance. The kind, the area of the surface and the depth of the placing of the grounding electrode depends on the soil resistivity and the aimed grounding resistance. The soil resistivity depends on its density and its composition. Before proceeding to the design of a grounding system we must measure the soil resistivity and model it by calculating its parameters at the same time. Thus, with the appropriate evaluation of the results that will arise we will be able to find the best solution according to technical and economic criteria, e.g. the ideal depth of placement of the grounding electrode.

The mentioned led remarks to the development of techniques to which several admissions were made in order to approach the real situations in the best possible way. The simplest approach is to consider the ground homogeneous with a constant value of soil resistivity. On the contrary, the most complicated approach is to consider the ground structure as multi-layered. The modeling takes place by separating it in several horizontal layers where each layer has a certain homogeneous soil resistivity value.

The measurements of the soil resistivity which have been published in the international bibliography have shown that the best model of ground approach is the two-layered, a conclusion to which we came too after currying out series of measurements. We used the Wenner method in order to curry out them because it gives exact results and in order to have a point of reference for the comparison of our results with other researchers' results that used the same method. The experimental results show an excellent convergence to the theoretical ones, obtained using the two-layer model of the soil.

Eight algorithmic techniques, which are based on five mathematical methods, have been developed for the calculation of the multi-layered ground parameters. A ninth technique is presented in this thesis which has been developed iv the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens and is based on genetic algorithms.

Genetic algorithms are quite different in relation to the other calculating methods. They codify the natural set of the parameters of the problem by the way of string just as in biology the representation of variables is made by the way of genes chromosome. The reasons for which the use of genetic algorithms is to our benefit is that they are simple in calculation and strong in the search of the best solution (search of minimum and maximum). Moreover they are not restricted by assumptions for the searching area (assumptions concerning the continuity, the existence of derivatives and the existence of the one and only maximum). In addition they are not trapped when they are among local and global minimums like other repeating methods.

A critical judgment has shown that in all cases the solutions that arise with the use of the genetic algorithm are more accurate than the equivalent solutions that arise from each one of the eight mentioned techniques.

At the end curves of the variation of the soil resistivity versus a) the time b) the temperature and c) the moisture are presented, in order to make obvious the dependence of the soil resistivity upon the climatic conditions.

## **Κεφάλαιο 1**

### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ-ΓΕΙΩΣΕΙΣ**

#### **1.1 Γενικές έννοιες**

Με τον όρο *γείωση* εννοούμε την αγώγιμη σύνδεση ενός σημείου του δικτύου με τη γη (συνήθως των ουδέτερων κόμβων και αγωγών των γεννητριών και μετασχηματιστών, πηνίων, κ.λπ., όπως επίσης και η αγώγιμη σύνδεση των μεταλλικών περιβλημάτων των μηχανών, μετασχηματιστών, διακοπών, στύλων και πυλώνων των γραμμών, ηλεκτρικών συσκευών, κ.λπ., στη γη.) [1].

Σκοπός της γείωσης είναι να κάνει εφικτή την εκφόρτιση των ηλεκτρικών ρευμάτων στη γη μέσω ενός γυμνού μεταλλικού κομματιού, του ηλεκτροδίου της γείωσης, το οποίο είναι θαμμένο μέσα στο έδαφος. Για μία συγκεκριμένη εκφόρτιση ρεύματος η αντίσταση του ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού (σε Volts) μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός πιο μακρινού σημείου της γης (άπειρη γη) και της εκφόρτισης ρεύματος (σε Ampere), δηλαδή

$R = \frac{V}{I}$ . Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι για το λόγο αυτό μία ωμική

αντίσταση στο γύρω από το ηλεκτρόδιο έδαφος και όχι ένα είδος επιφανειακής αντίστασης του ηλεκτροδίου [2]. Η αντίσταση γείωσης την οποία μετράμε σε ένα ηλεκτρόδιο γείωσης εκφράζει την αντίσταση διαβάσεώς του, από το αγώγιμο υλικό του ηλεκτροδίου, προς το έδαφος που το περιβάλλει. Ένα προφανές συμπέρασμα είναι πως η αντίσταση γείωσης είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους, και αντιστρόφως ανάλογη προς την επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το έδαφος. Για το λόγο αυτό το υλικό των ηλεκτροδίων γείωσης είναι κατά κανόνα χαλκός, επικασιτερωμένος, για την αποφυγή οξείδωσης. Η αντίσταση γείωσης  $R_g$  είναι η συνισταμένη των εν παραλλήλω αναπτυσσόμενων ακτινικά προς την επιφάνεια του ηλεκτροδίου, απειροστών αντιστάσεων διαβάσεως  $R_\delta$ .

Επίσης όσον αφορά ένα σύστημα γείωσης, για να είναι αυτό ασφαλές, πρέπει να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της καλής λειτουργίας του σε περίπτωση εμφάνισης οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, καθώς και να προστατεύει από

ηλεκτροπληξία άτομα που είτε δουλεύουν, είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά να είναι ίση με το μηδέν), ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης, διατηρώντας τις μέγιστες διαφορές δυναμικού (βηματική τάση και τάση επαφής) που δημιουργούνται, κάτω από συγκεκριμένα όρια [3].

Τα συστήματα γειώσεων, που χρησιμοποιούμε για να εξασφαλιστούν οι προηγούμενοι σκοποί, διακρίνονται σε τρία (3) είδη ανάλογα με τη προστασία που υποχρεούμαστε να παρέχουμε κάθε φορά.

Αυτά είναι:

α) Γείωση λειτουργίας, η οποία γίνεται για λειτουργικούς λόγους ή για την αποφυγή υπερτάσεων και η οποία διακρίνεται σε:

- *Άμεση* εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης
- *Έμμεση* εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.

Στις γειώσεις λειτουργίας δεν συμπεριλαμβάνονται οι ανοικτές γειώσεις.

β) Γείωση προστασίας, η οποία είναι η αγώγιμη σύνδεση με τη γη των μεταλλικών τμημάτων μιας εγκατάστασης που κανονικά δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας. Αυτή η γείωση εφαρμόζεται υποχρεωτικά για την προστασία των ανθρώπων που μπορεί να έρθουν σε επαφή με τα μεταλλικά τμήματα συσκευών όπου εμφανίστηκε επικίνδυνη τάση.

γ) Γείωση αντικεραυνικής προστασίας, δηλαδή η σύνδεση με τη γη των προστατευτικών αντικεραυνικών εγκαταστάσεων με σκοπό τη διοχέτευση σ' αυτή των κεραυνικών ρευμάτων [5].

---

### 1.1.1 Βασικοί ορισμοί

Μεταλλικά αντικείμενα. Ονομάζονται τα αγωγίμα εξαρτήματα των εγκαταστάσεων ή συσκευών, που δεν είναι μονωμένα προς το περιβάλλον και που σε κανονική κατάσταση λειτουργίας δεν έχουν τάση προς τη γη [5].

Άπειρη γη. Είναι ένα σημείο στην επιφάνεια σε άπειρη απόσταση από τον γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών. Λέμε ότι, η τάση της άπειρης γης είναι μηδέν. Για πρακτικούς σκοπούς η «άπειρη απόσταση» είναι 5-10 φορές επί την μεγαλύτερη διάσταση του γειωτή [5].

Πολυστρωματική δομή εδάφους. Ανομοιογενές έδαφος που προς μοντελοποίησή του το χωρίζουμε σε πολλά οριζόντια στρώματα, όπου κάθε στρώμα έχει την ίδια ειδική αντίσταση [6].

Ουδετέρωση. Είναι η αγωγήμη σύνδεση των μεταλλικών τμημάτων των συσκευών ή των στοιχείων του δικτύου με τον ουδέτερο αγωγό [5].

Αποτελεσματική γείωση. Ονομάζεται μια γείωση με την οποία δεν είναι δυνατόν να εμφανιστούν στην περιοχή που καλύπτει η γείωση αυτή επικίνδυνες τάσεις επαφής ή επικίνδυνες βηματικές τάσεις [5].

Αντίσταση γειώσεως. Για ένα ηλεκτρόδιο ή σύστημα γείωσης είναι η αντίσταση προς την άπειρη γη [5].

Ηλεκτρόδιο γείωσης. Πρόκειται για έναν αγωγό τοποθετημένο μέσα στη γη, ο οποίος συλλέγει και διαχέει το ρεύμα μέσα στη γη [5].

Πλέγμα γείωσης. Ονομάζεται ένα σύνολο από συνδεδεμένα μεταξύ τους αγωγίμα σώματα, που είναι τοποθετημένα μέσα στο έδαφος και είναι έτσι διαρρυθμισμένα, ώστε να εξασφαλίζεται «αποτελεσματική γείωση» [5].

Τάση ηλεκτροδίου γείωσης. Είναι η τάση μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και κάποιου σημείου της γης επαρκώς απομακρυσμένου, όταν ρέει ρεύμα μέσω του ηλεκτροδίου [4].

Ισοδυναμικές επιφάνειες. Αποτελούν τρόπο αναπαράστασης του ηλεκτρικού πεδίου. Αν  $\Phi$  είναι η συνάρτηση δυναμικού τότε ισοδυναμικές επιφάνειες ορίζονται οι επιφάνειες εκείνες που περιγράφονται από την εξίσωση:  $\Phi(x, y, z) = c$  (όπου  $c$  είναι μια σταθερά) [5].

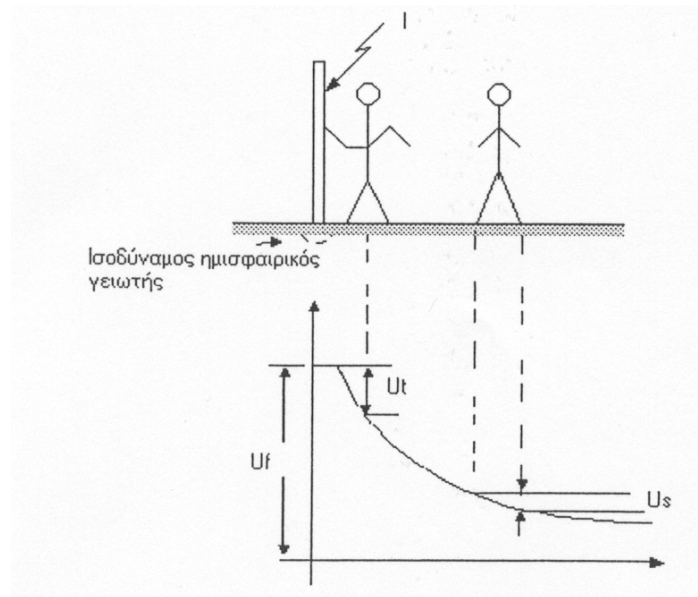
Τάση σφάλματος ή Δυναμικό προς άπειρη γη  $U_f$ . Είναι η τάση που εμφανίζεται μεταξύ των προσιτών αγωγίων στοιχείων, τα οποία δεν αποτελούν τμήμα του κυκλώματος αλλά είναι δυνατόν να βρεθούν υπό τάση λόγω βλάβης της μόνωσης, και κάποιου σημείου της γης επαρκώς απομακρυσμένου [7].

Τάση επαφής  $U_t$ . Είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικού γειωμένου ικρίωματος και σημείου σε απόσταση 1m που στέκεται άνθρωπος και ακουμπά με τα χέρια του το ικρίωμα [7].

Βηματική τάση  $U_s$ . Είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω ανοικτού βηματισμού [8].

Οι παραπάνω ορισμοί των δυναμικών, που μπορεί να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια σφάλματος γίνονται καλύτερα κατανοητοί με τη βοήθεια του Σχήματος 1.1.

Οι τάσεις που υφίσταται τότε το άτομο φαίνονται στο Σχήμα 1.1 [5]. Συγκεκριμένα, κάτω από τη συσκευή διαμορφώνεται ένα "πεδίο ροής" ρεύματος και το άτομο τίθεται μεταξύ χεριού και ποδιών και μεταξύ ποδιών σε μια διαφορά δυναμικού - "τάση επαφής"-  $U_t$  και μια διαφορά δυναμικού  $U_s$  αντίστοιχα. Η  $U_t$  και η  $U_s$  αποτελούν προφανές μέρος της συνολικής ανύψωσης του δυναμικού του μεταλλικού στοιχείου του κυκλώματος -"τάση σφάλματος"-  $U_f$ .



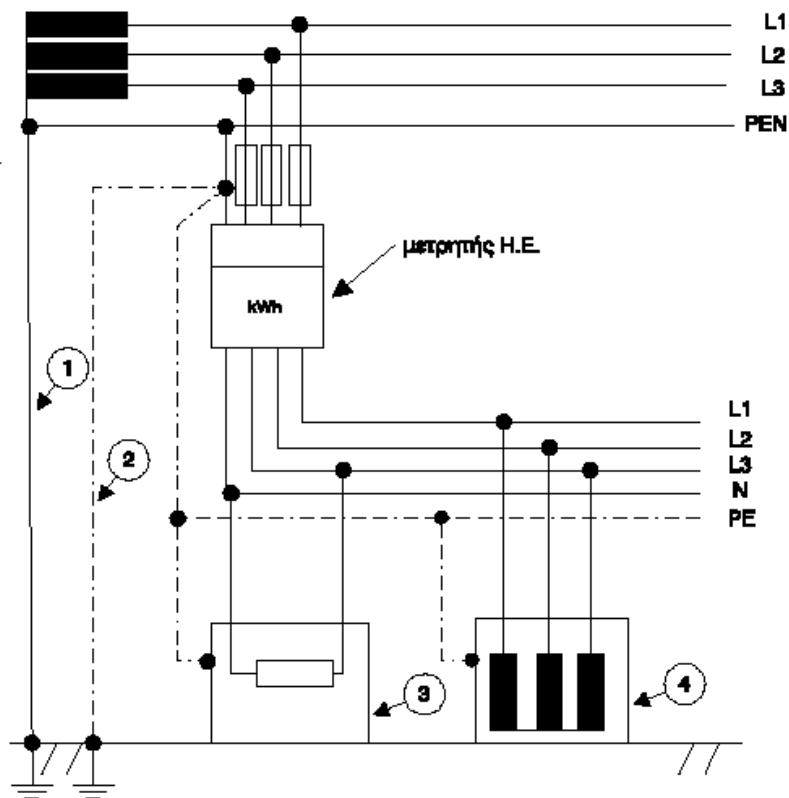
Σχήμα 1.1: Σχηματική παρουσίαση της τάσης επαφής  $U_t$ , της τάσης σφάλματος  $U_f$  και της βηματικής τάσης  $U_s$ .



## 1.2 Μέθοδοι γείωσης

Οι μέθοδοι γείωσης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι οι παρακάτω:

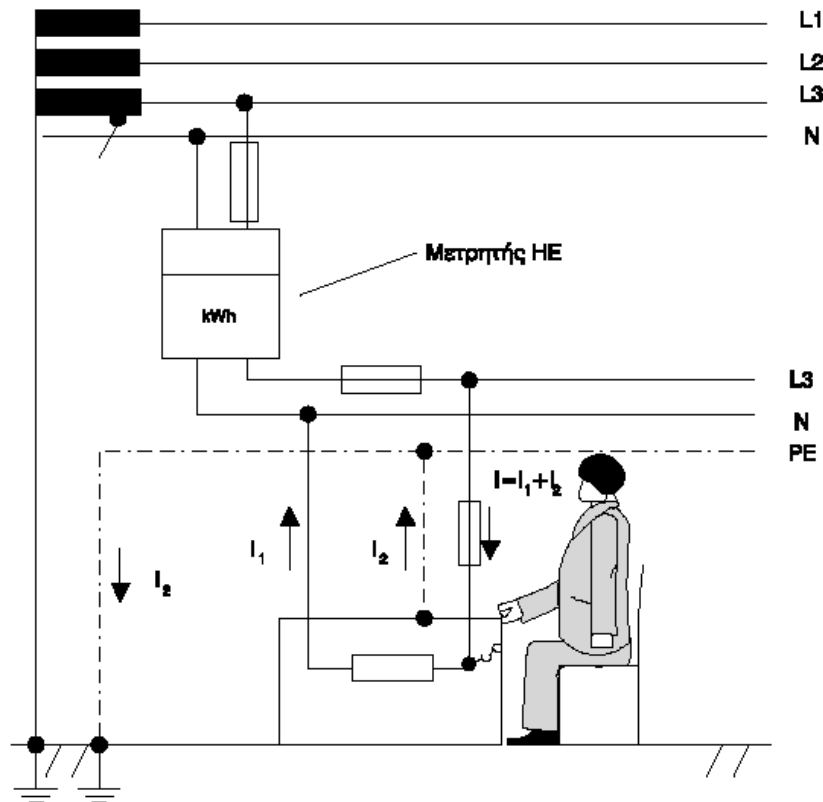
- Η *ουδετέρωση*, δηλαδή η αγωγίμη σύνδεση με τον ουδέτερο αγωγό του αγωγού γης ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρόδιο γείωσης, ενώ από το σημείο σύνδεσής τους αναχωρεί ο αγωγός γείωσης του συστήματος που ενώνεται με τα μεταλλικά αντικείμενα της εγκατάστασης που σε κανονική λειτουργία δε βρίσκονται υπό τάση. Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται το σχέδιο ενός συστήματος γείωσης με ουδετέρωση [9].



Σχήμα 1.2: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με ουδετέρωση ( Με 1 δείχνεται ο ουδέτερος από ΔΕΗ με 2 ο αγωγός γης με 3 και 4 τα μεταλλικά τμήματα της εγκατάστασης όπου συνδέεται η γείωση του συστήματος.

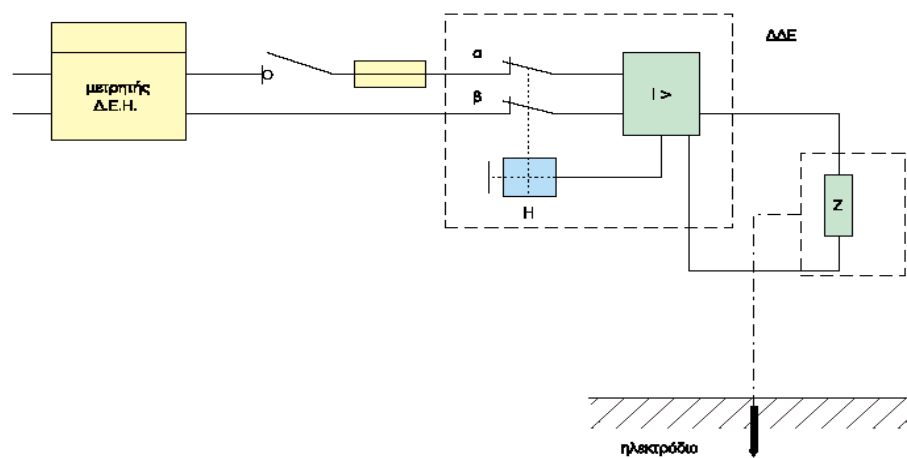
- Η *άμεση γείωση*, δηλαδή η απ' ευθείας αγωγίμη σύνδεση με το σύστημα γείωσης του αγωγού γης που είναι συνδεδεμένος με κάποιο αγωγίμο υλικό που είναι τοποθετημένο μέσα στη γη όπως πλάκα γείωσης, ηλεκτρόδιο, τρίγωνο,

κλπ. Στο παρακάτω Σχήμα 1.3 φαίνεται το σχέδιο ενός συστήματος άμεσης γείωσης [9].



Σχήμα 1.3: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με άμεση γείωση.

- και μέσω διακόπτη διαφυγής για την αυτόματη απομόνωση του προβληματικού μέρους της εγκατάστασης όπως βλέπουμε στο Σχήμα 1.4.

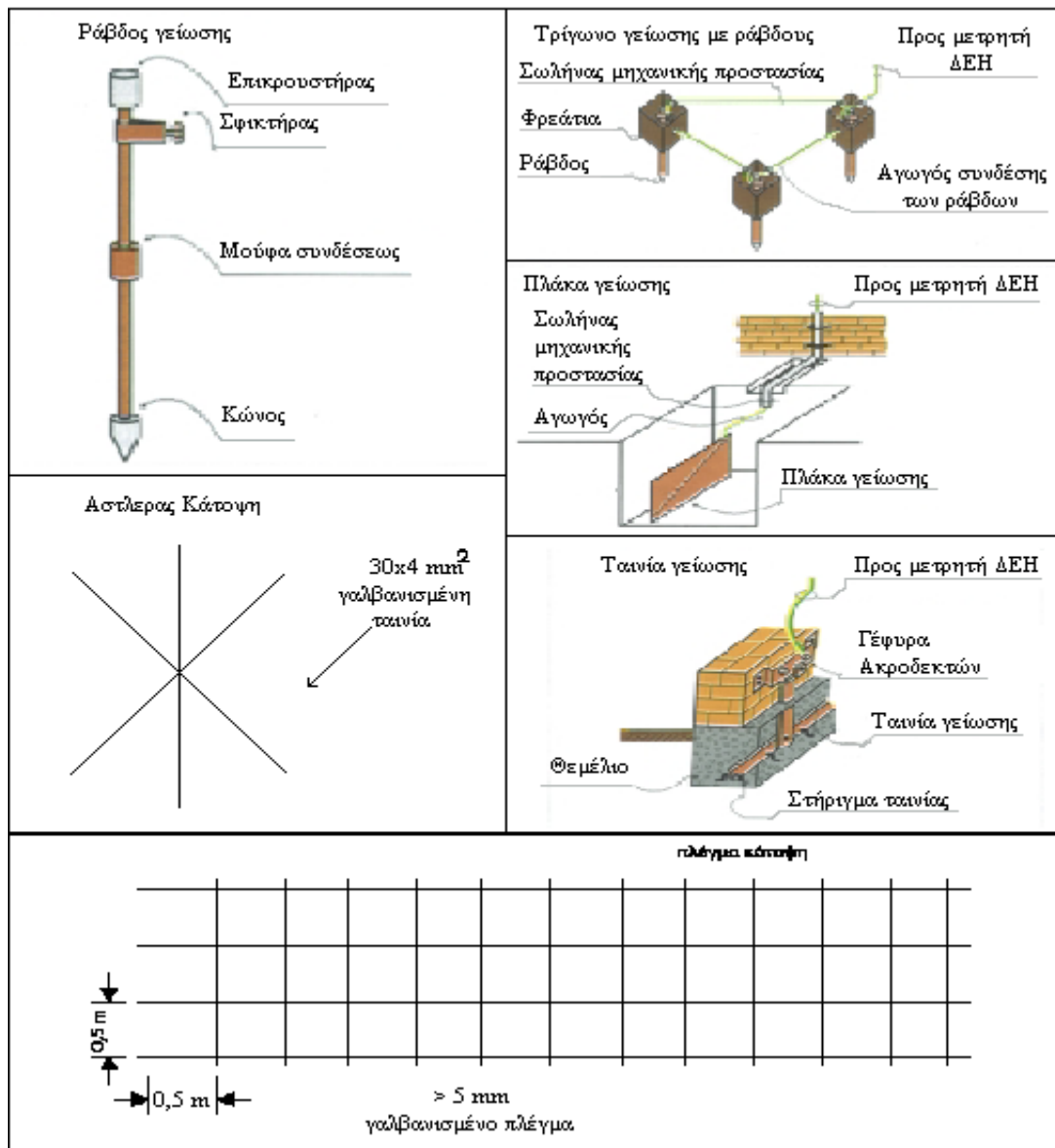


Σχήμα 1.4: Σχηματική παρουσίαση συστήματος προστασίας με διακόπτη διαφυγής έντασης σε εγκατάσταση που έχει ηλεκτρόδιο γείωσης.

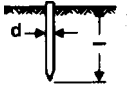
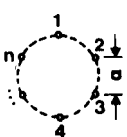
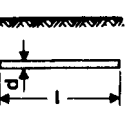
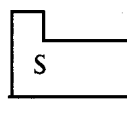
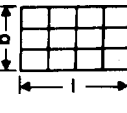
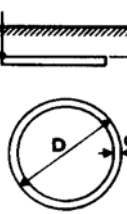
Πάντως και στις τρεις αυτές περιπτώσεις θα πρέπει να επιτυγχάνεται η απόζευξη της εγκατάστασης το πολύ σε 5 δευτερόλεπτα εάν η τάση κάποιου τμήματος αυτής σε σχέση με τη γη εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερη των 50V.

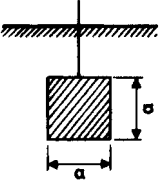
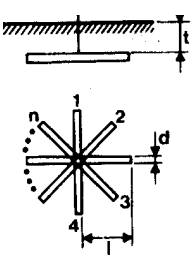
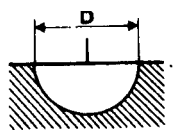
### 1.3 Είδη ηλεκτροδίων γείωσης

Τα ηλεκτρόδια γείωσης (γειωτές) έχουν τις μορφές που παρουσιάζονται στο *Σχήμα 1.5* [9]. Οι τύποι που δίνουν τις αντιστάσεις τους φαίνονται στον *Πίνακα 1.1*. Οι ελάχιστες διαστάσεις των ηλεκτροδίων γείωσης δίνονται στον *Πίνακα 1.2* κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε. (Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων) [10]. Οι ειδικές αντιστάσεις των διαφόρων εδαφών φαίνονται στον *Πίνακα 1.3*.



*Σχήμα 1.5: Ηλεκτρόδια γειωτών*

	Γειωτής	Τύπος	Προσεγγιστικός τύπος
	Πάσσαλος (πλάγια όψη)	$R_{A1} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l_{eff}} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l_{eff}}{d}\right)$ $l_{eff} \approx l - 0.5 \text{ m}^*$	$R_A \cong \frac{\rho}{l_{eff}}$
	Πολύγωνο Πασάλων $a \geq 1$ (κάτοψη)	$R_A \approx k \cdot \frac{1}{n} \cdot R_{A1}$ $\frac{a}{l} = 3 : n = 5 : k \approx 1.2$ $R_{A1} = \text{αντίσταση ενός πασάλου}$	$K = (1 \dots 1.5) \text{ για } n = 10 : k \approx 1.25$
	Ταινία γείωσης ή επιφανειακός γειωτής, βάθος $h = 0,5 \dots 1,0 \text{ m}$ (πλάγια όψη)	$R_A = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)$	$R_A \approx \frac{2 \cdot \rho}{l}$
	Θεμελιακή γείωση $D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S}$		$R_A = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\rho}{D}$
	Πλέγμα σε βάθος $0,5 - 1,0 \text{ m}$ $D = \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot l}{\pi}}$ (κάτοψη)	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot d} + \frac{\rho}{l \cdot g}$ $l \cdot g = \text{συνολικό μήκος αγωγού}$	$R_A \approx \frac{\rho}{2 \cdot D}$
	Κυκλικός γειωτής (κάτοψη)	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi^2 \cdot D} \cdot \ln \frac{8 \cdot D}{d}$	$R = \frac{2 \cdot \rho}{\pi \cdot D}^{**}$

		$\left( 1 + \frac{\ln \frac{2 \cdot D}{t}}{\ln \frac{8 \cdot D}{d}} \right)$	
	Γειωτής πλάκας, πλάγια όψη S [m <sup>2</sup> ]		$R = \frac{\rho}{4.5 \cdot \alpha} \text{ ***}$
	<p>n=2</p> <p>n=3</p> <p>n=4</p> <p>n=5</p>	$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.27 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.25 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.22 \cdot t \cdot d} \right)$ $R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{0.09 \cdot t \cdot d} \right)$	
	Ημισφαιρικός γειωτής	$R = \frac{\rho}{\pi \cdot D} \text{ ****}$	
<p>* Όπου εμφανίζεται το πάχος του αγωγού d, αυτό είναι το ισοδύναμο πάχος <math>d = \sqrt{4(A/\pi)}</math>, όπου A η διατομή του αγωγού.</p> <p>** Για ακανόνιστους βρόχους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη διάμετρος <math>D = 0,33 \cdot U</math>, U το μήκος αγωγού.</p> <p>*** Για πλάκες που δεν είναι τετράγωνα θέτουμε: <math>\alpha = \sqrt{S}</math>, όπου S η επιφάνεια.</p> <p>**** Για ένα γειωτή όγκου V ακανόνιστου σχήματος, εφαρμόζεται ο τύπος του σφαιρικού γειωτή με <math>D = 1,57 \cdot \sqrt[3]{V}</math>.</p>			

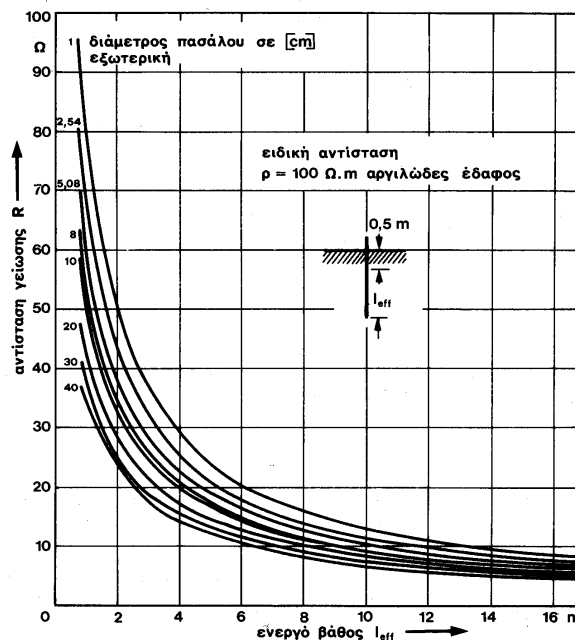
Πίνακας 1.1: Τύποι υπολογισμού αντιστάσεων ηλεκτροδίων γείωσης

Μορφή γειωτή	Υλικό		
	Χάλυβας γαλβανισμένος (με 70 μm στρώμα)	Χάλυβας επιχαλκωμένος	Χαλκός
Ταινία	100 mm <sup>2</sup> ελάχιστο πάχος 3 mm	50 mm <sup>2</sup> ελάχιστο πάχος 2 mm	50 mm <sup>2</sup> ελάχιστο πάχος 2 mm
Ράβδος στρογγυλή	78 mm <sup>2</sup> =10 φ	50 mm <sup>2</sup> χάλυβα 35 mm <sup>2</sup> χαλκός	35 mm <sup>2</sup>
Συρματό- σχοινο	95 mm <sup>2</sup> χονδρόκλωνο (δεν χρησιμοποιείται)		35 mm <sup>2</sup> χονδρόκλωνο (ελάχιστο πάχος κλώνων 1.8 mm)
Σωλήνας για πασσαλο- γειώσεις	Ονομαστική διάμετρος 1' (εσωτερική διάμετρος), ελάχιστο πάχος 2 mm		Εσωτερική διάμετρος 20mm, ελάχιστο πάχος 2 mm
Ράβδος L, U, T, I για πασσαλο- γειώσεις	Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, συνήθως όμως 100 mm <sup>2</sup> , ελάχιστο πάχος 3 mm.	50 mm <sup>2</sup> στρογγυλή ράβδος	Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, συνήθως όμως 35 mm <sup>2</sup> , ελάχιστο πάχος 3 mm.
Πλάκα	Ελάχιστο πάχος 3 mm		Ελάχιστο πάχος 2 mm

Πίνακας 1.2: Ελάχιστες διατομές ηλεκτροδίων γειωτών, κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε.

### 1.3.1 Γειωτής ράβδου

Είναι σωλήνας ονομαστικής διαμέτρου μεγαλύτερης της μίας ίντσας ή μία ράβδος στρογγυλή ή προφίλ από γαλβανισμένο χάλυβα, π.χ. U, L, T ή I-προφίλ. Η ράβδος τοποθετείται κατακόρυφα ή λοξά (π.χ. 20<sup>ο</sup>) ως προς την κατακόρυφο στο έδαφος σε βάθος, π.χ. 2.5 m με σφυρί χεριού, ή με μηχανικό σφυρί. Το κάτω μέρος διαμορφώνεται σαν ακίδα για να οδηγείται καλύτερα στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη του βάθους Πίνακας 1.1 και Σχήμα 1.6. Η αντίσταση δεν εξαρτάται σημαντικά από το πάχος ή τη διάμετρο της ράβδου. Εφ' όσον το επιτρέπει η μηχανική αντοχή, προτείνονται ηλεκτρόδια χαλκού ή επιμολυβδωμένα ηλεκτρόδια, γιατί αντέχουν στη διάβρωση.



Σχήμα 1.6: Αντίσταση γείωσης κατακόρυφων πασάλων στο έδαφος. Το ενεργό μήκος ισούται με το πραγματικό μήκος μείον μισό μέτρο, δηλαδή  $l_{eff} = l - 0.5 \text{ m}$ .

### 1.3.2 Γειωτής ταινίας ή συρματόσχοινου

Ταινία ή συρματόσχοινο που τοποθετείται σε χαντάκι βάθους τουλάχιστον 0.5 m. Το βάθος που προτιμάται είναι 0.7-1.0 m, για να υπάρχει υγρό έδαφος. Η ταινία μπορεί να είναι χάλυβας γαλβανισμένος ή επιχαλκωμένος. Χρησιμοποιούνται επίσης χάλκινες ταινίες. Η ταινία μπορεί να τοποθετηθεί ευθύγραμμα ή κυκλικά γύρω από την εγκατάσταση. Η τελευταία γείωση λέγεται γειωτής βρόγχου. Η αντίσταση είναι

περίπου αντιστρόφως ανάλογη του μήκους. Για το ίδιο μήκος ταινίας ο ευθύγραμμος γειωτής έχει μικρότερη αντίσταση από τον κυκλικό. Δεν συνιστάται συρματόσχοινο αντί ταινίας σαν ηλεκτρόδιο γείωσης, αν και το επιτρέπουν οι Κ.Ε.Η.Ε., γιατί διαβρώνεται εύκολα. Γι' αυτό το λόγο δεν το συνιστούν και οι κανονισμοί VDE 100. Μία περίπτωση του γειωτή ταινίας είναι η θεμελιακή γείωση, που θα εξετάσουμε λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο[10].

### 1.3.3 Γειωτής πλάκας

Πρόκειται για πλάκα μορφής παραλληλογράμμου, π.χ.  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ , η οποία ενταφιάζεται στο έδαφος με την επιφάνειά της κατακόρυφη. Το πάνω μέρος της βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1.0 m. Το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι γαλβανισμένος χάλυβας με πάχος μεγαλύτερο των 3 mm ή χαλκός ή μόλυβδος με πάχος μεγαλύτερο των 2 mm.

### 1.3.4 Ακτινικός γειωτής

Είναι ταινίες ή ράβδοι που διαμορφώνονται υπό μορφή αστέρα με πολλές ακτίνες *Πίνακας 1.1*. Ο αστέρας βρίσκεται σε οριζόντια θέση, ενταφιασμένος σε βάθος τουλάχιστον 0.8 m. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι όμοια, όπως στον γειωτή ταινίας.

### 1.3.5 Γειωτής πλέγματος

Πλέγμα από ταινίες με τετραγωνικά ανοίγματα πλάτους 0.7-2.0 m τοποθετείται οριζόντια σε βάθος 0.5-1.0 m *Πίνακας 1.1*. Τα ελάχιστα πάχη είναι όπως στους γειωτές ταινίας. Το πλεονέκτημα των γειωτών πλέγματος είναι ότι οι βηματικές τάσεις στο έδαφος, επάνω από το πλέγμα, είναι αμελητέες. Επιτρέπονται, προφανώς, και ανοίγματα μικρότερα από 0.7 m. Αυτά, όμως δεν έχουν μικρότερες βηματικές τάσεις απ' ότι πλέγματα με ανοίγματα 0.7 m.

### 1.3.6 Το δίκτυο ύδρευσης σαν γειωτής

Επιτρέπεται κατά το άρθρο 24 των Κ.Ε.Η.Ε. [11], χωρίς ιδιαίτερη άδεια, η χρησιμοποίηση μεταλλικών δικτύων ύδρευσης σαν γειωτών για εγκαταστάσεις με τάσεις ως προς γη μικρότερες των 250 V, εφ' όσον υπάρχει η συγκατάθεση του Οργανισμού Ύδρευσης. Πάνω από αυτές τις τάσεις χρειάζεται ειδική άδεια από τον Οργανισμό Ύδρευσης. Η γραμμή γείωσης συνδέεται κατά προτίμηση πριν από τον



μετρητή. Αν η σύνδεση γίνει μετά τον μετρητή, πρέπει βραχυκυκλωθεί μονίμως ο μετρητής με χάλκινο σύρμα H03V-U και διατομή τουλάχιστον 6 mm<sup>2</sup>.

*Προσοχή:* Κατά VDE 100 δεν επιτρέπεται η παράλληλη σύνδεση γειωτών από χαλκό με το δίκτυο ύδρευσης. Σχηματίζονται ηλεκτροχημικά στοιχεία με αποτέλεσμα τη διάβρωση του σιδήρου [10].

### 1.3.7 Επιφανειακοί και βαθείς γειωτές

Γίνεται διάκριση στους γειωτές ανάλογα με το βάθος τους σε:

- επιφανειακούς γειωτές, π.χ. γειωτές ταινίας, πλέγματος και ακτινικούς γειωτές,
- βαθείς γειωτές, π.χ. γειωτές ράβδου.

### 1.3.8 Απολήξεις και συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης

Το μέρος του γειωτή ή της σύνδεσης που προεξέχει από το έδαφος μονώνεται κατά της υγρασίας με πίσσα ή άλλα μονωτικά και μάλιστα 30 cm μέσα και 30 cm έξω από το έδαφος. Οι συνδέσεις των ηλεκτροδίων γείωσης γίνονται σε γειώσεις ουδέτερου με Cu, ελάχιστης διατομής ίσης με τη διατομή του ουδέτερου, όχι όμως μικρότερη των 16 mm<sup>2</sup> (H07V-U), μονόκλιωνα. Σε εγκαταστάσεις αλεξικέραυνου η ελάχιστη διατομή για χαλκό είναι 50 mm<sup>2</sup>. Η σύνδεση του ουδέτερου του Μ/Σ με τον γειωτή γίνεται με καλώδια H07-R (πριν NYA) 25 mm<sup>2</sup> τουλάχιστον.

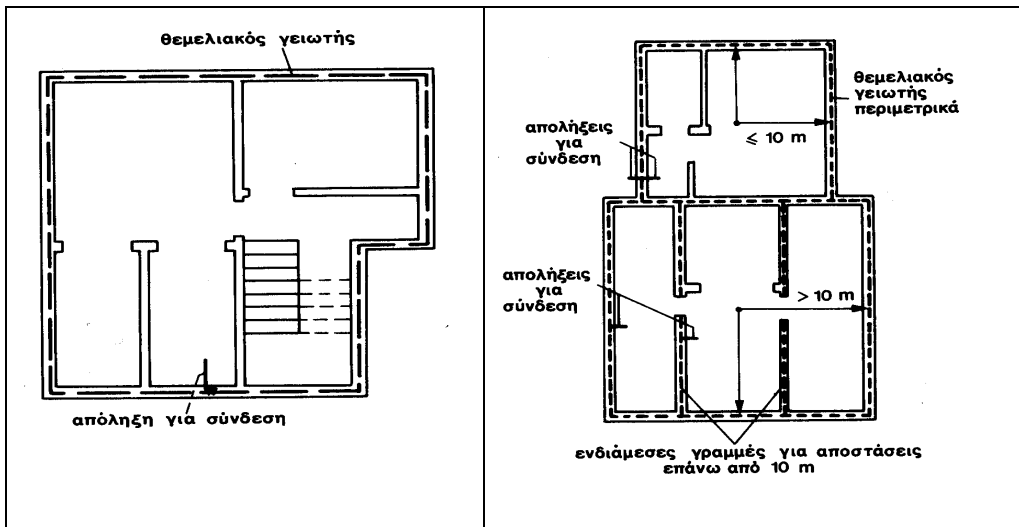
### 1.3.9 Θεμελιακή γείωση

Η θεμελιακή γείωση είναι ένας γειωτής ταινίας που τοποθετείται στο κάτω μέρος των θεμελίων των κτιρίων, μέσα στο σκυρόδεμα. Η τοποθέτηση γίνεται στη βάση των εξωτερικών τοίχων *Σχήμα 1.7* και είναι ένας κλειστός βρόγχος. Επειδή το έδαφος και το σκυρόδεμα των θεμελίων είναι υγρό όλο το έτος συνήθως, ο θεμελιακός γειωτής έχει σχετικά χαμηλή αντίσταση γείωσης. Τιμές των 2 Ω ή μικρότερες δεν είναι σπάνιες.

Ο αγωγός του γειωτή μπορεί να είναι:

- ταινίες γαλβανισμένου χάλυβα ελάχιστων διαστάσεων 30 mm x 3.5 mm ή 25 mm x 4 mm. Συνιστάται οι διαστάσεις να είναι 40x5 ή 50x4.
- βέργα γαλβανισμένου χάλυβα ελάχιστης διαμέτρου 10 mm. Συνιστάται διάμετρος 12 mm.

Το χαλύβδινο ηλεκτρόδιο τοποθετείται στο περιμετρικό θεμέλιο του κτιρίου. Σε περιπτώσεις που υπάρχει μόνωση κατά της υγρασίας, πρέπει το ηλεκτρόδιο να



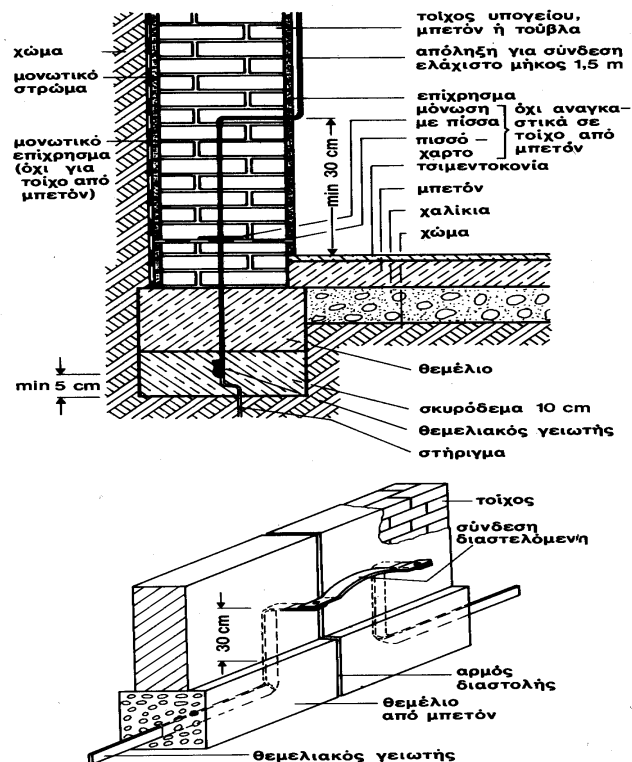
Σχήμα 1.7: Θεμελιακές γειώσεις. Δείχονται δύο κατόψεις με και χωρίς ενδιάμεση σύνδεση.

τοποθετηθεί προς την πλευρά του εδάφους. Για μεγάλες διαστάσεις των κτιρίων (>10m), συνιστώνται και εγκάρσιες συνδέσεις του περιμετρικού γειωτή, όπως στο Σχήμα 1.7, έτσι ώστε κανένα σημείο του υπογείου να μην απέχει πάνω από 10 m από τον γειωτή.

Ο γειωτής πρέπει να περιβάλλεται παντού από δονημένο σκυρόδεμα. Τοποθετείται σε ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 5 cm (συνήθως 6-10 cm), γιατί αλλιώς διαβρώνεται.

Μετά από την εκσκαφή των θεμελίων κατασκευάζεται μία στρώση από σκυρόδεμα πάχους 6-10 cm Σχήμα 1.8. Εκεί μέσα τοποθετείται ή μία ταινία με την πλατιά της πλευρά όρθια ή μία χαλύβδινη βέργα κυκλικής διατομής. Το Σχήμα 1.9 δείχνει διάφορες διατάξεις για να κρατηθεί η ταινία στη θέση της. Ακολούθως τοποθετείται ο οπλισμός των θεμελίων και χύνεται όλο το θεμέλιο. Η όρθια τοποθέτηση της ταινίας εξασφαλίζει μία άνεση στην τοποθέτηση. Η ταινία λυγίζει καλύτερα στις γωνίες του κτιρίου. Το σκυρόδεμα πρέπει να είναι αντοχής B 225 ή περιεκτικότητας 300 kg τσιμέντου ανά m<sup>3</sup>. Η τοποθέτηση του γειωτή μέσα στο σκυρόδεμα στη βάση των θεμελίων εξασφαλίζει αντοχή στη διάβρωση και στις μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, ο γειωτής είναι σε υγρό έδαφος όπου η αγωγιμότητα είναι μεγάλη. Συνιστάται να συνδέεται στον γειωτή ο οπλισμός του σκυροδέματος του κτιρίου. Οι

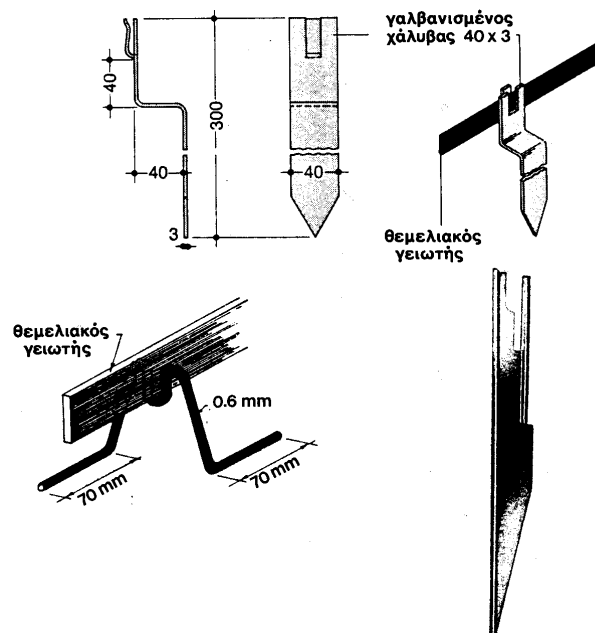
απολήξεις του γειωτή έχουν την ίδια διατομή με το ηλεκτρόδιο του γειωτή. Το μήκος τους είναι 1,5 m κατά VDE 100 και τοποθετούνται στον τοίχο του κτιρίου εσωτερικά. Η απόληξη απέχει στο κάτω μέρος της στην έξοδο της από τον τοίχο, 30 cm από το έδαφος. Η σύνδεση με την λοιπή εγκατάσταση γίνεται με χάλκινο αγωγό διατομής 16 mm<sup>2</sup> τουλάχιστον ή καλύτερα 25 mm<sup>2</sup>. Στην περίπτωση των θεμελιακών γειώσεων συνδέονται στη θεμελιακή γείωση και τα αλεξικέραυνα, ενδεχομένως μέσω σπινθηριστών.



Σχήμα 1.8: Λεπτομέρειες θεμελιακής γείωσης

Για τον υπολογισμό της αντίστασης του θεμελιακού γειωτή χρησιμοποιείται ο τύπος του γειωτή ταινίας ή προσεγγιστικά ο τύπος του θεμελιακού γειωτή Πίνακας 1.1. Αυτός παίρνει τον γειωτή σαν κυκλικό γειωτή διαμέτρου  $D$ , επιφάνειας ίσης με το εμβαδόν κάτοψης των θεμελίων. Σαν αντίσταση εδάφους θα ληφθεί, κατά VDE 0141 ή DIN 57141, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση όχι του σκυροδέματος, αλλά του περιβάλλοντος εδάφους [10].

Θεμελιακή γείωση προτείνεται από τους Κ.Ε.Η.Ε.. Ο κανονισμός DIN 18015/Teil 1 την επιβάλλει σε όλα τα νέα κτίρια.



Σχήμα 1.9: Στηρίγματα θεμελιακής γείωσης

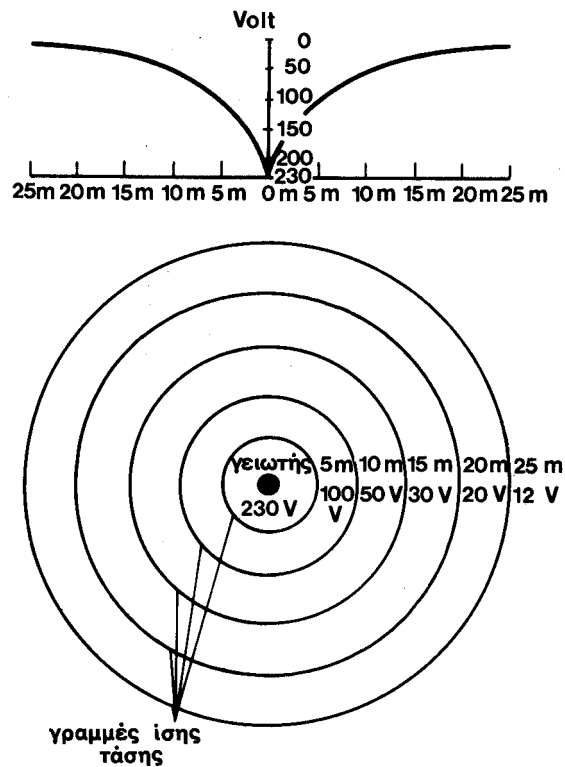
#### 1.4 Η αντίσταση γείωσης

Αντίσταση γείωσης είναι η αντίσταση από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Άπειρη γη είναι ένα σημείο στην επιφάνεια σε *άπειρη απόσταση* από τον γειωτή. Λαμβάνεται σαν σημείο αναφοράς των δυναμικών. Λέμε ότι, η τάση της άπειρης γης είναι μηδέν. Για πρακτικούς σκοπούς η 'άπειρη απόσταση' είναι 5-10 φορές επί τη μεγαλύτερη απόσταση από το γειωτή. Για γειωτές πάσσαλους με 3 m βάθος, η απόσταση της άπειρης γης είναι 20 m. Σε αυτή την απόσταση το δυναμικό αποτελεί το 2% του δυναμικού του πασάλου [10].

Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου, για μία δοσμένη εκφόρτιση ρεύματος είναι ο λόγος, της τάσης  $V$  (σε Volts) μεταξύ του σημείου σύνδεσης του ηλεκτροδίου και ενός πιο μακρινού σημείου της γης, και της εκφόρτισης ρεύματος  $I$  (σε Amperes),

και επομένως έχουμε  $R = \frac{V}{I}$ .

