



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ  
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ  
ΣΟΛΩΜΟΥ 56, 10682 ΑΘΗΝΑ, ΤΗΛ.: 0103803343, 0105192136 FAX: 0105192324  
COMITE NATIONAL HELLENIQUE  
56, RUE SOLOMOU, 10682 ATHENES, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324  
GREEK NATIONAL COMMITTEE  
56, SOLOMOU STR., 10682 ATHENS, TEL.: +30103803343, 30105192136 FAX: 30105192324

Δ6

## ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ

Ι.Φ. Γκόνος<sup>1</sup> Β.Θ. Κονταργύρη<sup>1</sup> Ι.Α. Σταθόπουλος<sup>1</sup> Π.Α. Κονταξής<sup>2</sup> Α.Ξ. Μορώνης<sup>2</sup>  
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π. Τ.Ε.Ι. Αθήνας

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, καταγράφηκε η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, συναρτήσει του χρόνου και υπολογίστηκε η ετήσια μεταβολή των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια μεθοδολογία βασισμένη σε γενετικό αλγόριθμο, μέσω της οποίας υπολογίζονται οι παράμετροι της πολυστρωματικής δομής του εδάφους, με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων που διεξήχθησαν, δεδομένου ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων αυτών έχει αναχθεί ουσιαστικά σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχει τη δυνατότητα 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. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα βέλτιστου σχεδιασμού του συστήματος γείωσης ελαχιστοποιώντας τα επίπεδα των αναπτυσσόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής.

## VARIATION OF MULTILAYER STRUCTURE OF THE SOIL DURING THE YEAR

I.F. Gonos<sup>1</sup> V.T. Kontargyri<sup>1</sup> I.A. Stathopoulos<sup>1</sup> P. A. Kontaxis<sup>2</sup> A.X. Moronis<sup>2</sup>  
High Voltage Laboratory N.T.U.A. T.E.I. Athens

In this work, the variation of the soil resistivity versus the time was recorded and the annual variation of the parameters of the multilayer structure of the soil was calculated. For this aim, a methodology based on genetic algorithm was used, considering that the calculation of these parameters is substantially a minimization problem. This methodology uses the measurements that were carried out, in order to calculate the parameters of the multilayer structure of the soil. The proposed methodology makes possible the calculation of the parameters of the multilayer structure of the soil with accuracy. Then, these parameters will constitute the essential input data in the simulation of the grounding system, that will be installed in the particular area. This provides the possibility of the optimum design of the grounding system, minimizing the values of the step and touch voltages.

<sup>1</sup> Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Τηλ. 2107723582, Fax 2107723504, e-mail: [igonos@ieee.org](mailto:igonos@ieee.org), [vkont@power.ece.ntua.gr](mailto:vkont@power.ece.ntua.gr), [stathop@power.ece.ntua.gr](mailto:stathop@power.ece.ntua.gr)

<sup>2</sup> Τμήμα Ενεργειακής Τεχνολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας, Αγ. Σπυρίδωνος 17, 12210, Αιγάλεω, Τηλ. 2105385344, Fax 2105385306, e-mail: [pkont@mail.ntua.gr](mailto:pkont@mail.ntua.gr), [amoronis@teiath.gr](mailto:amoronis@teiath.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για το σχεδιασμό και κατασκευή ενός συστήματος γείωσης είναι απαραίτητη η γνώση της δομής του εδάφους του γηπέδου, όπου πρόκειται να χωροθετηθεί η υπό προστασία εγκατάσταση. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της δομής του εδάφους (πλήθος στρωμάτων, βάθος και ειδική αντίσταση κάθε στρώματος) είναι επιβεβλημένος για τη σχεδίαση ενός ασφαλούς συστήματος γείωσης με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής του. Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που διεξήχθησαν σε διάφορες περιοχές της χώρας, έδειξαν ότι το έδαφος πρέπει να προσομοιώνεται τουλάχιστον ως διστρωματικό.

Η επίδραση του είδους του εδάφους μπορεί να μελετηθεί με τη μέτρηση της ειδικής αντίστασής του. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι μια βασική εργασία για την ακριβή ανάλυση των συστημάτων γείωσης [1, 2]. Η απόδοση του συστήματος γείωσης επηρεάζεται σημαντικά από την υφή του χώματος στην εγγύς περιοχή του συστήματος γείωσης. Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους πρέπει να γίνεται, ιδανικά, με απουσία οποιουδήποτε μεταλλικού σώματος ή αγωγού στο έδαφος. Λεπτομερής μελέτη της επίδρασης των μεταλλικών αντικειμένων, που βρίσκονται μέσα στο έδαφος, στη μέτρηση της ειδικής αντίστασής του έγινε από τους Ma και Dawalibi, [3].