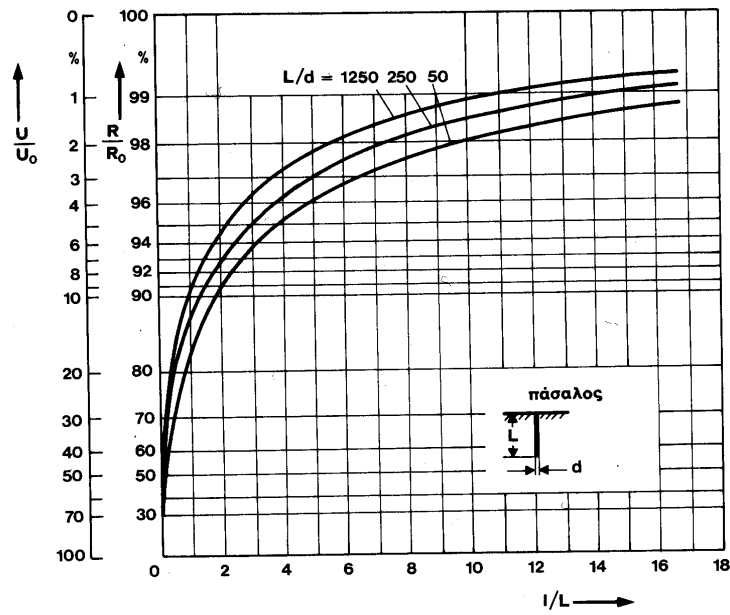
Αν ένας γειωτής τεθεί υπό τάση  $U$  (=100%) ως προς την άπειρη γη, δημιουργείται ένα πεδίο ροής και δυναμικού γύρω από τον γειωτή. Όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από τον γειωτή, τόσο μειώνεται η τάση. Το διάγραμμα τάσης-απόστασης ονομάζεται χοάνη δυναμικού του γειωτή Σχήματα 1.10, 1.11, 1.12.



Σχήμα 1.10: Χοάνη δυναμικού ενός γειωτή.

Η χοάνη δυναμικού δίνει επίσης την περιοχή επίδρασης του γειωτή ή την απόσταση της άπειρης γης. Έστω π.χ., γειωτής με 60 mm διάμετρο και 3 m βάθος. Αν θέσουμε σαν αμελητέα τάση το 5% της τάσης του γειωτή, τότε βλέπουμε από το διάγραμμα στο Σχήμα 1.12 ότι αυτή η τάση αντιστοιχεί σε απόσταση τετραπλάσια από το βάθος του γειωτή. Δηλαδή, η άπειρη γη είναι  $3 \times 4 = 12$  m μακριά από τον γειωτή ή το πεδίο επηρεασμού του γειωτή είναι κύκλος με ακτίνα 12 m.

Η χοάνη δυναμικού χρησιμοποιείται επίσης για να εκτιμήσουμε το σφάλμα στη μέτρηση της αντίστασης γειωτών. Αν π.χ. μετρηθεί η αντίσταση στον παραπάνω γειωτή από το ηλεκτρόδιο μέχρι και 12 m μακριά, τότε η μετρούμενη αντίσταση είναι το 95% της πραγματικής.



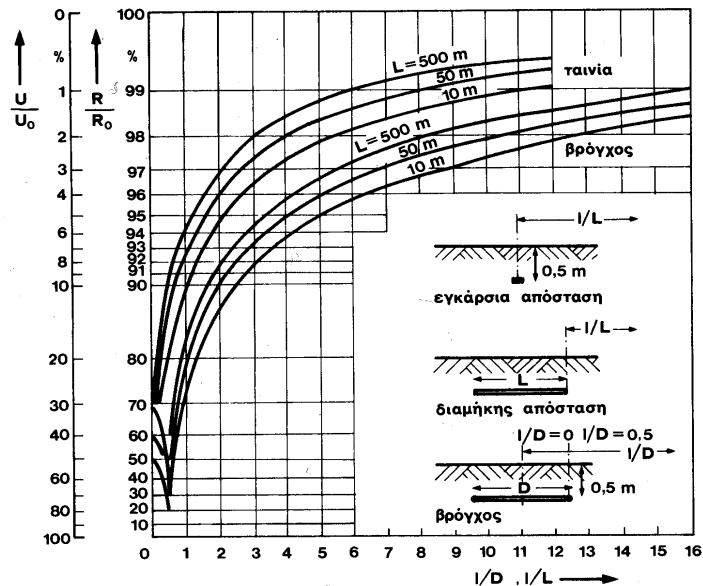
Σχήμα 1.11: Χοάνες δυναμικού για πασσαλογειωτές.

$l$ : η απόσταση από τον πάσσαλο.

$R_0$ =αντίσταση γείωσης ( $l \rightarrow \infty$ ),

$R$ =αντίσταση που μετρούμε σε απόσταση  $l$  πάνω στο έδαφος,

$U, U_0$ =τάση σε απόσταση  $l$  και σε απόσταση  $l=0$ .

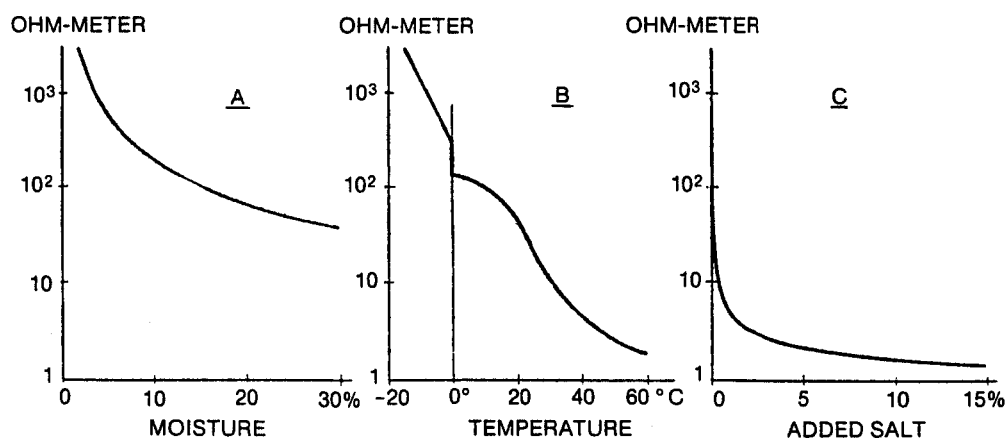


Σχήμα 1.12: Χοάνες δυναμικού για γειωτές ταινίες και βρόγχου. Στο έδαφος, επάνω από το μέσο του γειωτή ταινίας, οι αντιστάσεις είναι:

$$R/R_0=17.5\% \text{ για } L=500 \text{ m} \quad R/R_0=28\% \text{ για } L=50 \text{ m} \quad R/R_0=36\% \text{ για } L=10 \text{ m}$$

## 1.5 Ειδική Αντίσταση Εδάφους

Το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος τοποθέτησης του ηλεκτροδίου γειώσεως εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και την επιδιωκόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων (εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ.) με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και περισσότερο πετρώδες είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του,  $\rho$ , μετρούμενη συνήθως σε  $\Omega \cdot m$ . Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται κατά μήκος του ηλεκτροδίου γειώσεως, και ενδεχομένως με μη γραμμικό τρόπο [12].



Σχήμα 1.13: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει A) της υγρασίας B) της θερμοκρασίας και C) της προσθήκης άλατος [12]

Αναλυτικά οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ειδική αντίσταση του εδάφους περιγράφονται παρακάτω:

- *Είδος του εδάφους.* Ελώδες έδαφος έχει π.χ. πολύ μικρότερη αντίσταση από ότι ξηρός βράχος. Ο Πίνακας 1.3 παρουσιάζει τις ειδικές αντιστάσεις για διάφορα εδάφη.
- *Υγρασία.* Έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση είναι 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20%. Παρατηρούμε ότι η αντίσταση μειώνεται

αυξανομένης της υγρασίας του εδάφους, *Σχήμα 1.13.A*. Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγώγιμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), θειϊκός χαλκός ( $\text{CuSO}_4$ ), ή θειϊκό μαγνήσιο ( $\text{MgSO}_4$ ) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους *Σχήμα 1.13.C*. Ανεξάρτητα από αυτά που αναφέραμε προηγουμένως θα πρέπει ακόμα να παρατηρήσουμε ότι το έδαφος μπορεί να ξηραίνεται επιφανειακά, αλλά σε βάθος κάτω του μισού μέτρου (0.5 m) διατηρείται συνήθως υγρό, σε όλες τις εποχές του έτους. Έτσι, σε γειωτές ράβδους πασσαλωμένους λαμβάνεται σαν ενεργό μήκος αυτό που είναι κάτω από 0.5 m. Για τον ίδιο λόγο τοποθετούμε τους γειωτές ταινίες σε βάθη μεγαλύτερα από 0.5 m.

- *Θερμοκρασία..* Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους *Σχήμα 1.13.B*, ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Η μεταβολή της αντίστασης του εδάφους με τη θερμοκρασία φθάνει περίπου τα 130% κατά τη διάρκεια του έτους. Η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Συνεπώς, η τιμή της αντίστασης είναι υψηλότερη τον Ιανουάριο έως τον Φεβρουάριο και χαμηλότερη τον Ιούλιο έως τον Αύγουστο. *Μορφή της τάσης.* Σε κρουστικές τάσεις και για γειωτές με μήκος μεγαλύτερο από 10 m, έχει παρατηρηθεί άνοδος της αντίστασης. Σε αρνητικές κρουστικές τάσεις 0.3/30  $\mu\text{s}$ , η αντίσταση θεμελιακού γειωτή ανέρχεται από τα 3  $\Omega$  στα 26  $\Omega$ . Η άνοδος της αντίστασης γίνεται στο μέτωπο τάσης. Η αντίσταση σε κρουστικές τάσεις χαρακτηρίζεται και σαν κρουστική αντίσταση.

Τέλος, έχει μετρηθεί ότι η επίδραση της υγρασίας και της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη σε μικρά βάθη (0.5-1 m) παρά σε μεγάλα βάθη. Έτσι, ο γειωτής ράβδου που είναι σε μεγάλο βάθος, σε σύγκριση με ένα επιφανειακό γειωτή, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μετριέται, με γέφυρα 4 ηλεκτροδίων.



Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση $\rho_E$ ( $\Omega m$ )
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος,	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

*Πίνακας 1.3: Ειδικές αντιστάσεις εδαφών, ενδεικτικές μέσες τιμές κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε.*

## 1.6 Βιβλιογραφία

- [1] Β. Κ. Παπαδιάς: “Εισαγωγή στην Τεχνική των Γειώσεων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.
- [2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Αθήνα 1997.
- [3] Προκόπης Χριστοδούλου, “Συστήματα Γείωσης. Θεωρητική προσέγγιση”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2000.
- [4] Περής Γ. Χάλαρης: “Γειώσεις–Νομοθεσία και Κανονισμοί”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.
- [5] Διονύσιος Ρηγάτος, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2001.

- 
- [6] Ηλιάννα-Λαμπρινή Μ. Κουγιουμτζή, “Προσομοίωση Συστημάτων Γείωσης σε Πολυστρωματικό Έδαφος”, Διπλωματική εργασία, Αθήνα 2002.
- [7] Ν. Χατζηαργυρίου, “Γειώσεις Αιολικών Πάρκων”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.
- [8] Γ. Ι. Γεωργαντζής, “Σχεδίαση και Τεχνικές Γειώσεων Υποσταθμών Υψηλής Τάσης”, Σεμινάριο: “Γειώσεις και Αντικεραυνική Προστασία Δικτύων και Εγκαταστάσεων”.
- [9] Απόστολος Κεμίδης, Δημήτριος Μπαργιώτας, Χρήστος Σανδαλίδης, “Βιομηχανικές Εγκαταστάσεις Υποσταθμοί”, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο ΥΠΕΠΘ, Αθήνα 2002.
- [10] Πέτρος Ντοκόπουλος, “Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης”, Εκδόσεις Ζήτη 2<sup>η</sup> έκδοση, Θεσσαλονίκη 1992.
- [11] Κανονισμοί Εσωτερικών Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων (Κ.Ε.Η.Ε.), Επιμέλεια Γεώργιος Παπασωτηρίου, Εκδόσεις Α. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1980.
- [12] Διδακτορική Διατριβή Ι. Φ. Γκόνου, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
-

## **Κεφάλαιο 2**

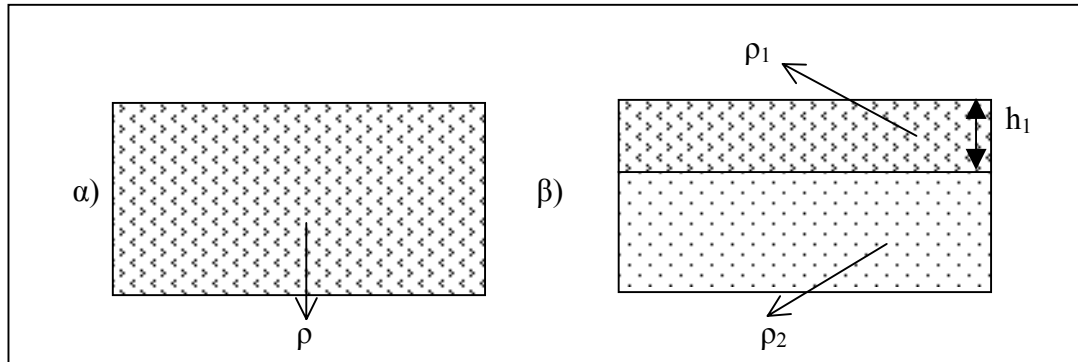
### ***ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ***

#### **2.1 Εισαγωγή**

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία που αφορούν τις διατάξεις γείωσης καθώς και τον σκοπό που υπηρετούν. Δηλαδή ότι πρέπει να οδηγούν τα πιθανά ρεύματα βραχυκύκλωσης προς τη γη, και να περιορίζουν το βαθμωτό δυναμικό γύρω από ολόκληρη την περιοχή του υποσταθμού γείωσης, ώστε οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής να παραμένουν σε ασφαλείς τιμές. Όμως σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των συστημάτων υποσταθμού γείωσης, εκτός από τα είδη των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν (όπως μεταλλικοί αγωγοί τοποθετημένοι οριζόντια ή κατακόρυφα στο έδαφος, συνδυασμός οριζοντίων και καθέτων αγωγών που συνιστούν πλέγμα γείωσης κ.τ.λ.), διαδραματίζει η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Είναι απαραίτητο προτού προχωρήσουμε στο σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης να μετρήσουμε την ειδική αντίσταση του εδάφους, και να το μοντελοποιήσουμε υπολογίζοντας παράλληλα τις παραμέτρους του. Έτσι με σωστή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν μπορούμε να βρούμε την βέλτιστη, κατασκευαστικά και οικονομικά, λύση για την υλοποίηση ενός συστήματος γείωσης, όπως για παράδειγμα το ιδανικότερο βάθος τοποθέτησης των μεταλλικών κατασκευών του συστήματος.

Όλα αυτά οδήγησαν στην δημιουργία διαφόρων τεχνικών, στις οποίες έγιναν διάφορες παραδοχές προκειμένου να προσεγγιστούν όσο το δυνατόν καλύτερα οι πραγματικές καταστάσεις. Η πιο απλή προσέγγιση είναι να θεωρήσουμε το έδαφος ομοιογενές (Σχήμα 2.1.α), με μία ενιαία τιμή ειδικής αντίστασης. Αντιθέτως η πιο πολύπλοκη είναι να θεωρήσουμε τη δομή του εδάφους ως πολυστρωματική, η οποία συγκλίνει στην πραγματικότητα αφού το έδαφος είναι πράγματι ανομοιογενές. Η μοντελοποίηση του γίνεται χωρίζοντας το σε πολλά οριζόντια στρώματα, όπου κάθε στρώμα έχει την ίδια τιμή ομογενούς ειδικής αντίστασης. Για παράδειγμα έδαφος με δύο στρώματα (διστρωματικό) όπου το

καθένα έχει την διαφορετική τιμή ομογενούς ειδικής αντίστασης με το πρώτο να φτάνει μέχρι κάποιο βάθος  $h$  και το δεύτερο να εκτείνεται στο άπειρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.β [2,25].



Σχήμα 2.1: Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε α) ένα έδαφος που έχει θεωρηθεί ομοιογενές με ειδική αντίσταση  $\rho$  και ένα έδαφος που έχει θεωρηθεί διστρωματικό με  $\rho_1$  ειδική αντίσταση και  $h_1$  βάθος το πρώτο στρώμα και  $\rho_2$  ειδική αντίσταση το δεύτερο.

Σημαντική είναι η συνεισφορά των H. Yang, J. Yuan και W. Zong με τη δημοσίευση τους πάνω στην μελέτη του τριστρωματικού μοντέλου (μετρήσεις με τη μέθοδο του Wenner) καθώς και του J. L. del Alamo για την εκτίμηση των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους όπου έκανε σύγκριση μεταξύ οκτώ διαφορετικών τεχνικών υπολογισμού των παραμέτρων διστρωματικού εδάφους.

Τις δύο αυτές μελέτες θα παρουσιάσουμε αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4 αντίστοιχα.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε σε διάφορες δημοσιεύσεις που έγιναν πάνω στην μοντελοποίηση του εδάφους, στους τρόπους εκτίμησης των παραμέτρων του, και στην επίδραση αυτών στον υπολογισμό των συστημάτων γείωσης.

## 2.2 Παρουσίαση βιβλιογραφίας

### 2.2.1 Μοντελοποίηση της δομής του εδάφους & μετρήσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων αυτού

Αρκετοί είναι αυτοί που ερεύνησαν και εφάρμοσαν μεθόδους μέτρησης και μοντελοποίησης για να προσδιορίσουν με τον βέλτιστο τρόπο την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Σε ανάλυσή του ο Blattner [1] τον Αύγουστο του 1982 έκανε σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων της αντίστασης του εδάφους που πήρε με την μέθοδο των τεσσάρων σημείων (Wenner) και της φαινόμενης ειδικής αντίστασης που προκύπτει από τη μέτρηση της αντίστασης μίας κατακόρυφης ράβδου. Αντιμετώπισε περιπτώσεις τόσο ομοιογενών όσο και ανομοιογενών εδαφών. Πραγματοποίησε αρκετές μετρήσεις και με τις δύο μεθόδους σε τρεις τοποθεσίες υποσταθμών. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων του βγήκαν τα εξής συμπεράσματα:

1. Για ομοιογενή εδάφη οι δυο μέθοδοι έχουν ταυτόσημα αποτελέσματα.
2. Για ανομοιογενή εδάφη οι δυο μέθοδοι έχουν, σε μεγάλο βαθμό, διαφορετικά αποτελέσματα.
3. Τα αποτελέσματα της μεθόδου με τη κατακόρυφη ράβδο στο έδαφος επηρεάζονται σημαντικά από το στρώμα του εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση.

Επίσης ανέπτυξε μια απλή εξίσωση, η οποία εφαρμόστηκε επιτυχώς, για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους μιας κατακόρυφης ράβδου βάσει των αποτελεσμάτων της μεθόδου των τεσσάρων σημείων.

Αργότερα σε παρουσίασή τους οι Dawalibi και Blattner τον Φεβρουάριο του 1984 [2] ανέπτυξαν τεχνικές ερμηνείας μετρήσεων ειδικής αντίστασης του εδάφους. Για τις περισσότερες περιπτώσεις γείωσης, η γη προσεγγίζεται ως μια διστρωματική δομή εδάφους. Το ανώτερο στρώμα έχει πάχος  $h$  και το κατώτερο θεωρείται άπειρο. Το πάχος του ανωτέρου στρώματος και οι ειδικές αντιστάσεις των δυο στρωμάτων καθορίζονται από τις τιμές της ειδικής αντίστασης που μετρούνται με τη μέθοδο Wenner. Λόγω των πολλών δυνατών δομών και

ιδιοτήτων των συστατικών της γης, υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι και τεχνικές μοντελοποίησης. Ένας τρόπος μοντελοποίησης της γης βασίζεται στην απ' ευθείας σύγκριση της καμπύλης του πεδίου με ένα σύνολο θεωρητικών καμπυλών. Αν βρεθεί ικανοποιητική ομοιότητα μεταξύ της πεδιακής και μιας θεωρητικής καμπύλης, τότε είναι δυνατός ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της γης, όπου διεξήχθησαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις. Ένας άλλος τρόπος ερμηνείας των μετρήσεων ειδικής αντίστασης, είναι με χρήση κατάλληλου λογισμικού.

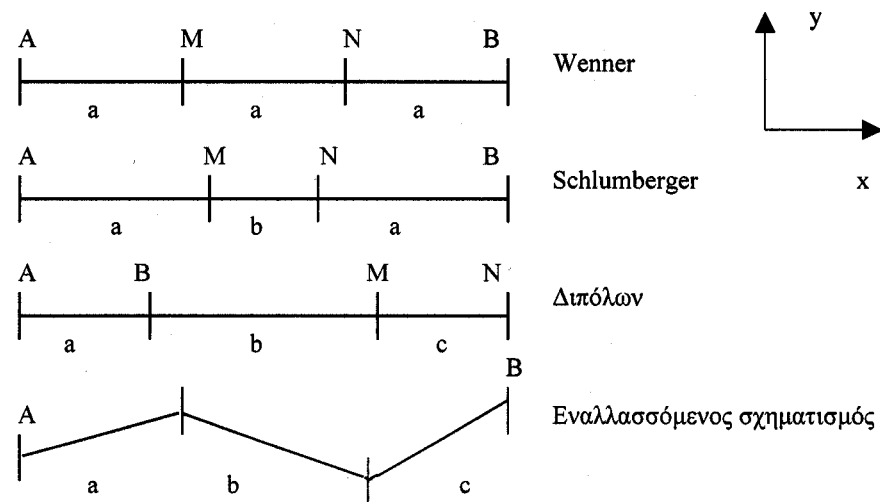
Τον Ιούλιο του 1992 οι Seedher και Aroga [3] σε άρθρο τους παρουσίασαν μία αποτελεσματική μέθοδο για τον προσδιορισμό ενός βέλτιστου διστρωματικού μοντέλου εδάφους με την βοήθεια της μεθόδου Wenner. Η μέθοδος αυτή βασίστηκε πάνω σε μία πρόσφατα αναπτυσσόμενη πεπερασμένη μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό του δυναμικού σε διστρωματικό έδαφος. Αναπροσάρμοσαν τους συντελεστές της εξίσωσης ώστε να γίνουν κατάλληλοι για την εφαρμογή τους. Παρουσίασαν έναν αλγόριθμο βασισμένο πάνω σε αυτές τις εκφράσεις για εκτίμηση των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους και περιέγραψαν το πρόγραμμα.

Οι Lagace, Fortin και Crainic [4] τον Ιούλιο του 1996 έκαναν μία εργασία στην οποία η μέθοδος των ειδώλων περιπλέκει την εκτίμηση των παραμέτρων του εδάφους. Τα πολυστρωματικά εδάφη μοντελοποιήθηκαν με  $N$  οριζόντια στρώματα που έχουν διαφορετική ειδική αντίσταση και βάθος. Από τις γνωστές παραμέτρους η φαινόμενη ειδική αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί αποτελεσματικά από τη μέθοδο των ηλεκτροστατικών ειδώλων. Εφόσον η απόκριση του μοντέλου είναι γενικά μη γραμμική συνάρτηση σε σχέση με το μοντέλο των παραμέτρων, τεχνικές ελαχίστων τετραγώνων μπορούν να φανούν χρήσιμες για εκτίμηση ειδικής αντίστασης στρωμάτων και βάθη που συμφωνούν με τις μετρήσεις.

Η εργασία αυτή αποδεικνύει πως η θεωρία των ηλεκτροστατικών ειδώλων μπορεί να αυξήσει την αποτελεσματικότητα στον υπολογισμό των συντελεστών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και της ευαισθησίας (έχοντας μετρήσεις που έγιναν σύμφωνα με τις μεθόδους: του Wenner, του Schlumberger, των δίπολων

και του εναλλασσόμενου σχηματισμού), Σχήμα 2.2 και να χρησιμοποιηθεί στην προσπάθεια μοντελοποίησης των πολυστρωματικών εδαφών.

Παρακάτω στο Σχήμα 2.2 αναπαριστούνται σχηματικά τέσσερις μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους όπου παρατηρούμε πως εκτός από μία μέθοδο όλες χρησιμοποιούν τέσσερα ηλεκτρόδια. Σε όλες σημαντικό ρόλο παίζουν οι αποστάσεις  $x_{AM}$ ,  $x_{AN}$ ,  $x_{BM}$ ,  $x_{BN}$ , κατά τον άξονα  $x$  και  $y_{AM}$ ,  $y_{AN}$ ,  $y_{BM}$ ,  $y_{BN}$ , κατά τον άξονα  $y$ .



Σχήμα 2.2: Μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Σε μία διεξοδική μελέτη, που έγινε από τους J.Ma, και F.P. Dawalibi [5] τον Απρίλιο του 1998, μελετήθηκε η επίδραση στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους των μεταλλικών αντικειμένων που βρίσκονται σε αυτό.

Επίσης ανέλυσαν διάφορες μεθόδους μετρήσεων για ποικίλες δομές εδάφους, και διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης των μετρητικών διατάξεων σε σχέση με τα μεταλλικά αντικείμενα που βρίσκονται στο έδαφος. Ακόμα αναφέρουν πως έχει βρεθεί ότι, η επίδραση στις μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους ενός τοποθετημένου μεταλλικού πλαισίου σ' αυτό, μπορεί να είναι σημαντική και μάλιστα αυτή η επίδραση, εξαρτάται από τις μετρητικές μεθόδους, τον τρόπο τοποθέτησης της μετρητικής διάταξης καθώς και απ' τα χαρακτηριστικά της δομής του εδάφους.

Τέλος η μελέτη τους αυτή παρουσιάζει κάποιους τρόπους τοποθέτησης της μετρητικής διάταξης, ώστε να ελαχιστοποιείται η επίδραση των τοποθετημένων στο έδαφος μεταλλικών αντικειμένων, όταν οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης

του εδάφους, πρέπει να πραγματοποιούνται με την παρουσία των μεταλλικών αντικειμένων.

Τον Οκτώβριο του 1998 διεξήχθησαν μετρήσεις από τους Ma και Dawalibi [6] με την εφαρμογή δύο ευρύτατα διαδεδομένων μεθόδων: τη μέθοδο Wenner και τη μέθοδο Schlumberger [25, 26]. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων για διαφορετικές τιμές της συχνότητας λειτουργίας, διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των ακροδεκτών ρεύματος και δυναμικού, καθώς και για περιπτώσεις πολυστρωματικών εδαφών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος Wenner υστερεί σε περιπτώσεις επαγωγικής σύζευξης μεταξύ των αγωγών έναντι της μεθόδου Schlumberger, αλλά επηρεάζεται λιγότερο από φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (π.χ. θόρυβος).

Οι Jinxi Ma, Farid P. και Dawalibi [7] τον Οκτώβριο του 2001 σε δημοσίευσή τους παρουσίασαν την μοντελοποίηση που έγινε σε μετρήσεις σύνθετης αντίστασης γης σε ποικίλες δομές εδάφους χρησιμοποιώντας την μέθοδο πτώσης του δυναμικού, παίρνοντας υπόψη την επαγωγική σύζευξη μεταξύ των καλωδίων ρεύματος και τάσης που χρησιμοποιήθηκαν στην μέτρηση. Ανέλυσαν για ομογενή και πολυστρωματικά εδάφη τη μεταβολή της επαγωγικής σύζευξης σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των καλωδίων ρεύματος και τάσης, συχνότητας λειτουργίας, και μεγέθους πλέγματος γείωσης. Παρουσίασαν αριθμητικά αποτελέσματα και τα σύγκριναν. Η ανάλυσή τους καθόρισε ποσοτικά την επαγωγική σύζευξη μεταξύ των καλωδίων ρεύματος και τάσης για διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των καλωδίων. Συμπερασματικά, όταν η συχνότητα λειτουργίας είναι υψηλή ή η ειδική αντίσταση του εδάφους χαμηλή ή το πλέγμα γείωσης εκτεταμένο, οι μετρήσεις επηρεάστηκαν πολύ απότομα από την επαγωγική σύζευξη από οποιαδήποτε άλλη περίπτωση. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό εδώ το άρθρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μία αναφορά για εκτίμηση επιπέδων επαγωγικής σύζευξης, και πιθανών σφαλμάτων, σε μετρήσεις σύνθετης αντίστασης γης.

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε τον Απρίλιο του 2002 από τους, I Αραβανή, Ε. Τζουβελέκη, Κ. Χρονόπουλο, και Θ. Αντωνίου [8] παρουσιάστηκε μία μέθοδος υπολογισμού ισοδύναμης ειδικής αντίστασης σε ανομοιογενές έδαφος. Σκοπός τους ήταν ο υπολογισμός της ισοδύναμης αντίστασης του



διστρωματικού εδάφους. Στην εργασία αυτή, αναφέρουν δύο τρόπους μέτρησης (του Wenner και των Shlumberger – Palmer) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επειδή για το σχεδιασμό ενός δικτύου γείωσης είναι απαραίτητο να προσεγγιστεί η πραγματική εικόνα της δομής του εδάφους χρησιμοποίησαν ένα διστρωματικό μοντέλο  $(\rho_1, \rho_2, h)$  το οποίο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Για την κατασκευή του μοντέλου υπέθεσαν ότι το έδαφος είναι διστρωματικό, ξεκίνησαν από μία εξίσωση για τον υπολογισμό της  $\rho_{\alpha\rho(n)}$  (αναμενόμενης φαινόμενης τιμής της ειδικής αντίστασης εδάφους  $(n=1,2,\dots,N)$ ) η οποία είναι συνάρτηση των  $K$  (συντελεστής ανάκλασης),  $a_n$  (απόσταση των ηλεκτροδίων) και  $h$  (πάχος του στρώματος), και κάνοντας μια μαθηματική ανάλυση κατέληξαν σε μία τελική σχέση που δίνει απευθείας την ισοδύναμη ειδική αντίσταση, ή οποία εξαρτάται από το βάθος  $h$  και τη διάμετρο κυκλικού δίσκου ίδιου εμβαδού με το πλέγμα γείωσης. Τέλος έκαναν εφαρμογή της μεθόδου του Wenner στον Υ/Σ 150/20 KV Σπάτων και πήραν μετρήσεις που οδήγησαν σε ισοδύναμη αντίσταση 100 Ω ενώ με τη χρησιμοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου (στον ίδιο χώρο) κατέληξαν σε ισοδύναμη αντίσταση εδάφους ίση με 35 Ω. Αυτό είχε σα λογική συνέπεια την μείωση του μήκους δικτύου από 7800m σε 5400m με κέρδος 10712 ΕΥΡΩ (3650000δρχ)

### **2.2.3 Επίδραση των χαρακτηριστικών του εδάφους στον υπολογισμό συστημάτων γείωσης**

Εκτός από μελέτες που έγιναν με σκοπό τον καλύτερο υπολογισμό της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους, πραγματοποιήθηκαν και εργασίες που αφορούν την επίδραση των χαρακτηριστικών του.

Το 1955 ο Zaborszky σε μελέτη του [9] αναφέρει ότι ένα υποκείμενο στρώμα στο έδαφος υψηλότερης ειδικής αντίστασης καθιστά το εσωτερικό τμήμα του πλέγματος γείωσης όλο και πιο αναποτελεσματικό, όσο η ανομοιογένεια των αγωγιμοτήτων του εδάφους αυξάνει. Είναι πιο οικονομικό να χρησιμοποιούμε το αγωγίμο υλικό εκτεινόμενο σε μία όσο το δυνατό μεγαλύτερη περιφέρεια από το να το χρησιμοποιούμε για να σχηματίσουμε ένα πλέγμα μικρότερης περιφέρειας.

Κατά κύριο λόγο η περιφέρεια, και όχι η περιοχή του ηλεκτροδίου γείωσης, καθορίζει την αντίσταση γείωσης.

Αργότερα ο Herpe σε άρθρο του [10] το Φεβρουάριο του 1979 θεωρεί ότι το έδαφος αποτελείται από δύο οριζόντια επίπεδα διαφορετικών αγωγιμοτήτων. Αυτό μπορεί να προκύψει, για παράδειγμα, εάν ένα λεπτό επίπεδο επιφάνειας αποτελείται από υγρό χώμα, από τριμμένο χώμα ή από συμπαγές χώμα και κάτω από αυτό υπάρχει ένα παχύ στρώμα παγωμένου χώματος ή πετρώδους ή ξερού εδάφους. Αυτές οι συνθήκες αλλάζουν την βηματική τάση και την αντίσταση επαφής. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται οι εξισώσεις για το δυναμικό και την αντίσταση του ηλεκτροδίου στην περιοχή ενός οριζόντιου ηλεκτροδίου γείωσης τοποθετημένου σε διστρωματικό έδαφος.

Σε εργασία τους, το Δεκέμβριο του 1979, οι Dawalibi και Mukhedkar [11] παρουσίασαν μία ανάλυση της επίδρασης της προσθήκης ράβδων γείωσης σε σύστημα που αποτελείται από οριζόντιους αγωγούς γείωσης, όπως αυτοί που συνιστούν ένα πλέγμα, θεωρώντας διστρωματική διαμόρφωση εδάφους. Αρχικά, αποδεικνύουν ότι οποιαδήποτε διαμόρφωση εδάφους μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία διστρωματική διαμόρφωση. Στη συνέχεια, αναλύεται μία τυπική ράβδος γείωσης και συσχετίζεται σταδιακά με άλλες ράβδους γείωσης καθώς και με οριζόντιους αγωγούς. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται σε κάθε περίπτωση οι πυκνότητες ρεύματος, η αντίσταση και οι τάσεις επαφής για διάφορα είδη εδάφους και χαρακτηριστικά ράβδων. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για ένα οριζόντιο αγωγό, με κατάληξη στη μελέτη πολλών ράβδων ενωμένων μεταξύ τους με πλέγμα γείωσης. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από ένα πρόγραμμα υπολογιστή βασισμένο στις αναλυτικές μεθόδους που περιέγραψαν στο [12].

Τον ίδιο καιρό, σε άρθρο του ο Manohar [13] είπε ότι η επιλογή των υλικών για διάφορες ηλεκτρολογικές κατασκευές σχετίζεται τόσο με τεχνικούς όσο και με οικονομικούς παράγοντες, ώστε το αποτέλεσμα να είναι από τεχνικής απόψεως το επιθυμητό με το μικρότερο δυνατό κόστος, στο άρθρο αυτό δίνονται πληροφορίες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ατσάλινων συστημάτων γείωσης, καθώς επίσης και τεχνικούς, οικονομικούς και πρακτικούς λόγους για χρήση ατσάλινων αγωγών κατά προτίμηση από τους χάλκινους. Τα

χαρακτηριστικά τήξης, η αντίσταση και η διάβρωση των αγωγών είναι οι κύριοι παράγοντες που εξετάζονται, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της δομής του εδάφους, προκειμένου να κατασκευαστούν αγωγοί γείωσης στην Ινδία. Παρουσιάζονται οι γενικευμένοι τύποι υπολογισμού του μεγέθους (διατομής) των αγωγών γείωσης κατασκευασμένων από ατσάλι, χαλκό και άλλα υλικά. Επίσης δίνονται κάποια στοιχεία σχετικά με την ηλεκτροχημική διάβρωση στα εδάφη, η γνώση της οποίας είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του βαθμού διάβρωσης των αγωγών που βρίσκονται μέσα στο έδαφος.

Τα χαρακτηριστικά και η απόδοση των κατάλληλα σχεδιασμένων ατσάλινων συστημάτων γείωσης είναι ισοδύναμα με αυτά των χάλκινων. Για την περίπτωση της Ινδίας ως συμπέρασμα προέκυψε ότι ήταν προτιμότερη η χρήση ατσάλινων πλεγμάτων εξαιτίας της λιγοστής διαθεσιμότητας και του υψηλότερου κόστους του χαλκού.

Οι Dawalidi, Bensted και Mukhedkar [14] τον Ιούλιο του 1981 στο άρθρο που δημοσίευσαν παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας θεωρητικής μεθόδου που αναπτύσσεται από τον Dawalidi στο [15].

Στη μελέτη εξετάστηκαν τα μονοφασικά σφάλματα ως προς γη σε εναέριες και υπόγειες γραμμές μεταφοράς, σε πυλώνες και σε τερματικούς σταθμούς.

Παρουσιάστηκαν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Είναι απευθείας μέθοδος (χωρίς επαναλήψεις).
- Μπορούν να γίνουν προσεγγίσεις.
- Συμπεριλαμβάνονται όλες οι σημαντικές παράμετροι, όπως αυτεπαγωγή και αμοιβαία επαγωγή καθώς επίσης και άλλα στοιχεία όπως ο αριθμός γραμμών μεταφοράς και πυλώνων κλπ.
- Δεν παρουσιάζει σημαντικά λάθη στρογγυλοποίησης.
- Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα σφάλματος τυχαίας γείωσης, το πώς καταμερίζεται καθώς επίσης και η τιμή της επαγόμενης τάσης σε γειτονικά κυκλώματα.

Τα χαρακτηριστικά του εδάφους έχουν σημαντική επίδραση στο ρεύμα που διαφεύγει δια μέσου της γείωσης και στον καταμερισμό αυτού ανάμεσα στο

έδαφος και στις μεταλλικές διαδρομές. Χρησιμοποιώντας αριθμητικά παραδείγματα φαίνεται ότι το ρεύμα σφάλματος ελαττώνεται με την αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο αγωγός γείωσης και από την ειδική αντίσταση του εδάφους η τιμή του ρεύματος σφάλματος στον αγωγό γείωσης μπορεί να κυμαίνεται από ένα πολύ μικρό ποσοστό μέχρι και 100%. Επίσης αποδεικνύεται ότι υπάρχει μία μέγιστη τιμή ειδικής αντίστασης η οποία προκαλεί την υψηλότερη τάση επαφής ανάμεσα τα ηλεκτρόδια γείωσης. Η χειρότερη περίπτωση είναι η τιμή της ειδικής αντίστασης να είναι μικρότερη από 2000 Ω/m. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την άποψη ότι ο κίνδυνος αυξάνεται με την ειδική αντίσταση του εδάφους.

Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν ότι οι επαγόμενες τάσεις μεταξύ γειτονικών κυκλωμάτων γείωσης επηρεάζονται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και από τον αριθμό των σημείων γείωσης του κυκλώματος στο οποίο επάγεται η τάση. Η επίδραση του εδάφους είναι αξιόλογη για τιμές ειδικής αντίστασης εδάφους, μικρότερες από 1000 Ω/m.

Συνολικά βλέπουμε ότι πετυχαίνεται μια συμφωνία σε ικανοποιητικό βαθμό σε μετρήσεις που έγιναν σε μία γραμμή μεταφοράς 120 KV μεταξύ δύο σταθμών και στα αποτελέσματα της μεθόδου που αναπτύχθηκε στο συμπληρωματικό άρθρο.

Ο Lattarulo [16] τον Ιανουάριο του 1988 σε ανάλυσή του ασχολείται με την μελέτη της συμπεριφοράς τοποθετημένων αγωγών μεγάλου μήκους στο έδαφος, χρησιμοποιώντας στον υπολογισμό την πραγματική εξάρτηση από την συχνότητα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους ως μέτρο εκφόρτισης ενός μεταβατικού ρεύματος. Και οι δύο καταστάσεις του εδάφους, όταν πρακτικά δεν έχει υγρασία και όταν είναι διαποτισμένο, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Το Νοέμβριο του 1995 οι Chow, Elsherbiny και Salama [17] με μία σημαντική μέθοδο προσέγγισης (μέθοδος των ροπών, του Galerkin) υπολογίζουν την αντίσταση γείωσης των κατακόρυφων ράβδων σε ομοιογενές έδαφος. Ο πίνακας, που έχει στοιχεία με τις αντιστάσεις των ράβδων και του εδάφους αλλά και τις αντιστάσεις λόγω αλληλεπίδρασης μεταξύ τους, είναι αρκετά μικρός. Επίσης οι N ράβδοι χρειάστηκαν NxN πίνακα. Η αντίσταση της ράβδου γειώσεως που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας αυτή την μέθοδο έχει μία

ποσοστιαία διαφορά του 2% και λιγότερο, από την μέθοδο που υπολογισμού σημείο προς σημείο. Η μέθοδος του Galerkin δεν προσαρμόζει το όριο του δυναμικού σ' ένα σημείο ενός τμήματος, αλλά προσαρμόζει το δυναμικό με το μέσο όρο που υπολογίζεται στο τμήμα συνολικά. Μια τέτοια απλή αλλαγή στην μέθοδο την κάνει να έχει αποκλίσεις και να καταλήγει σε ένα μικρό σφάλμα ακόμα και σε σχέση με ένα πιο ουσιαστικό τρόπο υπολογισμού. Οι επιδράσεις των παραμέτρων ενός πολύπλοκου συστήματος (πάνω στις παραμέτρους της συστοιχίας ράβδων) όπως το βάθος βύθισης της ράβδου, το μήκος της και η ακτίνα της, η απόσταση μεταξύ των ράβδων, ο τρόπος τοποθέτησης των ράβδων στο χώρο καθώς και ο αριθμός των ράβδων μελετώνται. Η παρούσα τεχνική αποδεικνύεται ότι είναι πολύ ακριβής και επαρκής όταν συγκρίνεται με τις μεθόδους που έχουν δημοσιευθεί. Τα παρόντα αποτελέσματα αποφέρουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- ι) Η αντίσταση της συστοιχίας ράβδων ελαττώνεται ανάλογα με το βάθος που βρίσκεται από την επιφάνεια της γης, ωστόσο αυτό το ποσό της μείωσης της αντίστασης μειώνεται όταν υπάρχει μεγάλο διάστημα ανάμεσα στις γειτονικές ράβδους και μικρός αριθμός ράβδων.
- ιι) Η σχέση ανάμεσα στην αντίσταση μιας μονής ράβδου είναι κατά προσέγγιση αντιστρόφως ανάλογη στο μήκος της ράβδου, εάν η ράβδος έχει μικρή ακτίνα. Η προσέγγιση χειροτερεύει για μια μεγάλης διαμέτρου ράβδο ή για συστοιχία ράβδων.
- ιιι) Η υψηλή ακρίβεια στην τοποθέτηση των ράβδων στο χώρο δεν παίζει ρόλο εάν το τελικό μήκος της περιμέτρου των κάθετων ράβδων είναι το ίδιο.
- ιιιι) Η κεντρική ράβδος δεν ελαττώνει την αντίσταση ενός πολυπληθούς συστήματος συστοιχία ράβδων πολύ, εάν ο μέσος όρος του διαστήματος μεταξύ των γειτονικών ράβδων μέσα στην περίμετρο είναι ίσος ή μικρότερος από το μήκος της ράβδου.

Χρησιμοποιώντας μεγάλα τμήματα, ένα τμήμα ανά ράβδο, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλό σφάλμα για τον υπολογισμό δυναμικού στην επιφάνεια της γης στη περίπτωση της μη βυθισμένης ράβδου (σφάλμα <5%). Για βυθισμένες ράβδους χρειάζεται τρία κομμάτια το πολύ ανά ράβδο για να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια.

## 2.2.4 Υπολογισμός αντίστασης συστήματος γείωσης τοποθετημένης σε πολυστρωματικό έδαφος

Τον Οκτώβριο του 1979, οι Dawalibi και Mukhedkar [18] παρουσίασαν τα αποτελέσματα ενός προγράμματος υπολογιστή που προσδιορίζει την ικανότητα γείωσης διστρωματικών εδαφών. Για διάφορα είδη πλεγμάτων γείωσης και διστρωματικών εδαφών υπολογίζονται αντιστάσεις γείωσης, βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Τα λαμβανόμενα αποτελέσματα οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

Όταν το έδαφος δεν είναι ομοιόμορφο, για δεδομένη μορφή πλέγματος, υπάρχει μία διαμόρφωση εδάφους που οδηγεί σε μέγιστη τάση επαφής.

- Τα πλέγματα που αποτελούνται από παράλληλους αγωγούς είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με αυτά που αποτελούνται από βρόχους και τα ορθογωνικά πλέγματα είναι πιο αποδοτικά από τα τετραγωνικά.
- Όταν το έδαφος είναι ομοιόμορφο, υπάρχει ένα ιδανικό βάθος τοποθέτησης του πλέγματος που οδηγεί σε ελάχιστη τάση επαφής.

Οι Nahman, και Salamon [19] τον Οκτώβριο 1988 σε στο άρθρο που δημοσίευσαν υποδεικνύουν μία απλή ημιεμπειρική μέθοδο υπολογισμού της αντίστασης γείωσης μίας απλής ράβδου τοποθετημένης σε διστρωματικό έδαφος. Οι υπολογισμοί χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για μία λεπτομερή μέθοδο ερμηνείας των πληροφοριών, που παίρνουμε από δοκιμές με κάθετα τοποθετημένη ράβδο στο έδαφος, για την εκτίμηση των παραμέτρων του. Η προσέγγιση της τιμής της ειδικής αντίστασης γίνεται με ερμηνεία τιμών της που προκύπτουν τόσο από υπολογισμό της όσο και από μετρήσεις.

Τα αποτελέσματα του άρθρου είναι:

1. Παρουσιάζεται ότι η κατά προσέγγιση πρακτική ερμηνεία για την αντίσταση γείωσης μίας απλής κατακόρυφα τοποθετημένης ράβδου σε διστρωματικό έδαφος, προσφέρει καλές εκτιμήσεις για την αντίσταση σε ένα ευρύ πεδίο των παραμέτρων του εδάφους.

2. Προτείνεται μία απλή μέθοδος απόκτησης δεδομένων από την κατακόρυφη ράβδο, με σκοπό την ερμηνεία της αντίστασης γης, και μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα.
3. Η μέθοδος ερμηνείας που προτείνεται μπορεί να επαληθευθεί μετά από σύγκριση της με συγκεκριμένα μοντέλα (ράβδου και εδάφους). Για παράδειγμα η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί πάνω σε υπάρχουσες αναλύσεις με πληροφορίες που προέκυψαν από δοκιμές στο πεδίο που ασχολήθηκαν.

Σε εργασία των Dawalibi και Barbeito το 1991 [20] υπολογίστηκαν και μετρήθηκαν οι αντιστάσεις και τα δυναμικά στην επιφάνεια του εδάφους των συστημάτων γείωσης δύο υποσταθμών, σε διάφορες φάσεις της εγκατάστασης. Τα συστήματα γείωσης των υποσταθμών είναι τοποθετημένα σε πολυστρωματικά εδάφη. Η ειδική αντίσταση του εδάφους κάθε σημείου μετράται και υπολογίζονται οι ισοδύναμες διστρωματικές και πολυστρωματικές δομές εδάφους. Αποδεικνύεται ότι υπάρχει καλή συμφωνία των μετρήσεων με τις υπολογιζόμενες τιμές όταν χρησιμοποιείται πολυστρωματική θεώρηση σε σχέση με την θεώρηση ομοιογενούς εδάφους.

Τον Ιανουάριο του 1994 οι Dawalibi, Ma και Southey [21] εφάρμοσαν για πρώτη φορά μία εκτεταμένη παραμετρική μελέτη του πλέγματος γείωσης που είναι τοποθετημένο σε πολυστρωματικά δομημένο έδαφος. Διάφορες πρακτικές περιπτώσεις εξετάστηκαν και οι αντιστάσεις πλεγματικής γείωσης, κατανομής ρεύματος, επιφανειακό δυναμικό της γης και τάσεις επαφής παρουσιάστηκαν και συγκρίθηκαν για διαφορετικές δομές εδάφους. Εξηγούν και πρακτικές καταστάσεις, όπως συνθήκες παγωμένου ή μερικά παγωμένου εδάφους (λόγω βροχής για παράδειγμα), το οποίο παραμένει ένα ανοιχτό ερώτημα μέχρι και σήμερα, όπου η πολυστρωματική δομή του πρέπει να εξετάζεται εάν θέλουμε να σχεδιάσουμε ένα αξιόπιστο σύστημα γείωσης.

Τρεις μήνες αργότερα οι Chow και Salama [22] τον Απρίλιο του 1994 σε άρθρο τους αποσκοπούσαν στην παρουσίαση μίας απλής μεθόδου για τον υπολογισμό της αντίστασης πλέγματος γείωσης. Αυτή η μέθοδος είναι βασισμένη στο θεωρητικό υπόβαθρο της αριθμητικής μεθόδου των ροπών και της μεθόδου του κατοπτρικού ρεύματος και παράλληλα εξαρτάται από τα σχεδιαστικά στοιχεία του πλέγματος γείωσης όπως:

- A) το βάθος στο οποίο βρίσκεται,
- B) το μέγεθός του πλέγματος,
- Γ) τον αριθμό των διακένων του πλέγματος,
- Δ) η διάμετρος των αγωγών που αποτελείται το πλέγμα γείωσης,
- Ε) ο αριθμός των τετραγωνικών βρόγχων του πλέγματος, τέλος στα στοιχεία αυτά θα πρέπει να προσθέσουμε και την επίδραση του τύπου του εδάφους.

Έτσι οι αντιστάσεις τις πλεγματικής γείωσης που υπολογίζονται με χρήση της προτεινόμενης μεθόδου, των Y.L. Chow και M.M.A.Salama, είναι πολύ ακριβής όταν συγκρίνονται με μία αντίστοιχα πολύπλοκη μέθοδο με χρήση προσωπικού ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η απλότητά και η ευκολία της, δίνοντας μας έτσι τη δυνατότητα να την χρησιμοποιήσουμε με ένα απλό επιστημονικό κομπιουτεράκι. Επίσης είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι με μικρή τροποποίηση αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται και σε διστρωματικό έδαφος.

Αργότερα τον Ιούλιο του 1995 οι Chow, El Sherbiny και Salama [23] ανέπτυξαν μία απλή και ακριβή μέθοδο για τον υπολογισμό της αντίστασης ενός πλέγματος γείωσης που είναι τοποθετημένο σε διστρωματικό έδαφος. Η μέθοδος αυτή βασίζεται, στην αντίσταση ενός πλέγματος γείωσης τοποθετημένου σ' ένα ομογενές έδαφος, σε μία νέα συνθετική ασυμπτωτική τεχνική και στην κατοπτρική θεωρία ειδώλων του διστρωματικού εδάφους. Η εξαγόμενη μέθοδος εξαρτάται από τις παραμέτρους του πλέγματος του υποσταθμού γείωσης όπως:

Το μέγεθος του πλέγματος, ο αριθμός εσωτερικών βρόγχων τετραγωνικού σχήματος του πλέγματος, η διάμετρος των αγωγών από τους οποίους αποτελείται το πλέγμα, το βάθος τοποθέτησης του πλέγματος από την επιφάνεια της γης, κτλ. Καθώς και των παραμέτρων του εδάφους όπως είναι οι ειδικές αντιστάσεις των ανώτερων και κατώτερων στρωμάτων.

Πιο συγκεκριμένα σ' αυτή τη μέθοδο, μόνο ένας τύπος εξίσωσης υπάρχει που επιχειρεί να υπολογίσει την αντίσταση ενός πλέγματος το οποίο είναι τοποθετημένο σε διστρωματικό έδαφος.



Γενικά τεχνικές αριθμητικής ανάλυσης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντίστασης. Απ' την άλλη πλευρά, η προτεινόμενη μέθοδος, υπολογίζει την αντίσταση ως μία μαθηματική συνάρτηση με εφαρμογή των πιο σχετικών παραμέτρων του γειωμένου πλέγματος και του εδάφους που αναφέρθηκαν πιο πάνω.

Αυτή η μέθοδος πάσχει από δύο ουσιώδη μειονεκτήματα:

- 1) δεν είναι ευαίσθητη στο συντελεστή ανάκλασης  $K$  και
- 2) χρειάζεται παραμέτρους που πρέπει να εκτιμηθούν από γραφήματα ή με πίνακες

Γενικά αυτή η μέθοδος είναι απλή και εύκολη να χρησιμοποιηθεί. Για πολλούς πρακτικούς υπολογισμούς, αποφέρει πολύ ορθά αποτελέσματα με σφάλμα λιγότερο του 5%. Οι αντιστάσεις που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας αυτήν την μέθοδο συγκρίνονται με τις αντιστάσεις που υπολογίζονται από μία αναλυτική αριθμητική μέθοδο και προκύπτει συμφωνία μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων που είναι πολύ καλή.

Επίσης τον Ιούλιο του 2002 ο Ι. Φ. Γκόνος [24], στα πλαίσια της διατριβής του παρουσίασε τη διαδικασία και τα αποτελέσματα του υπολογισμού των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους, με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου που ανέπτυξε. Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που διεξήχθησαν, έδειξαν ότι το έδαφος πρέπει να προσομοιώνεται ως διστρωματικό, τουλάχιστον. Επίσης, έγινε φανερό ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ο υπολογισμός των παραμέτρων της δομής του πολυστρωματικού εδάφους μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Στα πλαίσια της διατριβής αυτής προτάθηκε μεθοδολογία, με εφαρμογή γενετικού αλγορίθμου, μέσω της οποίας, με χρήση των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους, υπολογίζονται οι παράμετροι της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Η αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου, που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής, αποδεικνύεται, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Από τη σύγκριση διαπιστώθηκε ότι, η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους, έδωσε ακριβέστερα

αποτελέσματα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που δίνουν οι μέχρι τώρα υφιστάμενες μέθοδοι. Επομένως, με την προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι δυνατόν να υπολογισθούν με μεγάλη ακρίβεια οι παράμετροι του πολυστρωματικού εδάφους, οι οποίες στη συνέχεια, θα αποτελέσουν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης, που θα εγκατασταθεί στο συγκεκριμένο έδαφος.

### 2.3 Βιβλιογραφία

- [1] Blattner C. J., “Study of driven ground rods and four point soil resistivity tests”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 101, 8, August 1982, pp.2837-2850.
  - [2] Dawalibi F. P., Blattner C. J., “Earth resistivity measurement interpretation techniques”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 103, 1, February 1984, pp.374-382.
  - [3] Seedher H. R., Arora J. K., “Estimation of two layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.3, July 1992, pp.1213-1217.
  - [4] Lagace P. J., Fortin J., Crainic E. D., “Interpretation of resistivity sounding measurements in N-layer soil using electrostatic images”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.11, No.3, July 1996, pp. 1349-1354.
  - [5] Ma J., Dawalibi F. P., “Study of influence of buried metallic structures on soil resistivity measurements”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.13, No.2, April 1998, pp.356-365.
  - [6] Ma J., Dawalibi F. P., “Influence of Inductive Coupling Between Leads on Resistivity Measurements in Multilayers Soils”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.13, No.4, October 1998, pp.999-1004.
  - [7] Ma J., Dawalibi F. P., “Influence of Inductive Coupling Between Leads on Ground Impedance Measurements Using the Fall of Potential Method”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.16, No.4, October 2001, pp.739-743.
-

- 
- [8] Αραβανής Ι., Τζουβελέκης Ε., Χρονόπουλος Κ., Αντωνίου Θ., “Μέθοδος υπολογισμού ισοδύναμης ειδικής αντίστασης σε ανομοιογενές έδαφος για τη μελέτη του δικτύου γείωσης υποσταθμών μεταφοράς”, Σύνοδος ΕΕ CIGRE, Αθήνα 11 & 12 Απριλίου 2002, σελ. 59-66.
- [9] Zaborszky J., “Efficiency of grounding grids with non-uniform soil”, American Institute of Electrical Engineering, 74, 3, December 1955, pp.1230-1233.
- [10] Heppe R. J., “Step potentials and body currents near grounds in two-layer earth”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 98, 1, January/February 1979, pp.45-59.
- [11] Dawalibi F.P., Mukhedkar D., “Influence of ground rods on grounding grids”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 98, 6, Nov/Dec 1979, pp.2089-2098.
- [12] Dawalibi F.P., Mukhedkar D., “Multi step analysis of interconnected grounding electrodes”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 95, 1, Jan/Feb 1976, pp.113-119.
- [13] Manohar, “Design of steel earthing grids in India”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-98, No6, Nov/Dec 1979, pp.2126-2134.
- [14] Dawalibi F., Bensted D., Mukheadkar D., “Soil effects on ground fault currents”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100, No7, July 1981, pp.3442-3449.
- [15] Dawalibi F.P., “Ground fault current distribution between soil and neutral conductors”, IEEE Transaction, Vol.PAS-99, No2, March/April 1980, pp.452-461.
- [16] Lattarulo F., “How the electrical properties of soil affect the surge performance of buried long systems”, IEE Proceedings, Vol.135, Pt.A, No1, January 1988.
- [17] Chow Y. L., El Sherbiny M .M., Salama M. M .A., “A Formula for Resistance of Substation Grid in Two Layer Soil”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.10, No.3, July 1995, pp.1255-1262.
-

- 
- [18] Dawalibi F. P., Mukhedkar., “Parametric analysis of grounding grids”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 98, 5, Sept/Oct 1979, pp.1659-1668.
- [19] Nahman J., Salamon D., “A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988, pp.1375-1379.
- [20] Dawalibi F. P., Barbeito N., “Measurements and computations of the performance of grounding systems buried in multiplayer soils”, “A practical method for the interpretation of earth resistivity data obtained from driven rod tests”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.3, No.4, October 1988, pp.1375-1379.
- [21] Dawalibi F.P., Ma J., Southey R.D., “Behavior of grounding systems in multilayer soils: A parametric analysis”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.9, No.1, January 1994, pp.334-342.
- [22] Y.L. Chow, M.M.A. Salama, “A Simplified Method for Calculating the Substation Grounding Grid Resistance”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.9, No.2, April 1994, pp.736-742.
- [23] Y.L. Chow, M.M. Elsherbiny, M.M.A. Salama, “Efficient computation of rodded grounding resistance in a homogeneous earth by Galerkin’s moment method”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol.142, No.6, November 1995, pp.653-660.
- [24] Διδακτορική Διατριβή Ι.Φ.Γκόνου, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002.
- [25] IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983.
- [26] IEEE Std 81.2-1991, “IEEE guide to measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems”, June 1992.
-

## ***Κεφάλαιο 3***

### ***ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ- ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ WENNER***

#### **3.1 Εισαγωγή**

Το μοντέλο γης και οι παράμετροί του θα πρέπει να προσδιορίζονται πριν από την προσομοίωση και το σχεδιασμό του πλέγματος γείωσης υποσταθμού το οποίο αποτελείται από αγώγιμες μπάρες τοποθετημένες κάτω από τον υποσταθμό. Συνήθως η δομή του εδάφους είναι πολύπλοκη, λόγω του ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους διαφέρει ανάλογα με το βάθος και άλλες συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία). Όμως για να πετύχουμε την αριθμητική προσομοίωση της πλεγματικής γείωσης συνήθως γίνεται υπόθεση ότι η γη είναι οριζόντιας διάταξης πολυστρωματικό μοντέλο όπου το κάθε στρώμα έχει σταθερή ειδική αντίσταση. Χρησιμοποιώντας μία σειρά μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην επιφάνεια της γης, μπορεί να καθοριστεί ένα πολυστρωματικό μοντέλο της, βασιζόμενο στη λύση του προβλήματος του ανάστροφου ηλεκτρικού πεδίου. Μέθοδοι για τον καθορισμό πολυστρωματικών μοντέλων έχουν προταθεί, τόσο για διστρωματικό [1,2], όσο και για τριστρωματικό μοντέλο [3]. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία αποτελεσματική μέθοδος για το προσδιορισμό τριστρωματικού μοντέλου [3], που είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης πέντε μεταβλητών. Από το προηγούμενο μπορούμε πολύ εύκολα να οδηγηθούμε σε πρόβλημα τριών μεταβλητών, όπως είναι αυτό του διστρωματικού μοντέλου.

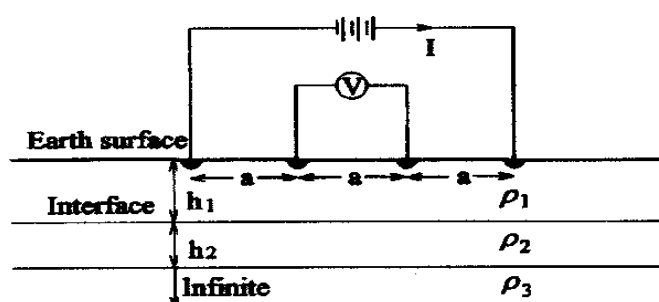
Από τους Ma και Dawalidi [4] έγινε σύγκριση μεταξύ των δύο συνηθέστερων μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης, του Wenner και του Schlumberger. Στο Σχήμα 2.2 του προηγούμενου κεφαλαίου διακρίνονται οι αποστάσεις που τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια στο έδαφος, αυτή η απόσταση αλλάζει προκειμένου να

πάρουμε τα ζεύγη των μετρήσεων που θέλουμε. Με την μέθοδο μέτρησης του Schlumberger, τα δύο μεσαία ηλεκτρόδια παραμένουν σταθερά και μετακινούμε μόνο τα δύο ακραία, ενώ με την μέθοδο του Wenner αλλάζουν θέση όλα τα ηλεκτρόδια διατηρώντας πάντα ίση απόσταση μεταξύ τους. Προφανές συμπέρασμα είναι ότι απαιτείται λιγότερη χειρονακτική εργασία για τις μετρήσεις σύμφωνα με τη μέθοδο Schlumberger, όμως στην περισσότερη βιβλιογραφία τα διαθέσιμα πειράματα έχουν γίνει σύμφωνα με την μέθοδο Wenner. Ο κύριος λόγος που οδήγησε τους περισσότερους ερευνητές να χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο είναι ότι επηρεάζεται λιγότερο από τα φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (π.χ. Θόρυβος).

Για τον ίδιο λόγο επιλέξαμε την μέθοδο του Wenner στην λήψη των μετρήσεων, προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα και να αποφανθούμε για την πολυστρωματική δομή του εδάφους. Τις μετρήσεις αυτές παρουσιάζουμε στην παράγραφο 3.5 του παρόντος κεφαλαίου.

### 3.2 Μέθοδος μέτρησης Wenner

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το σύστημα μέτρησης των τεσσάρων ηλεκτροδίων του Wenner [3]. Στο σύστημα τα τέσσερα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε μία ευθεία γραμμή σε ίση απόσταση μεταξύ τους που συμβολίζεται με  $a$ . Οι ημισφαιρικοί αγωγοί μπορούν να θεωρηθούν ως ηλεκτρόδια που είναι βυθισμένα στην γη και η επίπεδη επιφάνειά τους εφάπτεται στο επίπεδο της γης. Το εξωτερικό ζευγάρι των ηλεκτροδίων είναι αυτά του ρεύματος, στο ένα απ' τα οποία το ρεύμα κατευθύνεται προς τη γη και επιστρέφει, δια μέσου της, στο άλλο. Το εσωτερικό ζευγάρι των ηλεκτροδίων είναι αυτό της τάσης και μετράει την αύξηση του δυναμικού της γης ή την τάση ανάμεσα σ' αυτά τα δύο σημεία.



Σχήμα 3.1: Σύστημα τεσσάρων ηλεκτροδίων του Wenner για τριστρωματικό μοντέλο γης

Παίρνοντας μια δεδομένη τιμή από το ρεύμα που εισρέει στη γη για διαφορετικές αποστάσεις  $a$ , δημιουργούμε μία ομάδα τιμών τάσεων. Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές για το  $a$  τόσο βαθύτερα εισρέει το ρεύμα στη γη. Επιπλέον, η δομή και οι παράμετροι του μοντέλου γης μπορούν να μας δώσουν μια εξήγηση για τη σχέση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης για διαφορετικές αποστάσεις των ηλεκτροδίων. Ο προσδιορισμός της δομής και των παραμέτρων του μέσου από γνωστές πηγές ρεύματος και κατανεμημένο δυναμικό είναι απλά η λύση του προβλήματος της αντιστροφής ηλεκτρικού πεδίου.

### 3.3 Ορισμός της φαινόμενης ειδικής αντίστασης

Βάζοντας σταθερό ρεύμα, η τάση πρέπει να μειωθεί με αύξηση της απόστασης  $a$ , ακόμη και στη περίπτωση που το μοντέλο γης είναι ομοιογενές, για παράδειγμα οι τιμές  $V/I$  ποικίλουν για όποιες αλλαγές του  $a$ . Για να ξεπεραστεί αυτή η ατέλεια, ορίζεται μια φαινόμενη ειδική αντίσταση, η οποία περιγράφει τη σχέση της τάσης, του ρεύματος και της απόστασης των ηλεκτροδίων  $a$  όπως ακολουθεί παρακάτω:

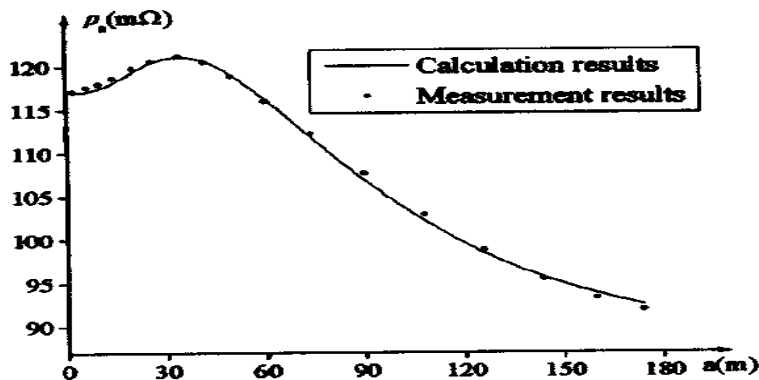
$$\rho_{\alpha}^t = 2\pi a V / I \quad (3.1)$$

Αποδεικνύεται ότι εάν η γη είναι ομοιογενής, η ακριβής τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι ανεξάρτητη του  $a$ , και η τιμή είναι σχεδόν ίδια με την πραγματική ειδική αντίσταση της γης. Χρησιμοποιώντας τη λύση του δυναμικού που παράχθηκε από σημειακές πηγές ρεύματος ή από ημισφαιρικά ηλεκτρόδια σε επαφή με τριστρωματικό μέσο καταλήγουμε ότι η θεωρητική έκφραση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης είναι [5] :

$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \left\{ 1 + 4\alpha \int_0^{\infty} f(\lambda) [J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)] d\lambda \right\}, \quad (3.2)$$

όπου  $J_0$  είναι ο συντελεστής *Bessel* του πρώτου είδους της μηδενικής τάξης:

$$f(\lambda) = \frac{k_1 e^{-2h_1\lambda} + k_2 e^{-2(h_1+h_2)\lambda}}{1 + k_1 k_2 e^{-2h_1\lambda} - k_1 e^{-2h_1\lambda} - k_2 e^{-2(h_1+h_2)\lambda}}, \quad (3.3)$$



Σχήμα.3.2: Κατανομή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για διαφορετικές αποστάσεις ηλεκτροδίων για μοντέλο με  $h_1=27.1$ ,  $h_2=12.5$ ,  $\rho_1=116.9$ ,  $\rho_2=85.0$ .

$k_1 = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$ ,  $k_2 = (\rho_3 - \rho_2)/(\rho_3 + \rho_2)$ ,  $h_i$  και  $\rho_i$  είναι αντίστοιχα το πάχος στρώματος και η ειδική αντίσταση του στρώματος  $i$  όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.1.

Από την σχέση (3.2) μπορούμε να δούμε κατευθείαν ότι, όταν η απόσταση  $a$  των ηλεκτροδίων τείνει στο μηδέν η φαινόμενη ειδική αντίσταση τείνει στην ειδική αντίσταση του ανώτερου στρώματος, και μπορεί να αποδειχθεί ότι όταν το  $a$  τείνει σε μία σχετικά μεγάλη τιμή η φαινόμενη ειδική αντίσταση τείνει στην ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος του εδάφους. Από το τριστρωματικό παράδειγμα του Σχήματος 3.2 βλέπουμε αυτή την ιδιότητα. Την ονομάζουμε *διπλή τελική οριακή ιδιότητα*, όπου για μικρό και μεγάλο  $a$  υπάρχουν δύο όρια. Η διπλή οριακή ιδιότητα μπορεί να αποτελέσει τον οδηγό επιλογής της μεγαλύτερης και μικρότερης τιμής της απόστασης  $a$  στη δοκιμή με τα τέσσερα ηλεκτρόδια, για παράδειγμα το επιλεγμένο  $a$  πρέπει να είναι αρκετά μικρό και αρκετά μεγάλο ώστε να εξασφαλίσει σχεδόν αμετάβλητη φαινόμενη ειδική αντίσταση με επιπλέον αλλαγές του  $a$ .

### 3.4 Προσδιορισμός του μοντέλου γης

Η λύση του ανάστροφου προβλήματος διευθετεί τις παραμέτρους στη σχέση (3.3), οι οποίες δηλώνονται με  $x = (\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2)$ , προκειμένου η θεωρητική φαινόμενη αντίσταση να φαίνεται στη σχέση (3.2) όσο το δυνατό πιο κοντά σ' αυτή που



βρέθηκε με χρήση των αποτελεσμάτων, στη σχέση (3.1), από  $m$  ζεύγη μετρήσεων με διαφορετικές αποστάσεις, ώστε να κάνει:

$$\rho_{\alpha i}^c - \rho_{\alpha i}^t = \min \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (3.4)$$

ή

$$\sum_{i=1}^m |(\rho_{\alpha i}^c - \rho_{\alpha i}^t)| / \rho_{\alpha i}^t = \min. \quad (3.5)$$

Ο προσδιορισμός του μοντέλου του τριστρωματικού εδάφους είναι ένα γραμμικό βελτιστοποιημένο πρόβλημα πέντε μεταβλητών, το οποίο μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων. Η λύση του προκύπτει από την σχέση (3.4) ως ακολούθως:

$$g_i(x) = \rho_{\alpha i}^c(x) - \rho_{\alpha i}^t = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (3.6)$$

όπου διαφορετικό  $i$  αντιστοιχεί σε διαφορετικό  $\alpha$ .

#### *A. Λύση του μη γραμμικού συστήματος των εξισώσεων*

Το σύστημα (3.6), των μη γραμμικών εξισώσεων μπορεί να λυθεί με γενίκευση της μεθόδου των Newton – Kantorovich [6].

Η κύρια διαδικασία είναι :

- 1) Επιλέγει μία αρχική τιμή του  $x$ , δηλώνοντάς την με  $x^{(0)}$ .
- 2) Υπολογίζει τον Ιακωβιανό πίνακα:

$$A(x^{(0)}) = \begin{bmatrix} \partial g_1 / \partial \rho_1 & \partial g_1 / \partial \rho_2 & \partial g_1 / \partial \rho_3 & \partial g_1 / \partial h_1 & \partial g_1 / \partial h_2 \\ \partial g_2 / \partial \rho_1 & \partial g_2 / \partial \rho_2 & \partial g_2 / \partial \rho_3 & \partial g_2 / \partial h_1 & \partial g_2 / \partial h_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial g_m / \partial \rho_1 & \partial g_m / \partial \rho_2 & \partial g_m / \partial \rho_3 & \partial g_m / \partial h_1 & \partial g_m / \partial h_2 \end{bmatrix}_{[x=x^{(0)}}$$

- 3) Υπολογίζει το  $z^{(0)}$ , με την λύση του γραμμικού συστήματος των εξισώσεων που ακολουθούν:

$$A(x^{(0)})z^{(0)} + g(x^{(0)}) = 0, \quad (3.7)$$

$$\text{όπου } g(x^{(0)}) = [g_1(x^{(0)}), g_2(x^{(0)}), \dots, g_2(x^{(0)})]^T.$$

Από τη στιγμή που ο αριθμός των εξισώσεων  $m$  είναι, συνήθως, μεγαλύτερος από τον αριθμό των αγνώστων, που εδώ είναι πέντε, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος του ελαχίστου τετραγώνου ώστε να λυθεί το σύστημα, το οποίο είναι η γενίκευση της μεθόδου των Newton – Kantorovich.

- 4) Αποδίδει  $x^{(1)} = x^{(0)} + z^{(0)}$ . Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προσεγγίσουμε το όριο σφάλματος.

Στη διαδικασία απαιτούνται οι παράγωγοι του  $g_i(\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2)$  σε αναφορά των  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2$ , για να συμπληρώσουμε τον Ιακωβιανό πίνακα. Από την σχέση (3.2) μπορούμε να δούμε ότι για να βρούμε τις παραγώγους της  $g_i$  πρέπει να υπολογίσουμε τις παραγώγους της  $f$  που δίνονται από την σχέση (3.3), οι οποίες είναι:

$$\begin{aligned} df / d\lambda &= (-2 \cdot k_1 \cdot h_1 \cdot B + D \cdot A \cdot k_2) / E - (k_1 \cdot B + A \cdot k_2) \cdot G \\ df / dh_1 &= F / E + (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot F \\ df / dh_2 &= -2 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot A / E - (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot (-2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot C + 2 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot A) \\ df / d\rho_1 &= -2 \cdot \rho_2 / (\rho_2 + \rho_1)^2 \cdot dFdK_1, \\ df / d\rho_2 &= dFdK_1 \cdot 2 \cdot \rho_1 / (\rho_2 + \rho_1)^2 + dFdK_2 \\ df / d\rho_3 &= 2 \cdot \rho_2 / (\rho_3 + \rho_2)^2 \cdot dFdK_2 \\ A &= \exp((-2 \cdot h_1 - 2h_2) \cdot \lambda), \quad B = \exp(-2 \cdot h_1 \cdot \lambda), \\ C &= \exp(-2 \cdot h_2 \cdot \lambda), \quad D = (-2 \cdot h_1 \cdot -2 \cdot h_2), \\ E &= 1 + k_1 \cdot k_2 \cdot C - k_1 \cdot B - k_2 \cdot A, \quad E_2 = E \cdot E, \\ F &= -2 \cdot k_1 \cdot \lambda \cdot B - 2 \cdot k_2 \cdot \lambda \cdot A, \\ G &= (-2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot h_2 \cdot C + 2 \cdot k_1 \cdot h_1 \cdot B - D \cdot A \cdot k_2) / (E \cdot E), \\ dFdK_1 &= B / E - (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot (k_2 \cdot C - B), \\ dFdK_2 &= A / E - (k_1 \cdot B + k_2 \cdot A) / E_2 \cdot (k_1 \cdot C - A). \end{aligned}$$

### B. Λύση του ολοκληρώματος με όριο στο άπειρο.

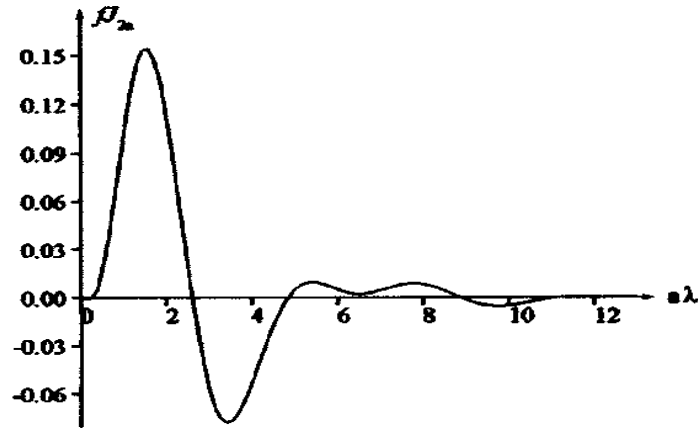
Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας της γενικευμένης μεθόδου Newton – Kantorovich, θα πρέπει να υπολογιστούν η θεωρητική φαινόμενη ειδική αντίσταση για κάθε απόσταση  $a$  των ηλεκτροδίων και οι παράγωγοι από την φαινόμενη ειδική αντίσταση, η οποία περιλαμβάνει τον υπολογισμό από τα ολοκληρώματα με όρια από το  $0 - \infty$  που σχετίζονται με τις σχέσεις (3.2), (3.3) και το πίνακα με του τύπου της προηγούμενης σελίδας. Είναι αδύνατον να βρούμε τη θεωρητική λύση των ολοκληρωμάτων, οπότε πρέπει να υιοθετηθεί η αριθμητική ολοκλήρωση που να προσεγγίζει τη λύση. Στην αριθμητική προσέγγιση, το όριο του απείρου πρέπει να αντικατασταθεί με μία μεγάλη τιμή, δηλωμένη με  $\lambda_{max}$ . Προφανώς, ο ορισμός του  $\lambda_{max}$  επηρεάζει μαζί την ακρίβεια της εκτίμησης και τον χρόνο υπολογισμού. Μεγαλύτερο  $\lambda_{max}$  προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά απαιτεί περισσότερες αριθμητικές ολοκληρώσεις θέσεων και μεγαλύτερο χρόνο υπολογισμού. Για να φτιάξεις ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα, πρέπει να κατασκευαστεί μία μέθοδος για το προσδιορισμό του  $\lambda_{max}$ .

#### 1) Χαρακτηριστικά των ολοκληρωτικών παραστάσεων:

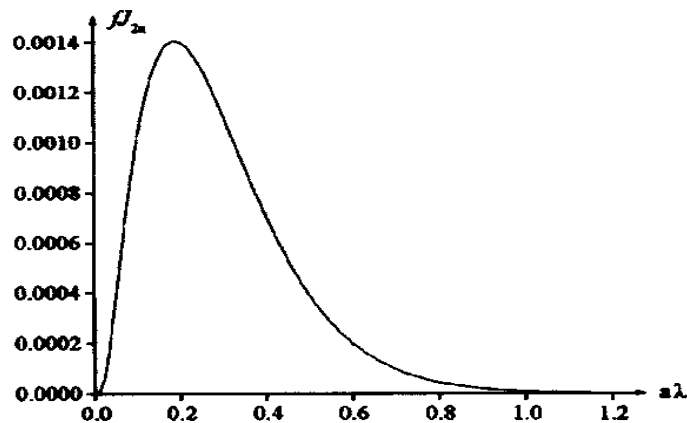
Οι ολοκληρωτικές παραστάσεις σχετίζονται με τους συντελεστές Bessel  $[J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$  όπως φαίνονται στη σχέση (3.2). Ως εκ τούτου, οι συναρτήσεις ολοκλήρωσης πρέπει να είναι μία συνάρτηση ταλάντωσης σε σχέση με το  $\lambda$ . Το Σχήμα 3.3 είναι το γράφημα της  $f(\lambda)[J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$ , όπου δείχνεται με  $f_{J_{2\alpha}}$ , για  $\rho_1=100$ ,  $\rho_2=200$ ,  $\rho_3=70$ ,  $h_1=5$ ,  $h_2=20$ ,  $\alpha=30$ . Οποσδήποτε, εάν ο συντελεστής συνάρτησης της  $J_{2\alpha} = [J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$ , ο οποίος μπορεί να είναι η  $f$  ή η παράγωγός της, ελαττώνεται γρήγορα, η  $f_{J_{2\alpha}}$  μπορεί να θεωρηθεί ως μία συνάρτηση χωρίς ταλάντωση. Σχήμα 3.4 το γράφημα της  $f_{J_{2\alpha}}$  για  $\rho_1=100$ ,  $\rho_2=200$ ,  $\rho_3=70$ ,  $h_1=5$ ,  $h_2=20$ ,  $\alpha=1$ . Στη συνέχεια θεωρούμε μόνο τη  $f_{J_{2\alpha}}$ , εφόσον είναι το ίδιο να ορίσουμε το  $\lambda_{max}$  για εκτίμηση των ολοκληρωμάτων θεωρώντας τις παραγώγους της  $f$  στον Ιακωβιανό πίνακα.

#### 2) Ο ορισμός του $\lambda_{max}$ με αντικατάσταση του απείρου ορίου: Για τις περιπτώσεις συνάρτησης ταλάντωσης ή συνάρτησης χωρίς ταλάντωση

των συναρτήσεων ολοκλήρωσης, πρέπει να θεωρηθούν διαφορετικές προσεγγίσεις για να καθοριστεί το  $\lambda_{max}$ .



Σχήμα 3.3: Η προς ολοκλήρωση συνάρτηση ταλάντωσης, με άπειρο όριο ολοκλήρωσης.



Σχήμα 3.4: Η προς ολοκλήρωση συνάρτηση, περίπτωση χωρίς ταλάντωση.

Το κύριο χαρακτηριστικό της  $f(\lambda)$  είναι ότι όταν το  $\lambda$  τείνει στο άπειρο το όριό της είναι μηδέν. Γι' αυτό, μία μέγιστη τιμή του  $\lambda$  ( που συμβολίζεται με  $\lambda_{fmax}$  ) μπορεί να βρεθεί για να κάνει τη τιμή της  $f(\lambda)$  αρκετά μικρή σε σχέση με μία μέγιστη τιμή της  $f(\lambda)$ . Μία προσέγγιση μπορεί να υιοθετηθεί όταν η τιμή της  $f(\lambda)$  είναι μηδέν για  $\lambda$  μεγαλύτερο από  $\lambda_{fmax}$  . Το  $\lambda_{fmax}$  μπορεί να βρεθεί με μία διερεύνηση κατά μήκος του άξονα  $\lambda$ . Οι περιπτώσεις συναρτήσεων ταλάντωσης και μη ταλάντωσης των

ολοκληρωτικών παραστάσεων μπορεί να διακριθούν ανάλογα με το  $\lambda_{fmax}$ . Εάν το γινόμενο του  $\lambda_{fmax}$  επί  $\alpha$  είναι μικρότερο του 2.61, το οποίο είναι το πρώτο σημείο μηδενισμού της  $J_{2\alpha}$ , το ολοκλήρωμα πρέπει να είναι στη περίπτωση της συνάρτησης μη ταλάντωσης. Για την περίπτωση συνάρτησης ταλάντωσης το ολοκλήρωμα μπορεί να εκτιμηθεί χωρίζοντάς το σε μικρά διαστήματα ως ακολούθως:

$$\int_0^{\infty} fJ_{2\alpha} d\lambda = \sum_{i=0}^n \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} fJ_{2\alpha} d\lambda \quad (3.8)$$

όπου  $\lambda_i$  επί  $\alpha$  είναι τα σημεία μηδενισμού του  $J_{2\alpha}$ , το  $n$  καθορίζεται με έλεγχο εάν η απόλυτη τιμή του ολοκληρώματος με όριο από  $\lambda_n$  έως  $\lambda_{n+1}$  είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με το άθροισμα των τιμών που πήραμε στο προηγούμενο διάστημα. Εδώ το  $\lambda_{n+1}$  είναι σχεδόν το  $\lambda_{fmax}$  που θέλουμε να ορίσουμε. Αφού, στην περίπτωση της συνάρτησης ταλάντωσης ο ορισμός του  $\lambda_{max}$  προκύπτει απλά στην εκτίμηση του διαστήματος ολοκλήρωσης.

Για την περίπτωση της συνάρτησης χωρίς ταλάντωση η βασική ιδέα της επιλογής του  $\lambda_{max}$  κάνει το  $fJ_{2\alpha}(\lambda_{max})$  να προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή  $fJ_{2\alpha}(\lambda)$  την στιγμή ενός οριακού σφάλματος  $\varepsilon$ , με  $\varepsilon = 0.005$ . Αφού το πρώτο που έχουμε να κάνουμε είναι να υπολογίσουμε με εκτίμηση τη μέγιστη τιμή της  $fJ_{2\alpha}(\lambda)$ , η οποία δηλώνεται ως  $fJ_{max}(\lambda_{ffmax})$ . Για να βρεθεί το  $fJ_{max}$  να αποκτήσουμε κατευθείαν την παράγωγο της  $ff(\lambda)$  και να λύσουμε την εξίσωση  $df/d\lambda = 0$  για να πάρουμε το  $\lambda_{ffmax}$ . Δυστυχώς δεν είναι εύκολο να πάρουμε τη λύση γι' αυτό για να βρούμε το  $ff_{max}$  πρέπει να υιοθετήσουμε μια μέθοδο ανεύρεσης κατά μήκος του άξονα  $\lambda$  στην οποία οι τιμές της  $f$  και της  $j_{2\alpha}$  πρέπει να υπολογιστούν πολλές φορές και ο υπολογισμός της συνάρτησης Bessel είναι χρονοβόρος. Για να αυξήσουμε την αποτελεσματικότητα του προγράμματος είναι απαραίτητο να βρεθεί ένας εύκολος τρόπος υπολογισμού της  $J_{2\alpha} = [J_0(\alpha\lambda) - J_0(2\alpha\lambda)]$ .

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι σχεδόν αδύνατο να βρεθεί η ακριβής μέγιστη τιμή της  $fJ(\lambda)$  με αυτή την διαδικασία ανεύρεσης. Στην πραγματικότητα δεν είναι απαραίτητο να βρεθεί η ακριβής τιμή αφού η  $fJ_{max}$  χρησιμοποιείται μόνο σα βάση για να προσδιοριστεί το  $\lambda_{max}$ , μαζί με ένα όριο σφάλματος  $\varepsilon$ . Η τιμή του  $\lambda_{max}$  θα επηρεαστεί από την τιμή των  $\varepsilon$  και  $fJ_{max}$ . Όσο το  $\lambda_{max}$  είναι αρκετά μεγάλο η αλλαγή

του σε ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών, σχεδόν δεν επηρεάζει την ακρίβεια της ολοκλήρωσης, αφού το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης εξαρτάται κυρίως από την τιμή της συνάρτησης ολοκλήρωσης γύρω από το  $\lambda fJ_{max}$ , αλλά όχι γύρω από το  $\lambda_{max}$ . Για αυτό η κατά προσέγγιση εκτίμηση της  $J_{1\alpha}$  είναι αποδεκτή στην ανεύρεση της  $fJ_{max}$  και  $\lambda_{max}$ . Η συνάρτηση  $J_{2\alpha}$  μεταξύ του διαστήματος του  $\lambda$  από 0 έως 2.61 μπορεί κατά προσέγγιση να δοθεί απ' την ακόλουθη έκφραση:

$$J_{2\alpha}(\lambda) \approx \tilde{J}_{2\alpha}(\lambda) = \begin{cases} e^{0.558 \lambda^2} - 1 & \lambda < 0.7 \\ 0.776 \sin[1.42(l - 0.406)] & \lambda \geq 0.7 \end{cases} \quad (3.9)$$

Τώρα μπορούμε να βρούμε μια προσεγγιστική  $fJ_{max}$  μέσω μίας διαδικασίας ανεύρεσης βασισμένης στην  $\tilde{fJ}_{2\alpha}$  σε ένα πολύ μικρό υπολογιστικό χρόνο. Αμέσως μετά η  $\lambda_{max}$  μπορεί να βρεθεί από την ίδια διαδικασία.

#### Γ. Καθορισμός αρχικών τιμών :

Για να επιταχύνουμε την σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου, οι αρχικές τιμές πρέπει να καθοριστούν ξεκάθαρα. Γι' αυτό το λόγο ας δούμε κάποιες άλλες ιδιότητες της καμπύλης της φαινόμενης αντίστασης εκτός από την ιδιότητα των δύο οριακών σημείων. Για μοντέλα ενός στρώματος η κατανομή της ειδικής αντίστασης κατά μήκος με διαφορετικό  $\alpha$  είναι μία ευθεία γραμμή. Για μοντέλα με δύο στρώματα είναι μία καμπύλη χωρίς καμία ακραία τιμή. Για τρία στρώματα είναι μία καμπύλη χωρίς ή με μία ακραία τιμή όπως τα αποτελέσματα που βρίσκονται στο Σχήμα 3.2. Εάν  $\rho_2$  είναι μεγαλύτερη από τα  $\rho_1$  και  $\rho_3$  μαζί η καμπύλη έχει συνήθως ένα μέγιστο και αν το  $\rho_2$  είναι μικρότερο από το άθροισμα τους τότε έχει συνήθως ένα ελάχιστο. Σε κάθε άλλη περίπτωση δεν υπάρχει κανένα ακρότατο.

Με βάση την υπολογιστική εμπειρία και την αρχή του τεστ των τεσσάρων ηλεκτροδίων, η μέθοδος για το καθορισμό των αρχικών τιμών ακολουθεί αμέσως μετά.

- (1) Η αρχική τιμή του  $h_l$  συμβολίζεται με  $h_{lim}$ , θέτεται στην τιμή της απόστασης του ηλεκτροδίου  $a$  στην οποία το γόνατο της καμπύλης της φαινόμενης ειδικής

αντίστασης αρχίζει να μεταβάλλεται γρηγορότερα π.χ. το τέταρτο σημείο με  $\alpha=14$  στο Σχήμα 3.2.

- (2) Για την καμπύλη με ένα τοπικό ακρότατο,  $h_{2in}$  θέτουμε  $\alpha_s - h_{1in}$ , όπου  $\alpha_s$  είναι η τιμή του  $\alpha$  στην οποία το γόνατο της καμπύλης αλλάζει γρηγορότερα κοιτώντας στα σημεία από το μέγιστο  $\alpha$  προς τα μικρότερα  $\alpha$ .
- (3) Ο καθορισμός των αρχικών τιμών για  $\rho_1$  και  $\rho_3$  που δόθηκε πιο πάνω βασίζεται στην ιδιότητα των δύο οριακών τιμών π.χ. οι αρχικές τιμές για  $\rho_1$  και  $\rho_3$  είναι 117.2 και 94.1 αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.2.
- (4) Εάν η καμπύλη της φαινόμενης ειδικής αντίστασης δεν έχει τοπικό ακρότατο η αρχική τιμή  $\rho_{2in}$  μπορεί απλώς να τεθεί ίση με  $(\rho_{1in} + \rho_{2in})/2$ . εάν η καμπύλη έχει τοπικό ακρότατο τότε αυτό μπορεί προσεγγιστικά να δοθεί από την σχέση

$$\rho_{\max} = (\rho_{1in}h_1 + \rho_{2in}h_2)/(h_1 + h_2) \quad (3.10)$$

η οποία μπορεί να θεωρηθεί σαν το αποτέλεσμα της σε σειρά σύνδεσης δύο αντιστάσεων όσον αφορά το πάνω και το μεσαίο στρώμα του γήινου μοντέλου. Από την (3.10) μπορούμε να πάρουμε την (3.11).

$$\rho_{2in} = \rho_{\max} + (\rho_{\max} - \rho_{1in})h_1 / h_2. \quad (3.11)$$

Στην σχέση (3.11) η τιμή του  $\rho_{2in}$  είναι 119.0 για το παράδειγμα στο Σχήμα 3.2 όταν  $\rho_2$  είναι μικρότερο από τα  $\rho_1$  και  $\rho_3$ , το  $\rho_{2in}$  που υπολογίζεται από την σχέση (3.11) μπορεί να είναι αρνητικό σε ορισμένες περιπτώσεις. Εάν συμβεί αυτό η  $\rho_{2in}$  μπορεί απλώς να τεθεί ίση με  $\rho_{\max}/2$ .

Με βάση την ιδιότητα των δύο οριακών τιμών οι παράμετροι  $\rho_1$  και  $\rho_3$  μπορούν να προσδιοριστούν προσεγγιστικά, αυτές οι προσεγγιστικές τιμές μπορούν να θεωρηθούν ως πραγματικές τιμές ώστε το πρόβλημα των πέντε μεταβλητών να απλουστευθεί σε ένα τριών μεταβλητών. Φυσικά το πρόβλημα με τις πέντε μεταβλητές απαιτεί ένα πιο αποδοτικό επαναληπτικό αλγόριθμο από το πρόβλημα με τρεις μεταβλητές για να επιτευχθεί σωστή και γρήγορη σύγκλιση.

### 3.5 Πειραματικές μετρήσεις της ειδικής αντίστασης εδάφους - επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Στα πλαίσια της μελέτης μας για την πολυστρωματική δομή του εδάφους πραγματοποιήσαμε πειραματικές μετρήσεις στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου αλλά και σε άλλους χώρους. Πραγματοποιήθηκαν στο παρτέρι που βρίσκεται πίσω από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, σε άλλο επίσης παρτέρι στο πίσω μέρος της βιβλιοθήκης, στο χώρο που είναι ανάμεσα στο γήπεδο ποδοσφαίρου του Ε.Μ.Π. και το δρόμο καθώς και στο άλσος απέναντι από τη φοιτητική εστία της Πανεπιστημιούπολης Αθηνών. Ακόμα δίνονται τα αποτελέσματα μετρήσεων που διεξήχθησαν στην Αγγλία με την ίδια μέθοδο και με όμοιο όργανο μέτρησης.

Σκοπός των πειραματικών μετρήσεων είναι η μέτρηση της ειδικής αντίστασης διαφορετικών δομών εδάφους ώστε να εξάγουμε συμπεράσματα για την ομοιογένεια τους ή την πολυστρωματικότητά τους, καθώς και η σύγκριση τους με αποτελέσματα μοντέλων ομοιογενών και πολυστρωματικών εδαφών.

Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τα γειωσόμετρα MIT 904 της PANTEC και SATURN GEO-X της LEM. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατεγράφησαν με την βοήθεια του υγρομέτρου – θερμομέτρου Dostmann H270. Για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *Wenner*, χρησιμοποιήσαμε δηλαδή τέσσερα ηλεκτρόδια σε βάθος 30cm τα οποία τοποθετούνταν σε ευθεία γραμμή, σε ίση απόσταση  $a$  μεταξύ τους και σε επίπεδο πάντα έδαφος. Για να έχουμε καλύτερη ακρίβεια, σε περιπτώσεις ιδιόμορφων εδαφών (δηλαδή σημαντική μεταβολή της τιμής της αντίστασης σε πολύ κοντινές τιμές του  $a$ ), οι μετρήσεις έγιναν με διακριτό βήμα του ενός μέτρου.

Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης, χρησιμοποιήσαμε δύο σχέσεις, όπου στην μία λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο η απόσταση  $a$  μεταξύ των ηλεκτροδίων ενώ στην άλλη συμπεριλαμβάνεται και το βάθος τοποθέτησης  $b$ :



$$\rho_{\varepsilon} = 2\pi R_{\varepsilon} \alpha \quad \text{σε } \Omega \cdot m \quad (3.12)$$

$$\rho_{\varepsilon}^* = \frac{4\pi R_{\varepsilon} \alpha}{\left(1 + \frac{2\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + b^2}}\right)} \quad \text{σε } \Omega \cdot m \quad (3.13)$$

Όπου:

$\rho_{\varepsilon}$ : ειδική αντίσταση που υπολογίζεται μόνο με βάση την απόσταση των ηλεκτροδίων  $\alpha$ .

$\rho_{\varepsilon}^*$ : ειδική αντίσταση που υπολογίζεται με βάση την απόσταση των ηλεκτροδίων  $\alpha$  αλλά και το βάθος μέτρησης  $b$ .

$R_{\varepsilon}$ : μετρούμενη αντίσταση εδάφους στην εκάστοτε μέτρηση.

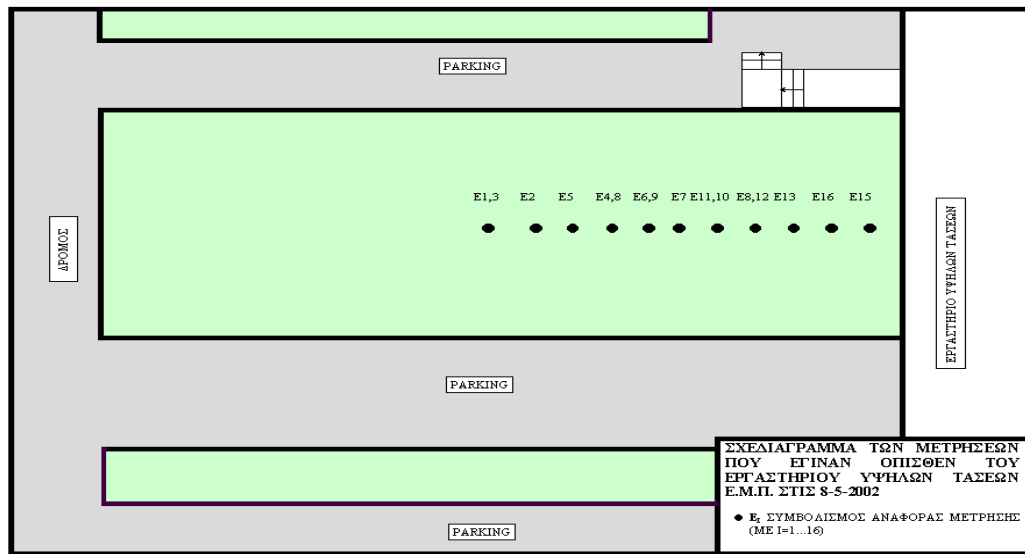
Ακολουθούν οι πειραματικές μετρήσεις καθώς και στοιχεία, για τις συνθήκες και τον τόπο πραγματοποίησής τους:

ΠΕΜΠΤΗ 09-05-2002

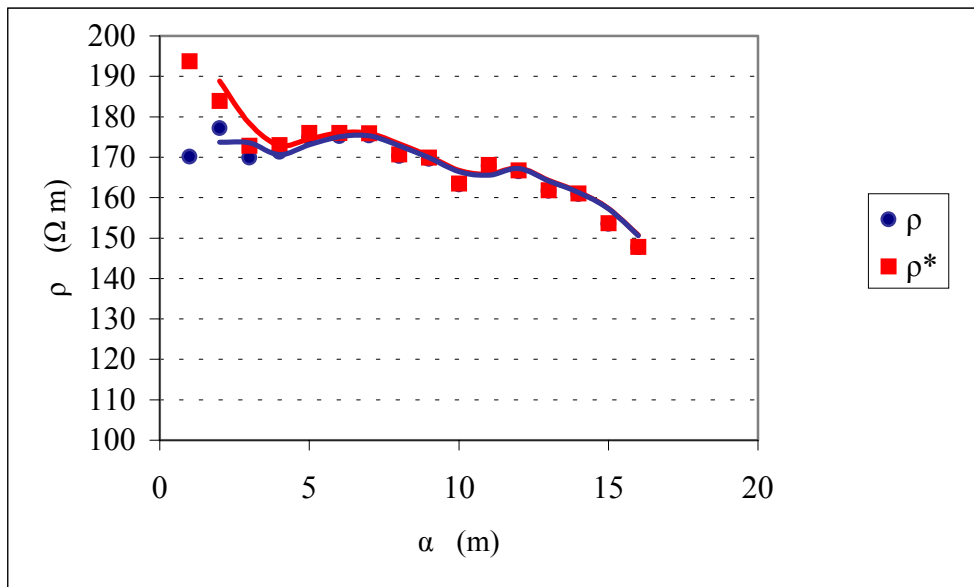
Θερμοκρασία από 20 °C έως 23 °C  
 Υγρασία από 35% έως 45%  
 Τοποθεσία : Παρτέρι όπισθεν εργαστηρίου Υ.Τ.

$\alpha$ (m)	$R_{\varepsilon}$ ( $\Omega$ )	$\rho_{\varepsilon}$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_{\varepsilon}^*$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	27,10	170,19	193,71
2	14,11	177,22	183,96
3	9,02	169,94	172,86
4	6,82	171,32	172,99
5	5,57	174,90	175,99
6	4,65	175,21	175,98
7	3,99	175,40	175,96
8	3,39	170,31	170,73
9	3,00	169,56	169,89
10	2,60	163,28	163,54
11	2,43	167,86	168,08
12	2,21	166,55	166,73
13	1,98	161,65	161,80
14	1,83	160,89	161,02
15	1,63	153,55	153,65
16	1,47	147,71	147,796

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις στο παρτέρι όπισθεν του εργαστηρίου Υ.Τ.



Σχήμα 3.5: Παρτέρι όπισθεν εργαστηρίου Υ.Τ.