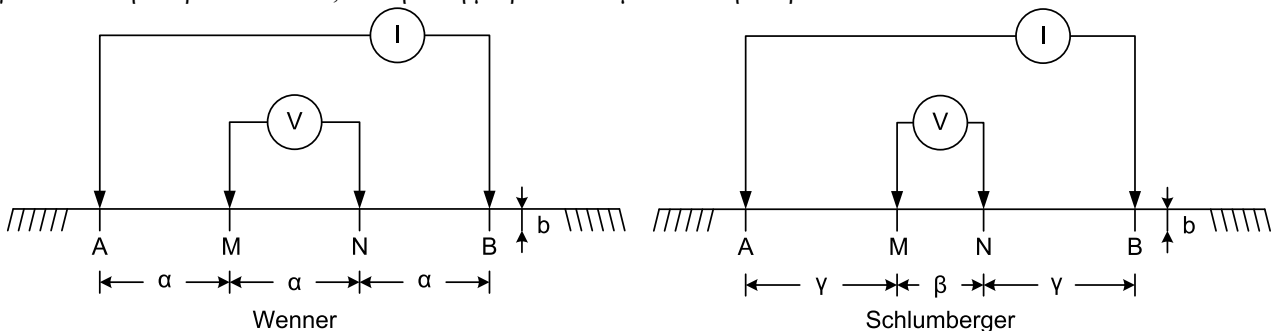
Για την εκτίμηση των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους έγινε σημαντική έρευνα από τον Del Alamo, ο οποίος συνέκρινε οκτώ διαφορετικές μεθοδολογίες [4], φυσικά, στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται και άλλες μέθοδοι [5-10]. Έχει, επίσης, πραγματοποιηθεί έρευνα για την εκτίμηση των παραμέτρων του τριστρωματικού εδάφους [9-12].

Το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Επομένως, είναι απαραίτητη μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους (ειδική αντίσταση και βάθος του κάθε στρώματος του εδάφους). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική [4-10] και τριστρωματική δομή [8-12] του εδάφους, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [9] αναπτύχθηκε, σε Matlab, ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος παρέχει άριστα αποτελέσματα για τον υπολογισμό των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους [6, 10].

## ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η συνεισφορά της ειδικής αντίστασης του εδάφους στη διαμόρφωση της τελικής τιμής της αντίστασης γείωσης είναι σημαντικότερη [13]. Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές [1-13]. Οι κυριότερες από αυτές είναι [1, 11] α) η μέθοδος Wenner, β) η μέθοδος Schlumberger, γ) η μέθοδος των διπλών, δ) ο εναλλασσόμενος σχηματισμός και ε) η μέθοδος της μέτρησης της αντίστασης γείωσης.

Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα βοηθητικά ηλεκτρόδια στις δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους φαίνεται στο Σχήμα 1. Στην περίπτωση της μέτρησης με χρήση τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων, η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια *A* και *B*, ενώ η τάση μετρείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια *M* και *N*.



Σχήμα 1: Συνδεσμολογίες μέτρησης της ειδικής αντίστασης.

Σύμφωνα με τη μέθοδο του Wenner, χρησιμοποιούνται τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα επ' ευθείας γραμμής και ισαπέχοντα το ένα από το άλλο απόσταση *a*. Τα τέσσερα αυτά ηλεκτρόδια εμφανίζονται με το κάτω άκρο τους μερικώς στο έδαφος, ενώ το άνω άκρο τους συνδέεται σε ένα μετρητικό όργανο, το γειωσόμετρο. Το ρεύμα κυκλοφορεί μεταξύ των δύο ακραίων ηλεκτροδίων και μετρείται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο μεσαία ηλεκτρόδια. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους  $\rho$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [1]:

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

όπου *R* είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου), *a* η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων και *b* το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια. Όταν  $a \gg b$ , τότε η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στην ακόλουθη:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (2)$$

Μια άλλη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους –όπως προαναφέρθηκε- είναι η μέθοδος Schlumberger. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση ενός ευαίσθητου οργάνου και τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η μέση αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = R \cdot \pi \cdot \frac{d^2 - c^2}{2 \cdot c} \quad (3)$$

όπου  $d$  είναι το μισό της απόστασης των ακραίων βοηθητικών ηλεκτροδίων ( $d = AB/2$ ), ενώ  $c$  είναι το μισό της απόστασης των δύο μεσαίων βοηθητικών ηλεκτροδίων ( $c = MN/2$ ).