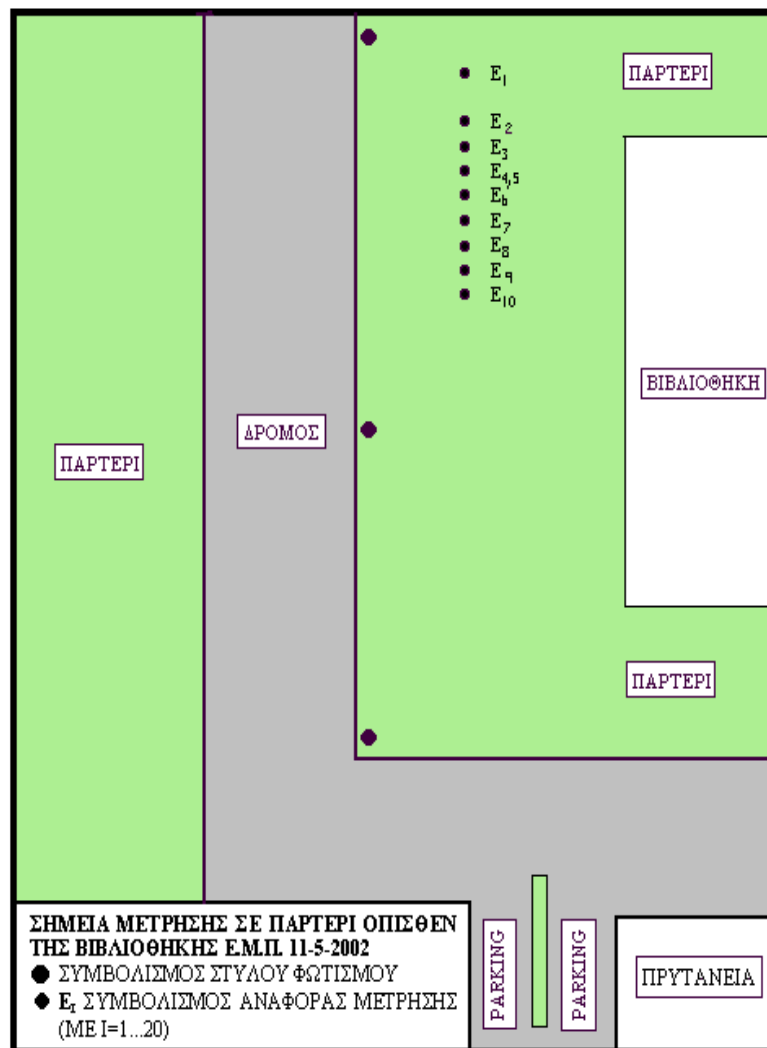
Σχήμα 3.6: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την απόσταση α των ηλεκτροδίων στο παρτέρι όπισθεν του εργαστηρίου Υ.Τ.

Σάββατο 11-5-2002

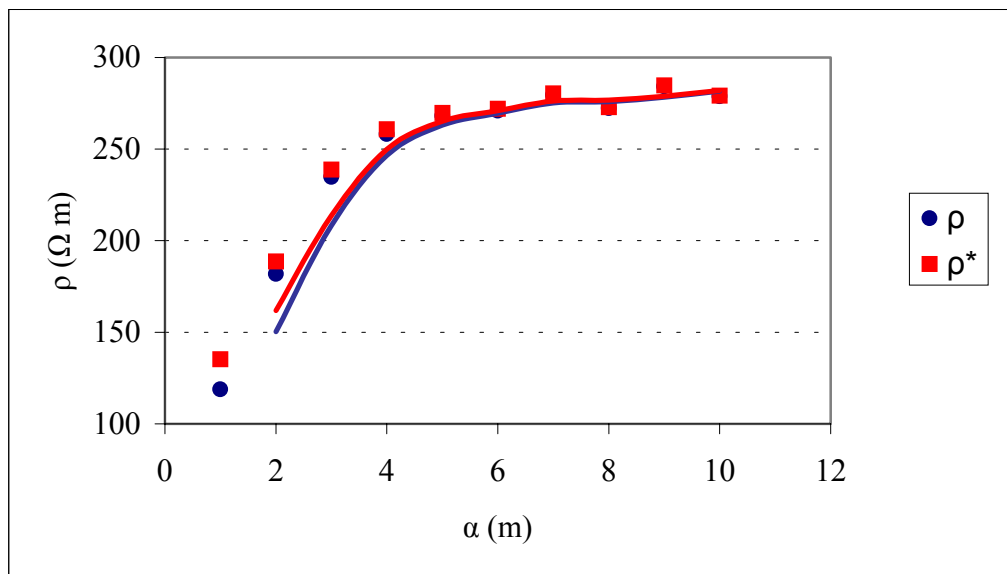
Θερμοκρασία από 26 °C έως 30 °C  
Υγρασία από 43,5% έως 48%  
Τοποθεσία: Βιβλιοθήκη

$\alpha$ (m)	$R_{\varepsilon}$ ( $\Omega$ )	$\rho_{\varepsilon}$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho^*_{\varepsilon}$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	18,92	118,82	135,24
2	14,47	181,74	188,66
3	12,46	234,75	238,79
4	10,28	258,23	260,75
5	8,54	268,16	269,84
6	7,19	270,92	272,10
7	6,36	279,59	280,48
8	5,42	272,30	272,97
9	5,03	284,30	284,85
10	4,44	278,83	279,27

Πίνακας 3.2: Μετρήσεις στη βιβλιοθήκη.



Σχήμα 3.7: Βιβλιοθήκη.

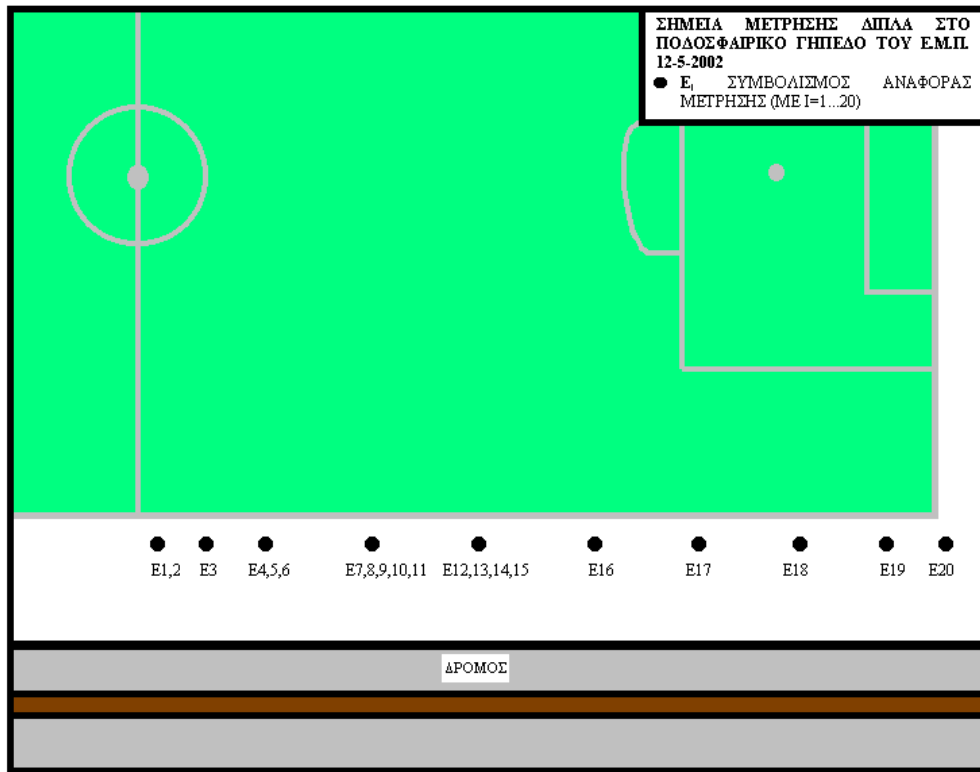


Σχήμα 3.8: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την απόσταση  $\alpha$  των ηλεκτροδίων στη βιβλιοθήκη.

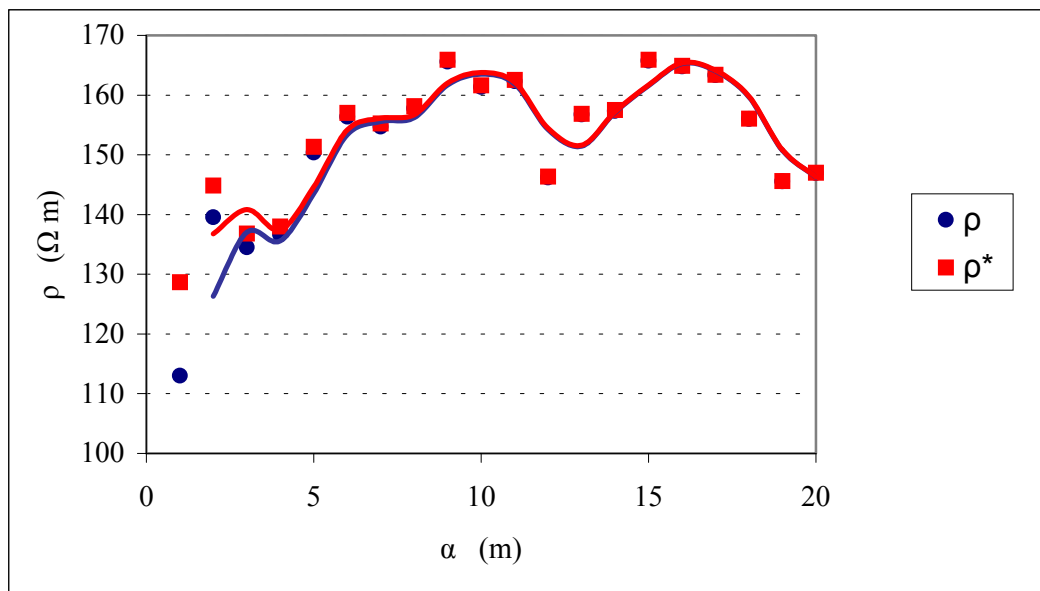
Κυριακή 12-5-2002  
 Θερμοκρασία από 27 °C έως 30 °C  
 Υγρασία από 47% έως 51%  
 Τοποθεσία : Γήπεδο ποδοσφαίρου

$\alpha$ (m)	$R_{\varepsilon}$ ( $\Omega$ )	$\rho_{\varepsilon}$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_{\varepsilon}^*$ ( $\Omega \cdot m$ )
1	18	113,04	128,66
2	11,11	139,54	144,85
3	7,14	134,52	136,84
4	5,44	136,65	137,99
5	4,79	150,41	151,35
6	4,15	156,37	157,05
7	3,52	154,74	155,24
8	3,14	157,75	158,14
9	2,93	165,60	165,93
10	2,57	161,40	161,65
11	2,35	162,34	162,55
12	1,94	146,20	146,36
13	1,92	156,75	156,89
14	1,79	157,38	157,50
15	1,76	165,79	165,91
16	1,64	164,79	164,89
17	1,53	163,34	163,43
18	1,38	155,99	156,07
19	1,22	145,57	145,63
20	1,17	146,95	147,01

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις στο γήπεδο ποδοσφαίρου.



Σχήμα 3.9: Γήπεδο ποδοσφαίρου.



Σχήμα 3.10: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την απόσταση  $\alpha$  των ηλεκτροδίων στο γήπεδο ποδοσφαίρου.

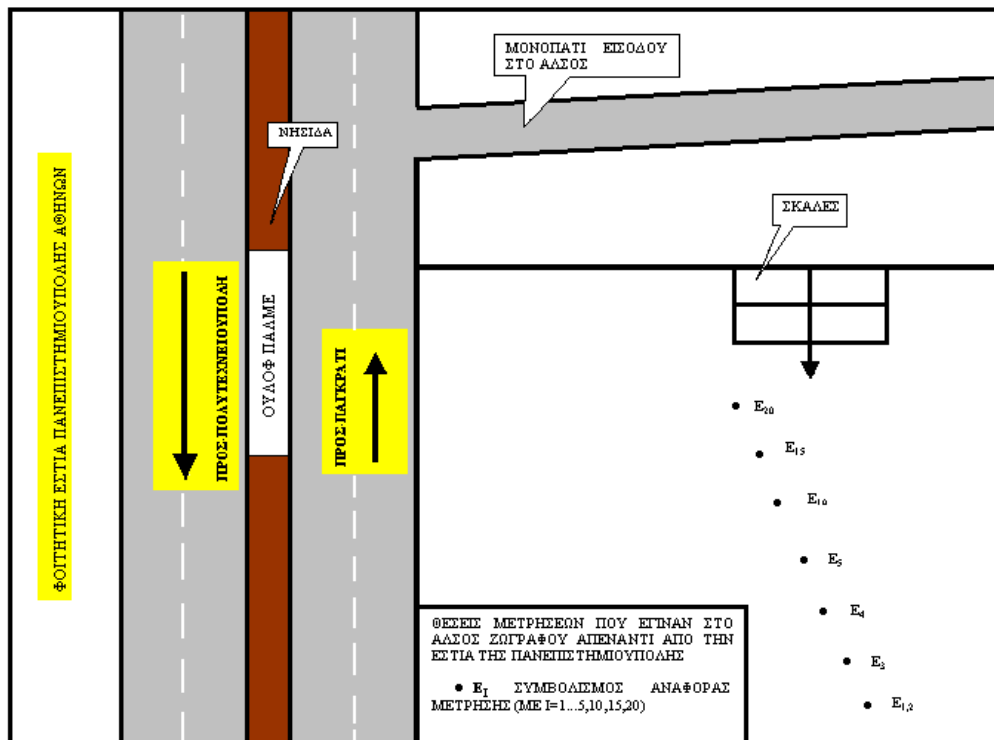
ΤΕΤΑΡΤΗ 15-5-2002

Θερμοκρασία 25 °C  
Υγρασία 44%

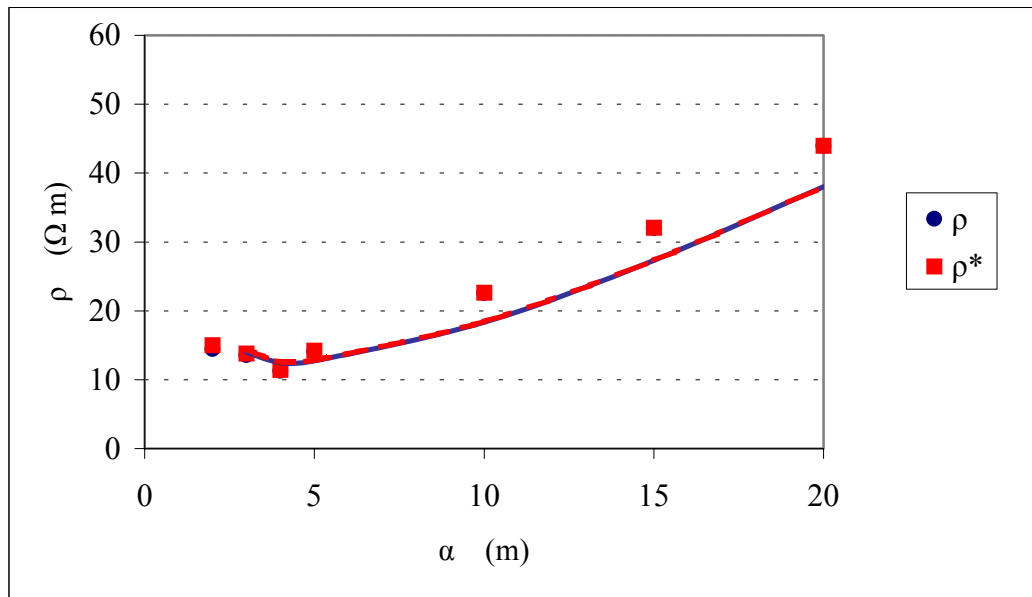
Τοποθεσία : Άλσος έναντι εστίας Πανεπιστημιούπολης Αθηνών

$\alpha$ (m)	$R_{\varepsilon}$ ( $\Omega$ )	$\rho_{\varepsilon}$ ( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_{\varepsilon}^*$ ( $\Omega \cdot m$ )
2	1,15	14,44	14,99
3	0,72	13,56	13,80
4	0,45	11,30	11,41
5	0,45	14,13	14,22
10	0,36	22,61	22,64
15	0,34	32,03	32,05
20	0,35	43,96	43,98

Πίνακας 3.4: Μετρήσεις στο άλσος έναντι εστίας Πανεπιστημιούπολης Αθηνών.



Σχήμα 3.11: Άλσος έναντι εστίας Πανεπιστημιούπολης Αθηνών.



Σχήμα 3.12: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την απόσταση  $\alpha$  των ηλεκτροδίων στο άλσος έναντι εστίας Πανεπιστημιούπολης Αθηνών.

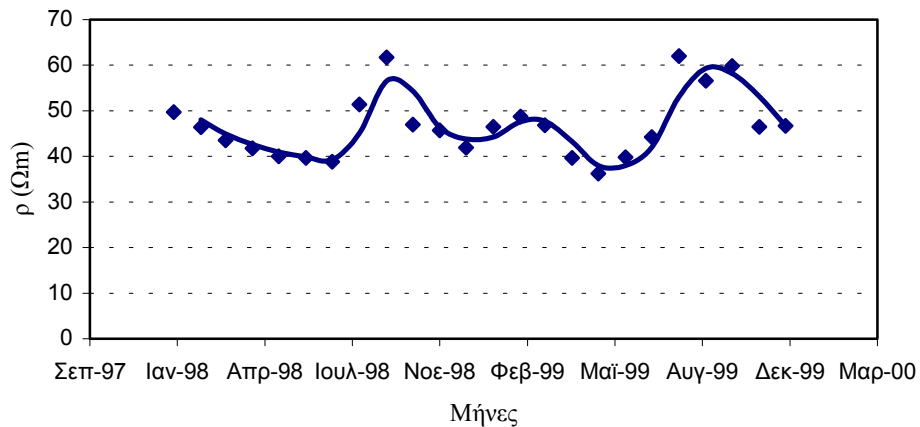
01/98-12/99  
 Θερμοκρασία: δίνεται μέση σε κάθε μήνα  
 Υγρασία: δίνεται μέση σε κάθε μήνα  
 Τοποθεσία: Ryarsh Vicarage, England

Μήνας	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ ) για αντίστοιχα $\alpha$ (m)				Precipitation (mm)	Θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$
	1	2	3	4		
01/98	49.7	51.1	61.1	74.1	18.0	4
02/98	46.4	51.5	62.2	75.4	6.5	5
03/98	43.5	48.8	59.8	71.9	43.5	7
04/98	41.8	45.7	56.7	68.9	84.0	9
05/98	40.0	42.7	53.6	65.9	11.0	13
06/98	39.7	43.5	54.9	65.6	77.0	16
07/98	38.8	40.6	54.1	66.4	18.0	19
08/98	51.4	49.0	62.2	74.1	10.5	18
09/98	61.7	54.8	63.2	75.9	80.7	16
10/98	47.0	50.5	61.8	73.9	136.0	12
11/98	45.7	42.7	52.9	66.6	79.5	7
12/98	41.9	47.0	58.1	70.6	66.0	6

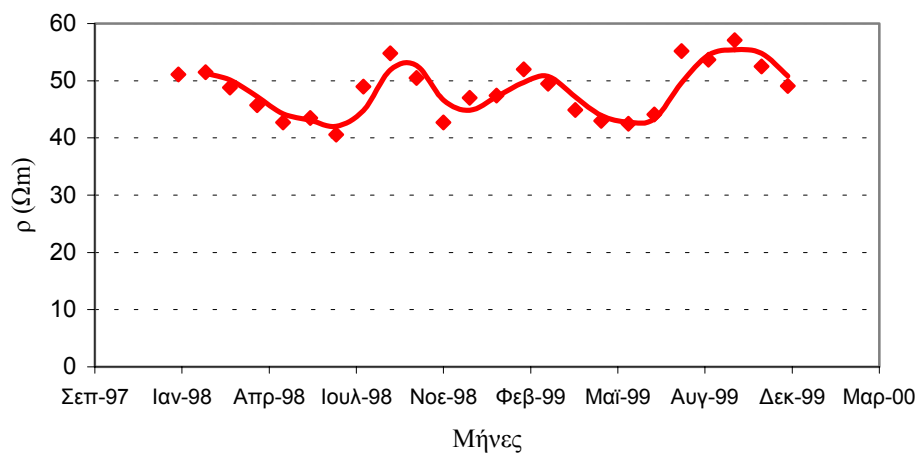
Πίνακας 3.5α: Μετρήσεις στο Ryarsh Vicarage της Αγγλίας κατά το έτος 1998.

Μήνας	$\rho$ ( $\Omega m$ ) για αντίστοιχα $a$ (m)				Precipitation (mm)	Θερμοκρασία $^{\circ}C$
01/99	46.5	47.4	57.9	70.6	107	8.1
02/99	48.7	52.0	61.4	73.1	20	7.7
03/99	46.8	49.5	59.9	72.9	45	10.6
04/99	39.7	44.9	55.4	68.1	30	13.5
05/99	36.2	43.0	55.2	67.9	15	19.6
06/99	39.8	42.5	54.3	68.1	50	22.6
07/99	44.2	44.1	58.1	73.1	3	25.7
08/99	62.0	55.2	62.8	74.6	106	23.3
09/99	56.6	53.7	65.0	78.7	92	21.1
10/99	59.8	57.1	65.6	78.9	56	15.2
11/99	46.5	52.5	65.8	77.9	29	9.8
12/99	46.7	49.1	62.2	78.4	116	7.7

Πίνακας 3.5β: Μετρήσεις στο Ryarsh Vicarage της Αγγλίας κατά το έτος 1999.

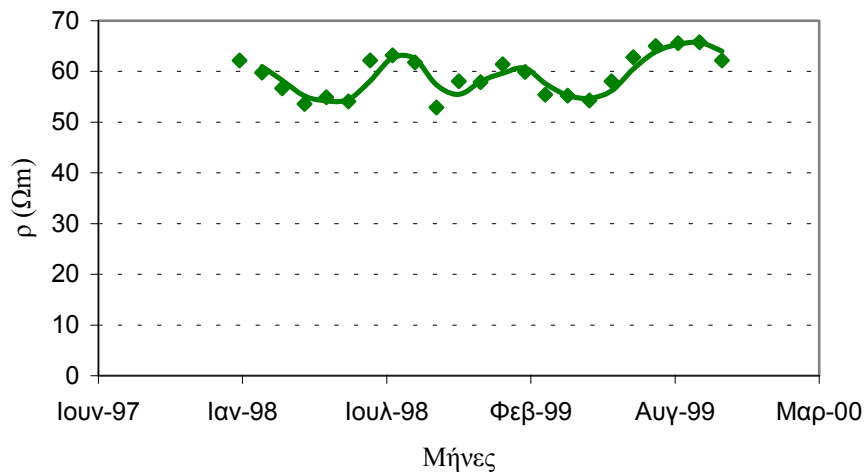


Σχήμα 3.13: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με το χρόνο για απόσταση  $a=1m$ .

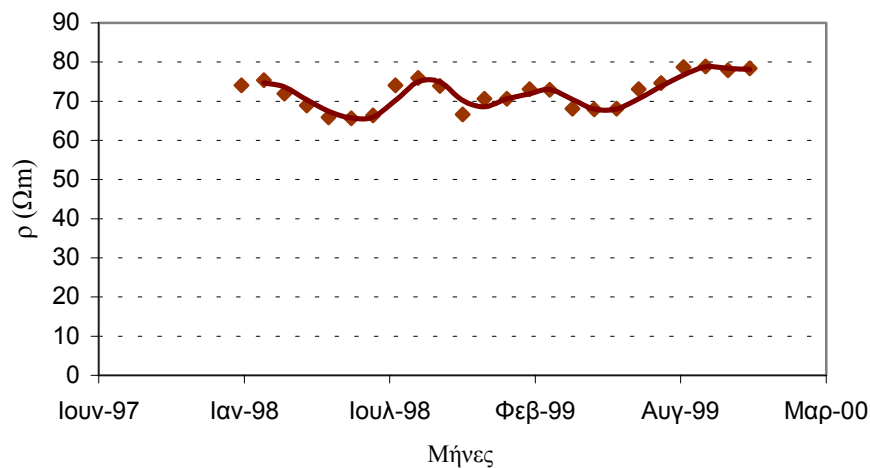


Σχήμα 3.14: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με το χρόνο για απόσταση  $a=2m$ .





Σχήμα 3.15: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με το χρόνο για απόσταση  $a=3m$ .



Σχήμα 3.16: Μεταβολή της μετρούμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με το χρόνο για απόσταση  $a=4m$ .

Με παρατήρηση των Σχημάτων 3.6, 3.8, 3.10, 3.12 μπορούμε να αποφανθούμε για τον αριθμό των στρωμάτων του προς εξέταση εδάφους. Πιο συγκεκριμένα η διακύμανση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και στα τέσσερα σχήματα μας δείχνει ότι το έδαφος είναι διστρωματικό, με  $\rho_1$  μεγαλύτερο του  $\rho_2$  στην περίπτωση του Σχήματος 3.6 και  $\rho_1$  μικρότερο του  $\rho_2$  στις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις (Σχήματα 3.8, 3.10, 3.12). Από τα Σχήματα 3.13-3.16 μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι όσο μεγαλώνει η απόσταση  $a$ , ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, τόσο αυξάνει και η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.13 έως 3.14, και δεδομένου ότι για  $a$  κοντά στο μηδέν μετράμε την ειδική αντίσταση του ανωτέρου

στρώματος, και για  $a$  με μεγάλη τιμή μετράμε την ειδική αντίσταση του κατώτερου στρώματος, βγάζουμε το συμπέρασμα από τις ότι και σε αυτή την περίπτωση το έδαφος είναι διστρωματικό, με το  $\rho_1$  να είναι μικρότερο του  $\rho_2$ .

### 3.6 Βιβλιογραφία

- [1] Seedher H.R., Arora J.K., “Estimation of two-layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No.3, July 1992, pp 1213-1217.
  - [2] Alamo J. L., “A comparison eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.8, No.4, October 1993, pp. 1890-1899.
  - [3] Huina Y., Yuan J., Zong W., “Determination of three-layer earth model from Wenner four-probe test data”, IEEE Transaction on Magnetics, Vol.37, September 2001, pp 3684-3687.
  - [4] Ma J., Dawalibi F. P., “Influence of inductive coupling between leads on ground impedance measurements using the fall -of- potential method”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, No.4, October 2001, pp. 739-743.
  - [5] Takahashi T., Kawase T., “Analysis of apparent resistivity in a multiplayer earth structure”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No.2, April 1990, pp. 604-612.
  - [6] Bronshtein I. N., Semendyayev K. A., “Handbook of Mathematics”, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
-

## ***Κεφάλαιο 4***

### ***ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΙ & ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ***

### ***ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ***

#### **4.1 Εισαγωγή**

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η σύγκριση, της απόδοσης οκτώ υπάρχουσων αλγοριθμικών τεχνικών (βασισμένες σε πέντε διαφορετικές μαθηματικές μεθόδους) [1], τόσο μεταξύ τους όσο και με μία ένατη τεχνική, η οποία αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. και στηρίζεται στους γενετικούς αλγόριθμους [2].

Οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται για την εύρεση των ηλεκτρικών παραμέτρων γείωσης σε διστρωματικό έδαφος (ειδικές αντιστάσεις και βάθος του στρώματος) σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο [1]. Ο υπολογισμός των παραμέτρων γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουμε τη καλύτερη δυνατή ταύτιση μεταξύ των τιμών της ειδικής αντίστασης που μετράμε με την μέθοδο Wenner και αυτών που υπολογίστηκαν με το μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους.

Στην παράγραφο 4.2 γίνεται μία μαθηματική ανασκόπηση των πέντε βελτιστοποιημένων μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των οκτώ διαφορετικών τεχνικών. Τρεις από αυτές είναι κατηγορία κλίσης πρώτης τάξης (First Order Gradient type), μία ακόμη δεύτερης τάξης (SO, μέθοδος Newton), η πέμπτη από αυτές είναι βασισμένη στην Levenberg–Marquardt μέθοδο, η έκτη στην Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδο, η έβδομη στην Quasi-Newton μέθοδο και η τελευταία στην μικτή Newton–Γενικευμένη ανάστροφη μέθοδο [1].

Στην 4.3 γίνεται μία εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους και τις δυνατότητες τους. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος γραμμένος σε κώδικα Matlab και, ο οποίος παρέχει άριστα αποτελέσματα σε προβλήματα ελαχιστοποίησης. Επίσης παρουσιάζονται και κάποια παραδείγματα εφαρμογών του τα οποία αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του [2].

Οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε έξι δοκιμαστικές υποθέσεις (δηλαδή, ζεύγη μετρήσεων που έγιναν με τη μέθοδο του Wenner). και γίνεται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων, στην παράγραφο 4.4.

## 4.2 Αλγοριθμικές τεχνικές υπολογισμού των παραμέτρων του εδάφους

### 4.2.1 Γενικά

Όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το αρχικό βήμα σχεδιασμού γειώσεων (για παράδειγμα ενός Υποσταθμού, Μετασχηματιστή Διανομής ή μίας γραμμής διανομής), είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις παραμέτρους που ορίζουν το έδαφος στο οποίο θα τοποθετηθούν οι γειώσεις. Ο υπολογισμός με εκτίμηση πρέπει πάντα να γίνεται βασισμένος σε μία ομάδα μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η πλειοψηφία των μετρήσεων δείχνει ότι το έδαφος, μέσα σε περιορισμένη έκταση, συμπεριφέρεται σαν να αποτελείται από δύο οριζόντια στρώματα διαφορετικής ειδικής αντίστασης [7, 10, 11, 16].

Η εκτίμηση του διστρωματικού παραμετρικού εδάφους για την επίτευξη του καλύτερου επιθυμητού αποτελέσματος ανάμεσα στις μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές της ειδικής αντίστασης, τονίζεται και στα [7, 8, 10, 11, 13, 14, 19]. Επίσης στο [17] παρουσιάζεται μία πολύ μεστή μεθοδολογία για την ανάλυση του εξελιγμένων τύπων του υπολογισμού φαινόμενης ειδικής αντίστασης πολυστρωματικών εδαφών παρουσιάζεται, και μία εκτίμηση ουσιαστικά πραγματοποιείται βασισμένη σε μία  $\rho$ - $r$  υπολογιστική τεχνική. Μέσα από τις αναφορές [12, 14] γίνεται εκτίμηση των παραμέτρων του εδάφους όταν μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί ακολουθώντας την μεθοδολογία της οδηγούμενης ράβδου. Στην [13] ένας υπολογισμός των αποτελεσμάτων αναφέρεται.

Όπως υποδεικνύεται στα [8, 14, 19], η πλειοψηφία αυτών των τεχνικών δεν είναι πολύ αποτελεσματικές διότι ακόμη εάν το έδαφος κατορθωθεί να έχει διστρωματική μορφή, οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν αργή σύγκλιση ή δεν έχουν αρκετή ευστάθεια ώστε να συγκλίνουν για την λύση. Οπωσδήποτε έχει δειχθεί στο [19] ότι μία δεύτερης τάξης τεχνική κλίσης είναι ικανή στο να φθάσει στο προσδοκώμενο απόλυτο ελάχιστο της αντικειμενικής συνάρτησης.

Οι τεχνικές που αναπτύσσονται στην επόμενη παράγραφο στηρίζονται στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προαναφερόμενη βιβλιογραφία.

#### 4.2.2 Μεθοδολογία

Προκειμένου να συγκρίνουμε την αποδοτικότητα διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των παραμέτρων του εδάφους, με σκοπό τη βέλτιστη ταύτιση των τιμών της ειδικής αντίστασης που μετρούνται με αυτές που υπολογίζονται χρησιμοποιούμε μία ομογενή διαδικασία του προβλήματος, βασισμένη στην ακόλουθη θεώρηση [3]:

1<sup>ο</sup> – Δεχόμαστε ότι το έδαφος αποτελείται από ομοιογενή οριζόντια επίπεδα, με διαφορετικές ειδικές αντιστάσεις,  $\rho_1$  και  $\rho_2$ , και  $z$  είναι το πλάτος του ανώτερου στρώματος.

$$K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1) \quad (4.1)$$

είναι ο συντελεστής ανάκλασης.

2<sup>ο</sup> – Για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιείται ως πρότυπο η μέθοδος του Wenner, με απόσταση  $r$  ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, επίσης χρησιμοποιούμε τα [9, 11, 13]:

$$\rho_a = \rho_1 \left( 1 + 4 \sum_n K^n \left( \frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (4.2)$$

$$\text{όπου } A = 1 + (2 \cdot n \cdot z / r)^2 \quad (4.3)$$

$$\text{και } B = A + 3 \quad (4.4)$$

με  $n = 1 \dots \infty$

3<sup>ο</sup> – Δεχόμαστε μία ομάδα από τιμές ειδικής αντίστασης  $\rho_m(r_j)$  συγκεντρωμένες από ένα πεδίο με διαφορετικά διαστήματα  $r_j$  ( $j = 1 \dots m$ ), π.χ.  $\rho_m(r_2) \dots \rho_m(r_m)$ .

4<sup>ο</sup> – Το ίδιο διάγραμμα  $\underline{X}$  καθορίζει τις παραμέτρους του εδάφους που χρησιμοποιούμε σε κάθε επεξεργασία

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ K \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

ή εναλλακτικά για σύγκριση με την προτεινόμενη στο [9] τεχνική:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ Z \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

5<sup>ο</sup> – Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η σημαντική διαφορά  $d_j(j = 1 \dots m)$  ανάμεσα στις μετρούμενες και υπολογισμένες τιμές για ένα συγκεκριμένο διάστημα  $r_j$  και μία ομάδα από παραμέτρους  $\underline{X}$  δίνεται από τον τύπο:

$$d_j = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \quad (4.7)$$

όλες οι σημαντικές διαφορές ορίζονται στο διάνυσμα  $\mathbf{D}$  με διαστάσεις  $m \times 1$ .

6<sup>ο</sup> – Θα θεωρήσουμε ότι η ρύθμιση των παραμέτρων  $\underline{X}$  στις οποίες ταιριάζει καλύτερα το έδαφος είναι αυτές οι οποίες βελτιστοποιούν το τετράγωνο της συνάρτησης  $F(\underline{X})$ , ορίζεται ως η Ευκλείδεια νόρμα  $\|\mathbf{D}\|^2$ , του διανύσματος  $\mathbf{D}$ . Η ισοδυναμία στην πλειοψηφία των προσαρμοσμένων συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται στα έντυπα [7, 11] είναι:

$$F(\mathbf{X}) = \sum_j \left( \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \right)^2 \quad j=1 \dots m \quad (4.8)$$

*Λίστα συμβόλων- χρήσιμοι τύποι:*

$\rho_1$	=	ειδική αντίσταση ανώτερου στρώματος, σε $\Omega.m$
$\rho_2$	=	ειδική αντίσταση κατώτερου στρώματος, σε $\Omega.m$
$K$	=	Συντελεστής ανάκλασης $(\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$
$Z$	=	πάχος πάνω στρώματος

- $\underline{X}$  = διάνυσμα με παραμέτρους που ορίζονται από το έδαφος. Γενικά με  $n$  στοιχεία  $x_i$  ( $i=1 \dots n$ ). Για διστρωματικό έδαφος  $n=3$
- R = απόσταση ηλεκτροδίων (F. Wenner), σε μέτρα
- A =  $r/z$
- B =  $\rho_2/\rho_1$
- M = αριθμός μετρήσεων στο πεδίο.
- $\rho_m(r_j)$  = μετρούμενη ειδική αντίσταση ( $\Omega.m$ ) για κάθε απόσταση  $r_j$  των ηλεκτροδίων  $j=1 \dots m$ . Εν συντομία  $\rho_m$ .
- $\rho_a(\underline{X}, r_j)$  = Φαινόμενη αντίσταση ( $\Omega.m$ ). Υπολογισμένη τιμή χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο  $\rho_a(\rho_1, K, z, r_j)$  ή  $\rho_a(\rho_1, \rho_2, z, r_j)$ , για κάθε διάστημα  $r_j$  και διάνυσμα  $\underline{X}$ . Εν συντομία  $\rho_a$ .
- $\nabla \rho_a(\underline{X}^p, r_j)$  = κλίση της συνάρτησης του μαθηματικού μοντέλου της γείωσης με τις παραμέτρους  $\underline{X}$ , εκτιμώμενη στη θέση  $p$  ή στο βήμα  $p$ .
- $\Delta \underline{X}$  =  $\underline{X} - \underline{X}^p$  μεταβολή στο διάνυσμα  $X$  από το  $\underline{X}^p$ .
- $F(\underline{X})$  = Αντιπροσωπεύει την αντικειμενική συνάρτηση  $F(\rho_1, K, z)$ , ή  $F(\rho_1, \rho_2, z)$ , για τα ελάχιστα τετράγωνα προσαρμογής μεταξύ των μετρούμενων τιμών και των υπολογιζόμενων τιμών, σύμφωνα με ένα μαθηματικό μοντέλο. Σε κάθε περίπτωση  $F(\underline{X}) = \|\mathbf{D}\|^2 = \mathbf{D}^t \cdot \mathbf{D}$  όπου τα στοιχεία του  $\mathbf{D}$  είναι οι διαφορές βάρους  $d_j$  ανάμεσα στις μετρούμενες και τις υπολογισμένες τιμές
- N = Αριθμός παραμέτρων, στην περίπτωση μας  $n=3$

Για όλες τις περιπτώσεις  $j=1 \dots m$ ,  $n=1 \dots \infty$ ,  $i=1 \dots 3$

$$\frac{\partial F}{\partial X_i} = 2 \cdot \sum_j \frac{\partial d_j}{\partial X_i} \cdot d_j = -2 \cdot \sum_j \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial_i} \cdot d_j \quad (4.9)$$

- $F(\underline{X}^p)$  = Αντικειμενική συνάρτηση εκτιμώμενη στη θέση  $p$  ή στο βήμα  $p$ .
- $T$  = υπερδείκτης που δείχνει την μετατόπιση του πίνακα ή του διανύσματος
- $D$  = υπολειπόμενο διάνυσμα με  $m$  στοιχεία των διαφορών βάρους. Κάθε στοιχείο υπολογίζεται από τον  $d_j = (\rho_m(r_j) - \rho_a(\underline{x}, r_j)) \rho_m(r_j)$ .
- $J$  = Ο  $J$  αντιπροσωπεύει τη Ιακωβιανή μήτρα των μερικών παραγώγων των διαφορών βάρους  $d_j$  σε σχέση με κάθε μία από τις παραμέτρους, διαστάσεων  $n \times m$ .

$$J_{ji} = \frac{\partial d_j}{\partial X_i} = \frac{1}{\rho_m} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial X_i}, \text{ συνεπάζεται } \nabla F(\underline{X}) = 2 \cdot J^t \cdot D \quad (4.10)$$

Τα στοιχεία σε μία πιο συγκεκριμένη μορφή είναι:

$$\frac{\partial F}{\partial \rho_1} = -2 \cdot \sum_j \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m^2} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_1} \quad \frac{\partial F}{\partial \rho_2} = -2 \cdot \sum_j \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m^2} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_2} \quad (4.11\alpha, \beta)$$

$$\frac{\partial F}{\partial K} = -2 \cdot \sum_j \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m^2} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial K} \quad \frac{\partial F}{\partial z} = -2 \cdot \sum_j \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m^2} \cdot \frac{\partial \rho_a}{\partial z} \quad (4.11\gamma, \delta)$$

Έκφραση για το  $\frac{\partial \rho_a}{\partial X_i}$  μπορεί να βρει στα [6, 10].

- $\nabla F(\underline{X}^p)$  = κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμού των θέσεων  $p$  ή των βημάτων  $p$ . Διαστάσεων  $n \times 1$ ,  $\nabla F(\underline{X}^p) = 2 J^t D$
- $I$  = μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων  $n \times n$ .
- $H$  = πίνακας Hessian της  $F(\underline{X})$  υπολογισμού στη θέση  $p$  ή στο βήμα  $p$ , σε συντομογραφία:  $\left[ \frac{\partial}{\partial \underline{X}} \nabla F(\underline{X}^p) \right]$ . διαστάσεων  $n \times n$ .



Οι συνιστώσες του πίνακα Hessian είναι:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X_i^2} = 2 \cdot \sum_j \left( \frac{\partial d_j}{\partial X_i} \right)^2 + 2 \cdot \sum_j \frac{\partial^2 d_j}{\partial X_i^2} \cdot d_j \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X_i \partial X_k} = 2 \cdot \sum_j \frac{\partial d_j}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial d_j}{\partial X_k} + 2 \cdot \sum_j \frac{\partial^2 d_j}{\partial X_i \partial X_k} \cdot d_j \quad (4.13)$$

και αντίστοιχα οι εκφράσεις για τα στοιχεία  $J_{ji}$  είναι:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X_i^2} = 2 \cdot \sum_j J_{j,i}^2 + 2 \cdot \sum_j \frac{\partial^2 d_j}{\partial X_i^2} \cdot d_j \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial X_i \partial X_k} = 2 \cdot \sum_j j_{j,i} \cdot j_{j,k} + 2 \cdot \sum_j \frac{\partial^2 d_j}{\partial X_i \partial X_k} \cdot d_j \quad (4.15)$$

ή σε μορφή πίνακα:  $\mathbf{H} = 2 \cdot (\mathbf{J}^t \cdot \mathbf{J} + \mathbf{R})$  (4.16)

όπου  $\mathbf{R}$  είναι ένας τετραγωνικός  $3 \times 3$  πίνακας που περιέχει τις διαφορές βάρους και τις δεύτερες παραγώγους τους.

$$R_{j,i} = \sum_j \frac{\partial^2 d_j}{\partial X_i^2} \cdot d_j \quad (4.17\alpha) \quad \text{και} \quad R_{j,i} = \sum_{i \neq k} \frac{\partial^2 d_j}{\partial X_i \partial X_k} \cdot d_j \quad (4.17\beta)$$

Πιο λεπτομερείς εκφράσεις αυτών υπάρχουν στο άρθρο [19].

$\mathbf{R}$  = πίνακας του υπολειπόμενου βάρους  $d_j$  και της δεύτερης παραγώγου τους.

$\mathbf{E}$  = διάνυσμα των διαφορών βάρους, με  $j$  γραμμές. Τα στοιχεία του (Γενική Ανάστροφη Μέθοδος) είναι:

$$e_j = \frac{1}{\rho_m} \left( \rho_m(r_j) - \rho_a(\underline{X}^p, r_j) \right) - \sum_i \frac{\partial \rho_a(\underline{X}, r_j)}{\rho_m(r_j) \partial X_i} \Delta X_i \quad (4.18)$$

$\nabla \| \mathbf{E} \|^2$  = κλίση της τετραγωνικής Ευκλείδειας νόρμας του διανύσματος της διαφοράς βάρους  $\mathbf{E}$  στην Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδο.

### 4.2.3 Μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν

Για να συγκρίνουμε τις μεθόδους θα εφαρμόσουμε υπολογιστικές τεχνικές που βασίζονται στις ακόλουθες μεθόδους:

α) Μέθοδος Καθόδου Μέγιστης Κλίσης

β) Μέθοδος *Levenberg-Marquardt*

γ) Μέθοδος *Newton*

δ) Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδος

ε) Μέθοδος *Quasi-Newton*

#### 4.2.3.1 Μέθοδος Καθόδου Μέγιστης Κλίσης

Βασισμένες σε αυτή τη μέθοδο, αρκετές τεχνικές υπολογισμού των παραμέτρων έχουν παρουσιαστεί, τέτοιες προτείνονται στις αναφορές [7, 10, 11]. Επίσης παρουσιάζεται στην [1] μία βοηθητική τεχνική η οποία βασίζεται σε αυτή τη μέθοδο και έχει σκοπό την απόλυτη ελαχιστοποίηση για την αντικειμενική συνάρτηση των σφαλμάτων ανάμεσα στις μετρούμενες και τις υπολογιζόμενες τιμές. Είναι γνωστό ότι η αρνητική κλίση είναι στην κατεύθυνση της ελάττωσης, της συνάρτησης. Έτσι πλησιάζουμε το ελάχιστο μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία:

$$\underline{\mathbf{X}}^{p+1} = \underline{\mathbf{X}}^p - \lambda \nabla F(\underline{\mathbf{X}}^p) \quad (4.19)$$

όπου  $\lambda$  είναι ένα θετικό διάνυσμα βαθμίδας.

Το κύριο πρόβλημα της σύγκλισης, όταν χρησιμοποιούμε την απότομα καθοδική τεχνική, προκαλείται από το διάνυσμα βαθμίδας  $\lambda$ .

Για να αποφύγουμε εν μέρει το πρόβλημα της κλιμάκωσης μπορούμε να επιλέξουμε ένα μοναδιαίο διάνυσμα το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$\nabla F(\underline{X}^p) = \left\| F(\underline{X}^p) \right\| \quad (4.20)$$

έτσι η διαδικασία παίρνει τη μορφή:

$$\underline{X}^{p+1} = \underline{X}^p - \lambda \frac{\nabla F(\underline{X}^p)}{\left\| \nabla F(\underline{X}^p) \right\|} \quad (4.21)$$

Η μέθοδος της Καθόδου Μέγιστης Κλίσης είναι μία φτωχής αναζήτησης στρατηγική. Συνήθως δουλεύει αρκετά καλά [6] κατά την διάρκεια αρχικών σταδίων της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ωστόσο, καθώς ένα σταθερό σημείο πλησιάζετε, η μέθοδος είναι συνήθως αντιαποδοτική όταν πραγματοποιούνται μικρά ορθογώνια βήματα.

Η πρώτη παράγωγος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι απαραίτητη για όλες τις τεχνικές που αναλύονται σε αυτό το άρθρο.

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι σύμφωνα με την μοντελοποίηση, οι αλλαγές στο διάνυσμα  $\underline{X}$  από  $\underline{X}^p$  σε  $\underline{X}^{p+1}$  μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση:

$$\Delta \underline{X}^p = -\mu \mathbf{J}^t \mathbf{D} \quad (4.22)$$

όπου  $\mu$  είναι ένα βαθμωτό διάνυσμα όπως το  $\lambda$ .

#### 4.2.3.2 Μέθοδος Newton

Θεωρώντας ότι γύρω από ένα σημείο (διάνυσμα)  $\underline{X}^p$ , η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται μέσω μιας δευτεροβάθμιας συνάρτησης, η τιμή της συνάρτησης σε ένα οποιοδήποτε σημείο σε μία περιοχή δίνεται από τον τύπο:

$$F(\underline{X}) = F(\underline{X}^p) + \nabla^t F(\underline{X}^p) \Delta \underline{X} + \frac{1}{2} \Delta \underline{X} \cdot \mathbf{H} \cdot \Delta \underline{X} \quad (4.23)$$

Η ακολουθία της αναζήτησης του ελάχιστου έχει τη μορφή [6]:

$$\Delta \underline{X}^p = \mathbf{H}^{-1} \nabla F(\underline{X}^p) \quad (4.24)$$

Τα στοιχεία του πίνακα Hessian (και αυτά του διανύσματος κλίσης).

Η καθοδική ιδιότητα είναι πολύ σημαντική για έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης, έτσι κάθε βήμα θα πρέπει να φθίνει [15]. Στην μέθοδο Newton αυτό είναι δυνατό για κάθε  $\Delta \underline{X}$  μόνο και μόνο τότε, όταν ο πίνακας Hessian είναι θετικά ορισμένος.

Η μέθοδος Newton, γενικά, δεν συγκλίνει σε ένα σταθερό σημείο [6] όταν ξεκινάμε με ένα αυθαίρετο αρχικό σημείο. Για το πρόβλημα που μας απασχολεί και σύμφωνα με την μοντελοποίηση του παραρτήματος:

$$\Delta \underline{X}^p = -[\mathbf{J}' \cdot \mathbf{J} + \mathbf{R}]^{-1} \mathbf{J}' \cdot \mathbf{D} \quad (4.25)$$

όπου  $\mathbf{J}' \mathbf{J}$  είναι πάντα θετικά ορισμένα. Οι πιθανότητες της επίτευξης του ελάχιστου εξαρτώνται, κυρίως, από τον πίνακα  $\mathbf{R}$  ο οποίος περιέχει τα υπόλοιπα και τις δεύτερες παραγώγους. Εμφανώς, και σύμφωνα με την εισαγωγική εξήγηση, αν πετύχουμε μέσω μίας βοηθητικής τεχνικής να παίρνουμε όλα τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{R}$  μικρού βαθμού, ο αλγόριθμος σίγουρα θα συγκλίνει σε ένα ελάχιστο.

Αυτός είναι ο ακριβής λόγος για την αποδοτικότητα της τεχνικής που προτείνεται στην αναφορά [19], στην οποία η αρχική διαδικασία προσέγγισης καθορίζεται σε μία τεχνική κλίσης πρώτης τάξης, όπου τα αποτελέσματα είναι όπως περιμέναμε ουσιαστικά.

#### 4.2.3.3 Μέθοδος Levenberg - Marquardt

Ο στόχος της μεθόδου Levenberg είναι να αναζητήσει, σε κάθε βήμα προσέγγισης του ελάχιστου, την μικρότερη τιμή που μπορεί να επιτευχθεί από την προηγούμενη προσέγγιση της  $F(\underline{X})$  κατά τέτοιο τρόπο ώστε η αλλαγή  $\Delta \underline{X}$  που απαιτείται για να βρεθεί περιορίζεται σε μία υπερσφαίρα μοναδιαίας ακτίνας που έχει κέντρο το  $\underline{X}^p$ . Με άλλα λόγια σε κάθε βήμα προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε την  $F(\underline{X})$  έτσι ώστε

$$\Delta \underline{X}' \cdot \Delta \underline{X} = 1 \quad (4.26)$$

Φτιάχνοντας τις παραγώγους που αντιστοιχούν στο Λαγκρασιανό μηδέν, η ακόλουθη ελάχιστη συνθήκη επιτυγχάνεται:

$$[\mathbf{H} + \sigma \cdot z \cdot \mathbf{I}] \Delta \underline{X}^p = -\nabla F(\underline{X}^p) \quad (4.27)$$

όπου  $\sigma$  καλείται η παράμετρος Levenberg-Marquardt.

Για το πρόβλημα που μας απασχολεί και σύμφωνα με την μοντελοποίηση του παραρτήματος:

$$\Delta \underline{X}^p = -[\mathbf{J}' \cdot \mathbf{J} + \mathbf{R} + \sigma \cdot \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}' \cdot \mathbf{D} \quad (4.28)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι, με ένα ακριβή τρόπο [15], ο πίνακας των υπολοίπων  $\mathbf{R}$  και η δεύτερη παράγωγος τους έχουν αντικατασταθεί από τον διαγώνιο πίνακα  $\sigma \mathbf{I}$ .

Μία από τις δυσκολίες στην εφαρμογή της μεθόδου [15] συνίσταται στον έλεγχο των τιμών της παραμέτρου  $\sigma$ . Από την άλλη  $\nabla F(\underline{X}^p) = \mathbf{J}' \cdot \mathbf{D}$  με ελάχιστο το  $\nabla F(\underline{X}^p) = 0$ , αν  $\mathbf{D} \neq 0$  τότε ο  $\mathbf{J}$  θα είναι μοναδικός. Συμπερασματικά, καθώς προσεγγίζουμε το ελάχιστο, τα επιτυχή βήματα γίνονται πιο ακριβή αλλά ο Ιακωβιανός πίνακας εκφυλίζεται. Για να το αποφύγουμε χρησιμοποιούμε την ανάλυση της μοναδικότητας του Jackson [4].

#### 4.2.3.4 Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδος

Η τεχνική αυτή παρουσιάζεται στα [12] και [14], εφαρμόζεται στον παραμετρικό υπολογισμό χρησιμοποιώντας σαν μαθηματικό μοντέλο το αντίστοιχο στις μετρήσεις αντίστασης με τη βοήθεια της μεθόδου της κάθετα τοποθετημένης ράβδου. Σαν συμπλήρωμα υποδεικνύεται στο [14] ότι αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν η μετρητική μέθοδος είναι η μέθοδος Wenner. Σε αυτή τη περίπτωση χρησιμοποιούμε για παραμέτρους τις  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  και  $z$ .

Στην περίπτωση μας έχουμε εξετάσει τις πιθανότητες ώστε η Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδος να διατηρεί συστηματικά τις μεθόδους του πεδίου μέσω της μεθόδου Wenner και χρησιμοποιώντας σαν παραμέτρους τις  $\rho_1$ ,  $K$  και  $z$ .

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος έχει ως εξής:

Ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να υπολογίσουμε μία ομάδα παραμέτρων  $X_i (i=1 \dots n$ , στην περίπτωση μας  $n=3$ ), έτσι ώστε οι τιμές της αντίστασης να πετυχαίνονται, έτσι ώστε τα αποτελέσματα από το μαθηματικό μοντέλο (για κάθε διάστημα  $r_j$ ) να είναι

αρκετά κοντά στις μετρούμενες τιμές  $\rho_m(r_j)$ . Έτσι μπορούμε να τις υπολογίσουμε με ανάπτυγμα Taylor γύρω από τις υπολογιζόμενες τιμές  $\rho_a(\underline{X}, r_j)$ .

$$\text{Έτσι είναι: } \rho_m(r_j) \approx \rho_a(\underline{X}^p, r_j) + \nabla' \cdot \rho_a(\underline{X}^p, r_j) \Delta \underline{X} \quad (4.29)$$

$$\text{με } \Delta \underline{X} = \underline{X}^{p+1} - \underline{X}^p \quad (4.30)$$

Η σημαντική διαφορά (σφάλμα) ανάμεσα στις μετρούμενες και τις υπολογιζόμενες τιμές φαίνεται στην επόμενη σχέση (για κάθε διάστημα  $r_j$ )

$$e_j = \frac{\rho_m(r_j) - \rho_a(\underline{X}, r_j)}{\rho_m(r_j)} = \sum_i \frac{1}{\rho_m(r_j)} \cdot \frac{\partial \rho_a(\underline{X}, r_j)}{\partial X_i} \Delta X_i \quad (4.31)$$

$$j=1 \dots m, i=1 \dots 3$$

και παίρνοντας υπ' όψιν στον υπολογισμό την έκφραση των στοιχείων  $\mathbf{D}$  και  $\mathbf{J}$  έχει ως αποτέλεσμα για το διάνυσμα  $\mathbf{E}$  με  $m$  στοιχεία  $e_j$ :

$$\mathbf{E} = \mathbf{D} + \mathbf{J}' \Delta \underline{X} \quad (4.32)$$

Συνιστούμε ότι ο καλύτερος υπολογισμός των παραμέτρων του μοντέλου θα είναι αυτός που θα κάνει την τετραγωνική Ευκλείδεια νόρμα των σφαλμάτων  $\|\mathbf{E}\|^2$  ελάχιστη, έτσι:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} \|\mathbf{E}\|^2 = 0 \quad \text{για } j=1 \dots m \quad (4.33)$$

$$0 = -2 \sum_j \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m} \frac{\partial \rho_a}{\partial X_i} + 2 \sum_j \frac{1}{\rho_m^2} \left( \frac{\partial \rho_a}{\partial X_i} \Delta X_i \right) \frac{\partial \rho_a}{\partial X_i} \quad (4.34)$$

Ο πρώτος όρος της προηγούμενης εξίσωσης είναι  $2 \cdot \mathbf{J}' \cdot \mathbf{D}$  και ο δεύτερος  $2(\mathbf{J}' \cdot \mathbf{J})$ , έτσι η σειρά της εξέτασης του ελαχίστου θα είναι:

$$\Delta \underline{X}^p = -[\mathbf{J}' \cdot \mathbf{J}]^{-1} \cdot \mathbf{J}' \cdot \mathbf{D} \quad (4.35)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε αυτή τη περίπτωση η συνάρτηση που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε δεν είναι η ευκλείδεια τετραγωνική νόρμα του  $\mathbf{D}$ , αλλά η

Ευκλείδεια τετραγωνική νόρμα του  $\mathbf{E}$ . Σε κάθε περίπτωση η εναρμόνιση πραγματοποιείται πάνω σε σημαντικές διαφορές. Για συγκριτικούς σκοπούς, όταν εφαρμόζουμε την Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδο, αξιολογούμε και την αντικειμενική συνάρτηση  $\|\mathbf{D}\|^2$ .

Οι συνηθισμένες δυσκολίες στην εφαρμογή αυτής της τεχνικής είναι όμοιες με αυτές της μεθόδου Levenberg – Marquardt, και έχει να κάνει με το γινόμενο  $\mathbf{J}^t \cdot \mathbf{J}$ .

Συμπερασματικά η ανάλυση της μοναδικότητας του Jackson [4] μπορεί να εφαρμοστεί. Πράγματι αν το  $\mathbf{J}^t \cdot \mathbf{J}$  περίπου μοναδικό, μία ή και περισσότερες από τις ιδιοτιμές του μπορούν να είναι κοντά στο μηδέν. Μπορεί να αποδειχθεί ότι μία μικρή ιδιοτιμή μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αλλαγή σε ένα ή περισσότερα στοιχεία του  $\Delta \underline{X}$ . Όμοια μπορούμε να δούμε ότι το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης των παραμέτρων είναι αντιστρόφως ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας των ιδιοτιμών [4], μπορεί να συμβεί μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης να αποδώσουν μεγάλο βαθμό απόκλισης.

#### 4.2.3.5 Μέθοδος Quasi – Newton

Στην παράγραφο αυτή αναφερόμαστε στη μέθοδο η οποία αναζητεί το ελάχιστο απευθείας σε κάθε σημείο  $\underline{X}^p$  του τύπου  $-\mathbf{A} \nabla F(\underline{X}^p)$ , όπου  $\mathbf{A}$  είναι ένας θετικά ορισμένος προσεγγιστικός πίνακας, ο αντίστροφος του Hessian. Η κατεύθυνση της κλίσης τότε αποκλίνει αν προ-πολλαπλασιαστεί με τον  $\mathbf{A}$ . Προφανώς η μέθοδος Quasi – Newton είναι η πιο αποτελεσματική μη γραμμική μέθοδος βελτιστοποίησης για γενικευμένα προβλήματα [15].

Στην Μέθοδο Quasi – Newton, η προσέγγιση του ελαχίστου γίνεται με τον τύπο:

$$\underline{X}^{p+1} - \underline{X}^p = \Delta \underline{X}^p = -\mathbf{A}^{-1}(\nabla F(\underline{X}^p) - \nabla F(\underline{X}^{p+1})) \quad (4.36)$$

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του προβλήματος παρουσιάζεται στο [19], είναι ο ίδιος που παρουσιάζεται και στο [15] και τώρα εφαρμόζεται μέσω της υπορουτίνας ZXMIN από την βιβλιοθήκη IMSL [9].

### 4.2.3.6 Σύνοψη επαναληπτικών τύπων

Τα αποτελέσματα που έχουν σχέση με την τυποποίηση της επαναληπτικής διαδικασίας για την εύρεση του βέλτιστου στις διαφορετικές μεθόδους που εξετάζονται για την επίλυση του προβλήματος συνοψίζονται παρακάτω:

α) Μέθοδος Καθόδου Μέγιστης Κλίσης  $\Delta \underline{X}^p = -\mu \mathbf{J}^t \mathbf{D}$

β) Μέθοδος Newton  $\Delta \underline{X}^p = -[\mathbf{J}^t \cdot \mathbf{J} + \mathbf{R}]^{-1} \mathbf{J}^t \cdot \mathbf{D}$

γ) Μέθοδος Levenberg – Marquardt  $\Delta \underline{X}^p = -[\mathbf{J}^t \cdot \mathbf{J} + \mathbf{R} + \sigma \cdot \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{J}^t \cdot \mathbf{D}$

δ) Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδος  $\Delta \underline{X}^p = -[\mathbf{J}^t \cdot \mathbf{J}]^{-1} \cdot \mathbf{J}^t \cdot \mathbf{D}$

ε) Μέθοδος Quasi – Newton  $\underline{X}^{p+1} - \underline{X}^p = \Delta \underline{X}^p = -\mathbf{A}^{-1}(\nabla F(\underline{X}^p) - \nabla F(\underline{X}^{p+1}))$

Έτσι έχουμε παρουσιάσει όλη την απαραίτητη τυποποίηση που χρειάζεται για την εφαρμογή των μεθόδων.

### 4.2.4 Εφαρμογή

Οι τεχνικές που παρουσιάζονται εφαρμόζονται σε έξι επιλεγμένες προσαρμοσμένες δοκιμές [19]: Μία βελτιωμένη τεχνική κλίσης πρώτης τάξης, η οποία επιτρέπει την προσέγγιση του απόλυτου ελάχιστου της αντικειμενικής συνάρτησης, μία τεχνική βασισμένη στη μέθοδο Levenberg–Marquardt, μία βασισμένη στη Γενικευμένη Ανάστροφη μέθοδο όμοια με την [14] αλλά εφαρμοσμένη σε διαφορετική ομάδα παραμέτρων, μία ακόμη βασισμένη στη μέθοδο Quasi–Newton, και τελικά μία σύνθετη Δεύτερης τάξης- Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδος η οποία είναι βελτιωμένη σε σχέση με αυτή που προτείνεται [19] έχει σχέση με το χρόνο εκτέλεσης.

#### 4.2.4.1 Γενικές Θεωρήσεις

- Το αρχικό σημείο είναι από μία ομάδα μετρήσεων ειδικής αντίστασης που ελήφθησαν με την μέθοδο Wenner.
- Οι αρχικές τιμές για κάθε επαναληπτική διαδικασία είναι:



Για  $\rho_1^0$ , η ειδική αντίσταση που αντιστοιχεί στη μικρότερη απόσταση από την λίστα των μετρήσεων.

Για  $\rho_2^0$ , η ειδική αντίσταση που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη απόσταση από την λίστα των μετρήσεων.

Για  $K^0$ , αν είναι κατάλληλη, μία εναρμονισμένη με τα προηγούμενα κριτήρια τιμή.

Για  $Z^0$ ,  $1 \dots m$  σε όλες τις περιπτώσεις.

Για τον σκοπό της τελικής σύγκρισης χρησιμοποιήθηκαν, η τιμή των ίδιων αντικειμενικών συναρτήσεων  $F$  (η οποία είναι  $\|\mathbf{D}\|^2$ ), η Ευκλείδεια νόρμα του  $\nabla F$  (που είναι  $\|\nabla F(\underline{X})\|$ ) και ο χρόνος εκτέλεσης.

#### 4.2.4.2 Περιπτώσεις για επίλυση

Οι τεχνικές που θα εφαρμοστούν στις έξι περιπτώσεις προτείνονται στο Πίνακα 4.9 [19]. Η περίπτωση #1 αντιστοιχεί στις αναφορές [7, 11].

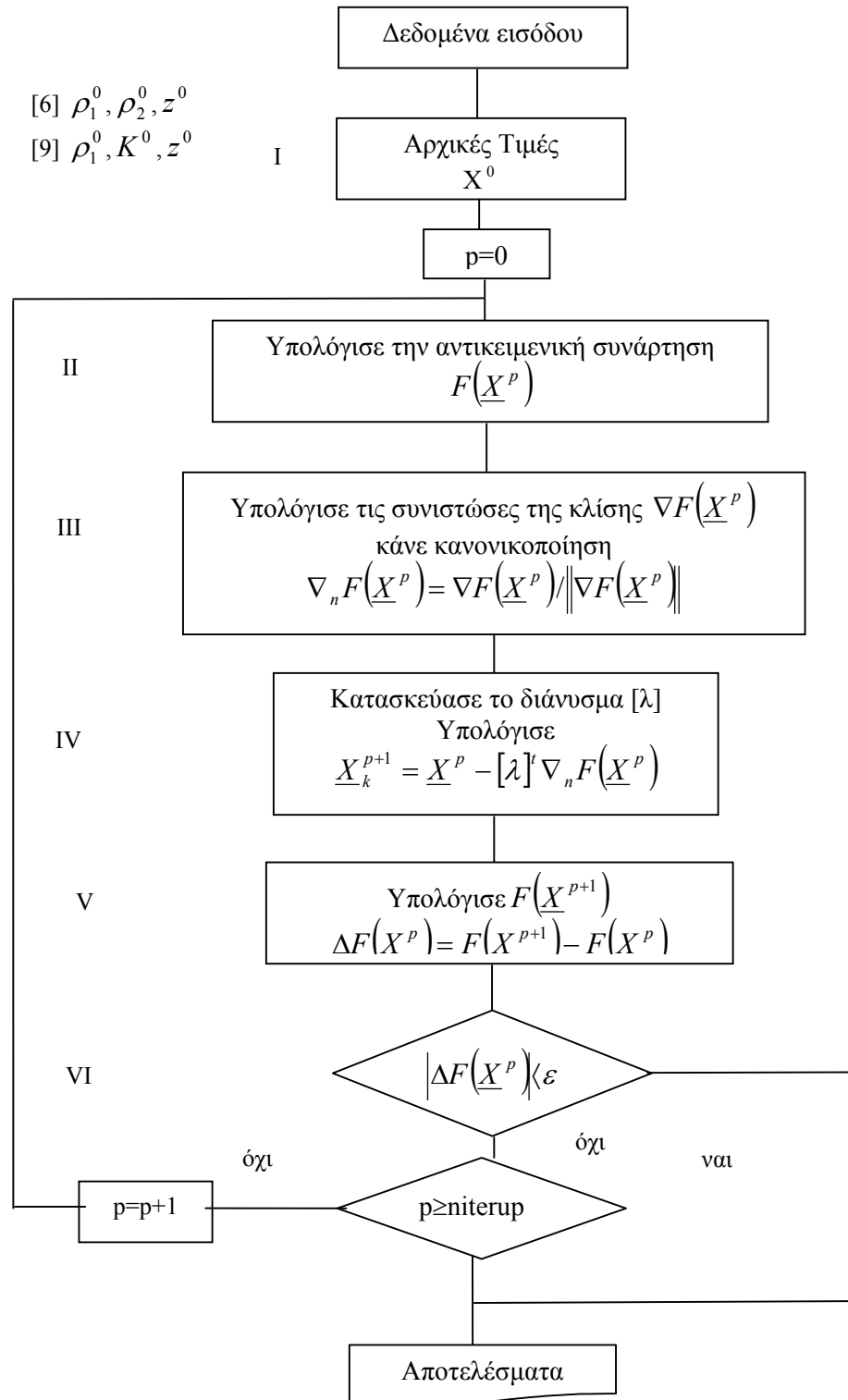
#### 4.2.4.3 Οκτώ τεχνικές

*I<sup>ov</sup>* – Τεχνική κλίσης πρώτης τάξης - Εφαρμογή της μεθόδου που προτείνεται στην [10]:

Είναι μία τεχνική κλίσης πρώτης τάξης (First Order Gradient Technique-FOGT). Χρησιμοποιεί για παραμέτρους τα  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $z$  και έχει εκτελεστεί σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.1 μέσω ενός προγράμματος γραμμένου σε Turbo C.

Στο βήμα II για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης και ελλείψη ενός σαφούς κριτηρίου στη [10], οι απαιτούμενοι όροι χρησιμοποιούνται μέχρι οι νέοι όροι να συμβάλουν στη σειρά για τιμές του εξαγόμενου αθροίσματος μικρότερες του  $1 \cdot 10^{-5}$ . Σε κάθε υπόθεση ο μέγιστος αριθμός όρων της σειράς περιορίζεται στους 10,000.

Μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα  $\varepsilon=1\cdot 10^{-3}$ , Niterup=500



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής. Μέθοδοι από [7, 10].

Στο βήμα III παρόλο που δεν αποδεικνύεται στην αναφορά [10], έχουμε κανονικοποιήσει την κλίση, χρησιμοποιώντας την Ευκλείδεια νόρμα, γιατί αλλιώς ήταν αδύνατον να προβούμε σε κάποια λύση.

Τα στοιχεία της διαγωνίου του  $[\lambda]$  είναι τα  $=.005|\rho_1|$ ,  $.005|\rho_2|$  και  $|z|$  (δες αναφορά [9]). Το κριτήριο για να σταματήσει η επαναληπτική διαδικασία  $|\Delta F(X)| < 1 \cdot 10^{-3}$ , όπως αναφέρεται στην αναφορά [10] έχει αποδειχθεί ότι είναι τελείως αναποτελεσματικό διότι η διαδικασία πλήρη την συνθήκη σχεδόν αμέσως και ενώ βρίσκεται αρκετά μακριά από το ελάχιστο. Αντί αυτής χρησιμοποιούμε την  $1 \cdot 10^{-5}$ .

2<sup>ον</sup> – *Τεχνική κλίσης πρώτης τάξης-Εφαρμογή της μεθόδου που προτείνεται στα [7, 11]:*

Είναι μία τεχνική κλίσης πρώτης τάξης (FOGT). Χρησιμοποιεί για παραμέτρους τα  $\rho$ ,  $K$ ,  $z$ .

Έχει εκτελεστεί σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του *Σχήματος 4.1* μέσω ενός προγράμματος γραμμένου σε Turbo C.

Στο βήμα II για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, οι απαιτούμενοι όροι χρησιμοποιούνται μέχρι οι νέοι όροι να συμβάλουν στη σειρά για τιμές του εξαγόμενου αθροίσματος μικρότερες του .001.

Στο βήμα III παρόλο που δεν αποδεικνύεται στην αναφορά [7], έχουμε κανονικοποιήσει την κλίση, χρησιμοποιώντας την Ευκλείδεια νόρμα, γιατί αλλιώς ήταν αδύνατον να προβούμε σε κάποια λύση.

Στις αναφορές [7, 11] κανένα κριτήριο δεν έχει καθοριστεί για την επιλογή του  $[\lambda]$  εκτός του ότι μια “κατάλληλη” επιλογή πρέπει να γίνει. Έτσι δεχόμαστε ότι οι συγγραφείς επιλέγουν για την διαγώνιο του πίνακα  $[\lambda]$  μία τιμή σύμφωνα με την αναφορά [10]. Αυτή είναι  $\tau = .005|\rho_1|$ ,  $.005|\rho_2|$  και  $.005|z|$ .

Το κριτήριο για να σταματήσει η επαναληπτική διαδικασία  $|\Delta F(X)| < 1 \cdot 10^{-3}$ , όπως αναφέρεται στις αναφορές [7, 11] έχει αποδειχθεί ότι είναι τελείως αναποτελεσματικό διότι η διαδικασία πληροί την συνθήκη σχεδόν αμέσως και

ενώ βρίσκεται αρκετά μακριά από το ελάχιστο. Αντί αυτής χρησιμοποιούμε την  $1 \cdot 10^{-5}$ .

*3<sup>ov</sup> – Πρόταση για μία βελτιωμένη τεχνική κλίσης πρώτης τάξης:*

Μια βελτιωμένη τεχνική κλίσης πρώτης τάξης (FOGT) παρουσιάζεται, χρησιμοποιεί για παραμέτρους τα  $\rho$ ,  $K$ ,  $z$  και έχει εκτελεστεί σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.2 μέσω ενός προγράμματος γραμμένου σε Turbo C.

Στο βήμα II το άθροισμα των όρων για τον υπολογισμό της  $F(X)$  σταματάει όταν το άθροισμα των νέων όρων που προμηθεύει τη σειρά είναι μικρότερο από  $1 \cdot 10^{-5}$ . Σε κάθε υπόθεση ο μέγιστος αριθμός όρων της σειράς περιορίζεται στους 1,000.

Στο βήμα IV ένας τυχαίος θετικός αριθμός στο διάστημα (0,1) παράγεται για τον συντελεστή βαθμίδας  $\lambda$ . Αυτή είναι όμοια με την επεξεργασία που χρησιμοποιείται στην

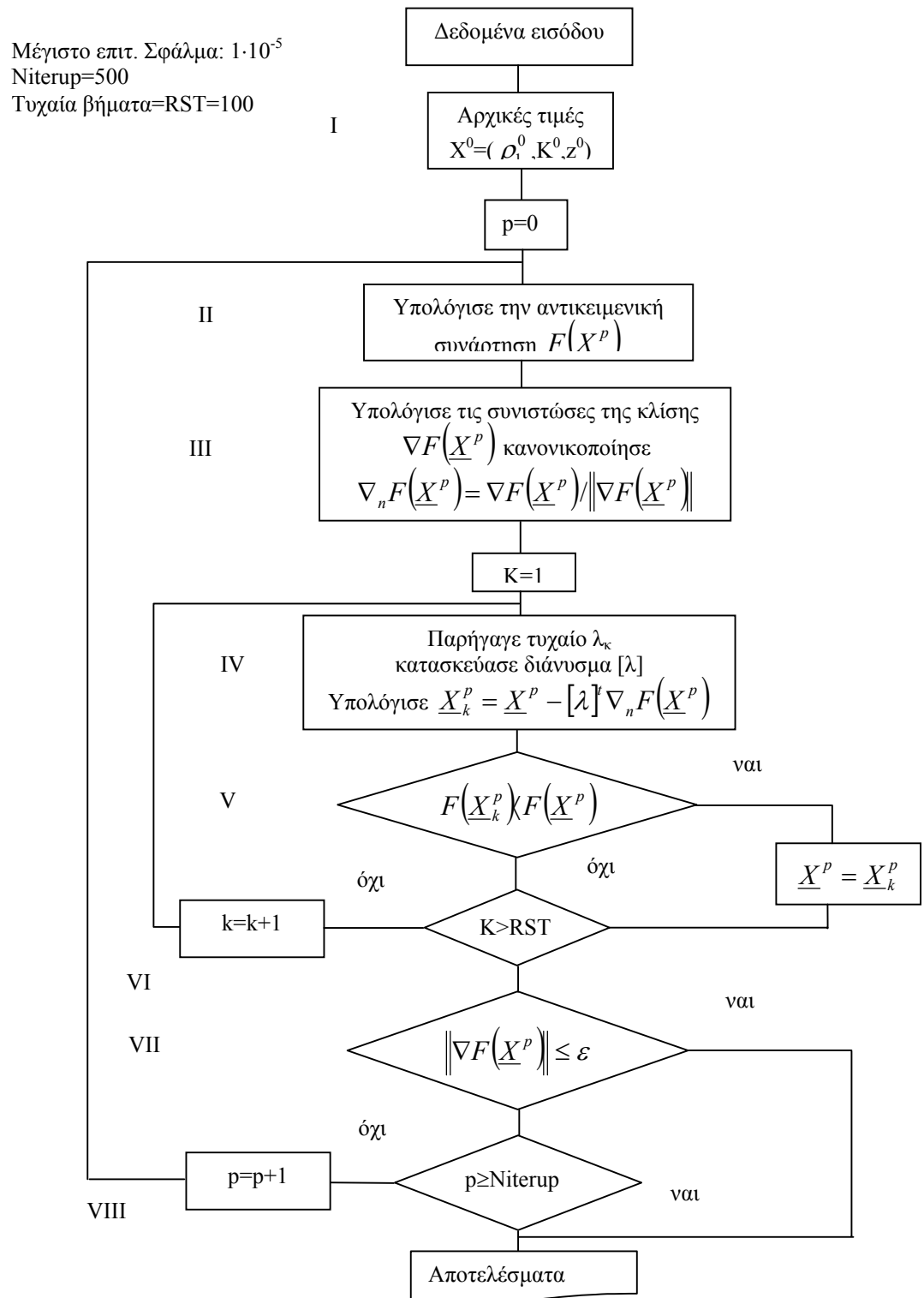
αναφορά [19] σε ένα από τα βήματα υπολογισμού. Χρησιμοποιούμε για διάνυσμα τους συντελεστές βαθμίδας τους 1000  $\lambda$ , .02 $\cdot\lambda$  και .75 $\cdot\lambda$ .

Η Ευκλείδεια νόρμα του διανύσματος κλίσης έχει επιλεγεί ώστε να είναι μικρότερος από  $1 \cdot 10^{-3}$  ώστε να κάνουμε μια εκτύπωση των αποτελεσμάτων.

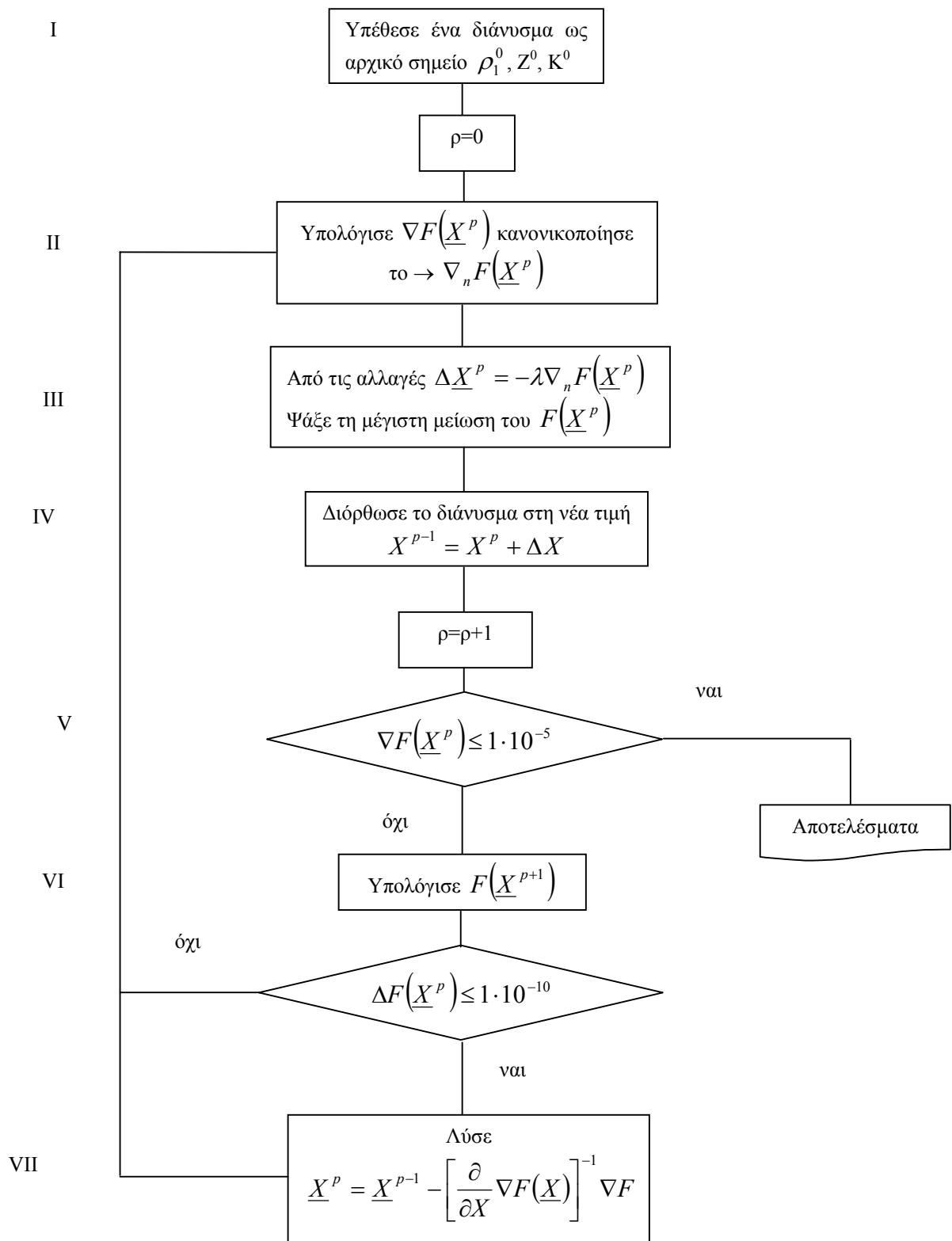
*4<sup>ov</sup> - Τεχνική Κλίσης Δεύτερης Τάξης (Second Order Gradient Technique - SOGT):*

Είναι μια τεχνική βασισμένη στη μέθοδο Newton η οποία πλεονεκτεί από την first order gradient όσον αφορά την προσέγγιση του ελάχιστου και από την τετραγωνική σύγκλιση της μεθόδου Newton όταν είναι σε μία περιοχή κοντά στην λύση.

Ο αλγόριθμος περιγράφεται στην αναφορά [19] και εκτελείται σε Turbo C. Το διάγραμμα ροής φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα ροής, προτεινόμενης τεχνικής κλίσης 1<sup>ης</sup> τάξης.

Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ροής, τεχνικής κλίσης 2<sup>ης</sup> τάξης.

5<sup>ον</sup> – Τεχνική βασισμένη στην μέθοδος *Levenberg – Marquardt (LMT)*:

Χρησιμοποιούμε για παραμέτρους τις  $\rho_1, K, z$ .

Έχει εκτελεστεί μέσω της ρουτίνας ZXSSQ αναφορά [9] χωρίς συγκεκριμένο υπολογισμό της πρώτης παραγώγου. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιείται ο πλήρης τύπος [19], δίνεται ότι το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για να εξετάσει την πιθανότητα ύπαρξης πολυστρωματικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν από αυτά που παρατηρούνται με τη χρήση των άπειρων σειρών. Ο πρωταρχικός κώδικας που χρησιμοποιούμε για να ορίσουμε την συνάρτηση έχει γραφεί σε FORTRAN 77 μέσω των ρουτινών QROMO, MIDINF και POLINT. Οι τιμές της συναρτήσεως Bessel έχουν προσεγγιστεί από πολυώνυμα με την βοήθεια της συνάρτησης BESSJO(X) από την αναφορά [18].

Για κριτήριο χρησιμοποιούμε, η Ευκλείδεια νόρμα της κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης να είναι μικρότερη από  $1 \cdot 10^{-5}$ .

6<sup>ον</sup> – Τεχνική βασισμένη στην Γενικευμένη Ανάστροφη Μέθοδο (*Generalized Inverse Technique - IGT*):

Χρησιμοποιούμε για παραμέτρους τις  $\rho_1, K, z$ .

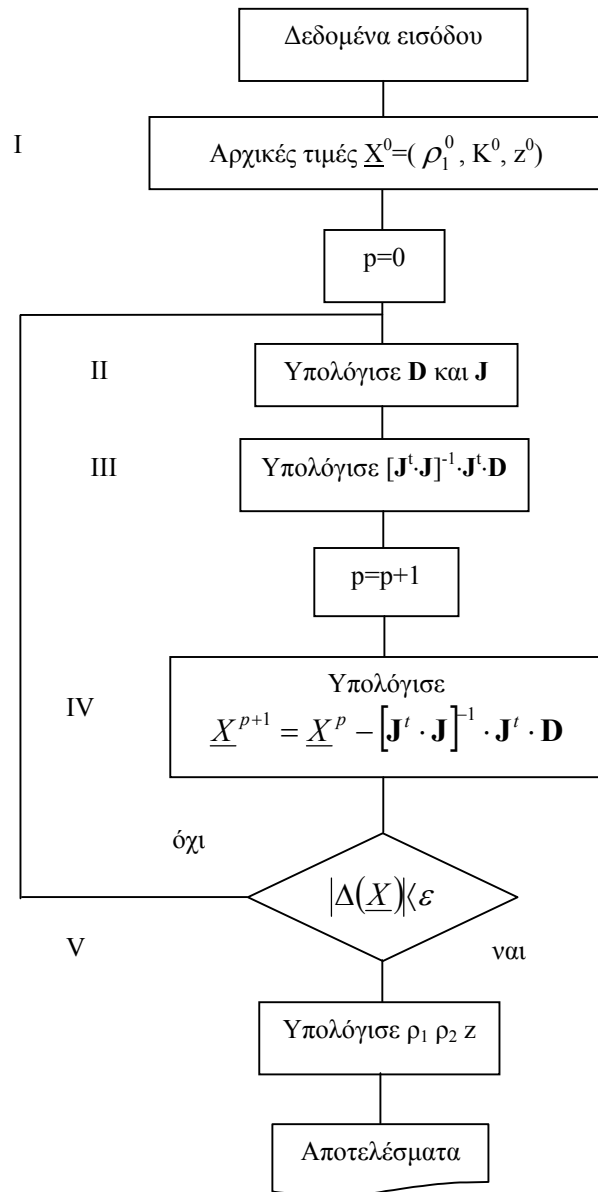
Έχει εκτελεστεί χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.4 μέσω ενός προγράμματος γραμμένου σε Turbo C. Η διαδικασία διακόπτεται όταν η μεταβολή της κάθε παραμέτρου είναι μικρότερη από  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Το πρόγραμμα έχει εκτελεστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να απορρίπτει τις μετρήσεις που είναι εκτός της επιτρεπτής περιοχής σφάλματος, με σφάλμα 15%, προς αποφυγή ιδιομορφιών.

7<sup>ον</sup> – Τεχνική βασισμένη στη μέθοδο *Quasi – Newton (QNT)*:

Χρησιμοποιούμε για παραμέτρους τις  $\rho_1, K, z$ .

Μέγιστο επιτ. Σφάλμα  $\varepsilon=1\cdot 10^{-5}$   
 Niterup=500



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα ροής. Προτεινόμενη τεχνική βασισμένη σε μια γενικευμένη ανάστροφη μέθοδος.



Έχει εκτελεστεί μέσω της ρουτίνας ZXMIN αναφορά [9] χωρίς συγκεκριμένο υπολογισμό της πρώτης παραγώγου. Για τον υπολογισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιείται ο πλήρης τύπος γιατί το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για να εξετάσει την πιθανότητα ύπαρξης πολυστρωματικών μοντέλων. Ο πίνακας Hessian θεωρείται ως μοναδιαίος.

*8<sup>ον</sup> –Τεχνική βασισμένη σε μία σύνθετη μέθοδο(MMT):*

Οι θεωρήσεις αναφορικά με τα χαρακτηριστικά σύγκλισης της μεθόδου Newton, όταν η διαδικασία προσεγγίζει το ελάχιστο ικανοποιητικά [19], βεβαιώνουν την συνολική αποτελεσματικότητα της μεθόδου.

Αναμένουμε, βελτιώνοντας τις αρχικές τιμές η διαδικασία θα συγκλίνει με μεγαλύτερη ασφάλεια και ταχύτητα προς το ελάχιστο. Σύμφωνα με τις τεχνικές που εξετάζουμε, όπως θα δούμε και στην ακόλουθη παράγραφο, αυτή η οποία εκτείνει τα αποτελέσματα κοντά στο βέλτιστο με υψηλή ταχύτητα είναι η τεχνική που βασίζεται στην IGT, και με αρκετή ακρίβεια είναι χρήσιμη για ένα υψηλό αριθμό πρακτικών εφαρμογών.

Η πρόταση έχει να κάνει με το ποιες τιμές θα χρησιμοποιήσουμε για αρχικές, για την τεχνική Newton παρουσιάζονται στο άρθρο [19], αυτές στα προηγούμενα παράγονται από την τεχνική IGT όπως φαίνεται στο παρόν άρθρο. Για να πετύχουμε το διάγραμμα ροής θα πρέπει να συνδιάσουμε αυτά των *Σχημάτων 4.3 και 4.4.*

#### **4.2.4.4 Αποτελέσματα**

Στους *Πίνακες 4.2* έως *4.7* οι τιμές πετυχαίνονται με την εφαρμογή των τεχνικών στις προτεινόμενες υποθέσεις που έχουμε από το [19], *Πίνακας 4.1*. Οι υπολογισμένες τιμές για τα  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $z$ , η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η Ευκλείδεια νόρμα της κλίσης και ο χρόνος σύγκλισης αναφέρονται σε αυτούς τους πίνακες.

Περί - πτωση	Μέτρηση	1	2	3	4	5	6	7	8
#1	Απόσταση r	2.5	5	7.5	10	12.5	15		
	$\rho_m(r)$	320	245	182	162	168	152		
#2	Απόσταση r	1	1.5	2.5	3	5	10		
	$\rho_m(r)$	255	290	315	376	528	690		
#3	Απόσταση r	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	5
	$\rho_m(r)$	58.71	61.79	58.1	61	73.9	78	79.13	78.19
#4	Απόσταση r	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20	25
	$\rho_m(r)$	451.6	366.7	250.2	180	144.2	120.2	115.5	96.5
#5	Απόσταση r	1	2	3	4				
	$\rho_m(r)$	156.4	113.1	95.2	65.3				
#6	Απόσταση r	1	2	4	10	20	40		
	$\rho_m(r)$	136	140	214	446	685	800		

Πίνακας 4.1: Ζεύγη τιμών για τις 6 περιπτώσεις.

Μέθοδος	Υπολογισμένες τιμές						
	$\rho_1$ (m)	$\rho_2$ (m)	z (m)	F	$\ \nabla F\ $	$F_g$	$t_{\text{Σύγκλισης}}$ (min)
1 <sup>η</sup>	355.773	143.122	2.880	.008361	$2.23 \cdot 10^{-3}$	.1933	1.27
2 <sup>η</sup>	324.600	141.454	3.176	.014998	$4.18 \cdot 10^{-2}$	.2769	0.78
3 <sup>η</sup>	360.379	143.751	2.821	.007950	$9.04 \cdot 10^{-4}$	.1854	1.60
4 <sup>η</sup>	368.295	144.470	2.760	.007620	$7.32 \cdot 10^{-8}$	.1852	2.28
5 <sup>η</sup>	372.727	145.262	2.689	.007627	$1.85 \cdot 10^{-5}$	.1882	1.03
6 <sup>η</sup>	364.683	143.634	2.828	.008110	0.05023	.1825	0.06
7 <sup>η</sup>	372.729	145.259	2.689	.007627	$2.87 \cdot 10^{-8}$	.1882	3.50
8 <sup>η</sup>	372.729	145.259	2.690	.007620	$2.31 \cdot 10^{-6}$	.1884	0.58

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα στην περίπτωση #1.

Μέθοδος	Υπολογισμένες τιμές						
	$\rho_1$ (m)	$\rho_2$ (m)	z (m)	F	$\ \nabla F\ $	$F_g$	$t_{\text{Σύγκλισης}}$ (min)
1 <sup>η</sup>	283.534	846.43	1.766	.018837	$3.87 \cdot 10^{-3}$	.7244	2.47
2 <sup>η</sup>	251.858	1078.67	2.224	.011823	$2.64 \cdot 10^{-2}$	.2268	0.60
3 <sup>η</sup>	246.615	1057.29	2.134	.011074	$1.68 \cdot 10^{-4}$	.2117	2.30
4 <sup>η</sup>	244.71	1023.11	2.048	.011000	$7.21 \cdot 10^{-7}$	.1951	1.03
5 <sup>η</sup>	246.841	1058.79	2.139	.011070	$3.40 \cdot 10^{-5}$	.2126	0.84
6 <sup>η</sup>	241.282	992.25	1.950	.011052	.047131	.1955	0.08
7 <sup>η</sup>	246.836	1058.62	2.139	.010740	$9.01 \cdot 10^{-9}$	.2126	3.12
8 <sup>η</sup>	246.836	1058.63	2.139	.010740	$8.46 \cdot 10^{-8}$	.2126	0.55

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα στην περίπτωση #2.

Μέθοδος	Υπολογισμένες τιμές						
	$\rho_1$ (m)	$\rho_2$ (m)	z (m)	F	$\ \nabla F\ $	$F_g$	$t_{\text{Σύγκλισης}}$ (min)
1 <sup>η</sup>	57.139	93.243	1.517	.024314	$4.0 \cdot 10^{-3}$	.4021	0.36
2 <sup>η</sup>	56.854	94.489	1.536	.024202	$4.25 \cdot 10^{-3}$	.4047	0.33
3 <sup>η</sup>	57.279	96.489	1.626	.024027	$7.33 \cdot 10^{-4}$	.4015	4.65
4 <sup>η</sup>	57.204	94.607	1.546	.024000	$3.03 \cdot 10^{-7}$	.3998	1.16
5 <sup>η</sup>	57.343	95.712	1.651	.024018	$3.13 \cdot 10^{-6}$	.4043	2.5
6 <sup>η</sup>	57.054	92.787	1.448	.023483	.069786	.3985	0.27
7 <sup>η</sup>	57.344	96.714	1.651	.024018	$4.04 \cdot 10^{-9}$	.4019	3.92
8 <sup>η</sup>	57.344	96.714	1.651	.024018	$5.46 \cdot 10^{-8}$	.4019	0.52

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα στην περίπτωση #3.

Μέθοδος	Υπολογισμένες τιμές						
	$\rho_1$ (m)	$\rho_2$ (m)	z (m)	F	$\ \nabla F\ $	$F_g$	$t_{\text{Σύγκλισης}}$ (min)
1 <sup>η</sup>	470.018	92.275	4.551	.013853	$6.18 \cdot 10^{-3}$	.2773	4.13
2 <sup>η</sup>	463.851	100.403	4.081	.055909	$1.23 \cdot 10^{-1}$	.4989	1.63
3 <sup>η</sup>	490.688	93.395	4.399	.011207	$8.22 \cdot 10^{-4}$	.2329	13.72
4 <sup>η</sup>	491.026	92.92	4.431	.011200	$5.03 \cdot 10^{-8}$	.2398	3.31
5 <sup>η</sup>	494.885	93.663	4.370	.001103	$3.65 \cdot 10^{-8}$	.2338	1.53
6 <sup>η</sup>	468.897	91.187	4.526	.014186	.061732	.2548	0.08
7 <sup>η</sup>	494.883	93.663	4.370	.011030	$1.63 \cdot 10^{-9}$	.2338	4.52
8 <sup>η</sup>	494.883	93.663	4.370	.011030	$2.09 \cdot 10^{-9}$	.2338	0.82

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα στην περίπτωση #4.

Μέθοδος	Υπολογισμένες τιμές						
	$\rho_1$ (m)	$\rho_2$ (m)	z (m)	F	$\ \nabla F\ $	$F_g$	$t_{\text{Σύγκλισης}}$ (min)
1 <sup>η</sup>	170.582	48.896	1.452	.013698	$4.14 \cdot 10^{-3}$	.1886	0.617
2 <sup>η</sup>	158.920	35.323	1.829	.019508	$2.98 \cdot 10^{-2}$	.1930	0.38
3 <sup>η</sup>	161.187	34.802	1.828	.010897	$7.01 \cdot 10^{-4}$	.1850	6.98
4 <sup>η</sup>	164.35	39.88	1.698	.010700	$1.52 \cdot 10^{-7}$	.1874	1.35
5 <sup>η</sup>	160.774	34.068	1.848	.010782	$7.27 \cdot 10^{-6}$	.1851	0.97
6 <sup>η</sup>	167.252	45.306	1.570	.012834	.108791	.1955	0.04
7 <sup>η</sup>	160.776	34.074	1.848	.010383	$3.71 \cdot 10^{-8}$	.1852	2.22
8 <sup>η</sup>	160.776	34.074	1.848	.010383	$1.52 \cdot 10^{-8}$	.1852	0.45

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα στην περίπτωση #5.

Μέθοδος	Υπολογισμένες τιμές						
	$\rho_1$ (m)	$\rho_2$ (m)	z (m)	F	$\ \nabla F\ $	$F_g$	$t_{\text{Σύγκλισης}}$ (min)
1 <sup>η</sup>	123.941	994.36	2.534	.021303	$4.53 \cdot 10^{-3}$	.3398	4.47
2 <sup>η</sup>	132.934	1055.24	2.821	.022387	$1.27 \cdot 10^{-1}$	.2958	2.03
3 <sup>η</sup>	125.474	1092.50	2.710	.020700	$8.76 \cdot 10^{-4}$	.2905	4.70
4 <sup>η</sup>	122.379	1035.78	2.465	.020600	$4.60 \cdot 10^{-6}$	.3098	2.25
5 <sup>η</sup>	125.527	1092.83	2.712	.020702	$1.06 \cdot 10^{-4}$	.2904	1.30
6 <sup>η</sup>	117.952	992.03	2.205	.031140	.266593	.3771	0.17
7 <sup>η</sup>	125.525	1092.88	2.712	.017902	$1.08 \cdot 10^{-3}$	.2904	3.48
8 <sup>η</sup>	125.526	1093.08	2.713	.016990	$6.29 \cdot 10^{-7}$	.2903	0.98

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα στην περίπτωση #6.

Τα αποτελέσματα που παίρνουμε μπορούν να εκτιμηθούν γενικά με τις τεχνικές 4<sup>η</sup> (SOGT), 5<sup>η</sup> (LMT), 7<sup>η</sup> (QNT) και 8<sup>η</sup> (MMT). Στον Πίνακα 4.8 ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για την MMT συγκρίνονται με αυτά της SOGT, όπου φαίνεται ότι η MMT είναι καλύτερη από την SOGT της αναφορά [19]. Αυτό ισχύει σε σχέση με τους χρόνους σύγκλισης, που είναι σημαντικά μικρότεροι από αυτούς της SOGT.

Από την άλλη θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην προτεινόμενη MMT οι επαναλήψεις της τεχνικής κλίσης πρώτης τάξης δεν χρειάζονται. Επιβεβαιώνεται έμμεσα ότι στην διαδικασία προσέγγισης του ελάχιστου, η IGT είναι αρκετά πιο αποτελεσματική από κάθε FOGT η οποία εμπλέκει τον διαγώνιο πίνακα  $\lambda \cdot I$ , καθώς και από την υπόθεση της SOGT όταν χρησιμοποιεί FOGT κατά την διαδικασία προσέγγισης του ελαχίστου.

Υπόθεση #		1	2	3	4	5	6
(SOGT) Αναφ. [9]	1 <sup>ης</sup> Τάξης	14	2	4	27	5	11
	2 <sup>ης</sup> Τάξης	9	10	8	7	9	21
(MMT)	1 <sup>ης</sup> Τάξης	1	0	1	2	0	4
	2 <sup>ης</sup> Τάξης	5	5	5	5	5	6

Πίνακας 4.8: Επαναλήψεις των 4<sup>ης</sup> (SOGT) και 8<sup>ης</sup> (MMT).

Σαν παράδειγμα τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την εφαρμογή της MMT τεχνικής με αυτά μίας ομάδας μετρούμενων τιμών σε ένα υποσταθμό στο Meleno, Leganes, Madrid (Spain), παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9. Η διαφορά εκφρασμένη σε ποσοστό %:  $100 \cdot (\rho_m - \rho_a) / \rho_a$ .

Σε σχέση με την αντικειμενική συνάρτηση F, στην 4<sup>η</sup> (SOGT), 8<sup>η</sup> (MMT), 5<sup>η</sup> (LMT), 7<sup>η</sup> (QNT), και 3<sup>η</sup> (FOGT) τεχνική είναι πρακτικά ισοδύναμη, όπου η first order gradient τεχνική που προτείνεται στη 3<sup>η</sup> περιλαμβάνεται. Η 6<sup>η</sup> (IGMT), 1<sup>η</sup> (FOGT) και 2<sup>η</sup> (FOGT) τεχνικές σε αυτή τη κατάσταση έχει φανεί ότι είναι λίγο υποδεέστερες.

Από την πλευρά της Ευκλείδειας νόρμας της κλίσης, μόνο οι τεχνικές 4<sup>η</sup> (SOGT), 8<sup>η</sup> (MMT), 5<sup>η</sup> (LMT), 7<sup>η</sup> (QNT), και 3<sup>η</sup> (FOGT) φτάνουν σε μία ικανοποιητικά μικρή τιμή. Η τεχνική 6<sup>η</sup> (IGT) δεν μας δίνει αποδεκτές τιμές σε όλες σχεδόν τις υποθέσεις. Η 1<sup>η</sup> (FOGT) επιτυγχάνει αποδεκτές τιμές, κάτι που δεν συμβαίνει με την 2<sup>η</sup> (FOGT).

Επαναλήψεις:

8 από την Γενικευμένη Ανάστροφη τεχνική (0.08 λεπτά)

1 από την Τεχνική Κλίσης Πρώτης Τάξης και

4 από την Τεχνική Κλίσης Δεύτερης Τάξης (0.40 λεπτά)

Μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή κλίσης:  $1 \cdot 10^{-005}$

Πίνακας Hessian. Τελευταία επανάληψη

0.0299	0.0273	0.3353
0.0273	0.1041	1.9913
0.3353	1.9913	56.5607

Αρχικές τιμές (διστρωματική δομή)

Ειδική αντίσταση ανώτερου στρώματος ( $\Omega \cdot m$ )=30.2

Ειδική αντίσταση κατώτερου στρώματος ( $\Omega \cdot m$ )=7.1

Βάθος ανώτερου στρώματος (m)=1

Αντικειμενική συνάρτηση =6.35825484

Υπολογιζόμενες τιμές (διστρωματική δομή)

Ειδική αντίσταση ανώτερου στρώματος ( $\Omega \cdot m$ )=29.800

Ειδική αντίσταση κατώτερου στρώματος ( $\Omega \cdot m$ )=5.635

Βάθος ανώτερου στρώματος (m)=10.238

Αντικειμενική συνάρτηση (τελική τιμή)=0.01387167				
Ευκλείδεια νόρμα της κλίσης = $3.44657 \cdot 10^{-009}$				
Αριθ. Μετρ.	Διάστημα	$\rho_m$ Μετρούμενη	$\rho_m$ Υπολογιζόμενη	Διαφορά %
1	1.500	30.200	29.756	1.491
2	2.000	29.700	29.698	0.006
3	2.500	30.000	29.605	1.333
4	3.000	29.000	29.472	-1.601
5	3.500	28.900	29.294	-1.344
6	4.000	28.800	29.068	-0.923
7	4.500	28.800	28.794	0.019
8	5.000	27.600	28.473	-3.065
9	5.500	27.400	28.105	-2.508
10	6.000	28.200	27.694	1.828
11	8.000	27.000	25.693	5.088
12	10.000	24.000	23.340	2.826
13	13.000	18.900	19.722	-4.167
14	16.000	17.500	16.481	6.185
15	20.000	13.000	13.085	-0.651
16	25.000	10.000	10.235	-2.299
17	32.000	7.800	8.030	-2.868
18	40.000	7.100	6.864	3.445

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα συνδυασμένης μεθόδου.