Μετρήσεις οι οποίες διεξήχθησαν από τους Ma και Dawalibi [14] με την εφαρμογή δύο ευρύτατα διαδεδομένων μεθόδων (Wenner και Schlumberger) συγκρίνουν τα αποτελέσματα 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), γι' αυτό στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος Wenner για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

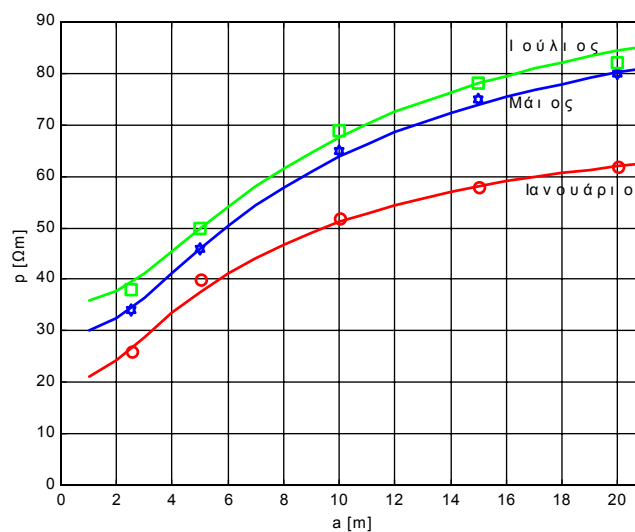
Ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους, είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης: για τον υπολογισμό των τριών παραμέτρων ( $\rho_1$  η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους,  $\rho_2$  η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους και  $h_1$  το βάθος του πάνω στρώματος) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης  $F_g$  [1, 6]:

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (4)$$

όπου  $\rho_{ai}^m$  είναι η  $i$ -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, με τη μέθοδο Wenner [1] για απόσταση μεταξύ των διαδοχικών βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με  $a$ , ενώ  $\rho_{ai}^c$  είναι η υπολογισθείσα τιμή 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 την εξίσωση (11) [1, 6]:

$$\rho_a^c = \rho_1 \cdot \left( 1 + 4 \cdot \sum_n \left( \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right)^n \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left( \frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2}} \right) \right) \quad (5)$$

όπου  $n = 1 \dots \infty$



Σχήμα 2: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης των βοηθητικών ηλεκτροδίων για διστρωματικό έδαφος.

Από τις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 2 φαίνεται η διστρωματική (τουλάχιστον) δομή του εδάφους. Παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση των μετρήσεων συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης των ηλεκτροδίων

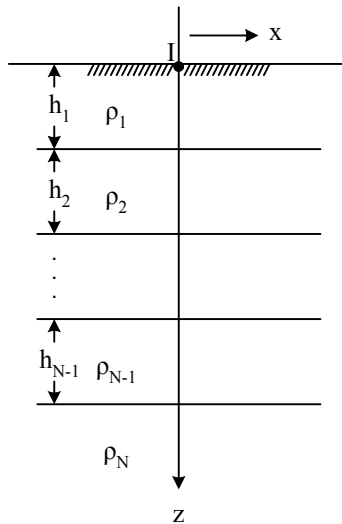
είναι αύξουσα. Αυτό φανερώνει τη διστρωματική διαμόρφωση του εδάφους με το πάνω στρώμα να έχει χαμηλότερη τιμή ειδικής αντίστασης από το κάτω [1, 4]. Με την βοήθεια του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων [9, 10], αναλύεται η δομή του εδάφους και υπολογίζονται οι παράμετροι του εδάφους, στο οποία μετρήθηκε η ειδική αντίσταση στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

Πίνακας 1: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου.

| Χρόνος μέτρησης | $\rho_1$ [ $\Omega \cdot m$ ] | $\rho_2$ [ $\Omega \cdot m$ ] | $h_1$ [m] | Σφάλμα $F_g$ |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|
| Ιανουάριος      | 20,5                          | 71,5                          | 2,23      | 0,100        |
| Μάιος           | 29,7                          | 96,8                          | 2,97      | 0,044        |
| Ιούλιος         | 35,5                          | 101,6                         | 3,40      | 0,086        |

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΟΛΥΣΤΡΩΜΑΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Για πολυστρωματικά εδάφη έχει αναπτυχθεί μία θεωρητική μέθοδος που προτάθηκε από τους Takahashi και Kawase [15, 16] και υπολογίζει το δυναμικό της επιφάνειας του εδάφους. Το θεωρητικό μοντέλο για δομή εδάφους  $N$  οριζόντιων στρωμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3: Πολυστρωματική δομή εδάφους  $N$  οριζόντιων στρωμάτων.