Σε σχέση με το χρόνο πρέπει να παρατηρήσουμε τα αποτελέσματα, είναι φανερό ότι η ταχύτερη τεχνική είναι η 6<sup>η</sup> (IGT) ακολουθούμενη στις περισσότερες περιπτώσεις από την 8<sup>η</sup> (MMT). Η 4<sup>η</sup> (SOGT) και η 5<sup>η</sup> (LMT) παρουσιάζουν σχετικά μειωμένο χρόνο σύγκλισης. Η 3<sup>η</sup> (FOGT) και η 7<sup>η</sup> (QNT) παρουσιάζουν γενικά απαγορευτικό



χρόνο σύγκλισης που είναι δικαιολογημένο μόνο στη δεύτερη λόγω της υψηλής ακρίβειας. Η 1<sup>η</sup> (FOGT) και η 2<sup>η</sup> (FOGT) παρουσιάζονται όμοιες και με σχετικά αποδεκτούς χρόνους σύγκλισης.

#### 4.2.5 Συμπεράσματα

Χρησιμοποιώντας τη θεωρητική βάση για τον υπολογισμό του διανύσματος των παραμέτρων πετυχαίνεται μία βέλτιστη ταύτιση ανάμεσα στην ομάδα των μετρούμενων τιμών της ειδικής αντίστασης και της αντίστοιχης ομάδας των υπολογιζόμενων τιμών της ειδικής αντίστασης με παραμέτρους σαν αυτές που αναφέραμε. Ο πρώτος μας στόχος είναι να ορίσουμε τα απαραίτητα εργαλεία ώστε να θα εφαρμόσουμε τις οκτώ διαφορετικές τεχνικές οι οποίες θα μας επιτρέψουν τον υπολογισμό των παραμέτρων ενός διστρωματικού εδάφους [3].

Στην Μέθοδος Καθόδου Μέγιστης Κλίσης στη κατεύθυνση της αρνητικής κλίσης υπάρχει ένα σημαντικό βαθμωτό διάνυσμα το οποίο πρέπει να λάβουμε υπόψιν. Μία κατάλληλη επιλογή του  $[\lambda]$  μπορεί να προκαλέσει μία αστάθεια στην σύγκλιση της διαδικασίας.

Τα αποτελέσματα των έξι υποθέσεων που εξετάζονται, δείχνουν μία ικανοποιητική συμπεριφορά των τεχνικών της αναφοράς [10] με τις παρουσιαζόμενες τροποποιήσεις. Μία ακόμη καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζεται από την FOGT που προτείνει το παρόν άρθρο το οποίο ωφελείται από τμήμα της φιλοσοφίας που παρουσιάζεται στο [19] για την παραγωγή του διαγώνιου πίνακα  $[\lambda]$ .

Η FOGT που προτείνεται είναι σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάσαμε καλύτερη από αυτές των αναφορών [7, 10, 11] και σε ότι αφορά τη ταύτιση των τιμών αλλά και στον χρόνο εκτέλεσης.

Η 2<sup>η</sup> τεχνική (FOGT) των αναφορών [7, 11] δεν είναι πολύ αποτελεσματική σε ορισμένες περιπτώσεις ( για παράδειγμα στις #1 και #4 ). Σε κάθε περίπτωση μειονεκτεί απέναντι σε αυτή της αναφοράς [10]. Οι τιμές των συνιστωσών της τελικής κλίσης είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μακριά από το μηδέν.

Η 1<sup>η</sup> (FOGT) τεχνική που προτείνεται στο [10] με τις τροποποιήσεις που προτείνονται στο παρόν άρθρο οδηγεί σε ικανοποιητικές τιμές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων ενός διστρωματικού εδάφους.

Σε κάθε περίπτωση καμία από τις FOGT αναλύσεις παρουσιάζουν αρκετά αξιόπιστη συμπεριφορά στην αναζήτηση των βέλτιστων ρυθμίσεων κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες, ώστε να τις πάρουμε για βάση για των υπολογισμό των βέλτιστων παραμέτρων σε πολυστρωματικά εδάφη.

Η 6<sup>η</sup> τεχνική (IGT) παρουσιάζει ως αποτέλεσμα συνιστώσες της κλίσης πολύ υψηλές για πραγματοποιήσει μία επαρκή προσέγγιση του βέλτιστου. Παρόλα αυτά μπορεί να φανεί χρήσιμη στην πράξη καθώς είναι ταχύτερη στην επίτευξη αποτελεσμάτων. Σε κάθε περίπτωση μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη (όπως έγινε στην MMT) σαν βοηθητικό εργαλείο για την προσέγγιση του βέλτιστου με μετέπειτα χρήση κάποιας άλλης τεχνικής.

Συγκρίνοντας τις υπόλοιπες τεχνικές η 8<sup>η</sup> (MMT) παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά πετυχαίνοντας στις περισσότερες περιπτώσεις τις μικρότερες τιμές των  $F(\underline{X})$ ,  $\|\nabla F(\underline{X})\|$  με τον ίδιο τρόπο όπως η 4<sup>η</sup> (SOGT). Επιπλέον επιτυγχάνει τους μικρότερους χρόνους εκτέλεσης. Όμοια χαρακτηριστικά παρουσιάζονται και από την 5<sup>η</sup> (LMT) αλλά με λίγο υψηλότερους χρόνους εκτέλεσης. Οι χρόνοι είναι επίσης λίγο υψηλοί και για την 7<sup>η</sup> (QNM) αλλά η ακρίβεια είναι στα ίδια επίπεδα και ίσως λίγο καλύτερα από αυτά των τεχνικών 8<sup>η</sup> (MMT), 4<sup>η</sup> (SOGT) και 5<sup>η</sup> (LMT).

Από την προηγούμενη παρουσίαση η συμπερασματική εισήγηση για τον υπολογισμό των παραμέτρων σε διστρωματικό έδαφος, από την καλύτερη προς την χειρότερη, με έμφαση στη ακρίβεια (πιο σημαντική) και τον χρόνο σύγκλισης είναι:

-Σύνθετη Δεύτερης Τάξης – Γενικευμένη Ανάστροφη Τεχνική (MMT)

-Τεχνική βασισμένη στην Levenberg – Marquardt (LMT)

-Τεχνική βασισμένη στην μέθοδο Newton (SOGT)

-Τεχνική βασισμένη στην μέθοδο Quasi-Newton (QNT)

-Προτεινόμενη 3<sup>η</sup> τεχνική κλίσης πρώτης τάξης (FOGT)

- Τεχνική κλίσης πρώτης τάξης από τα [7, 11]
- Γενικευμένη Ανάστροφη τεχνική (IGT)

Οι πρώτες τρεις από την προηγούμενη ταξινόμηση παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ακρίβειας και χρόνου σύγκλισης που τις καθιστούν ισχυρότατα εργαλεία ανάλυσης για την επίλυση του προβλήματος του υπολογισμού των παραμέτρων διστρωματικών εδαφών. Η IGT μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βοηθητική για την παραγωγή των αρχικών τιμών.

## 4.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

### 4.3.1 Γενικά

Η φύση έχει ένα πολύ ισχυρό μηχανισμό εξέλιξης των οργανισμών, που βασίζεται στον ακόλουθο κανόνα της φυσικής επιλογής: Οι οργανισμοί που δεν μπορούν να επιβιώσουν στο περιβάλλον τους πεθαίνουν, ενώ οι υπόλοιποι πολλαπλασιάζονται μέσω της αναπαραγωγής. Οι απόγονοι παρουσιάζουν μικρές διαφοροποιήσεις από τους προγόνους τους, ενώ συνήθως υπερισχύουν αυτοί που συγκεντρώνουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

Αν το περιβάλλον μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς, τα διάφορα είδη μπορούν να εξελίσσονται σταδιακά ώστε να προσαρμόζονται σε αυτό. Αν όμως συμβούν ραγδαίες μεταβολές, αρκετά είδη οργανισμών θα εξαφανιστούν. Σποραδικά, συμβαίνουν τυχαίες μεταλλάξεις, από τις οποίες οι περισσότερες οδηγούν τα μεταλλαγμένα άτομα στο θάνατο, αν και είναι πιθανόν, πολύ σπάνια, να οδηγήσουν στη δημιουργία νέων "καλύτερων" οργανισμών [20].

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα ανωτέρω παρουσιάζουμε ένα απλό παράδειγμα : Έστω ότι σε κάποια στιγμή υπάρχει ένας πληθυσμός κουνελιών. Είναι φυσικό ότι τα κουνέλια που είναι πιο γρήγορα και πιο έξυπνα από άλλα θα έχουν μικρότερη πιθανότητα να καταλήξουν γεύμα των αλεπούδων και συνεπώς μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσουν και να κάνουν αυτό που γνωρίζουν καλύτερα, να αναπαράγουν! Βέβαια, μερικά από τα αργά και κουτά κουνέλια θα καταφέρουν να

επιβιώσουν λόγω τύχης. Έτσι ο εξελισσόμενος πληθυσμός θα είναι αποτέλεσμα διασταύρωσης γρήγορων κουνελιών με παρόμοια, αργά κουνέλια με γρήγορα, αργά με αργά, έξυπνα με έξυπνα, έξυπνα με κουτά κ.ο.κ. Κάθε τόσο εμφανίζεται και ένα ιδιότυπο κουνέλι που είναι αποτέλεσμα μετάλλαξης. Όμως, τα περισσότερα κουνέλια που θα έχουν επιζήσει για να αναπαράγουν στην επόμενη γενιά θα είναι γρήγορα και έξυπνα οπότε είναι λογικό ότι κάθε επόμενη γενιά θα περιέχει πιο γρήγορα και πιο έξυπνα κουνέλια από την προηγούμενη· αυτή είναι εξάλλου και η Δαρβίνεια θεωρία της εξέλιξης.

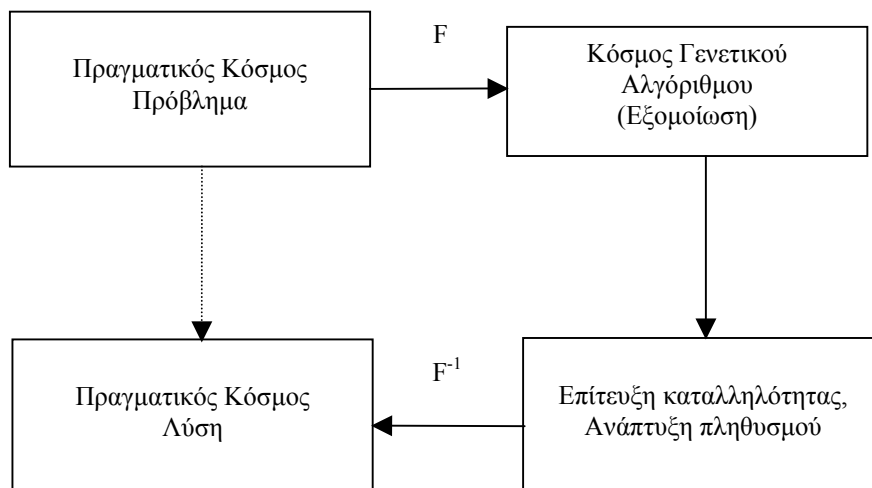
Πρέπει να σημειωθεί ότι από δύο γρήγορα και έξυπνα κουνέλια είναι πολύ πιθανόν να προκύψουν ακόμη πιο γρήγορα και έξυπνα κουνέλια, χωρίς όμως να αποκλείεται το ενδεχόμενο ότι από κάποιο ζεύγος γρήγορου με αργού κουνελιού ή από δύο αργά να προκύψουν κουνέλια που είναι πιο γρήγορα από τους γονείς τους. Αυτό εξαρτάται από το συνολικό συνδυασμό των γενετικών χαρακτηριστικών των γονέων και την ύπαρξη πιθανής μετάλλαξης σε κάποιο επιμέρους γενετικό χαρακτηριστικό. Βέβαια, στη περίπτωση αυτή, δεν πρέπει να ξεχάσουμε ότι και οι αλεπούδες υφίστανται εξέλιξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν πιο γρήγορες και έξυπνες αλεπούδες σε κάθε νέα γενιά για να αντιμετωπίσουν τα πιο γρήγορα και έξυπνα κουνέλια [21].

Η θεωρία της εξέλιξης (evolution) έχει χρησιμοποιηθεί σε μία κατηγορία αλγορίθμων επίλυσης προβλημάτων που ονομάζονται γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithms - GA). Η εισαγωγή των αλγορίθμων αυτών έγινε το 1958 από τον Freidberg, ο οποίος επιχείρησε να συνδυάσει μικρά προγράμματα FORTRAN, ωστόσο τα προγράμματα που προέκυψαν τις περισσότερες φορές δεν ήταν εκτελέσιμα. Ο Holland το 1975 έδωσε νέα ώθηση στο χώρο, χρησιμοποιώντας σειρές bits για να αναπαραστήσει λειτουργίες, με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε συνδυασμός bits να είναι μια έγκυρη λειτουργία. Δημιούργησε λοιπόν, ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο μπορούσε να λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτό το μοντέλο αντικατόπτριζε πλέον αυτό που ονομάζουμε εμείς γενετικό. Η ερευνητική ομάδα του Holland ασχολήθηκε ουσιαστικά με τεχνικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης εμπνευσμένες από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της γενετικής, που αναφέραμε παραπάνω. Σκοπός των γενετικών αλγορίθμων είναι η βελτίωση της ποιότητας των λύσεων (καθώς ο πληθυσμός αναπτύσσεται, γενιά με

γενιά) και τελικά μετά από ένα αριθμό γενεών να καταλήξουν σε βέλτιστες λύσεις. Σκοπός της έρευνας του Holland ήταν να ερμηνεύσουν τις προσαρμοστικές διαδικασίες των φυσικών συστημάτων και να σχεδιάσουν συστήματα τα οποία να έχουν ίδια χαρακτηριστικά με τα φυσικά συστήματα. Η έρευνα στους γενετικούς αλγόριθμους κορυφώθηκε τη δεκαετία του '80 και μετά, ευνοήθηκε δε πάρα πολύ από την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι οποίοι κατέστησαν υλοποιήσιμες και αποδοτικές τις βασικές αρχές τους.

### 4.3.2 Περιγραφή Γενετικών Αλγορίθμων

Ο μετασχηματισμός ενός προβλήματος από την περιοχή του πραγματικού κόσμου σε αυτή του γενετικού μας δίνει τη δυνατότητα απλοποίησης της διαδικασίας εύρεσης της λύσης, με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί ένας μετασχηματισμός Fourier *Σχήμα 4.5* [26].



*Σχήμα 4.5: Μετασχηματισμός του γενετικού αλγόριθμου.*

Η φιλοσοφία των γενετικών αλγορίθμων είναι η εξής: Αρχικά δημιουργείται με τυχαίο τρόπο ένα σύνολο  $P$  από υποψήφιες λύσεις του προβλήματος. Είναι σημαντικό να τονιστεί εδώ ότι το αρχικό αυτό σύνολο απαρτίζεται από λύσεις οι οποίες είναι ως επί το πλείστον μη αποδεκτές (π.χ. δεν είναι έγκυρες, δεν είναι βέλτιστες, κλπ). Έστω  $N$  το πλήθος των στοιχείων του συνόλου  $P$ . Οι λύσεις αυτές βαθμολογούνται από μια *συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function)*. Η βαθμολόγησή τους συνίσταται στην αντιστοίχιση σε κάθε υποψήφια λύση ενός αριθμού, ο οποίος δηλώνει την εγγύτητα της υποψήφιας μη αποδεκτής λύσης ως

προς κάποια αποδεκτή. Στη συνέχεια, από τον αρχικό πληθυσμό σχηματίζονται  $N/2$  ζευγάρια όχι απαραίτητα μοναδικών γονέων, δίνοντας μεγαλύτερη προτεραιότητα στις πλέον κατάλληλες λύσεις. Κάθε ζευγάρι ζευγαρώνει (*mates*), δίνοντας δύο νέες λύσεις, τους απογόνους (*offsprings*). Ο νέος πληθυσμός  $P'$  αποτελείται από το σύνολο των απογόνων και συνήθως αποτελεί βελτίωση του προηγούμενου πληθυσμού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το νέο πληθυσμό  $P'$ , ενώ οι πιο συνηθισμένες συνθήκες τερματισμού της είναι η εύρεση μιας τέλειας λύσης με βάση τη συνάρτηση καταλληλότητας και η σύγκλιση όλων των λύσεων σε μία.

Ο γενετικός αλγόριθμος εκτελεί μία αναζήτηση στο χώρο των υποψήφιων λύσεων, με στόχο την εύρεση κάποιας λύσης που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση καταλληλότητας. Η αναζήτηση αυτή είναι παράλληλη, καθώς σε κάθε υποψήφια λύση μπορεί να εκτελεστεί ξεχωριστή αναζήτηση. Η μέθοδος της αναζήτησης μπορεί να θεωρηθεί σαν *αναρρίχηση λόφου* (*hill climbing*), καθώς γίνονται μικρές αλλαγές στις υποψήφιες λύσεις του πληθυσμού και επιλέγονται πάντα οι καλύτερες, βάσει της συνάρτησης καταλληλότητας. Η αναζήτηση επικεντρώνεται στις περισσότερο κατάλληλες λύσεις, χωρίς όμως να αγνοούνται οι υπόλοιπες, καθώς υπάρχει πάντα ο κίνδυνος να παγιδευτεί η διαδικασία σε *τοπικό μέγιστο* (*local maximum*) [20].

### 4.3.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Γενετικών αλγορίθμων

Οι λόγοι που μας συμφέρει η χρησιμοποίηση γενετικών αλγορίθμων είναι ότι είναι υπολογιστικά απλοί και ισχυροί στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης (αναζήτηση ελαχίστου ή μεγίστου). Επιπλέον, δεν περιορίζονται ουσιαστικά από υποθέσεις για το χώρο αναζήτησης (υποθέσεις σχετικά με τη συνέχεια, την ύπαρξη παραγώγων και την ύπαρξη ενός μόνο μεγίστου). Ακόμα δεν παγιδεύονται όταν βρεθούν ανάμεσα σε τοπικά ακρότατα όπως άλλες επαναληπτικές μέθοδοι. [22, 23].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες υπολογιστικές μεθόδους. Κωδικοποιούν το φυσικό σύνολο των παραμέτρων του προβλήματος υπό τη μορφή συμβολοσειράς, όπως στην βιολογία γίνεται αναπαράσταση των μεταβλητών με τη μορφή γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα.

Οι άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης, για παράδειγμα η μέθοδος σημείου-σημείου στην οποία γίνεται μετακίνηση από ένα σημείο στο χώρο απόφασης σε ένα άλλο χρησιμοποιώντας κάποιον κανόνα μετάβασης, οδηγούνται πολύ συχνά σε λανθασμένο υπολογισμό του μέγιστου στις περιπτώσεις περιοχών με περισσότερα από ένα μέγιστα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι όμως χρησιμοποιούν ταυτόχρονα μία ευρεία βάση δεδομένων σημείων ψάχνοντας πολλά μέγιστα με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα σφάλματος.

Οι συνήθεις τεχνικές αναζήτησης όπως είναι η τεχνική της κλίσης απαιτούν τη γνώση των παραγώγων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν στο ότι δεν χρειάζονται βοηθητική πληροφορία. Δηλαδή μπορούν να επιτύχουν αποδοτική αναζήτηση με μοναδική απαίτηση τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζεται με τις ατομικές συμβολοσειρές.

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους, που χρησιμοποιούν αιτιοκρατικούς κανόνες μετάβασης, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης για την καθοδήγηση της αναζήτησης [24].

Τέλος μπορούν να δώσουν ένα πλήθος λύσεων στο πρόβλημα και όχι μόνο μία. Η επιλογή της καλύτερης λύσης είναι στην αρμοδιότητα του ανθρώπου. Αυτό είναι εξαιρετικά χρήσιμο όταν υπάρχουν πολλαπλές λύσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμένων [21].

Θα ήταν όμως σωστό να αναφέρουμε ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν και αυτοί τα μειονεκτήματά τους. Το βασικότερο μειονέκτημά τους κυρίως σε θέματα χρόνου εκτέλεσης, όπου οι γενετικοί αλγόριθμοι υστερούν, κυρίως λόγω του ότι απαιτούν πολύ μεγάλο αριθμό υπολογισμών της συνάρτησης καταλληλότητας.

Σε αρκετές περιπτώσεις επίσης οι γενετικοί αλγόριθμοι εντοπίζουν εύκολα την περιοχή του ολικού βέλτιστου, έχουν όμως πρόβλημα στον ακριβή προσδιορισμό του. Αυτό βέβαια μπορεί να αντιμετωπιστεί αποδοτικά με συνδυασμένη χρήση γενετικών αλγορίθμων και κάποιας άλλης μεθόδου βελτιστοποίησης, ώστε με το γενετικό αλγόριθμο να εντοπιστεί η άγνωστη περιοχή του ολικού βέλτιστου και στη συνέχεια, ο άλλος αλγόριθμος, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου σαν αρχική εκτίμηση, να προσεγγίσει πολύ κοντά στο πραγματικό

σημείο βέλτιστου. Αυτή η συνδυασμένη τεχνική μεγιστοποιεί την αποδοτικότητα στην επίλυση ενός σύνθετου και πολύπλοκου προβλήματος. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος είναι οι δοκιμαστικές προσπάθειες και εκτελέσεις ώστε να βρεθεί η πιο κατάλληλη και αποδοτική διαμόρφωση για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα [25].

#### 4.3.4 Εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζουμε μερικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των γενετικών αλγορίθμων:

##### *Εύρεση μέγιστης τιμής αριθμητικών συναρτήσεων*

Πρόκειται για την πιο καλά μελετημένη εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων. Η εύρεση του μεγίστου μίας συνάρτησης δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση για συναρτήσεις πολλών μεταβλητών, οι οποίες εμφανίζουν ασυνέχειες, θόρυβο, κλπ. Το πλεονέκτημα που εμφανίζει η εφαρμογή τους σε αυτά τα προβλήματα είναι ότι η συνάρτηση καταλληλότητας είναι δεδομένη.

##### *Επεξεργασία εικόνων*

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση προτύπων, όπως ακμές, επιφάνειες, ακόμη και αντικείμενα, σε ψηφιοποιημένες εικόνες. Το αποτέλεσμα αυτής της επεξεργασίας μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη ψηφιακή όραση.

##### *Συνδυαστική βελτιστοποίηση*

Πρόκειται για το κλασικό πρόβλημα κατανομής πόρων σε δραστηριότητες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του οφέλους ή την ελάττωση του κόστους. Τα προβλήματα αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν συνδυαστική έκρηξη του χώρου αναζήτησης, ως προς το μέγεθος του προβλήματος, με αποτέλεσμα ο έλεγχος όλων των υποψήφιων λύσεων να είναι αδύνατος. Το πιο γνωστό πρόβλημα αυτής της κατηγορίας είναι αυτό του *πλανόδιου πωλητή (Traveling sales person)*, όπου ο στόχος είναι η εύρεση της συντομότερης διαδρομής για την επίσκεψη ενός συνόλου πόλεων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να δώσουν σε αυτό το πρόβλημα αρκετές λύσεις κοντά στο



βέλτιστο. Ένα άλλο πρόβλημα είναι η αποθήκευση κιβωτίων (*bin packing*) και αφορά την εύρεση του βέλτιστου τρόπου αποθήκευσης ενός αριθμού κιβωτίων σε περιορισμένο χώρο και έχει πολύ μεγάλη πρακτική σημασία στη βιομηχανία. Ανάλογα προβλήματα εμφανίζονται και στη σχεδίαση VLSI κυκλωμάτων. Τέλος στην κατηγορία αυτών των εφαρμογών εντάσσονται και τα προβλήματα καταμερισμού των εργασιών (*job-shop scheduling*) και κατασκευής ωρολογίων προγραμμάτων (*time tabling*).

### *Σχεδίαση*

Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σχεδίαση κατασκευών και εξαρτημάτων, όπως για παράδειγμα γέφυρες, μηχανολογικά εξαρτήματα, όπου ζητούμενο μπορεί να είναι τόσο η εύρεση μιας λύσης, όσο και η βελτιστοποίηση της. Οι αλγόριθμοι μπορούν να δοκιμάσουν συνδυασμούς και ιδέες που ο ανθρώπινος νους δεν θα δοκίμαζε ποτέ, δίνοντας ενίοτε πρωτότυπα αποτελέσματα.

### *Μηχανική μάθηση*

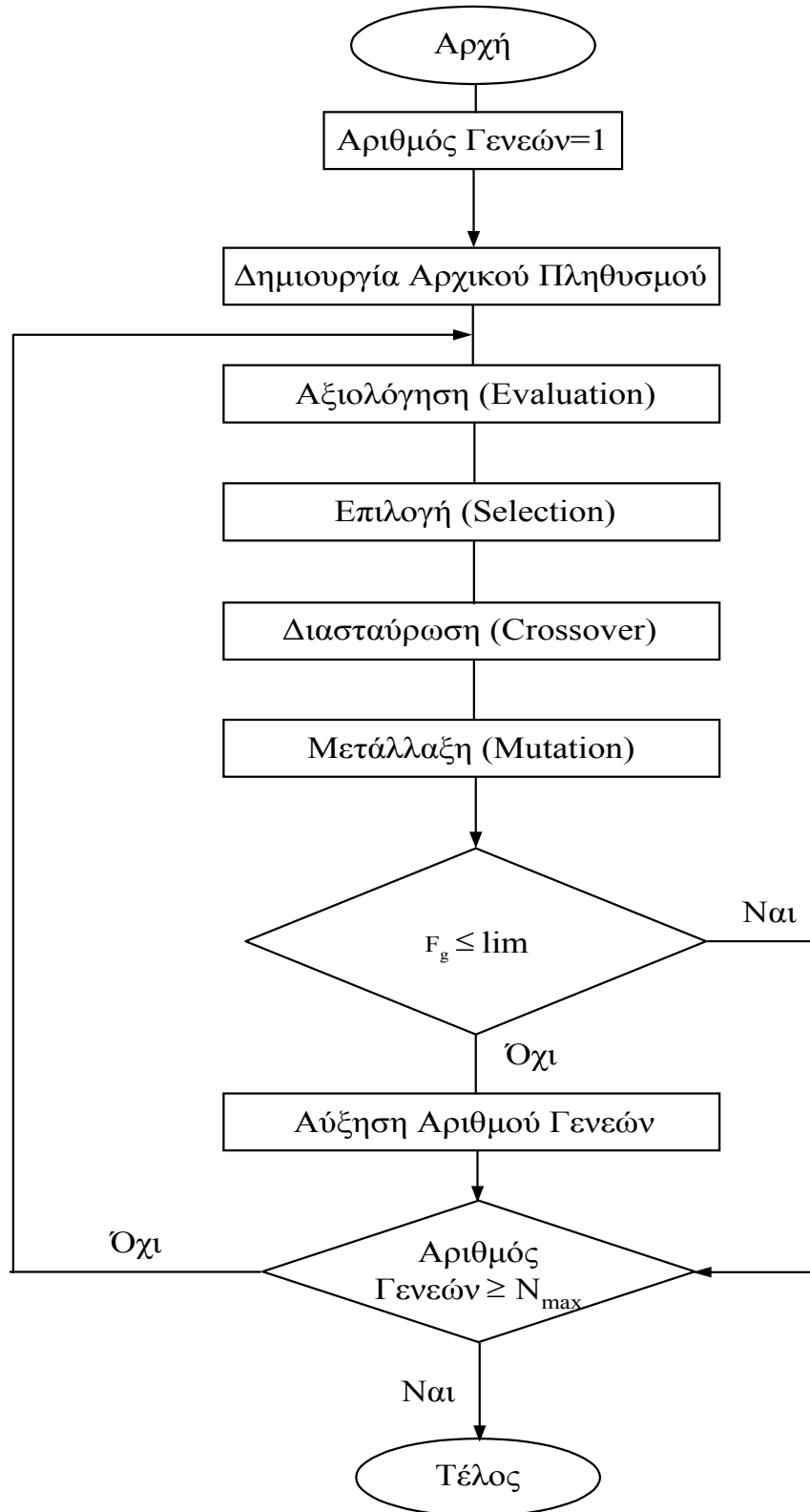
Στα συστήματα μηχανικής μάθησης οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανακάλυψη κανόνων *if...then...*. Η πιο γνωστή εφαρμογή είναι αυτή των συστημάτων κατηγοριοποίησης (*classifier systems*), ωστόσο οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν χρησιμοποιηθεί και σε παιχνίδια, επίλυση λαβυρίνθων, καθώς και για πολιτικές και οικονομικές αναλύσεις.

Γίνεται φανερό λοιπόν ότι οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα της τεχνητής νοημοσύνης και ιδιαίτερα σε προβλήματα βελτιστοποίησης [20].

#### **4.3.5 Λειτουργία γενετικού αλγόριθμου**

Η λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου που αναπτύχθηκε Σχήμα 4.6 βασίζεται σε πέντε βήματα που είναι τα εξής:

*Πρώτο βήμα* είναι η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού (αρχικοποίηση). Στο βήμα αυτό ο αρχικός πληθυσμός  $P_s$  δημιουργείται τυχαία από μία γεννήτρια αριθμών. Η αναπαράσταση του αρχικού πληθυσμού γίνεται με κωδικοποίηση.



Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Δηλαδή κάθε χρωμόσωμα είναι μία συμβολοσειρά που αποτελείται από δυαδικά ψηφία '0' και '1', όπου κάθε ψηφίο αναπαριστά ένα γονίδιο.

Δηλαδή κάθε ένα από τα  $P_s$  μέλη του αρχικού πληθυσμού μετατρέπεται σε ένα χρωμόσωμα με  $m$  συμβολοσειρές  $t$  θέσεων (μονοδιάστατος πίνακας  $t$  θέσεων). Ο αριθμός  $m$  δηλώνει το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών του προβλήματος, ενώ ο αριθμός  $t$  δηλώνει τα δυαδικά ψηφία που σχηματίζουν τον αριθμό. Είναι προφανές πως η ακρίβεια του προβλήματος θα είναι ανάλογη της ποσότητας  $\frac{E}{2^t}$ , όπου  $E$  είναι το εύρος στο οποίο κυμαίνεται η μεταβλητή του προβλήματος. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται ένα χρωμόσωμα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ενός προβλήματος με τρεις μεταβλητές ( $m=3$ ) και 256 στάθμες ( $2^t=2^8=256$ ).

$$\begin{array}{ccc} w_1 & w_2 & w_m \\ 10011010 & | & 00100111 & | & 11001010 \end{array}$$

Σχήμα 4.7: Παράδειγμα χρωμοσώματος για μέλος του πληθυσμού ( $m=3$ ,  $t=8$ ).

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν είναι κρίσιμος καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών. Όμως αν υπάρχει γνώση για το σύστημα η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό.

Στο δεύτερο βήμα έχουμε την αξιολόγηση (Evaluation), δηλαδή τον υπολογισμό της καταλληλότητας κάθε χρωμοσώματος, μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που μας δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης. Η επιλογή της συνάρτησης καταλληλότητας είναι το πιο κρίσιμο βήμα κατά την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε ένα πρακτικό πρόβλημα. Η συνάρτηση καταλληλότητας δέχεται ως είσοδο ένα χρωμόσωμα και επιστρέφει έναν αριθμό που υποδηλώνει το πόσο κατάλληλο είναι. Το πεδίο τιμών της συνάρτησης καταλληλότητας είναι συνήθων το διάστημα των πραγματικών αριθμών από το 0 έως το 1, αν και ανάλογα με την υλοποίηση αυτό θα μπορούσε να διαφέρει. Τιμή 1 υποδηλώνει ότι το συγκεκριμένο χρωμόσωμα είναι τέλει, δηλαδή ικανοποιεί όλες τις προϋποθέσεις του προβλήματος και αποτελεί αποδεκτή λύση. Ο τρόπος υλοποίησης της συνάρτησης βέβαια εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα. Δεν θα πρέπει να συγχέεται η συνάρτηση καταλληλότητας με την αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση δίνει

ένα μέτρο της απόδοσης ως προς το συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων και είναι χαρακτηριστική του προβλήματος και ανεξάρτητη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται. Η συνάρτηση καταλληλότητας είναι μια εσωτερική συνάρτηση των γενετικών αλγορίθμων και μετασχηματίζει το μέτρο της απόδοσης σε μία κατανομή ευκαιριών αναπαραγωγής. Στον γενετικό αλγόριθμο, η καταλληλότητα ορίζεται ως  $F_g = \frac{f_i}{\bar{f}}$  όπου  $f_i$  είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για τη λύση  $i$  και  $\bar{f}$  είναι η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης όλων των χρωμοσωμάτων.

Το τρίτο βήμα είναι αυτό της επιλογής (Selection). Στο βήμα αυτό τα χρωμοσώματα-γονείς με τον μεγαλύτερο βαθμό καταλληλότητας τοποθετούνται μία ή περισσότερες φορές σε έναν ενδιάμεσο πληθυσμό. Έτσι η πιθανότητα με την οποία οι λύσεις του τρέχοντα πληθυσμού αντιγράφονται και τοποθετούνται στον ενδιάμεσο πληθυσμό είναι ανάλογη του βαθμού καταλληλότητας τους

Τέταρτο βήμα είναι η διασταύρωση (ανασυνδιασμός -Crossover ). Στο βήμα αυτό οι λύσεις του ενδιάμεσου πληθυσμού ανασυνδιάζονται για την παραγωγή του επόμενου πληθυσμού με χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Συγκεκριμένα, από τον ενδιάμεσο πληθυσμό γίνεται τυχαία επιλογή των λύσεων ανά δύο, και έτσι δημιουργούνται οι λύσεις-γονείς. Έπειτα εφαρμόζεται στους γονείς ο τελεστής διασταύρωσης με μια πιθανότητα  $P_c$ . Η διασταύρωση ανασυνδιάζει τις συμβολοσειρές (γενετικό υλικό) των γονέων δημιουργώντας δύο απογόνους που κληρονομούν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων δηλαδή σχηματίζει  $P_s/2$  ζευγάρια από αυτά τα μέλη του πληθυσμού, που θεωρούνται γονείς για την αναπαραγωγή, στην οποία ανταλλάσσουν  $N_p$  τμήματα του γενετικού τους υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με διασταύρωση, Σχήμα 4.8.

Τελικό βήμα είναι η μετάλλαξη (Mutation). Η διασταύρωση αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων δεν είναι ωστόσο σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Ο τελεστής της μετάλλαξης καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στους απογόνους. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων των απογόνων. Δηλαδή είναι (η μετάλλαξη) το φαινόμενο κατά το οποίο επιλέγεται με τυχαίο τρόπο κάποια ή κάποιες από τις  $t$  θέσεις του χρωμοσώματος και το περιεχόμενο του

μεταλλάσσεται (δηλαδή αν περιέχει 0 γίνεται 1 ή το 1 γίνεται 0). Είναι απαραίτητη, καθώς, αν και η αναπαραγωγή και η διασταύρωση αναζητούν και αναμειγνύουν αποδοτικά τους υπάρχοντες απογόνους, υπάρχει περίπτωση να εγκλωβιστεί η λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο της συνάρτησης. Επίσης περιστασιακά μπορεί να προκαλέσει απώλεια μερικού εν δυνάμει χρήσιμου γενετικού υλικού, συνολικά όμως βοηθάει στην καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση [24].

$$\begin{array}{r}
 \\
 \\
 \\
 011|100|0011 \\
 000|110|1110 \\
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{r}
 0111000011 \\
 0111001110 \\
 0111100011 \\
 0111001110 \\
 0001000011 \\
 0001001110 \\
 0001100011 \\
 0001001110
 \end{array}$$

γονείς      -      παιδιά

Σχήμα 4.8: Οι δυνατοί συνδυασμοί παιδιών που προκύπτουν από τη διασταύρωση δύο γονιών ( $m=1$ ,  $t=10$ ,  $N_p=3$ ).

Θεωρείται ότι κάθε ζεύγος γονέων δίνει  $N_c$  παιδιά. Με την αναπαραγωγή, ο πληθυσμός των γονέων εμπλουτίζεται με τα παιδιά, αυξάνοντας τον αρχικό πληθυσμό, καθώς προστίθενται νέα μέλη. Οι γονείς πάντοτε ανήκουν στον θεωρούμενο πληθυσμό (ευγονισμός) για να μην χάνεται η προηγούμενη πληροφορία. Ο νέος πληθυσμός τώρα έχει  $P_s + N_c P_s / 2$  μέλη. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, μόνο  $P_s$  μέλη από τα  $P_s + N_c P_s / 2$  επιβιώνουν. Αυτά τα  $P_s$  μέλη επιλέγονται ως τα μέλη με τις υψηλότερες τιμές  $F_g$ , αν προσπαθούμε να επιτύχουμε μεγιστοποίηση του  $F_g$ , ή με τις χαμηλότερες τιμές  $F_g$ , αν προσπαθούμε να επιτύχουμε ελαχιστοποίηση του  $F_g$ . Με τις παραπάνω λειτουργίες δημιουργείται η επόμενη γενιά με έναν νέο πληθυσμό.

Συνεχίζοντας τις επαναλήψεις της αναπαραγωγής υπό τη διαδικασία της διασταύρωσης, της μετάλλαξης και της φυσικής επιλογής, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει το ελάχιστο (ή το μέγιστο) του  $F_g$ . Οι καλύτερες τιμές αυτού του πληθυσμού συγκλίνουν σε αυτό το σημείο. Το κριτήριο τερματισμού πληρείται, εάν

είτε η μέση τιμή του  $F_g$  στον πληθυσμό  $P_s$  μελών δεν βελτιώνεται περαιτέρω (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση), είτε ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος από τον μεγαλύτερο αριθμό των επαναλήψεων  $N_{max}$  [2].

### 4.3.6 Επίλυση του προβλήματος του διστρωματικού εδάφους με χρήση Γενετικών Αλγορίθμων

#### 4.3.6.1 Υπολογισμός των παραμέτρων

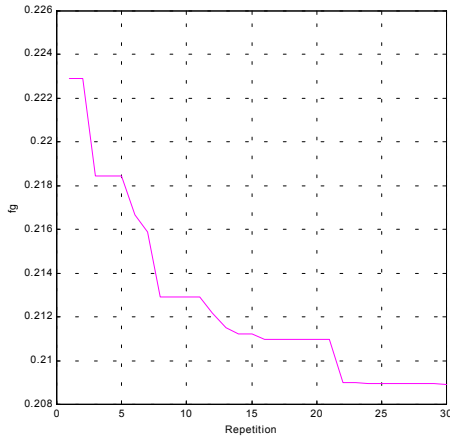
Ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε και στην §4.2.2. Για τον υπολογισμό των τριών παραμέτρων ( $\rho_1$  η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους,  $\rho_2$  η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους και  $h_1$  το βάθος του πάνω στρώματος) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης  $F_g$ :

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{mi} - \rho_{ai}|}{\rho_{mi}} \quad (4.37)$$

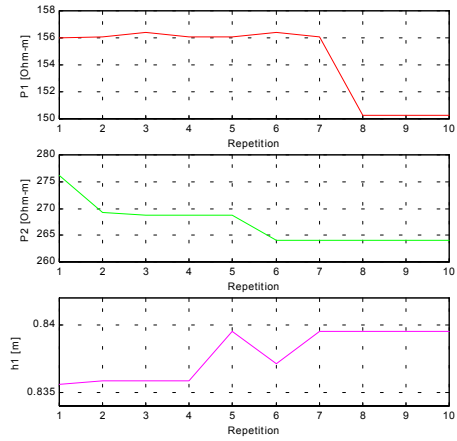
όπου  $\rho_{mi}$  είναι η  $i$ -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με  $a$ , ενώ  $\rho_{ai}$  είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με  $a$  που αντιστοιχεί στο  $i$ -οστό ζεύγος μετρήσεων. Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.1-4.4).

Στα σχήματα που ακολουθούν βλέπουμε κάποιες από τις εκτελέσεις του προγράμματος για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $h_1$ , καθώς επίσης και του απόλυτου σφάλματος  $F_g$ . Στο Σχήμα 4.9 βλέπουμε τη σύγκλιση των παραμέτρων που αντιστοιχούν στις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε στον χώρο έξω από τη Κεντρική βιβλιοθήκη της Πολυτεχνειούπολης, στο Άλσος Ζωγράφου απέναντι από την Πανεπιστημιούπολη, στο Γήπεδο ποδοσφαίρου της Πολυτεχνειούπολης και στην περιοχή πίσω από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.2, 3.4, 3.3, και 3.1 αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι παράμετροι για το έδαφος, μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή Ryarsh Vicarage της Αγγλίας για όλους τους

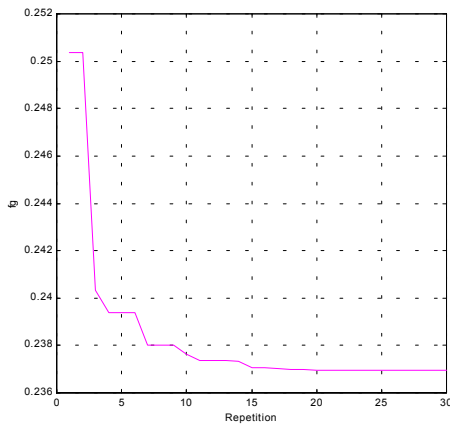
μήνες του έτους 1999 (Πίνακας 3.5β). Τέλος το Σχήμα 4.11 αναφέρεται σε κάθε μία από τις έξι περιπτώσεις που εξέτασε ο J. L Alamo (Πίνακας 4.1).



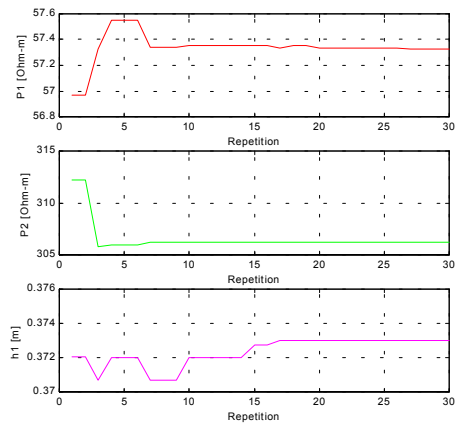
Σχήμα 4.9.1: Βιβλιοθήκη-Εκτέλεση No.1.



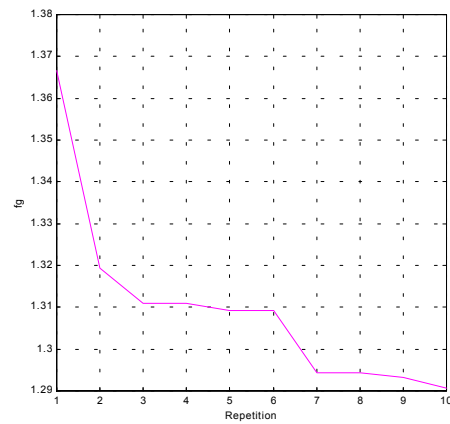
Σχήμα 4.9.2: Βιβλιοθήκη-Εκτέλεση No.1.



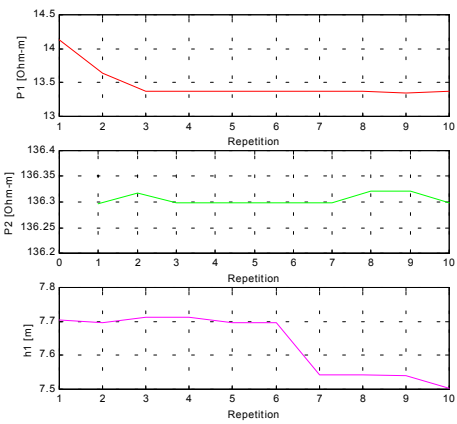
Σχήμα 4.9.3: Βιβλιοθήκη-Εκτέλεση No.2.



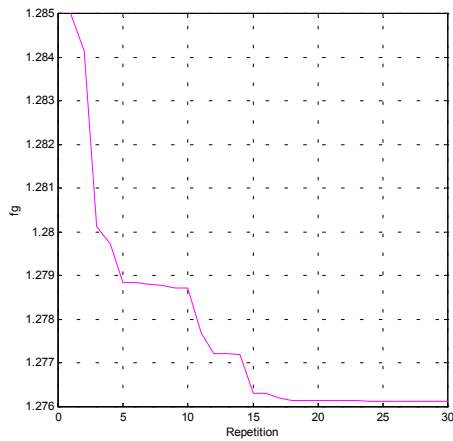
Σχήμα 4.9.4: Βιβλιοθήκη-Εκτέλεση No.2.



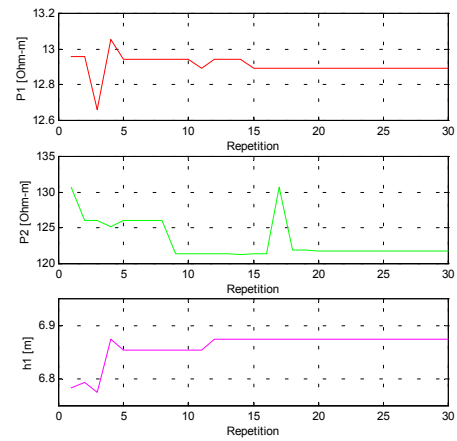
Σχήμα 4.9.5: Άλσος Ζωγράφου-Εκτέλεση No.1.



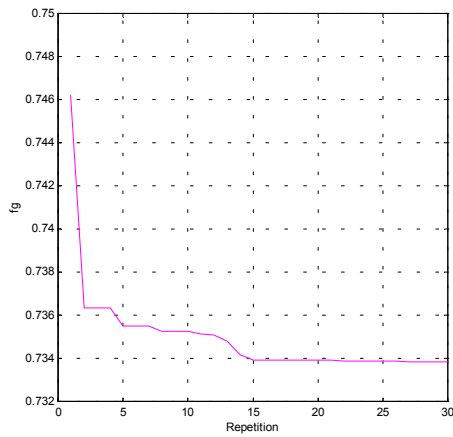
Σχήμα 4.9.6: Άλσος Ζωγράφου-Εκτέλεση No.1.



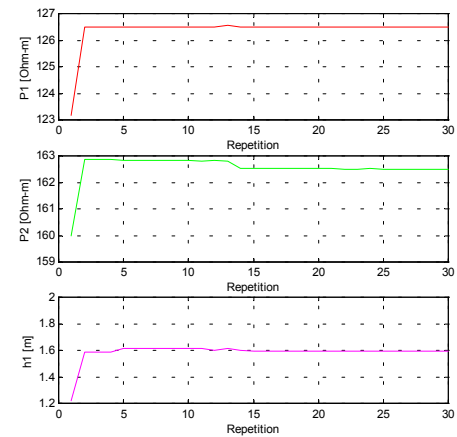
Σχήμα 4.9.7: Άλσος Ζωγράφου-Εκτέλεση Νο.2.



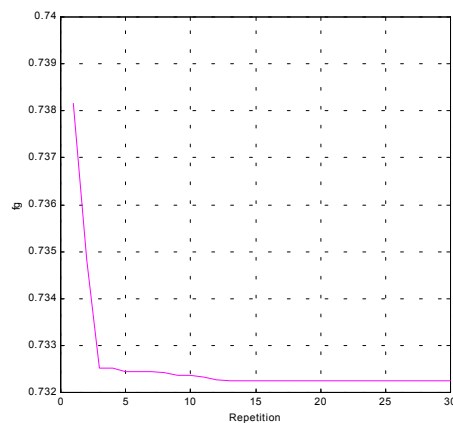
Σχήμα 4.9.8: Άλσος Ζωγράφου-Εκτέλεση Νο.2.



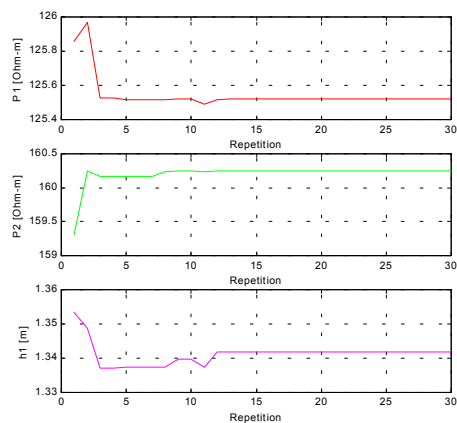
Σχήμα 4.9.9: Γήπεδο ποδοσφαίρου-Εκτέλεση Νο.1.



Σχήμα 4.9.10: Γήπεδο ποδοσφαίρου-Εκτέλεση Νο.1.

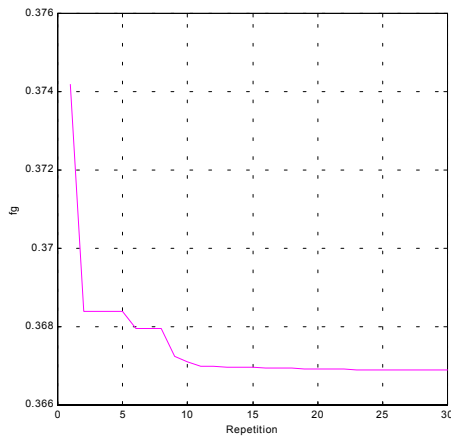


Σχήμα 4.9.11: Γήπεδο ποδοσφαίρου-Εκτέλεση Νο.2.

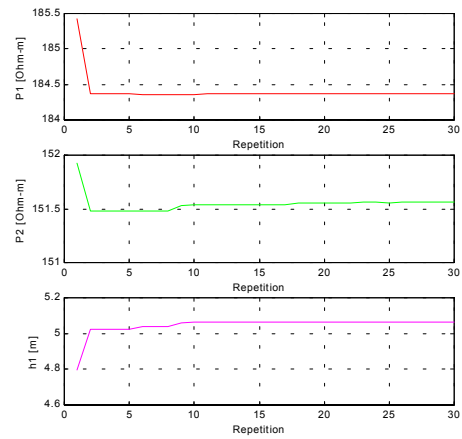


Σχήμα 4.9.12: Γήπεδο ποδοσφαίρου-Εκτέλεση Νο.2.

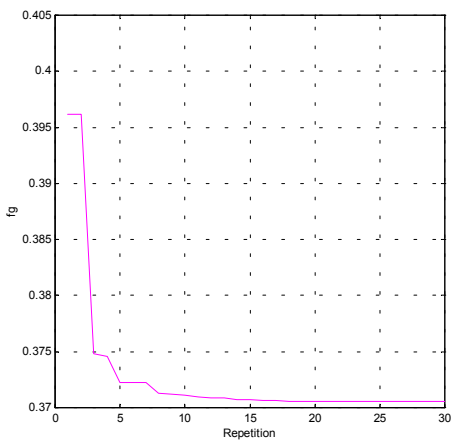




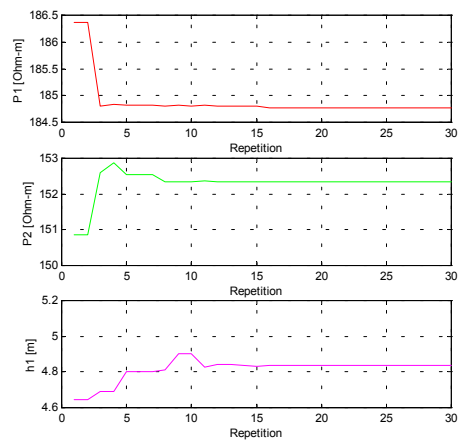
Σχήμα 4.9.13: Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων-Εκτέλεση No.1.



Σχήμα 4.9.14: Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων-Εκτέλεση No.1.

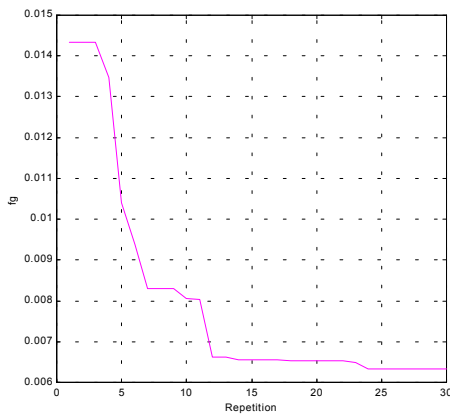


Σχήμα 4.9.15: Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων-Εκτέλεση No.2.

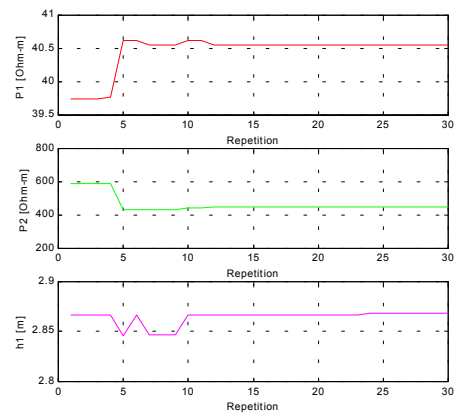


Σχήμα 4.9.16: Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων-Εκτέλεση No.2.

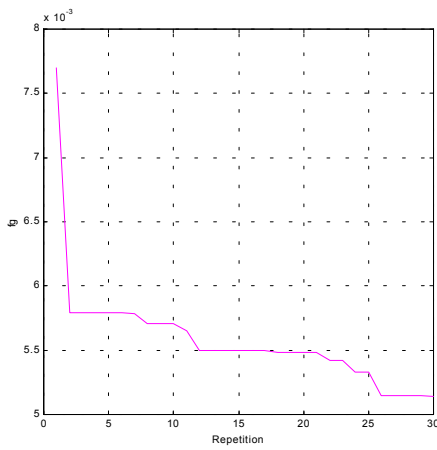
Σχήμα 4.9: Σύγκλιση παραμέτρων για δύο διαφορετικές εκτελέσεις του Γενετικού Αλγόριθμου.



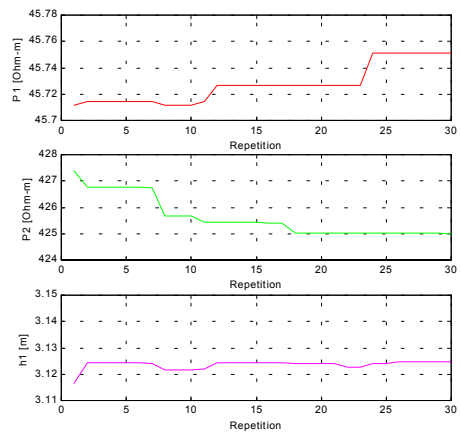
Σχήμα 4.10.1: Ryarsh Vicarage 1999/1.



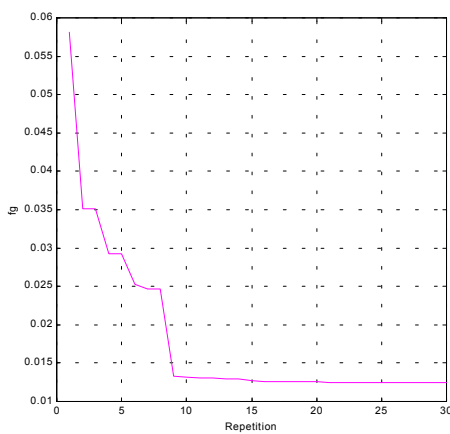
Σχήμα 4.10.2: Ryarsh Vicarage 1999/1.



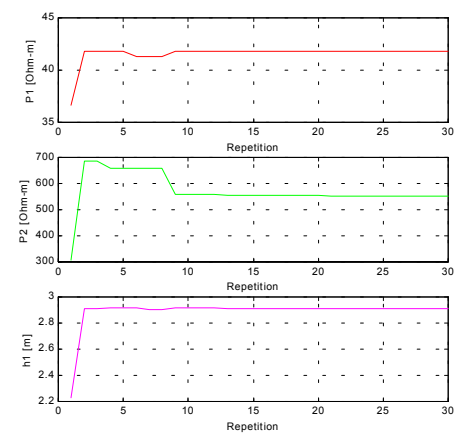
Σχήμα 4.10.3: Ryarsh Vicarage 1999/2.



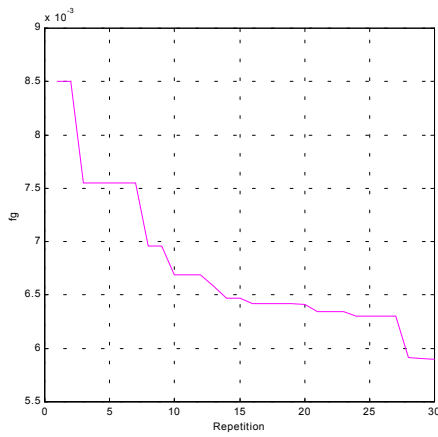
Σχήμα 4.10.4: Ryarsh Vicarage 1999/2.



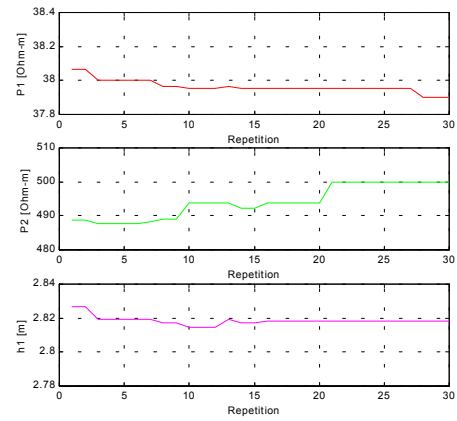
Σχήμα 4.10.5: Ryarsh Vicarage 1999/3.



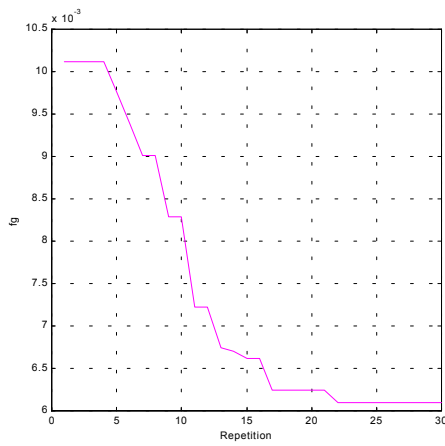
Σχήμα 4.10.6: Ryarsh Vicarage 1999/3.



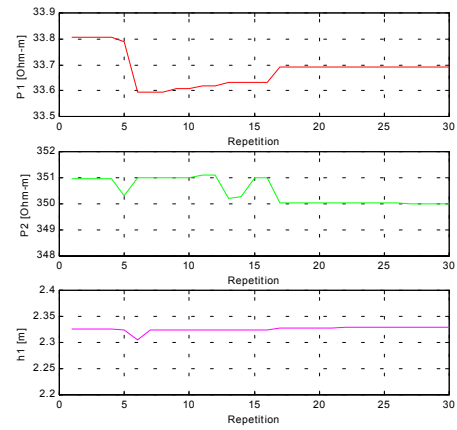
Σχήμα 4.10.7: Ryarsh Vicarage 1999/4.



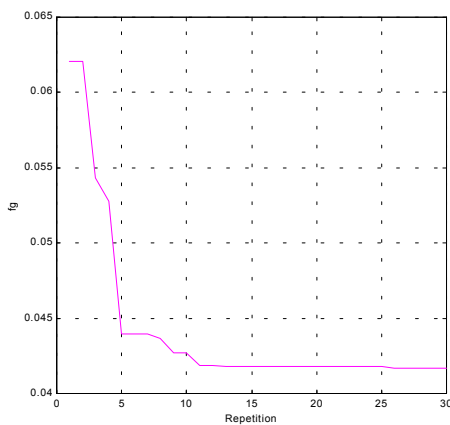
Σχήμα 4.10.8: Ryarsh Vicarage 1999/4.



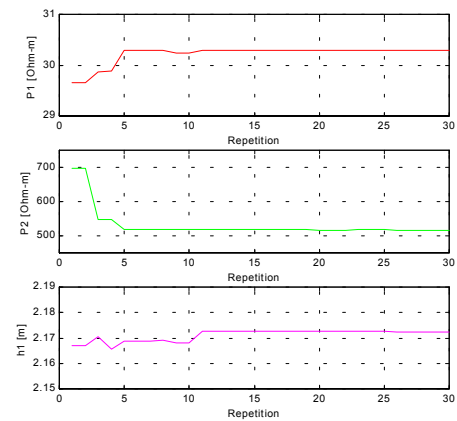
Σχήμα 4.10.9: Ryarsh Vicarage 1999/5.



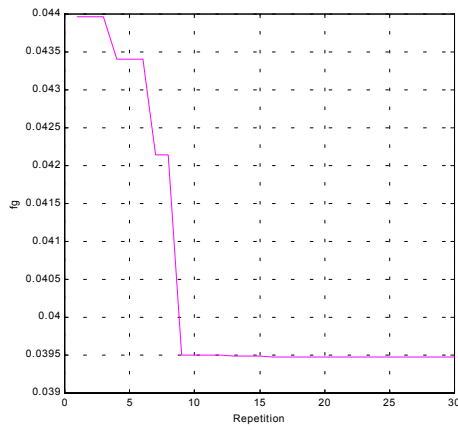
Σχήμα 4.10.10: Ryarsh Vicarage 1999/5.



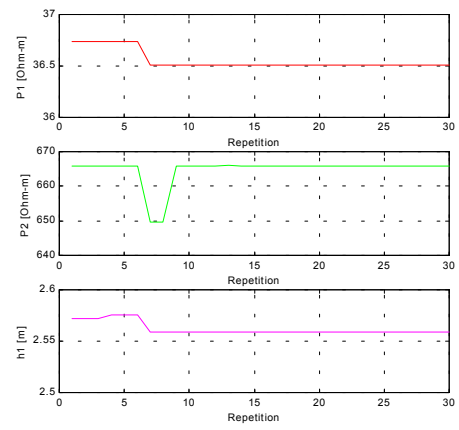
Σχήμα 4.10.11: Ryarsh Vicarage 1999/6.



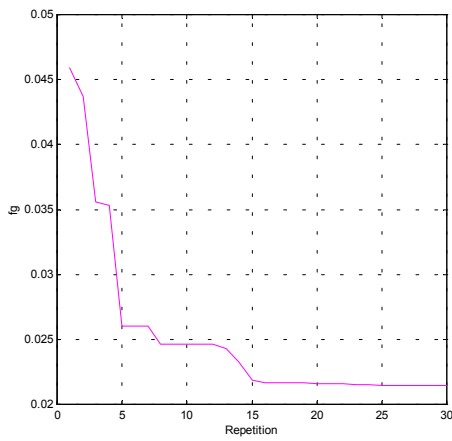
Σχήμα 4.10.12: Ryarsh Vicarage 1999/6.



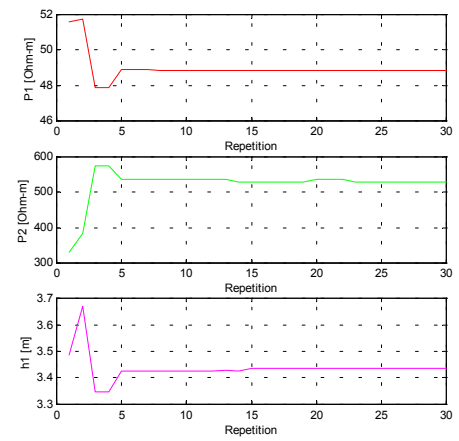
Σχήμα 4.10.13: Ryarsh Vicarage 1999/7.



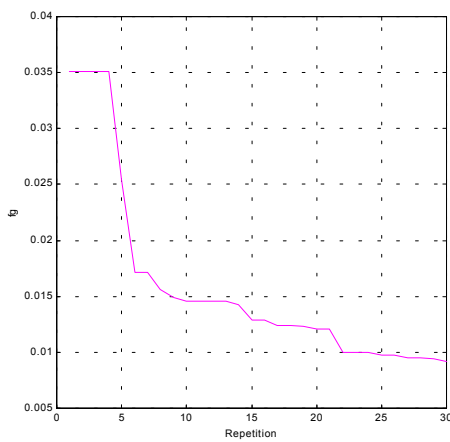
Σχήμα 4.10.14: Ryarsh Vicarage 1999/7.



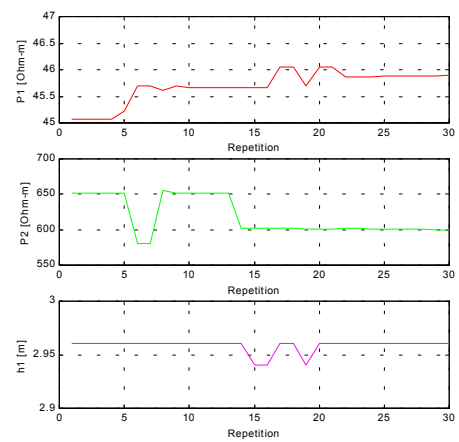
Σχήμα 4.10.15: Ryarsh Vicarage 1999/8.



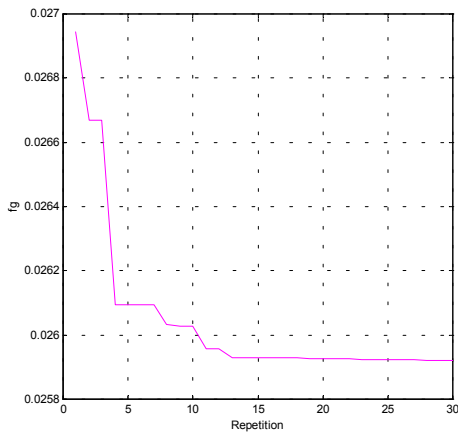
Σχήμα 4.10.16: Ryarsh Vicarage 1999/8.



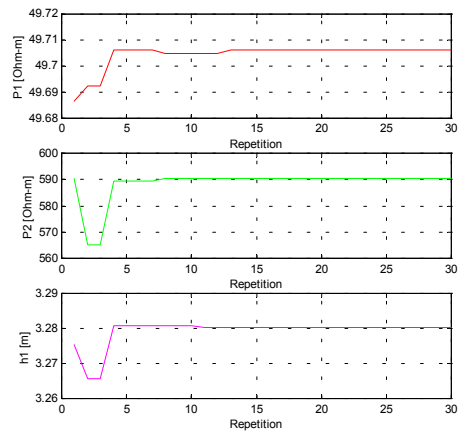
Σχήμα 4.10.17: Ryarsh Vicarage 1999/9.



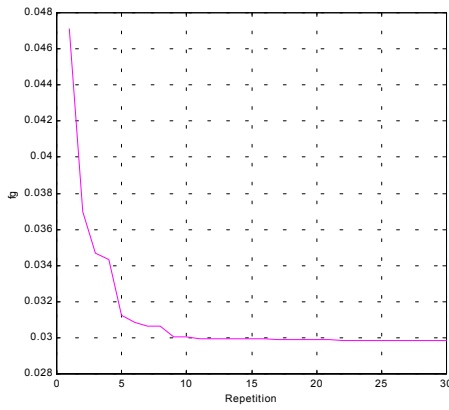
Σχήμα 4.10.18: Ryarsh Vicarage 1999/9.



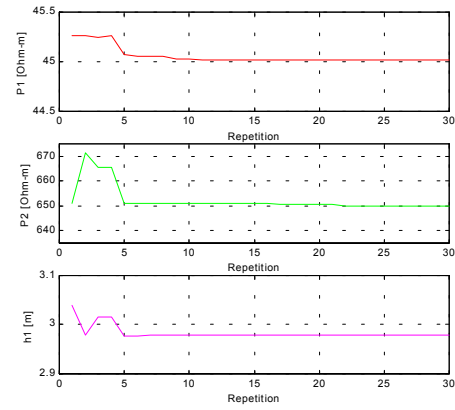
Σχήμα 4.10.19: Ryarsh Vicarage 1999/10.



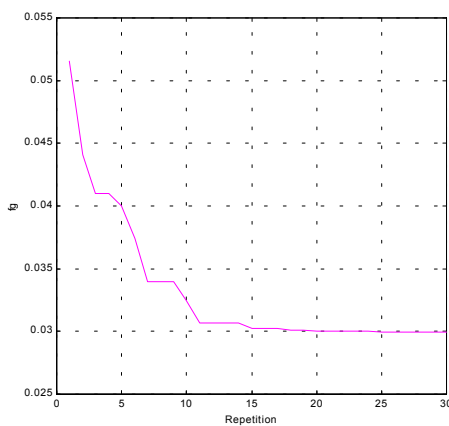
Σχήμα 4.10.20: Ryarsh Vicarage 1999/10.



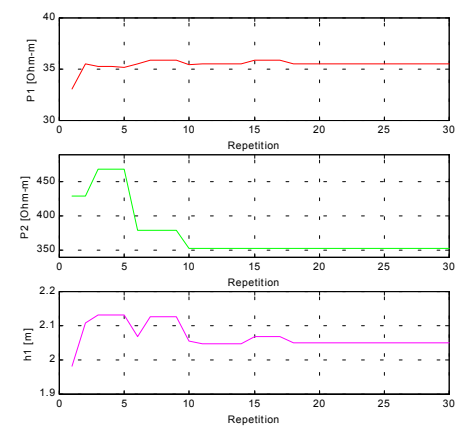
Σχήμα 4.10.21: Ryarsh Vicarage 1999/11.



Σχήμα 4.10.22: Ryarsh Vicarage 1999/11.

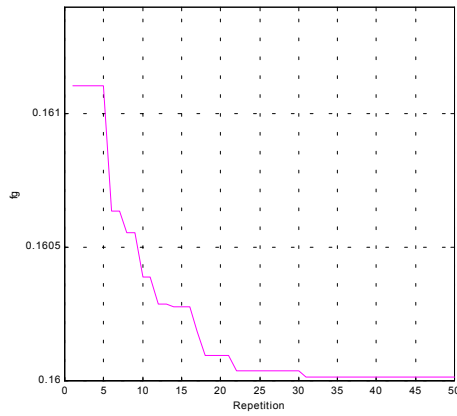


Σχήμα 4.10.23: Ryarsh Vicarage 1999/12.

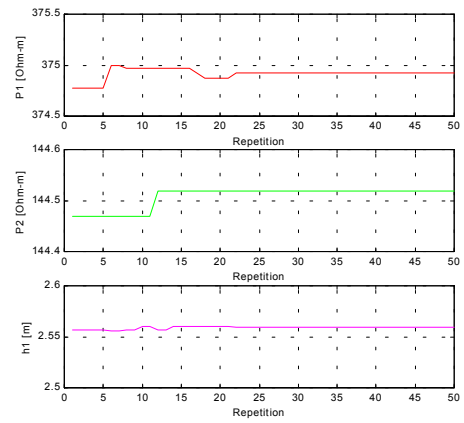


Σχήμα 4.10.24: Ryarsh Vicarage 1999/12.

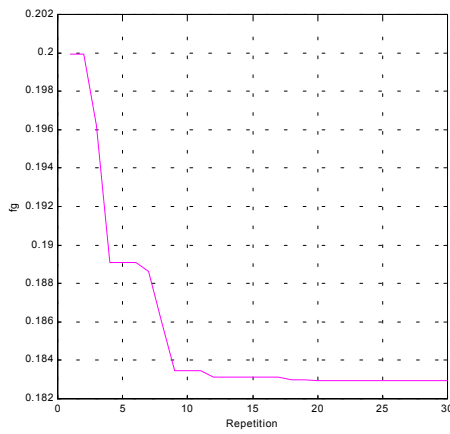
Σχήμα 4.10: Σύγκλιση παραμέτρων.



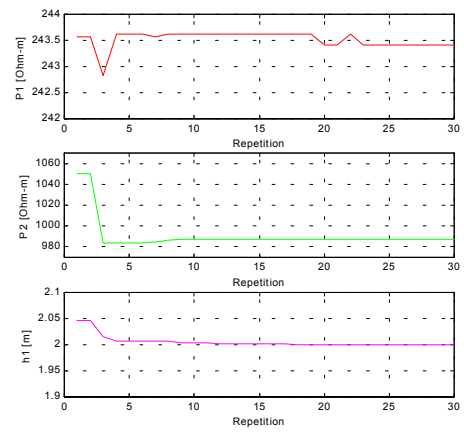
Σχήμα 4.11.1: J. L. Alamo-Περίπτωση #1.



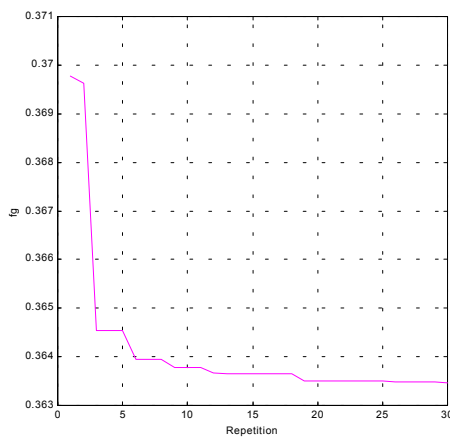
Σχήμα 4.11.2: J. L. Alamo-Περίπτωση #1.



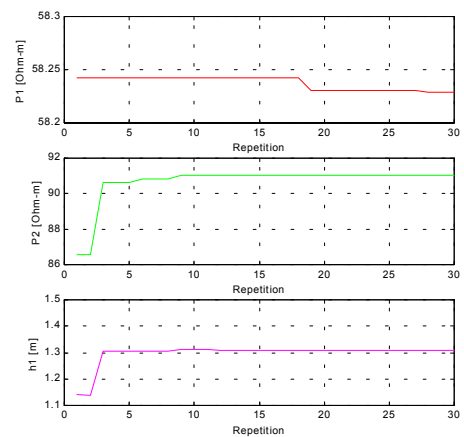
Σχήμα 4.11.3: J. L. Alamo-Περίπτωση #2.



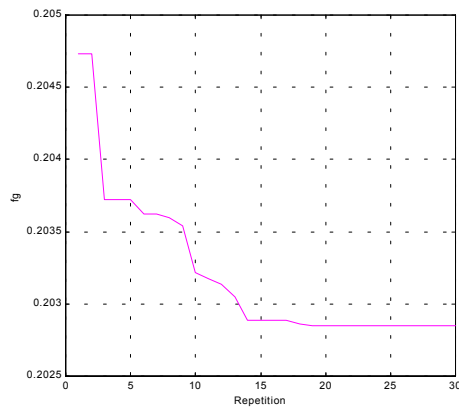
Σχήμα 4.11.4: J. L. Alamo-Περίπτωση #2.



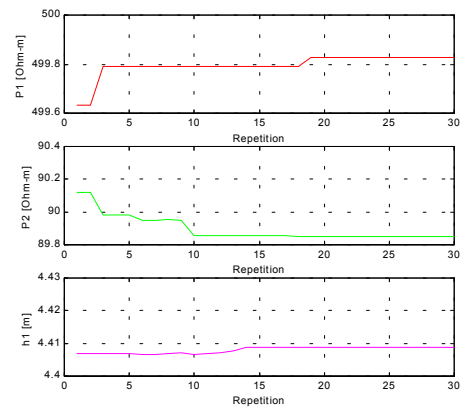
Σχήμα 4.11.5: J. L. Alamo-Περίπτωση #3.



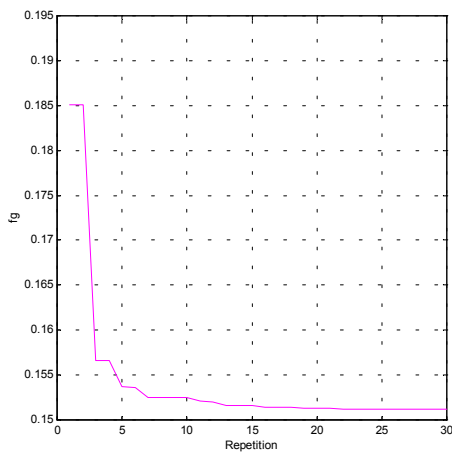
Σχήμα 4.11.6: J. L. Alamo-Περίπτωση #3.



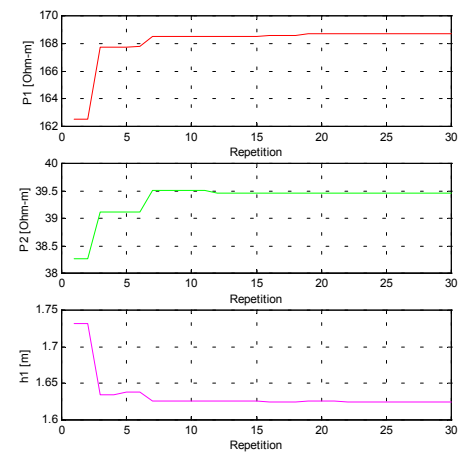
Σχήμα 4.11.7: J. L. Alamo-Περίπτωση #4.



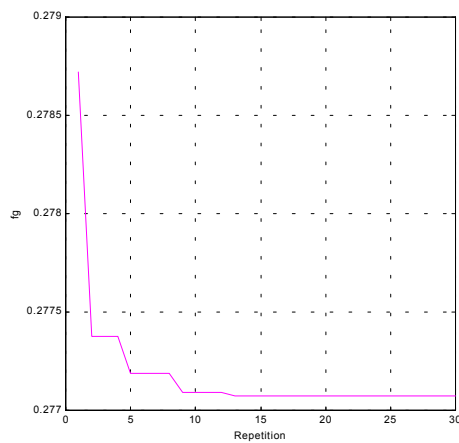
Σχήμα 4.11.8: J. L. Alamo-Περίπτωση #4.



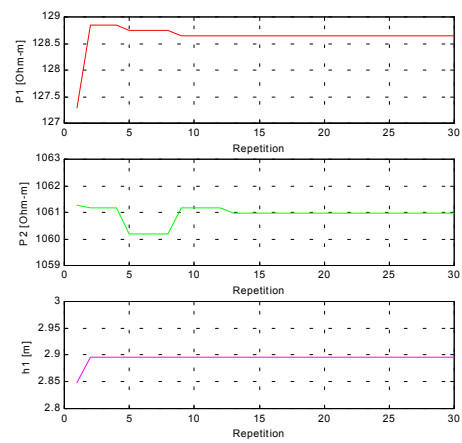
Σχήμα 4.11.9: J. L. Alamo-Περίπτωση #5.



Σχήμα 4.11.10: J. L. Alamo-Περίπτωση #5.



Σχήμα 4.11.11: J. L. Alamo-Περίπτωση #6.



Σχήμα 4.11.12: J. L. Alamo-Περίπτωση #6.

Σχήμα 4.11: Σύγκλιση παραμέτρων.

Στους Πίνακες 4.10, 4.11 και 4.12 υπάρχουν συγκεντρωμένες όλες οι τιμές σύγκλισης των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα σχήματα.

<b>Τελικές Τιμές Παραμέτρων Διστρωματικού Εδάφους με Χρήση Γενετικού Αλγόριθμου</b>				
<b>Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων</b>				
<b>Επαναλήψεις</b>	<b><math>F_g</math></b>	<b><math>P_1(\Omega \cdot m)</math></b>	<b><math>\rho_2(\Omega \cdot m)</math></b>	<b><math>h_1(m)</math></b>
1	0.3669	184.37	151.56	5.06
2	0.3705	184.77	152.35	4.84
<b>Βιβλιοθήκη</b>				
1	0.2369	57.32	306.24	0.37
2	0.2089	37.30	324.00	0.24
<b>Άλσος Ζωγράφου</b>				
1	1.2906	13.37	136.30	7.50
2	1.2761	12.89	121.75	6.87
<b>Γήπεδο</b>				
1	0.7339	126.50	162.50	1.59
2	0.7322	125.52	160.25	1.34

Πίνακας 4.10: Τιμές παραμέτρων, διστρωματικού εδάφους.



<b>Ryarsh Vicarage</b>					
<b>Έτος</b>	<b>Μήνας</b>	<b><math>Fg</math></b>	<b><math>\rho_1 (\Omega \cdot m)</math></b>	<b><math>\rho_2 (\Omega \cdot m)</math></b>	<b><math>h_1 (m)</math></b>
1998	Ιανουάριος	0.0047	44.82	645.00	3.18
	Φεβρουάριος	0.0187	45.70	575.00	3.14
	Μάρτιος	0.0276	43.93	621.75	3.21
	Απρίλιος	0.0261	40.24	462.48	2.94
	Μάιος	0.0160	34.06	426.93	2.51
	Ιούνιος	0.0272	36.91	615.86	2.92
	Ιούλιος	0.0280	30.29	503.02	2.21
	Αύγουστος	0.0221	40.11	330.70	2.50
	Σεπτέμβριος	0.0200	48.09	576.68	3.31
	Οκτώβριος	0.0161	43.95	631.89	3.09
	Νοέμβριος	0.0265	33.49	393.52	2.42
	Δεκέμβριος	0.0094	39.64	550.00	2.84
1999	Ιανουάριος	0.0063	40.55	449.98	2.87
	Φεβρουάριος	0.0051	45.75	425.00	3.12
	Μάρτιος	0.0124	41.80	550.09	2.91
	Απρίλιος	0.0059	37.90	500.00	2.82
	Μάιος	0.0061	33.69	350.01	2.33
	Ιούνιος	0.0417	30.30	516.24	2.17
	Ιούλιος	0.0395	36.51	665.73	2.56
	Αύγουστος	0.0214	48.87	529.62	3.43
	Σεπτέμβριος	0.0092	45.90	600.09	2.96
	Οκτώβριος	0.0259	49.71	590.39	3.28
	Νοέμβριος	0.0298	45.02	650.01	2.98
	Δεκέμβριος	0.0300	35.52	353.60	2.05

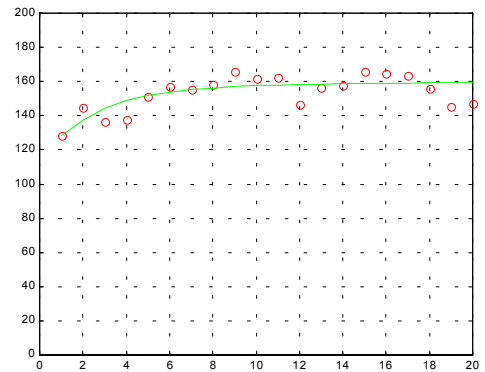
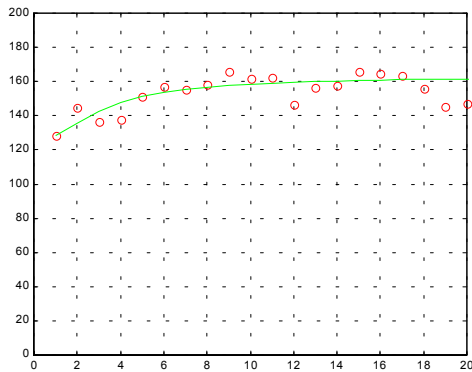
Πίνακας 4.11: Τελικές Τιμές Παραμέτρων Διστρωματικού Εδάφους με Χρήση Γενετικού Αλγόριθμου.

	<b>J. L. Alamo case #1</b>			
<b>Επαναλήψεις</b>	<b><math>Fg</math></b>	<b><math>\rho_1(\Omega \cdot m)</math></b>	<b><math>\rho_2(\Omega \cdot m)</math></b>	<b><math>h_1(m)</math></b>
1	0.1645	378.04	145.49	2.50
2	0.1600	374.92	144.52	2.56
	<b>J. L. Alamo case #2</b>			
1	0.1844	243.76	989.10	2.01
2	0.1829	243.42	986.96	2.00
	<b>J. L. Alamo case #3</b>			
1	0.3631	58.20	90.23	1.27
2	0.3635	58.23	91.04	1.31
	<b>J. L. Alamo case #4</b>			
1	0.2092	474.41	88.96	4.58
2	0.2028	499.83	89.85	4.41
	<b>J. L. Alamo case #5</b>			
1	0.1463	171.06	43.74	1.49
2	0.1512	168.69	39.46	1.63
	<b>J. L. Alamo case #6</b>			
1	0.2752	132.23	1060.50	3.00
2	0.2770	128.64	1060.96	2.90

Πίνακας 4.12: Τελικές Τιμές Παραμέτρων Διστρωματικού Εδάφους με Χρήση Γενετικού Αλγόριθμου (για κάθε μία από τις περιπτώσεις του J. L. Alamo).

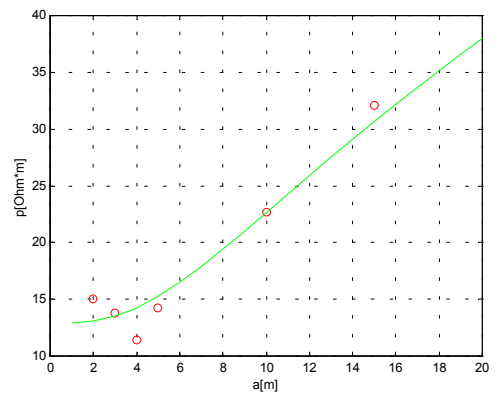
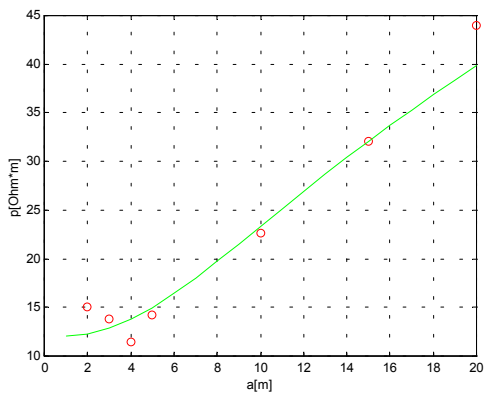
### 4.3.6.2 Προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε την προσέγγιση των πειραματικών μετρήσεων με τη χρήση του γενετικού αλγόριθμου, μέσω του υπολογισμού της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στα Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14 βλέπουμε τη προσαρμογή της συνάρτησης που μας δίνει ο γενετικός αλγόριθμος σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές, για τις μετρήσεις που πραγματοποιήσαμε, για τις μετρήσεις που έγιναν στην Αγγλία και για τις έξι περιπτώσεις που χρησιμοποίησε ο J. L. Alamo αντίστοιχα.



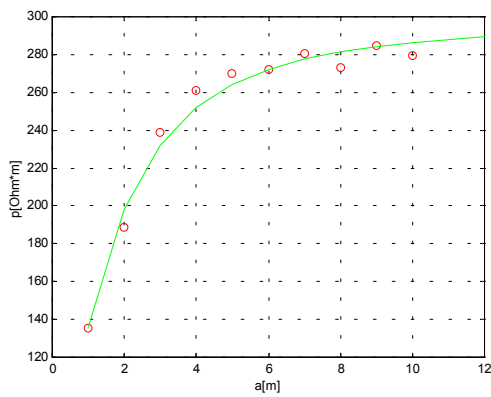
Σχήμα 4.12.1: Γήπεδο ποδοσφαίρου-Εκτέλεση Νο.1.

Σχήμα 4.12.2: Γήπεδο ποδοσφαίρου-Εκτέλεση Νο.2.

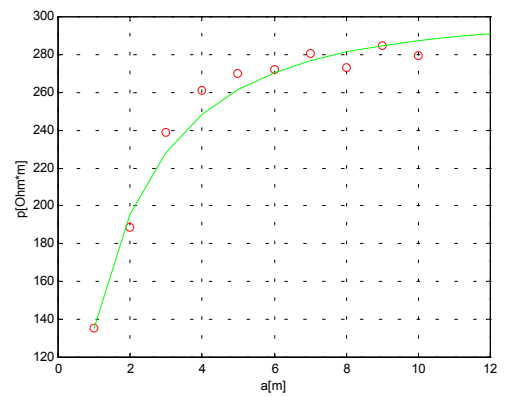


Σχήμα 4.12.3: Άλσος Ζωγράφου-Εκτέλεση Νο.1.

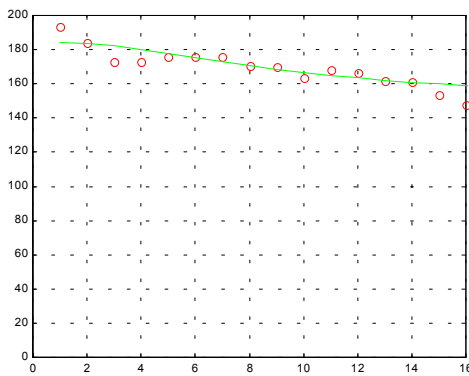
Σχήμα 4.12.4: Άλσος Ζωγράφου-Εκτέλεση Νο.2.



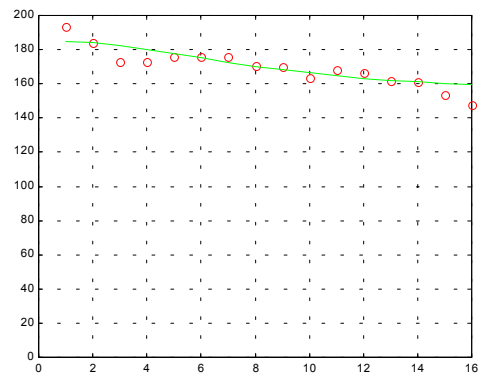
Σχήμα 4.12.5: Βιβλιοθήκη-Εκτέλεση No.1.



Σχήμα 4.12.6: Βιβλιοθήκη-Εκτέλεση No.2.

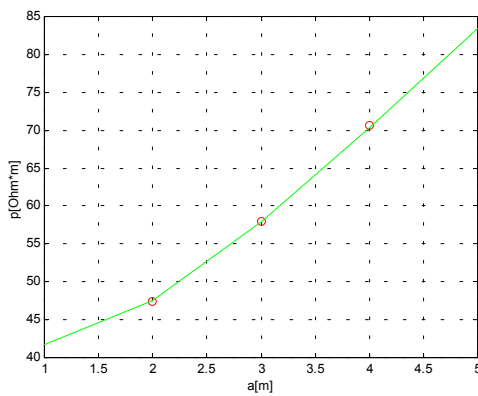


Σχήμα 4.12.7: Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων-Εκτέλεση No.1.

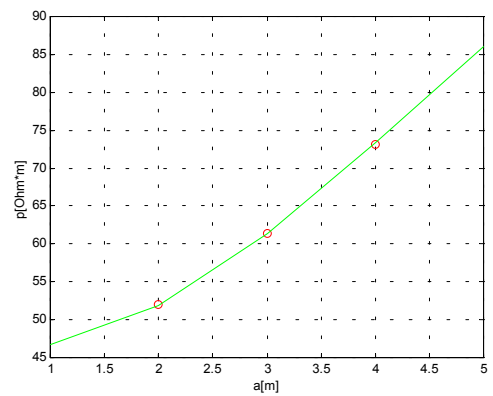


Σχήμα 4.12.8: Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων-Εκτέλεση No.2.

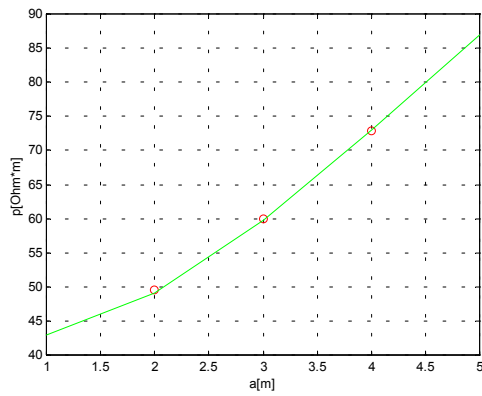
Σχήμα 4.12: Προσέγγιση των μετρήσεων.



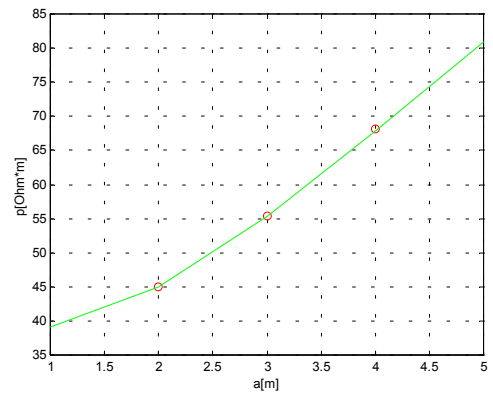
Σχήμα 4.13.1: Ryarsh Vicarage 1999/1.



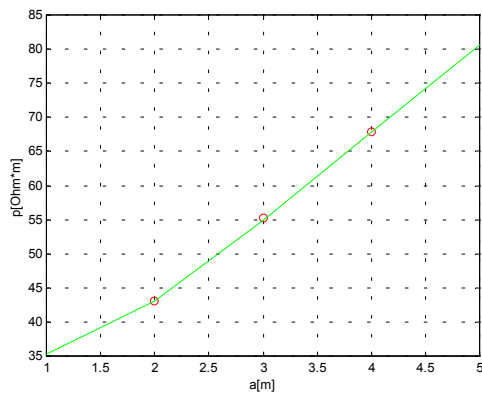
Σχήμα 4.13.2: Ryarsh Vicarage 1999/2.



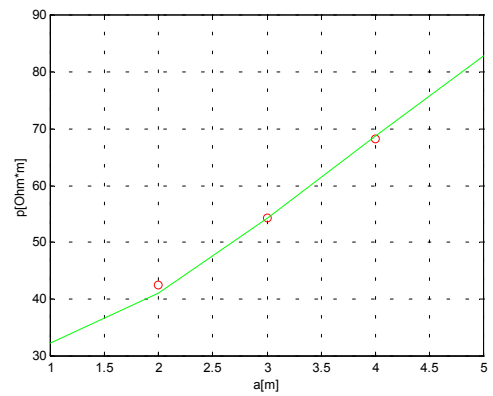
Σχήμα 4.13.3: Ryarsh Vicarage 1999/3.



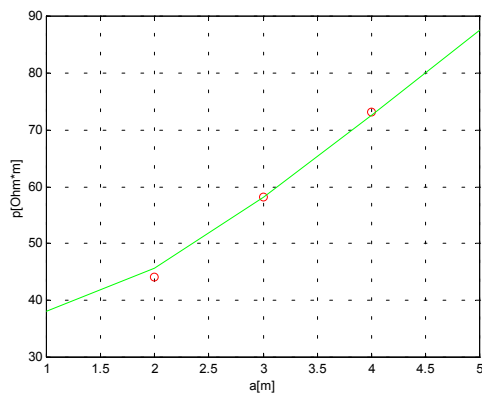
Σχήμα 4.13.4: Ryarsh Vicarage 1999/4.



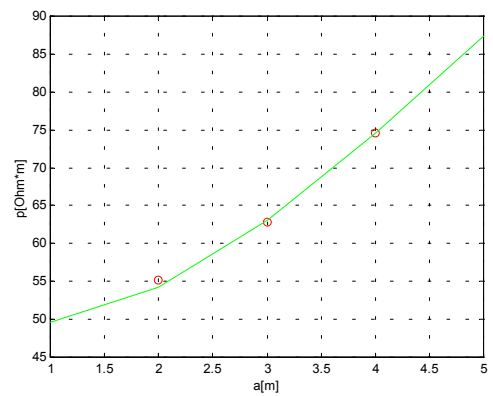
Σχήμα 4.13.5: Ryarsh Vicarage 1999/5.



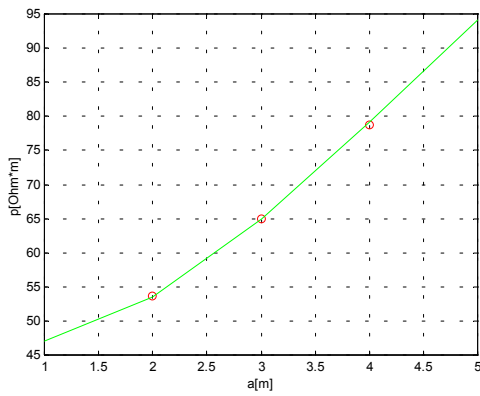
Σχήμα 4.13.6: Ryarsh Vicarage 1999/6.



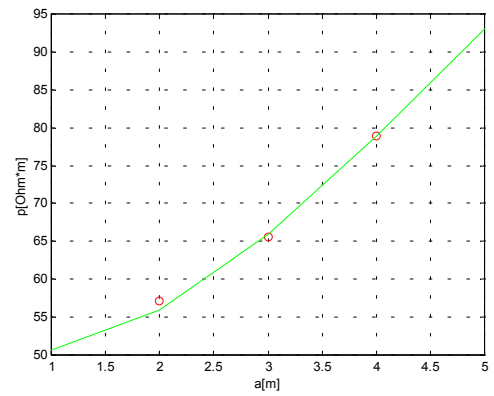
Σχήμα 4.13.7: Ryarsh Vicarage 1999/7.



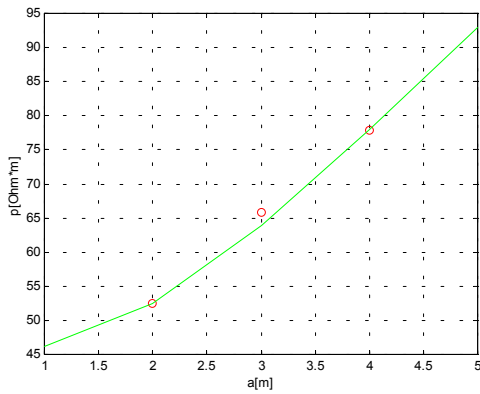
Σχήμα 4.13.8: Ryarsh Vicarage 1999/8.



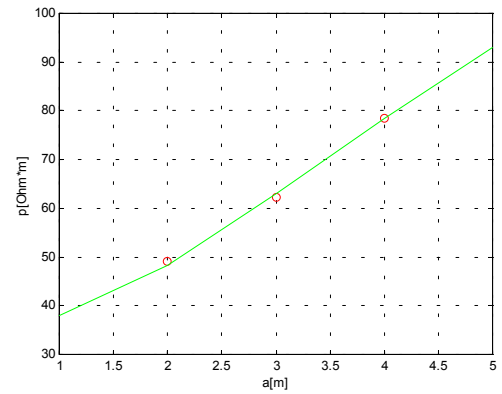
Σχήμα 4.13.9: Ryarsh Vicarage 1999/9.



Σχήμα 4.13.10: Ryarsh Vicarage 1999/10.

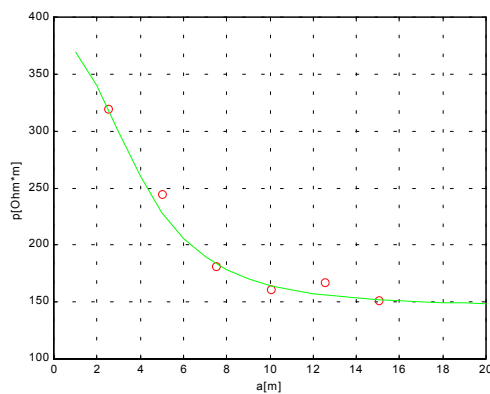


Σχήμα 4.13.11: Ryarsh Vicarage 1999/11.

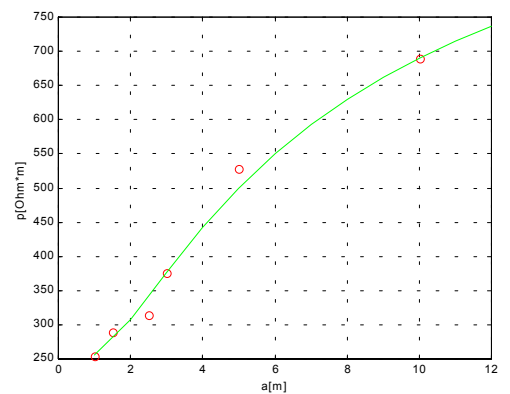


Σχήμα 4.13.12: Ryarsh Vicarage 1999/12.