Το δυναμικό σε κάθε σημείο  $x$  στην επιφάνεια της γης για ρεύμα  $I$  που εγχύεται στο έδαφος μέσω επιφανειακού σημειακού ηλεκτροδίου μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση (6) [15, 16]:

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot [1 + F_N(x)] \quad (6)$$

όπου

$$F_N(x) = 2 \cdot x \cdot \int_0^{\infty} \frac{K_{M1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_1}}{1 - K_{M1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_1}} J_0(\lambda \cdot x) \cdot \partial \lambda \quad (7)$$

Για  $1 < i < N-1$  οι συντελεστές ανάκλασης μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων του εδάφους δίνονται από τη σχέση:

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad (8)$$

όπου  $\rho_i$  η ειδική αντίσταση του  $i$ -οστού στρώματος του εδάφους.

Επιπρόσθετα, για  $N > 2$  και  $1 < S < N-2$  ο συντελεστής  $K_{NS}$  δίνονται από τη σχέση:

$$K_{NS} = \frac{k_S + K_{NS+1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{S+1}}}{1 + k_S \cdot K_{NS+1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{S+1}}} \quad (9)$$

και

$$K_{NN-1} = k_{N-1} \quad (10)$$

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων του οποιοδήποτε πολυστρωματικού εδάφους. Άρα ο υπολογισμός των παραμέτρων του  $N$ -στρωματικού εδάφους με την ίδια λογική ανάγεται σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης  $(2N-1)$  παραμέτρων. Πάλι πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση (4), μόνο που τώρα έχει  $(2N-1)$  παραμέτρους, ενώ το  $\rho_{ai}^c$ , που είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με  $a$  και αντιστοιχεί στο  $i$ -οστό ζεύγος μετρήσεων, δίνεται από τη σχέση [15, 16]:

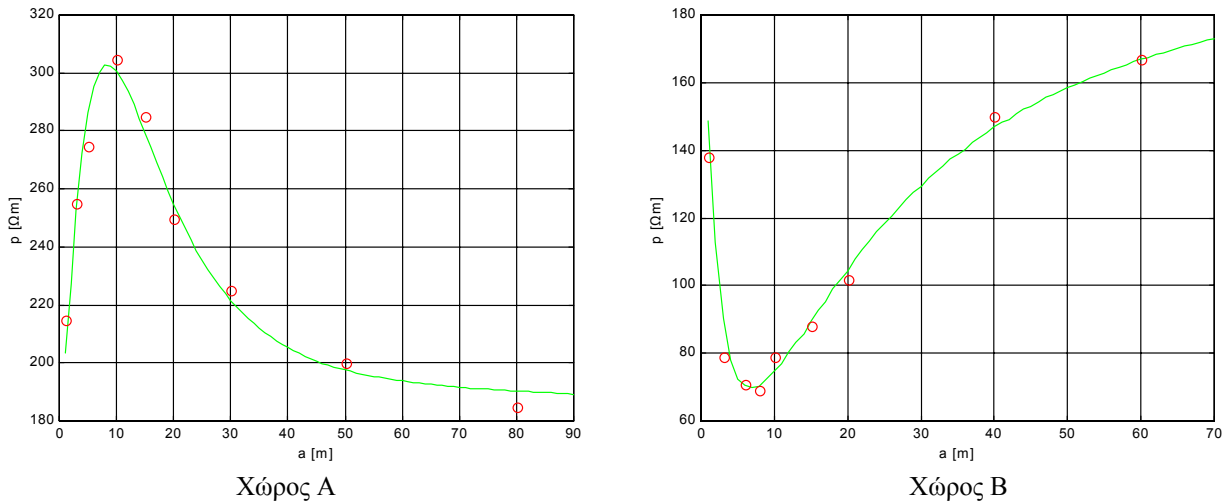
$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \cdot [1 + 2 \cdot F_N(a) - F_N(2 \cdot a)] \quad (11)$$

όπου η συνάρτηση  $F_N(x)$  υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (7).

Χρησιμοποιώντας το γενετικό αλγόριθμο για μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν [9], η λύση που προκύπτει παρουσιάζεται στον πίνακα 2. Η γραφική παράσταση της εξίσωσης (11) παρουσιάζεται με την πράσινη συνεχή καμπύλη στο Σχήμα 4, αξιοποιώντας τα στοιχεία των λύσεων που προέκυψαν, ενώ οι κόκκινοι κύκλοι αντιστοιχούν στις ληφθείσες μετρήσεις.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

| Περίπτωση | $\rho_1$ [ $\Omega \cdot m$ ] | $\rho_2$ [ $\Omega \cdot m$ ] | $\rho_3$ [ $\Omega \cdot m$ ] | $h_1$ [m] | $h_2$ [m] | Σφάλμα $F_g$ |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|--------------|
| Χώρος A   | 196,9                         | 351,7                         | 185,2                         | 1,7       | 8,4       | 0,266        |
| Χώρος B   | 164,5                         | 71,6                          | 203,7                         | 1,2       | 10,6      | 0,365        |