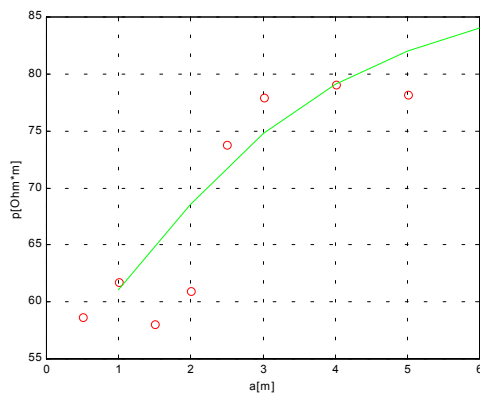
Σχήμα 4.13: Προσέγγιση των μετρήσεων.



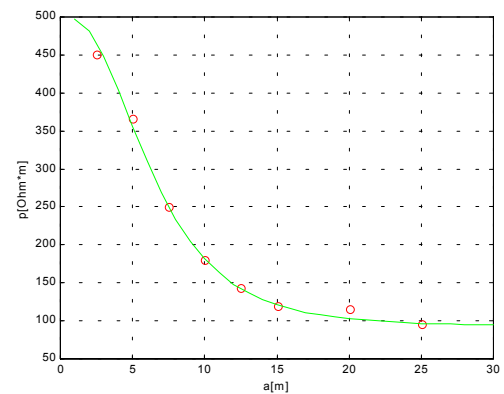
Σχήμα 4.14.1: J. L. Alamo-Περίπτωση #1.



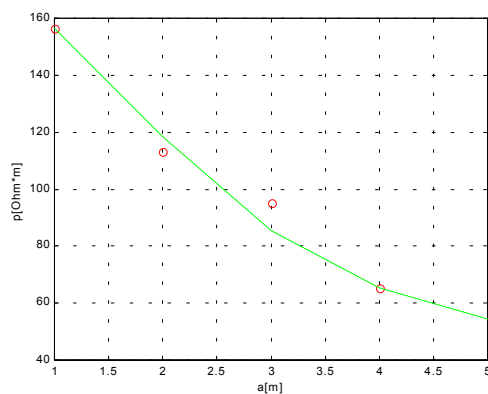
Σχήμα 4.14.2: J. L. Alamo-Περίπτωση #2.



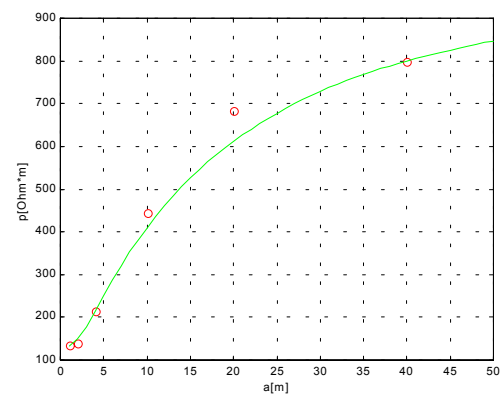
Σχήμα 4.14.3: J. L. Alamo-Περίπτωση #3.



Σχήμα 4.14.4: J. L. Alamo-Περίπτωση #4.



Σχήμα 4.14.5: J. L. Alamo-Περίπτωση #5.



Σχήμα 4.14.6: J. L. Alamo-Περίπτωση #6.

#### Σχήμα 4.14: Προσέγγιση των μετρήσεων

Από τα Σχήματα 4.12, 4.13 και 4.14 βλέπουμε την ακρίβεια του γενετικού αλγόριθμου. Τελικά σε όλες τις περιπτώσεις των πειραματικών δεδομένων που είχαμε στη διάθεση μας, οι καμπύλες που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του γενετικού αλγόριθμου έχουν πολύ μικρή απόκλιση από τις αντίστοιχες μετρούμενες τιμές.

## 4.4 Βιβλιογραφία

- [1] Alamo J. L., “A comparison among eight techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.4, October 1993, pp.1890-1899.
- [2] Διδακτορική Διατριβή Ι.Φ.Γκόνου, “Μεταβατική Συμπεριφορά Συστημάτων Γείωσης”, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2002.

- 
- [3] Sunde E. D., “Earth conduction effects in Transmission Systems”. New York, Dover Publications, 1968.
- [4] Jackson D. D., “Interpretation of inaccurate, insufficient and inconsistent data”, Geophys. J. R. Astr. Soc. 28, pp.97-109 ,1972.
- [5] Fletcher R., “FORTRAN subroutines for minimization by Quasi – Newton methods”. Harwell, Berkshire, England. Atomic Energy Research Establishment, Report No.AERE-R. 7125 ,1972.
- [6] Bazaraa M. S., Shetty C. M., Sherali H. D. “Nonlinear Programming. Theory and Algorithms”, Ed. John Wiley and Sons ,1979.
- [7] Electric Power Research Institute, “Transmission Line Grounding”. Vol.1 Research Project 1494-1. Report EL-2699.Principal Author F. Dawalibi., 1982.
- [8] Blattner C. J., “Study of driven ground rods and four point soil resistivity tests”, IEEE Transaction on Apparatus and System, Vol.PAS 101, 8, August 1982, pp.2837-2850.
- [9] IMSL Routines, 9<sup>th</sup> edition (FORTRAN), IMSL Inc. Houston, Texas, 1982.
- [10] IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983.
- [11] Dawalibi F. P., Blattner C. J., “Earth resistivity measurement interpretation techniques”, IEEE Transaction on Apparatus and System, Vol.PAS 103, 1, February 1984, pp.374-382.
- [12] Meliopoulos A. P., Papalexopoulos A. D., Webb R. P., Blattner C. J., “Estimation of soil parameters for driven rod measurements”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-103, No.9, September 1984, pp.2579-2587.
- [13] Blattner C. J., “Analysis of soil resistivity test methods in two-layer earth”, IEEE Transactions on PAS – 104, No.12, 1985, pp.3603-3608.
-



- 
- [14] Meliopoulos A. P., Papalexopoulos A. D., “Interpretation of resistivity measurements: Experience with the model SOIMP”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.4, October 1986, pp. 142-151.
- [15] Cuthberd T. R., “Optimization using personal computers”, Ed. John Wiley and Sons, 1987.
- [16] Meliopoulos A. P., “Power system grounding and Transients”, Ed. Marcel Dekker Inc., New York, 1988.
- [17] Takahashi T., Kawase T., “Analysis of apparent resistivity in a multiplayer earth structure”, IEEE Trans, Power Delivery, Vol.5, No.2, April 1990, pp. 604-612.
- [18] Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., “Numerical Recipes (FORTRAN Version)”, Ed. Cambridge University Press. 1990.
- [19] Alamo J. L., “A second order gradient technique for an improved estimation of soil parameters in a two-layered earth”, IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. PWRD-6, No.3, 1991, pp.1166-1170.
- [20] Βλαχάβας Ι., Κεφαλάς Π., Βασιλειάδης Ν., Ρεφανίδης Ι., Κόκκορας Φ., Σακελλαρίου Η., “Τεχνητή Νοημοσύνη”, Εκδόσεις Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη, 2002.
- [21] Γκόγκος Β., Κίνγκ Ρ. Ε., “Εισαγωγή σε μεθόδους αριστοποίησης της Υπολογιστικής Νοημοσύνης-Εξελικτικός Υπολογισμός”, Τεχνικά Χρονικά, Τεύχος 1/98, 1998.
- [22] Holland H., “Adaptation in natural and artificial systems”, University of Michigan Press, Reprinted in MIT Press, 1992.
- [23] Goldberg D. E., “Genetic Algorithm in search, optimization and machine learning”, Addison - Wesley, 1989.
- [24] Gonos I. F., Topalis F. V., Stathopoulos I. A., “Genetic Algorithm approach to the modeling of polluted insulators”, IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib., Vol.149, No.3, May 2002.
-

- 
- [25] Στεφόπουλος Γ. Κ., “Καθορισμός παραμέτρων γεννητριών από μετρήσεις δυναμικής συμπεριφοράς με χρήση γενετικών αλγορίθμων”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2001.
- [26] Giordano G., Marignetti F., Scarano M., “A genetic algorithm based off-line feeding optimization for flat-stator micro and mini motors”, 7<sup>th</sup> International conference on Optimization of Electrical and Electronical Equipment, Brasov, Romania, 11-12 May 2000.
-

## **Κεφάλαιο 5**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Σκοπός μας πάντα είναι να κατασκευάζουμε γειώσεις με όσο το δυνατό μικρότερη αντίσταση ώστε να εξασφαλίζεται η μεγαλύτερη ασφάλεια του ανθρώπου και της εγκατάστασης. Η σχεδίαση του συστήματος γείωσης θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται το βέλτιστο δυνατό επίπεδο ασφάλειας με ένα αποδεκτό, από οικονομικής πλευράς κόστος. Για την σχεδίαση αυτή σημαντικοί παράγοντες είναι τόσο το είδος και το μέγεθος του συστήματος γείωσης, όσο και το ίδιο το έδαφος στο οποίο θα τοποθετηθεί η γείωση.

Είναι γνωστό ότι το έδαφος αποτελείται από διάφορα συστατικά (για παράδειγμα αλατούχος μάργα, άργιλος, σχιστόλιθος, άνθρακας, αργιλικός ψαμμίτης πορώδης, συμπαγής ψαμμίτης κ.α.) που καθορίζουν τη δομή του. Οι βασικές όμως παράμετροι που επηρεάζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του, και πιο συγκεκριμένα την ειδική αντίστασή του είναι τρεις: η ποιότητά του (που εξαρτάται από τα υλικά που αναφέραμε παραπάνω), η θερμοκρασία, καθώς και η υγρασία (κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής). Η επίδραση αυτών έχει ως αποτέλεσμα τις περισσότερες φορές, να μην είναι δυνατόν να το θεωρήσουμε ομοιογενές (για παράδειγμα πολυστρωματικότητα λόγω επικαθίσεων, διαφορετικής υγρασίας και θερμοκρασίας ανάλογα με το βάθος). Η συμπεριφορά αυτή του εδάφους μας έδωσε το κίνητρο να ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία με τη μελέτη της πολυστρωματικής δομής του.

Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να αποφανθούμε για την πραγματική εικόνα της δομής του, ώστε να μπορούμε να προχωρήσουμε στο σωστό σχεδιασμό και την εγκατάσταση ενός συστήματος γείωσης. Με λίγα λόγια να χρησιμοποιήσουμε αναλυτικές τεχνικές που να οδηγούν σε ακριβή υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να ερευνήσουμε τη δομή του εδάφους στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

α) επιλογή κατάλληλου τρόπου μέτρησης της ειδικής αντίστασης του,

- β) αξιολόγηση των μετρήσεων για την επιλογή πολυστρωματικού μοντέλου,
- γ) με βάση το μοντέλο που επιλέξαμε, εκφράζουμε με μαθηματικές εξισώσεις την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους με μεταβλητές ( $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$  με  $n=1 \dots N$ , συνολικά  $2n-1$  μεταβλητές), και
- δ) με χρήση υπολογιστικών μεθόδων, προσδιορίζουμε τις παραμέτρους του.

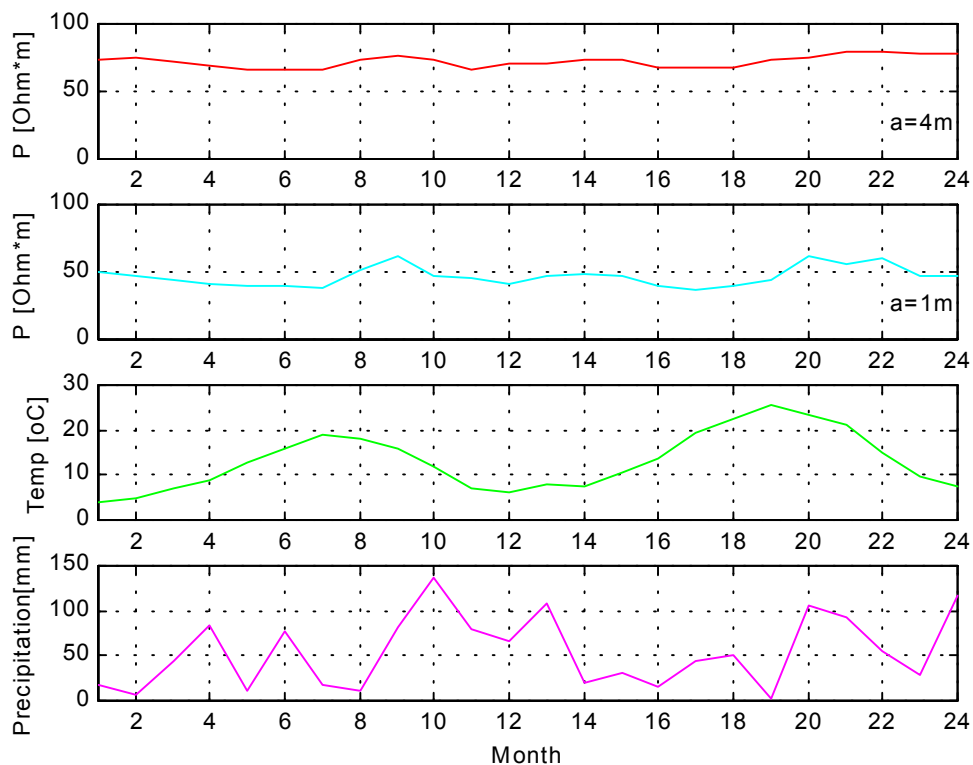
Η αριθμητική ανάλυση μας δίνει τη δυνατότητα επιλογής τεχνικών υπολογισμού (επαναληπτικές μέθοδοι) των χαρακτηριστικών του εδάφους, στο οποίο θα τοποθετηθεί η γείωση.

Προκειμένου να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα χρησιμοποιήσαμε ως μέθοδο μέτρησης της ειδικής αντίστασης τη μέθοδο του Wenner και επιλέξαμε το διστρωματικό μοντέλο για τη δομή του εδάφους. Τελικά με τη χρήση μίας επαναληπτικής μεθόδου (γενετικός αλγόριθμος) και χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις, που είχαμε πραγματοποιήσει με την προαναφερθείσα μέθοδο, επιβεβαιώσαμε την πλήρη ανταπόκριση του μοντέλου στις πραγματικές συνθήκες.

Όπως αναφέραμε πιο πάνω, χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο του Wenner προκειμένου να μετρήσουμε την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η επιλογή αυτή έγινε διότι στην πλειοψηφία της βιβλιογραφίας τα διαθέσιμα πειράματα έχουν γίνει σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο το οποίο σημαίνει ότι αφ' ενός ο τρόπος μέτρησης είναι έγκυρος και αφ' ετέρου μας δίνει την δυνατότητα της σύγκρισης καθώς επίσης και της συνεργασίας με άλλους ερευνητές.

Είναι γνωστό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ή της υγρασίας οδηγεί σε μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους (Σχήμα 1.13 B και A αντίστοιχα). Επειδή η τιμή της ειδικής αντίστασης όμως εξαρτάται και από τις δύο συνθήκες θα πρέπει να γνωρίζουμε τις τιμές της υγρασίας αλλά και της θερμοκρασίας προκειμένου να εξάγουμε σωστά συμπεράσματα. Στο Σχήμα 5.1 βλέπουμε την μεταβολή της ειδικής αντίστασης για  $a=1m$  (γαλάζια γραμμή) και  $a=4m$  (κόκκινη γραμμή). Στη μέθοδο Wenner όσο αυξάνει η απόσταση των ηλεκτροδίων, τόσο βαθύτερα γίνεται η έγχυση του ρεύματος με αποτέλεσμα να μετράμε τιμές για την ειδική αντίσταση σε μεγαλύτερο βάθος. Συνεπώς, αναμένουμε η τιμή της ειδικής αντίστασης να

επιηρεάζεται πιο πολύ, με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της υγρασίας, στην περίπτωση του ενός μέτρου έναντι των τεσσάρων. Σε αυτό το συμπέρασμα οδηγούμαστε με παρατήρηση του Σχήματος 5.1. Για παράδειγμα αν κοιτάξουμε από τον πρώτο μέχρι και τον έβδομο μήνα του 1998, θα παρατηρήσουμε ότι έχουμε αύξηση της θερμοκρασίας και συνεχή, με απότομες διακυμάνσεις βροχόπτωση, κάτι που συνεπάγεται υψηλή υγρασία. Ο συνδυασμός αυτών των δύο μεταβολών προκαλεί μείωση της τιμής της ειδικής αντίστασης του εδάφους πιο πολύ στο πάνω στρώμα ( $a=1\text{m}$ ) και λιγότερο στο κάτω ( $a=4\text{m}$ ). Από τον έβδομο μέχρι το δωδέκατο μήνα του πρώτου έτους βλέπουμε την θερμοκρασία να υποχωρεί. Η βροχόπτωση με τη σειρά της ελαττώνεται μέχρι και τον Αύγουστο, τον Οκτώβριο φτάνει στη μέγιστη τιμή όλων των μηνών, και μετά υποχωρεί παραμένοντας όμως σε υψηλά επίπεδα. Όλες αυτές οι μεταβολές δεν αφήνουν ανεπηρέαστη την ειδική αντίσταση του εδάφους, ιδίως του άνω στρώματος, στο οποίο αυξάνει απότομα η τιμή της σε



Σχήμα 5.1: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για  $a=4\text{m}$ ,  $a=1\text{m}$ , της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο διάστημα των ετών 1998-1999. (Ryarsh Vicarage).

σχέση με το κατώτερο στρώμα στην αρχή αυτής της περιόδου, στους μήνες που ακολουθούν η τιμή της μειώνεται ξανά. Παρατηρούμε όμως ότι η επίδραση της βροχόπτωσης είναι εντονότερη από αυτή της θερμοκρασίας στο συγκεκριμένο έδαφος, αφού η μείωσή της θα έπρεπε να αυξήσει την τιμή της αντίστασης του εδάφους, κάτι που δεν συμβαίνει, διότι η επιρροή της υγρασίας σε αντιδιαστολή με την μείωση της θερμοκρασίας υπερισχύει. Για τους υπόλοιπους μήνες του δεύτερου έτους (1999) ισχύουν τα ίδια ακριβώς, εκτός της περιόδου του καλοκαιριού, που η επίδραση της θερμοκρασίας για μικρό διάστημα επηρεάζει την αντίσταση του εδάφους περισσότερο από την υγρασία.

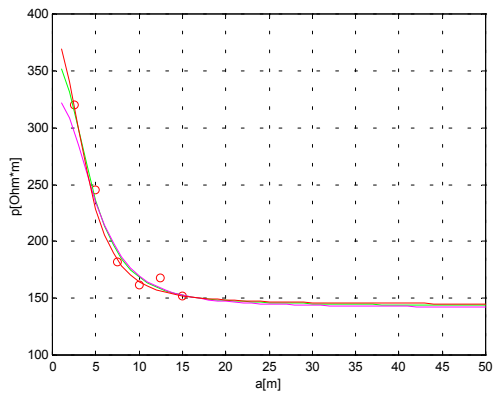
Έχουν αναλυθεί διάφορα μοντέλα σχετικά με τη δομή του εδάφους. Τα πιο διαδεδομένα είναι αυτά του διστρωματικού ( $\rho_1, \rho_2, h_1$ ) και του τριστρωματικού ( $\rho_1, \rho_2, \rho_3, h_1, h_2$ ). Στην παρούσα εργασία αναλύσαμε αυτό του τριστρωματικού, διότι είναι το πιο πολύπλοκο (πρόβλημα πέντε μεταβλητών) και επιπλέον με τη χρήση των οριακών συνθηκών ( $\rho_3 \rightarrow 0, h_2 \rightarrow \infty$ ) υπήρχε η δυνατότητα να οδηγηθούμε εύκολα στις εξισώσεις για το διστρωματικό μοντέλο (πρόβλημα τριών μεταβλητών). Τα πειραματικά αποτελέσματα μας έδειξαν ότι οι περισσότερες περιπτώσεις ανήκουν στο μοντέλο του διστρωματικού εδάφους, χωρίς να αποκλείονται κάποιες περιπτώσεις στις οποίες έχουμε είτε τριστρωματικό, είτε ομοιογενές έδαφος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε σύγκριση μεταξύ των επαναληπτικών μεθόδων που χρησιμοποίησε ο J. L. Alamo, και του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, στο εργαστήριο. Χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για πλήθος γονιών  $P_s=20$ , πλήθος θέσεων χρωματοσώματος  $t=16$ , αριθμό μεταβλητών  $m=3$ , αριθμό παιδιών  $N_c=4$ , μέγιστο αριθμό επαναλήψεων  $N_{max}=30$  και πιθανότητα μετάλλαξης  $P_m=5\%$  προκύπτουν οι λύσεις που παρατίθενται στον Πίνακα 5.1.

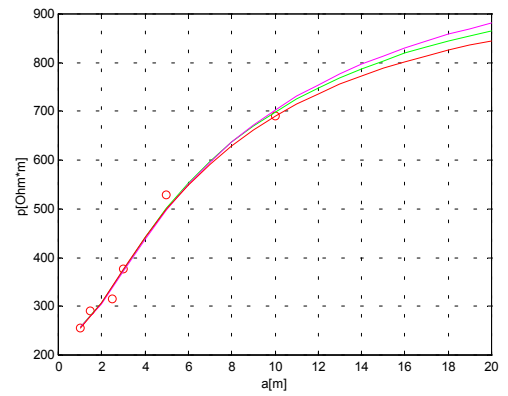
Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι λύσεις που προκύπτουν με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου είναι ακριβέστερες από τις αντίστοιχες που προκύπτουν για καθεμιά από τις οχτώ τεχνικές του J. L. Alamo. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται η προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα, με χρήση δύο μεθόδων του J. L. Alamo (πράσινη και μωβ γραμμή) και του γενετικού αλγορίθμου (κόκκινη γραμμή).

Περίπτωση #	$\rho_1$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$\rho_2$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$h_1$ [m]	Σφάλμα $F_g$	Μέθοδος λύσης
1	372.729	145.259	2.690	0.1884	8 <sup>η</sup>
	364.683	143.634	2.828	0.1825	6 <sup>η</sup>
	374.920	144.517	2.559	0.1600	GA
2	246.841	1058.790	2.139	0.2126	5 <sup>η</sup>
	246.836	1058.620	2.139	0.2126	7 <sup>η</sup>
	243.418	986.959	2.000	0.1829	GA
3	57.054	92.787	1.448	0.3985	6 <sup>η</sup>
	57.343	96.712	1.651	0.4043	5 <sup>η</sup>
	58.203	90.233	1.265	0.3630	GA
4	490.688	93.395	4.399	0.2329	3 <sup>η</sup>
	494.883	93.663	4.370	0.2338	7 <sup>η</sup>
	499.828	89.847	4.408	0.2028	GA
5	160.774	34.068	1.848	0.1851	5 <sup>η</sup>
	160.776	34.074	1.848	0.1852	8 <sup>η</sup>
	171.062	43.736	1.491	0.1463	GA
6	125.525	1092.880	2.712	0.2904	7 <sup>η</sup>
	125.526	1093.080	2.713	0.2903	8 <sup>η</sup>
	132.230	1060.470	2.999	0.2752	GA

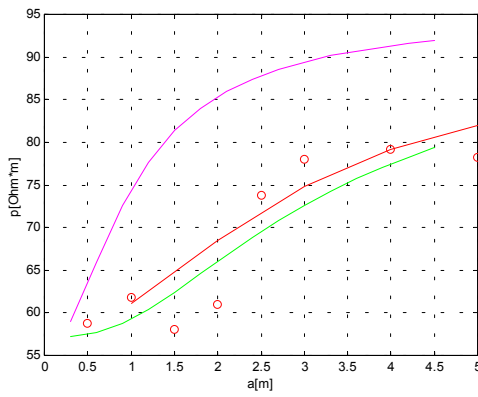
Πίνακας 5.1: Σύγκριση με τις καλύτερες από τις μεθόδους του J. L. Alamo.



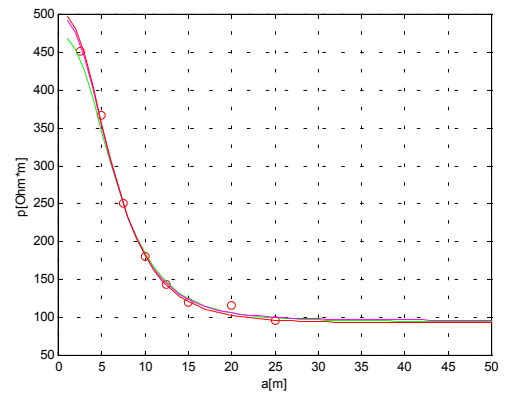
Σχήμα 5.2.1: Περίπτωση #1.



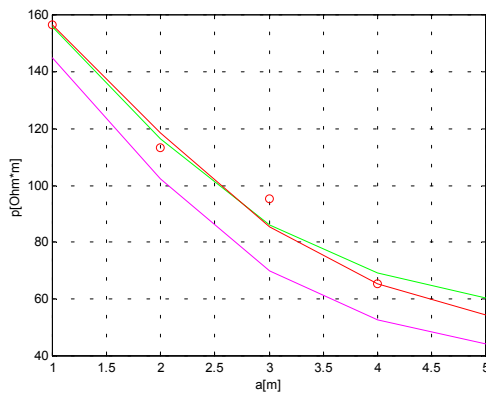
Σχήμα 5.2.2: Περίπτωση #2.



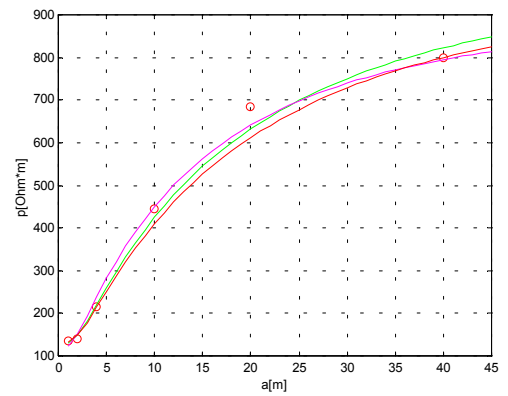
Σχήμα 5.2.3: Περίπτωση #3.



Σχήμα 5.2.4: Περίπτωση #4.



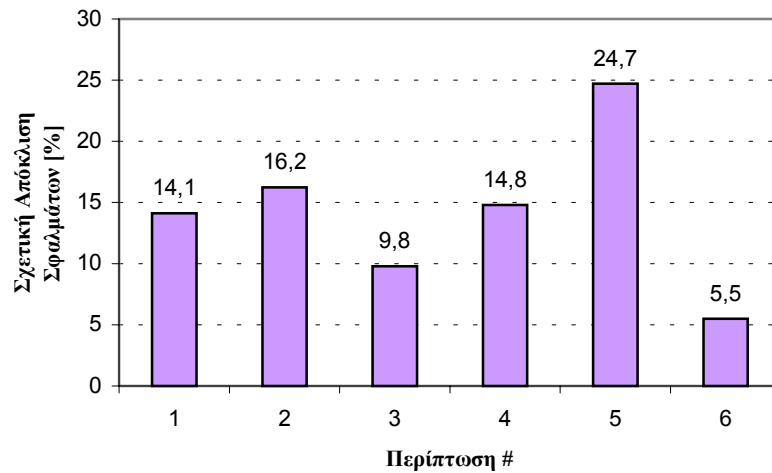
Σχήμα 5.2.5: Περίπτωση #5.



Σχήμα 5.2.6: Περίπτωση #6.

Σχήμα 5.2: Προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα.





Σχήμα 5.3: Σύγκριση της καλύτερης από τις μεθόδους του J. L. Alamo με την λύση που μας δίνει ο γενετικός αλγόριθμος.

Στο Σχήμα 5.3 πραγματοποιείται σύγκριση του σφάλματος της καλύτερης από τις μεθόδους του J. L. Alamo με το σφάλμα που δίνει η λύση με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου. Παρατηρείται ότι παρόλο που ο J. L. Alamo έχει συγκεντρώσει τις καλύτερες από τις υπάρχουσες τεχνικές για τον υπολογισμό των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους το σφάλμα του είναι, συγκρινόμενο με αυτό της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μεγαλύτερο κατά 5% έως 25%. Επομένως, είναι φανερό ότι η χρήση του γενετικού αλγορίθμου αυξάνει την ακρίβεια στον υπολογισμό των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους.

## *Παράρτημα 1*

### *ΓΕΝΕΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ*

Ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Δρ. Ι. Φ. Γκόνου. Σε αυτό το μέρος της εργασίας παρουσιάζουμε το γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος είναι γραμμένος σε κώδικα Matlab.

#### **Π.1.1 Κυρίως Πρόγραμμα Γενετικού Αλγορίθμου**

```
% Genetic Algorithm
% By Ioannis F. Gonos
% May 2002
% Files which are used:
% parents
% gagenia
% gafun
% "Library Katenof-Kontaxis"

clear;
close all

PlithosGonion=20;
Bit=16;
Variables=3;
ChildrenNumber=4;
ProbMutation=0.2;
IterationNumber=30;

dio=2^Bit-1;

fid=fopen('P_case1.txt','w');

for j=1:PlithosGonion
    FirstParents=parents(PlithosGonion, Bit, Variables);
    for i=1:1
        g=gagenia(FirstParents, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
        f(i)=gafun(g(1,:), Bit);
        FirstParents=g;
    end
end
```

```

    end
    j
    par(j,:)=FirstParents(1,:);
end
FirstParents=par
for i=1:IterationNumber
    g=gagenia(par, Bit, Variables, ChildrenNumber, ProbMutation);
    f(i)=gafun(g(1,:), Bit);
    par=g;

    po1=50+100*par(1,1)/dio;
    po2=200+100*par(1,2)/dio;
    h1=0+2*par(1,3)/dio;

    fprintf(fid,'%5d %12.8f %12.8f %12.8f %12.8f\n',i,f(i),po1,po2,h1);
    i
end

fclose(fid)

figure (1)
plot(f)
grid

load P_case1.txt
figure (2)
subplot(3,1,1)
plot(P_case1(:,3),'r')
ylabel('P1 [Ohm-m]')
grid
subplot(3,1,2)
plot(P_case1(:,4),'g')
ylabel('P2 [Ohm-m]')
grid
subplot(3,1,3)
plot(P_case1(:,5),'m')
ylabel('h1 [m]')
grid

```

### Π.1.2 Συνάρτηση Δημιουργίας Γονέων

```

function p=parents(NoP,N,M);

% Parents gives the first generation.
% NoP is the Number of Parents.
% The struct of the child is M chromosome of N-bits
% p=parents(NoP,N,M)
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000

```

```
Megisto=2^N;
for i=1:NoP
    for j=1:M
        p(i,j)=floor(Megisto*rand);
    end
end
```

### Π.1.3 Συνάρτηση Μετατροπής από Δυαδικό σε Δεκαδικό

```
function d=ga2to10(b,N,M);

% GA2to10 Convert a binary array to decimal integer with at least N bits.
%
% GA2to10(B,N,M) produces the decimal representation of M N-bits binary
% N bits.
% Example
% GA2to10(0 1 0 1 1 1, 6, 1) returns 23
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000

d=zeros(1,M);
two=1;
for i=1:N
    for k=1:M
        d(k)=d(k)+(b(k,(N-i+1)))*two;
    end
    two=2*two;
end
```

### Π.1.4 Συνάρτηση Μετατροπής από Δεκαδικό σε Δυαδικό

```
function b=ga10to2(d,n)

% GA10to2 Convert decimal integer to a binary array.
% GA10to2(D,N) produces a binary representation with at least
% N bits.
% Example
% GA10to2(23,6) returns 0 1 0 1 1 1
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000

for i=1:n
    b(n-i+1)=rem(d,2);
    d=floor(d/2);
end
```

### Π.1.5 Αντικειμενική Συνάρτηση

```
function f=gafun(p,N);

% "Library Katenof-Kontaxis"
% Function of p1, p2, h3
% p is array of p1, p2, p3 in [Ohm-m][Ohm-m][m]
% N is the number of bits
% f=gafun(p,N)
% Created by Ioannis F. Gonos 08-05-2002

N1=10;
dio=2^N-1;

Po1 = 50 + 100*p(1)/dio;
Po2 = 200 + 100*p(2)/dio;
H1 = 0 + 2*p(3)/dio;

K=(Po2-Po1)/(Po2+Po1);
S=0;
a = [ 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15
16  17  18  19  20 ];
Pm = [ 135.24 188.66 238.79 260.75 269.84 272.10 280.48 272.97 284.85 279.27
280.14 272.35 263.13 258.69 255.46 232.25 225.39 197.92 165.93 174.65 ];
N2=length(a);

for i=1:N2
Ra=0;
for n=1:N1
A=1+(2*n*H1/a(i))^2;
B=A+3;
Ra = Ra + 4*(K^n)*(1/(A^.5)-1/(B^.5));
end
Ra=Po1*(1+Ra);
S=S+abs((Ra-Pm(i))/Pm(i));
end

f=S;
```

### Π.1.6 Συνάρτηση Δημιουργίας Νέας Γενιάς

```
function g=gagenia(par, Bit, Variable, ChildrenNumber, ProbMutation);

% GaGenia gives new generation.
% par is the vector of Parents.
% The struct of the child is Variable chromosomes of Bit-bits
% g=gagenia(par, Bit, Variable, ChildrenNumber, ProbMutation);
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000
```

```

PlithosGonion=size(par,1);
goneis=ones(1, PlithosGonion);

while sum(goneis)>0
    % Selection of the first parents
    FirstGonios=floor(PlithosGonion*rand)+1;
    while goneis(FirstGonios) == 0,
        FirstGonios=FirstGonios+1;
        if FirstGonios>PlithosGonion FirstGonios=1; end;
    end
    if goneis(FirstGonios) == 1 goneis(FirstGonios) = 0; end

    % Selection of the second parents
    SecondGonios=floor(PlithosGonion*rand)+1;
    while goneis(SecondGonios) == 0,
        SecondGonios = SecondGonios+1;
        if SecondGonios>PlithosGonion SecondGonios=1; end
    end
    if goneis(SecondGonios) == 1 goneis(SecondGonios) = 0; end

    % Conversion of the Decimal data to binary data
    for i=1:Variable
        par1(i,:)=ga10to2(par(FirstGonios,i),Bit);
        par2(i,:)=ga10to2(par(SecondGonios,i),Bit);
    end

    % Birth of a child by crossover
    for c=1: ChildrenNumber
        child=crossover(par1,par2,Bit,Variable);
        if rand < ProbMutation child=mutation(child, Bit, Variable); end;
        children((2*sum(goneis))+c,:)=GA2to10(child,Bit,Variable);
    end
end

g=newgen(par,children, PlithosGonion, Bit, Variable);

```

### Π.1.7 Συνάρτηση Διασταύρωσης (Crossover)

```

function c=crossover(p1,p2,N,M);

% Crossover born a child from two parents.
% The struct of the parents is M chromosome N-bits
% c=crossover(p1,p2,N,M)
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000

```

```

for i=1:M
    CutPosition=1+floor((N-1)*rand);
    for j=1:CutPosition
        c(i,j)=p1(i,j);
    end
    for j=CutPosition+1:N
        c(i,j)=p2(i,j);
    end
end

```

### Π.1.8 Συνάρτηση Δημιουργίας Μετάλλαξης (Mutation)

```

function p=mutation(p,N,M);

% Mutation converts a bit from a child.
% The struct of the child is M chromosome of N-bits
% p=mutation(p,N,M)
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000

PositionY=1+floor(N*rand);
PositionX=1+floor(M*rand);
if p(PositionX, PositionY)==1
    p(PositionX, PositionY)=0;
else
    p(PositionX, PositionY)=1;
end

```

### Π.1.9 Συνάρτηση Δημιουργίας Νέας Γενιάς Γονέων

```

function G=newgen(OldGen,Children, NoP,N,M);

% The new generation of parents.
% NoP is the Number of Parents.
% The struct of the child is M chromosome of N-bits
% G=parents(NoP,N,M)
% Created by Ioannis F. Gonos 15-02-2000

Gen=OldGen;
for i=1:size(Children,1)
    Gen(NoP+i,:)=Children(i,:);
end

change=0;
while change==0
    change=1;
    for i=1:(size(Gen,1)-1)
        if gafun(Gen(i,:),N)<gafun(Gen(i+1,:),N)
            Help=Gen(i,:);

```

```
    Gen(i,:)=Gen(i+1,:);  
    Gen(i+1,:)=Help;  
    change=0;  
end  
end  
end
```

```
for i=1:NoP  
    G(i,:)=Gen(i,:);  
end
```

---



## **Παράρτημα 2**

### **ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

#### **Π.2.1 Γειωσόμετρο LEM / SATURN GEO X**

Οι δυνατότητες του συγκεκριμένου γειωσόμετρου είναι:

- Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιώντας 4 ηλεκτρόδια
- Μέτρηση της αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιώντας 3 ηλεκτρόδια.
- Μέτρηση αντιστάσεων γείωσης γενικότερα, ακόμη και σε πυλώνες υψηλής τάσης χωρίς αποσύνδεση του σύρματος γης.
- Δυνατότητα ελέγχου σωστής σύνδεσης της διάταξης.
- Μέτρηση της παράσιτης τάσης και συχνότητας.

#### *Τεχνικά Χαρακτηριστικά*

##### *Αντίσταση γης ( $R_E$ )*

Τρόπος μέτρησης :	η μέτρηση ρεύματος και τάσης γίνεται με ηλεκτρόδια σύμφωνα με IEC61557-5/EN61557-5
Τάση ανοιχτοκύκλωσης :	20/48 V,AC
Ρεύμα βραχυκύκλωσης :	250 mA,AC
Συχνότητα μέτρησης :	94, 105, 111, 128 Hz επιλέγεται με ρύθμιση του χειριστή ή αυτόματα. (AFC) 55 Hz σε λειτουργία R*
Απόρριψη θορύβου :	120dB ( $16^{2/3}$ , 50, 60, 400 Hz)

Μέγιστη υπερφόρτιση:

$$U_{rms}=250 \text{ V}$$

Στους Πίνακες Π.2.1 και Π.2.2 που ακολουθούν, βλέπουμε κάποια επιπλέον τεχνικά χαρακτηριστικά του οργάνου [2].

Περιοχή μέτρησης	Περιοχή ένδειξης	Ανάλυση	Εσωτερικό σφάλμα	Μέγιστο λειτουργικό σφάλμα
0.020 Ω... 300 kΩ	0.001 Ω...2.999 Ω	0.001Ω	±(2% της μετρούμενης τιμής+2 ψηφία)	±(5% της μετρούμενης τιμής+ 5 ψηφία)
	3.00 Ω...29.99 Ω	0.01Ω		
	30.0 Ω...299.9 Ω	0.1Ω		
	0.300 kΩ...2.999 kΩ	1Ω		
	3.00 kΩ...29.99 kΩ	10Ω		
	30.0 kΩ...299.9 kΩ	100Ω		

Πίνακας Π.2.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του γειωσόμετρου Saturn Geo X

Εσωτερικό σφάλμα ή επίδραση αστάθμητου παράγοντα	Αναφορά καταστάσεων ή καθορισμός σειράς λειτουργίας	Ονομασία κωδικού	Απαιτήσεις ή δοκιμασία σε συμφωνία με σχετικά τμήματα του κανονισμού IEC 1557	Τύπος της δοκιμής
Εσωτερικό σφάλμα	Αναφορά καταστάσεων	A	Τμήμα 5, 6.1	R

Θέση	Αναφορά θέση ±90°	E1	Τμήμα 1, 4.2	R
Τάση τροφοδοσίας	Όρια που καθορίζονται από το κατασκευαστή	E2	Τμήμα 1, 4.2, 4.3	R
Θερμοκρασία	0 °C - 35 °C	E3	Τμήμα 1, 4.2	T
Σειρά παρεμβολής τάσης	Βλέπε 4.2 και 4.3	E4	Τμήμα 5, 4.2, 4.3	T
Αντίσταση των ηλεκτροδίων και των βοηθητικών ηλεκτροδίων γης	0 έως 100 x RA αλλά ≤ 50 kΩ	E5	Τμήμα 5, 4.3	T
Σύστημα συχνότητας	99% έως 101% της ονομαστικής συχνότητας	E7	Τμήμα 5, 4.3	T
Σύστημα τάσης	85% έως 110% της ονομαστικής τάσης	E8	Τμήμα 5, 4.3	T
Λειτουργικό σφάλμα	$B = \pm( A  + 1,15 \cdot \sqrt{E_1^2 E_2^2 E_3^2 E_4^2 E_5^2 E_6^2 E_7^2 E_8^2})$		Τμήμα 5, 4.3	R
A= Εσωτερικό σφάλμα En= Αποκλίσεις R= Συνηθισμένη δοκιμή T= Τύπος δοκιμής			$B[\%] = \pm \frac{B}{\text{βασικ ή τιμη}} \times 100\%$	

Πίνακας Π.2.2: Όρια σφάλματος του γειωσόμετρου Saturn Geo X

*Χρόνος μέτρησης:* τυπικά 8 δευτερόλεπτα μία σταθερή συχνότητα 30 δευτερόλεπτα το μέγιστο με AFC και με ολοκληρωμένο κύκλο όλων των συχνοτήτων μέτρησης.

*Προσθετικό σφάλμα λόγω της αντίστασης των ηλεκτροδίων αναφοράς της γης:*

$$\frac{R_H (R_S + 2000\Omega)}{R_E} \times 1,25 \times 10^{-6} \% + 5 \text{ ψηφία .}$$

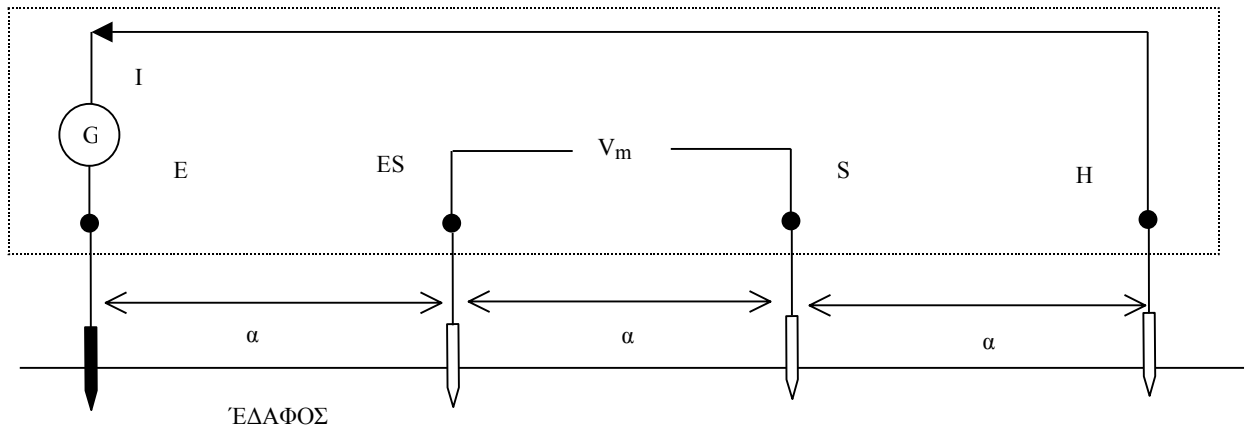
*Σφάλμα μέτρησης των  $R_H$  και  $R_S$ :* τυπικά 10% του  $(R_E + R_S + R_H)$

*Μέγιστη αντίσταση ηλεκτροδίου:*  $\leq 1 \text{ M}\Omega$

*Μέγιστη αντίσταση ηλεκτροδίου αναφοράς γης :*  $\leq 1 \text{ M}\Omega$

### Π.2.1 1 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιείται βασίζεται στη μέθοδο Wenner και φαίνεται στο *Σχήμα. Π.2.1* Μία γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος G εγχύει ρεύμα I μέσω του ηλεκτροδίου E (ηλεκτρόδιο γης) προς το έδαφος, το οποίο επιστρέφει μέσω του ηλεκτροδίου H (βοηθητικό ηλεκτρόδιο γης). Ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ES και S μετράται η διαφορά δυναμικού  $U_m$ . Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση του εδάφους.



*Σχήμα.Π.2.1: Συνδεσμολογία του οργάνου*

Τελικά η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}}$$

όπου  $R$  είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου),  $a$  η απόσταση των ηλεκτροδίων και  $b$  το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια.

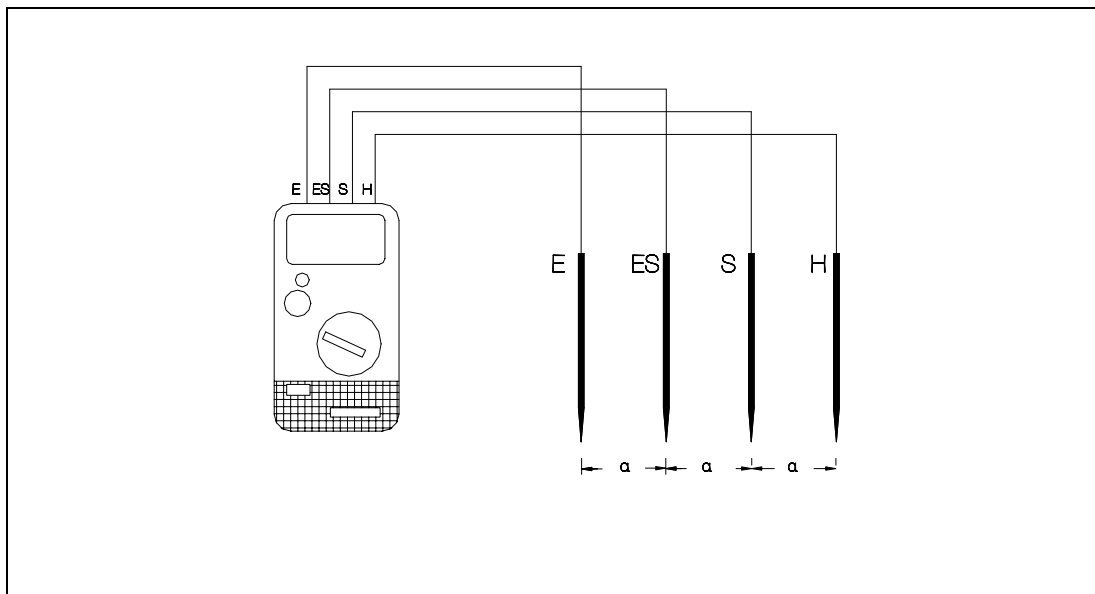
Όταν  $a \gg b$  η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a$$

## Π2.2 Γειωσόμετρο PANTEC / MIT 904

Το γειωσόμετρο της CARLO GAVAZZI PANTEC, μοντέλο MIT 904, (Σχήμα Π.2.2) είναι ένα φορητό, εύχρηστο όργανο. Το συγκεκριμένο όργανο χρησιμοποιείται για:

- Μέτρηση ειδικής αντίστασης εδάφους
- Μέτρηση αντίστασης γείωσης μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης
- Μέτρηση αντίστασης μόνωσης μιας εγκατάστασης.



Σχήμα.Π.2.2: Γειωσόμετρο MIT 904

Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της αντίστασης γείωσης είναι 108Hz. Η τιμή αυτή της συχνότητας έχει επιλεγεί να είναι έξω από το φάσμα των συχνοτήτων που συνήθως χρησιμοποιούνται (16,67Hz, 50Hz, 60Hz, 400Hz και τα πολλαπλάσια τους).

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, που αφορούν την μέτρηση αντίστασης γείωσης, φαίνονται στον Πίνακα Π.2.3 [2]. Με χρήση του Πίνακα Π.2.4 μπορούμε να υπολογίσουμε την μέγιστη ένδειξη που μπορεί να μας δείξει το όργανο. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο γιατί μπορούμε να ελέγχουμε κατά πόσο σωστές είναι οι μετρήσεις μας.

Η ακρίβεια του οργάνου είναι  $\pm 2\% \text{ rdg} \pm 4 \text{ dgt}$ .

Διακόπτης Μεταγωγής	Κλίμακες	Ανάλυση	Ρεύμα Δοκιμής και Βραχυκύκλωσης	Συνολική Αντίσταση Υποδοχών Αμπερομέτρου	Συνολική Αντίσταση Υποδοχών Βολτομέτρου
RE	20 Ω	0,01 Ω	$\leq 50 \text{ mA AC}$	4 kΩ	10 kΩ
200 Ω	200 Ω	0,1 Ω	$\leq 50 \text{ mA AC}$	6 kΩ	30 kΩ
RE	2000 Ω	1 Ω	$\leq 9 \text{ mA AC}$	50 kΩ	100 kΩ
20 kΩ	20 kΩ	0,01 kΩ	$\leq 9 \text{ mA AC}$	100 kΩ	100 kΩ

Πίνακας Π2.3: Τεχνικά χαρακτηριστικά του γειωσόμετρου MIT 904

RE 200 Ω				RE 20 ΚΩ			
Κλίμακα 20 Ω		Κλίμακα 200 Ω		Κλίμακα 2000 Ω		Κλίμακα 20 ΚΩ	
Αντίσταση (Ω)	Μέγιστη ένδειξη (Ω)	Αντίσταση (Ω)	Μέγιστη ένδειξη (Ω)	Αντίσταση (Ω)	Μέγιστη ένδειξη (Ω)	Αντίσταση (Ω)	Μέγιστη ένδειξη (Ω)
0.1	0.05	10	9.4	10	5	1	0.94
0.2	0.15	20	19.2	20	15	2	1.92
0.3	0.25	30	29.0	30	25	3	2.90
0.5	0.45	50	48.6	50	45	5	4.86
0.7	0.64	70	68.2	70	64	7	6.82
1	0.94	100	97.6	100	94	10	9.76
2	1.92	150	146.6	200	192	15	14.66
3	2.90	200	195.6	300	290	20	19.56
5	4.86			500	486		
7	6.82			700	682		
10	9.76			1000	976		
15	14.66			1500	1466		
20	19.56			2000	1956		

Πίνακας Π2.4: Μέγιστες επιτρεπόμενες ενδείξεις του γειωσόμετρου MIT 904

### **Π.2.3 Βιβλιογραφία**

- [1] “Operating instructions, Earth ground tester, Saturn GEO-X”, LEM NORMA GmbH, Wiener Austria, 2000.
  - [2] “MIT 904, Digital earth meter”, Carlo Gavazzi Pantec S.p.A., Belluno, Italy, June 1994.
-