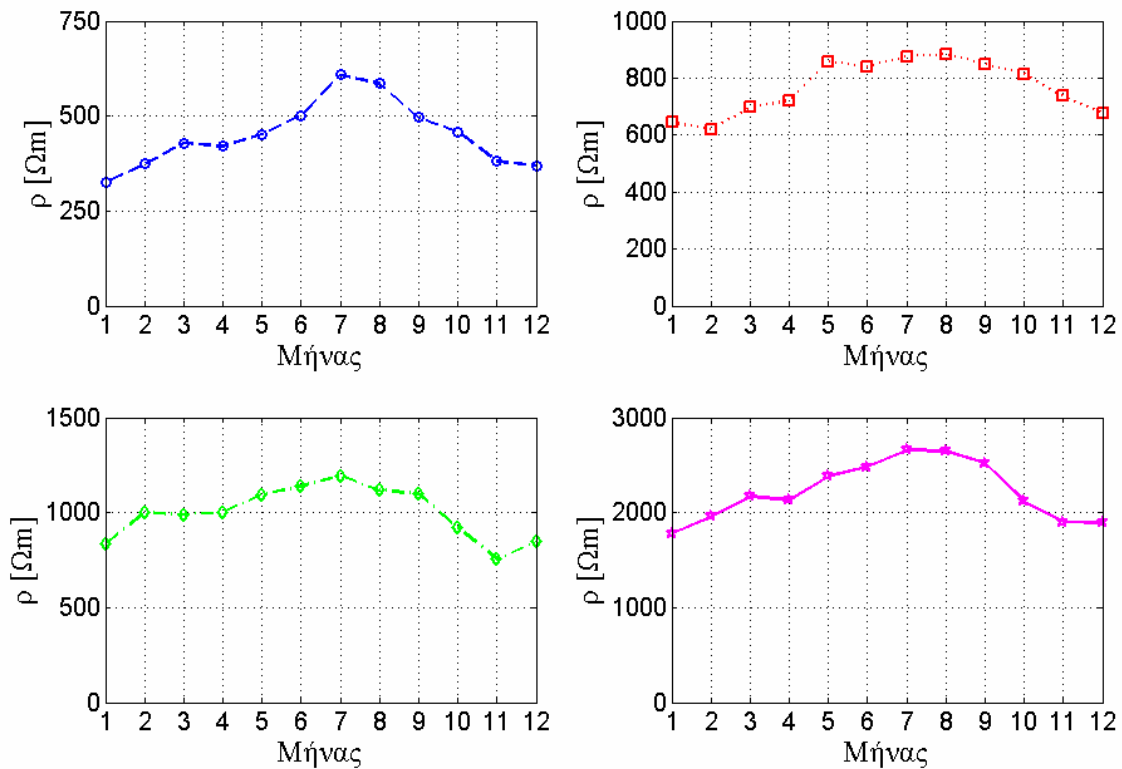
Σχήμα 4: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης των βοηθητικών ηλεκτροδίων για τριστηρωματικό έδαφος.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους και η καταγραφή της μεταβολής της μέσα στο χρονικό διάστημα ενός έτους αποτελεί το κύριο αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το γειωσόμετρο της LEM μοντέλο SATURN GEO-X. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες καταγράφηκαν με την βοήθεια του υγρομέτρου-θερμομέτρου Dostmann H270.

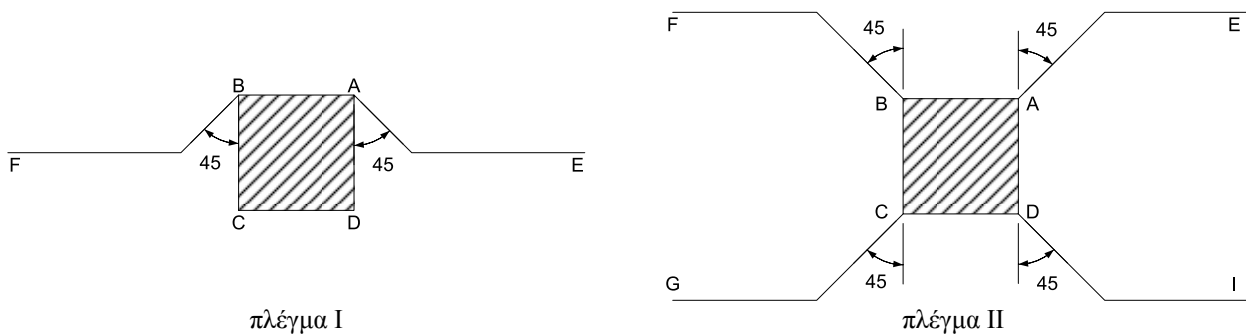
Εφαρμόζοντας τη μέθοδος Wenner χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ηλεκτρόδια μήκους 50cm τα οποία τοποθετήθηκαν σε μία νοητή ευθεία γραμμή. Οι αγωγοί που συνέδεαν τα βοηθητικά ηλεκτρόδια με το γειωσόμετρο είχαν διατομή  $4mm^2$ . Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων ήταν  $a$  και μεταβαλλόταν με διακριτά βήματα. Η ειδική αντίσταση του εδάφους καταγράφηκε για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, για τον προσδιορισμό του βαθμού ομοιομορφίας του εδάφους (Σχήματα 2 και 4). Με βάση αυτές τις μετρήσεις προκύπτουν συμπεράσματα για τη διαστρωμάτωση του εδάφους τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Οι τιμές, όμως που προκύπτουν, για την ειδική αντίσταση και το πάχος των στρωμάτων, δεν παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια του έτους.

Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν, σε ορισμένους χώρους, σε τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να ελεγχθεί η επίδραση των καιρικών φαινομένων. Οι χώροι που επιλέχθηκαν είναι εύκολα προσβάσιμοι και επιτρέπουν τη διεξαγωγή μετρήσεων επ' ευθείας γραμμής μήκους, τουλάχιστον, 60m. Για απόσταση  $a=10m$  τα αποτελέσματα που προκύπτουν, για τους ελεγχθέντες χώρους, φαίνονται στο Σχήμα 5. Είναι εμφανές, και προφανές, ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες τιμές τους καλοκαιρινούς μήνες σε σχέση με τους χειμερινούς: αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή βροχόπτωση ξηραίνουν το επάνω, τουλάχιστον, στρώμα του εδάφους. Ο λόγος της μεγίστης προς την ελαχίστη φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους, που έχουν καταγραφεί μέσα σε ένα χρονικό διάστημα πέντε ετών, παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1,5-3. Επομένως, είναι εμφανές ότι η πραγματοποίηση των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους τους καλοκαιρινούς μήνες, έχει ως αποτέλεσμα τη μέτρηση των μέγιστων τιμών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια του έτους. Εάν αυτό (δηλαδή, η διεξαγωγή των μετρήσεων μέσα στο καλοκαίρι) δεν είναι εφικτό, τότε συνιστάται η προσαύξηση των τιμών των μετρήσεων, που προκύπτουν σε διαφορετική εποχή του έτους, με βάση τα δεδομένα από τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους, για το οποίο διατίθενται οι απαραίτητες μετρήσεις.



Σχήμα 5: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους σε τέσσερις περιοχές για απόσταση βοηθητικών ηλεκτροδίων  $a=10m$ .

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην αντίσταση του συστήματος γείωσης. Το προς μελέτη σύστημα γείωσης είναι τα πλέγματα που χρησιμοποιεί η ΔΕΗ στους πυλώνες υψηλής τάσης. Στην περίπτωση των συστημάτων γείωσης των πυλώνων της ΔΕΗ, χρησιμοποιούνται δύο πλέγματα γείωσης, I και II, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 6. Το πλέγμα I έχει συνολικό μήκος περί τα 200m και χρησιμοποιείται σε εδάφη, όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους λαμβάνει μικρές τιμές, ενώ το πλέγμα II περί τα 240m και χρησιμοποιείται σε εδάφη, όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους λαμβάνει μεγάλες τιμές. Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε ο τυπικός πυλώνας S4 της ΔΕΗ με μήκος πλευράς του τετραγώνου ίση με 10,4m.



Σχήμα 6: Τα συστήματα γείωσης  $\alpha$  και  $\beta$  για τους πυλώνες.

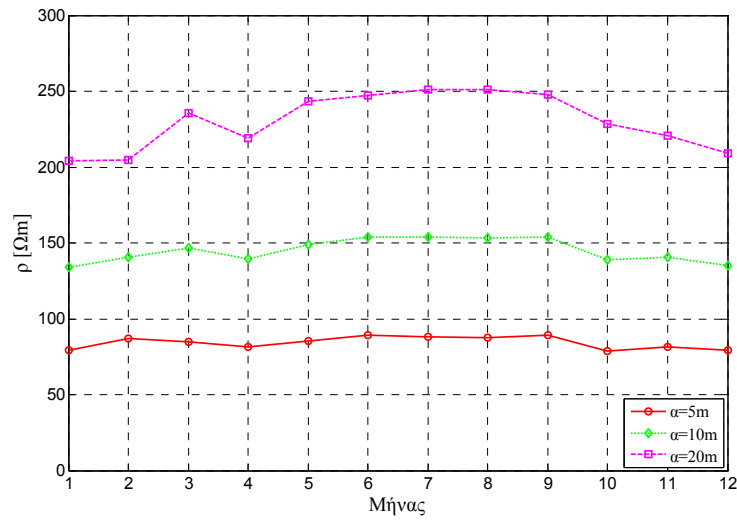
Η επίδραση του εδάφους στην τιμή της αντίστασης γείωσης μελετήθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα CDEGS. Στην περίπτωση του ομοιογενούς (μονοστρωματικού) εδάφους η αντίσταση γείωσης δίνεται από την σχέση:

$$R = K_{II} \cdot \rho \quad (12)$$

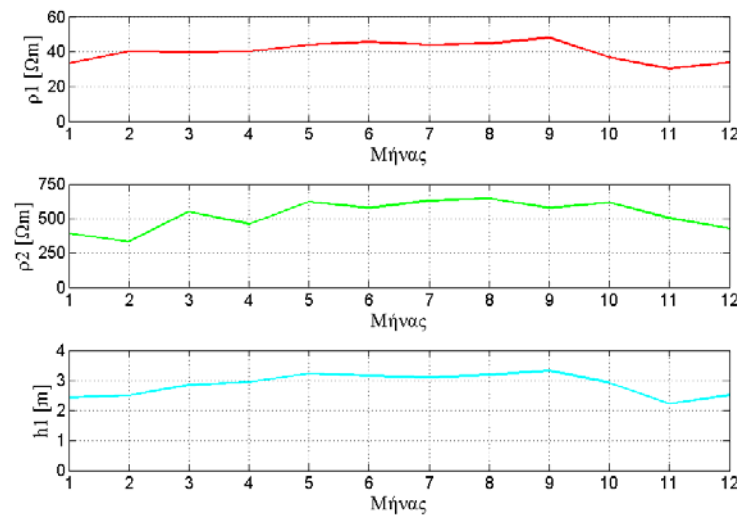
όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους και  $K_{II}$  συντελεστής εξαρτώμενος από τον τύπο του πλέγματος. Για τον πυλώνα S4 της ΔΕΗ οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής  $K_{II}$  είναι 0,01153 και 0,005242 για τα πλέγματα I, II του Σχήματος 6, αντίστοιχα.

Στις περιπτώσεις του διστρωματικού και του πολυστρωματικού εδάφους δεν υπάρχει μία αντίστοιχη σχέση που να συνδέει την ειδική αντίσταση του εδάφους με την αντίσταση του πυλώνα. Θα μπορούσαν να προταθούν σχέσεις που συνδέουν την αντίσταση γείωσης με τις παραμέτρους του εδάφους (ειδική αντίσταση και πάχος κάθε στρώματος), αλλά το πλήθος των μεταβλητών και ο απαιτούμενος όγκος επεξεργασίας των δεδομένων θα καθιστούσε τις σχέσεις αυτές δύσχρηστες. Επομένως, σ' αυτές τις περιπτώσεις είναι ευκολότερο να χρησιμοποιηθεί κάποιο πακέτο λογισμικού για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, αλλά και των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής. Στη συνέχεια

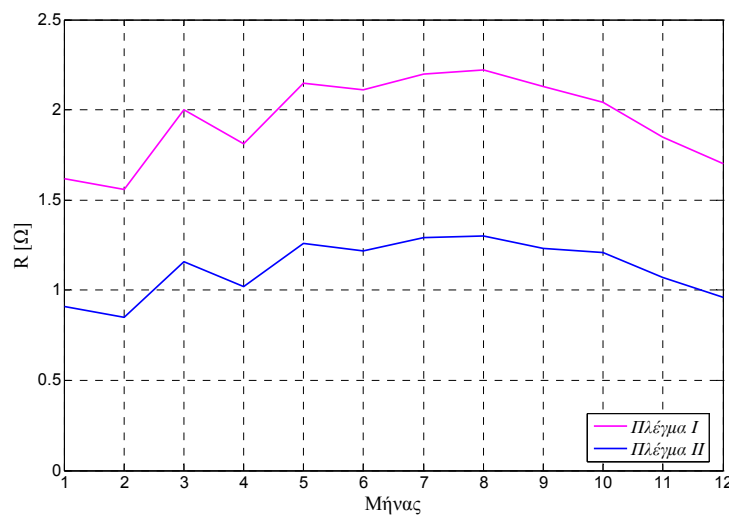
παρουσιάζεται η ετήσια μεταβολή της ειδικής αντίστασης εδάφους (Σχήμα 7), των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους (Σχήμα 8) και της αντίστασης γείωσης των δύο πλέον διαδεδομένων πλεγμάτων γείωσης των πυλώνων τύπου S4 (Σχήμα 9). Παρατηρείται (Σχήματα 7, 9) ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους και η αντίσταση του συστήματος γείωσης έχουν ανάλογη μεταβολή μέσα στο χρόνο.



Σχήμα 7: Ετήσια μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης εδάφους (για α=5, 10 και 20m).



Σχήμα 8: Ετήσια μεταβολή των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους.



Σχήμα 9: Ετήσια μεταβολή της αντίστασης γείωσης του πλέγματος πυλώνα τύπου S4.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που διεξήχθησαν σε διάφορες περιοχές, έδειξαν ότι το έδαφος πρέπει να προσομοιώνεται τουλάχιστον ως διστρωματικό. Παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία, που επιτρέπει τον υπολογισμό των παραμέτρων του πολυστρωματικού εδάφους, με τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα συγκρινόμενα με τις μετρήσεις που είχαν ληφθεί. 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 στοιχεία εισόδου στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης που θα τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο έδαφος.

Επίσης, έγινε φανερό από την επανάληψη των μετρήσεων, ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή της κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Τούτο διαφοροποιεί τα αποτελέσματα των μετρήσεων, ανάλογα με την εποχή που αυτές διεξάγονται, και καθιστά απαραίτητη την πραγματοποίησή τους το καλοκαίρι. Εάν τούτο δεν είναι εφικτό, τότε συνιστάται η προσαύξηση των τιμών των μετρήσεων, που προκύπτουν σε διαφορετική εποχή του έτους, με βάση τα δεδομένα από τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους για το οποίο διατίθενται οι απαραίτητες μετρήσεις..

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ



Το Πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (75%) και από Εθνικούς Πόρους (25%) - Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευσης και Αρχική Επαγγελματική Κατάρτιση II (ΕΠΕΑΕΚ II) και συγκεκριμένα από το Πρόγραμμα ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ II.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] IEEE Std 81-1983, “IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system”, 11 March 1983.
- [2] ANSI/IEEE Std 80-2000, “IEEE guide for safety in AC substation grounding”, 30 January 2000.
- [3] Ma J., Dawalibi F.P., “Study of influence of buried metallic structures on soil resistivity measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, 13, 2, April 1998, pp. 356-365.
- [4] Del Alamo J.L., “A comparison among eight different techniques to achieve an optimum estimation of electrical grounding parameters in two-layered earth”, IEEE Transactions on Power Delivery, 8, 4, October 1993, pp. 1890-1899.
- [5] Aravanis J., Tzouveleakis E., Chronopoulos C., Antoniou T., “Computing Method of the Equivalent resistivity of non-uniform Soil for the Design of transmission Substation Grounding Grids”, Proceedings of the 38th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2003), Thessaloniki, Greece, September 1-3, 2003, pp. 709-712.
- [6] Γκόνοϋ Ι.Φ., Κονταργόρη Β.Θ., Σταθόπουλος Ι.Α., Michaelides Α.Μ., Riley C.P., “Πεδιακή επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων”, Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 27-28 Νοεμβρίου 2003, σελ. 87-94.
- [7] Seedher H.R., Arora J.K., “Estimation of two layer soil parameters using finite wanner resistivity expressions”, IEEE Transactions on Power Delivery, 7, 3, July 1992, pp. 1213-1217.
- [8] Del Alamo J.L., “A second order gradient technique for an improved estimation of soil parameters in two-layer earth”, IEEE Transactions on Power Delivery, 6, 3, July 1991, pp. 1166-1170.
- [9] Γκόνοϋ Ι.Φ., “Μεταβατική συμπεριφορά συστημάτων γείωσης”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2002.
- [10] Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Estimation of Multi-Layer Soil Parameters using Genetic Algorithms”, IEEE Transactions on Power Delivery, January 2005, pp. 100-106.
- [11] Lagace P.J., Fortin J., Crainic E.D., “Interpretation of resistivity sounding measurements in N-layer soil using electrostatics images”, IEEE Transactions on Power Delivery, 11, 3, July 1996, pp. 1349-1354.
- [12] Yang H., Yuan J., Zong W., “Determination of three-layer earth model from wanner four-probe test data”, IEEE Transactions on Magnetics, 37, 5, September 2001, pp. 3684-3687.
- [13] Dawalibi F.P., Bensted D., Mukhedkar D., “Soil effects on ground faults currents”, IEEE Transaction on Apparatus and System, PAS 100, 7, July 1981, pp. 3442-3449.
- [14] Ma J., Dawalibi F.P., “Influence of inductive coupling between leads on resistivity measurements in multilayers soils”, IEEE Transactions on Power Delivery, 13, 4, October 1998, pp. 999-1003.
- [15] Takahashi T., Kawase T., “Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure”, IEEE Transactions on Power Delivery, 5, 2, April 1990, pp. 604-612.
- [16] Takahashi T., Kawase T., “Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure”, IEEE Transactions on Power Delivery, 6, 2, April 1991, pp. 608-614.