ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΟΝ ΑΣΦΑΛΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΕΙΩΣΗΣ

Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, Κάτια Δ. Δαμιανάκη, Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου, Ιωάννης Φ. Γκόνος, Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Τ.Κ. 15780, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα
e-mail: v.andro@mail.ntua.gr

Περίληψη

Η κατασκευή πλήθους ιδιωτικών υποσταθμών υψηλής τάσης (αιολικά πάρκα, ηλεκτροκίνηση τραίνων, ιδιωτικοί σταθμοί παραγωγής), καθώς και η εγκατάσταση μεγάλου πλήθους ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάρκων, έχει ως συνέπεια την απαίτηση για ενδελεχή μελέτη και προσεκτικό σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης αυτών των εγκαταστάσεων, ώστε να εξασφαλίζεται στο έπακρο η ασφάλεια των ανθρώπων και του εξοπλισμού έναντι σφαλμάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον σωστό σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης είναι η λεπτομερής γνώση της δομής του εδάφους, στον χώρο που πρόκειται να χωροθετηθεί η υπό προστασία εγκατάσταση, η οποία αποκτάται μέσω μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε διάφορα βάθη και στην οποία οι μελετητές μηχανικοί προσδίδουν βαρύνουσα σημασία. Μέσω των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης και με χρήση κατάλληλου λογισμικού προκύπτει το προφιλ του εδάφους, το οποίο αποτελεί και τη σημαντικότερη παράμετρο στον σχεδιασμό του συστήματος και στον καθορισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής. Η παρούσα εργασία αναδεικνύει την εξαιρετική σημασία που πρέπει να δίνεται, στην επιλογή των αξόνων μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους στον χώρο της εγκατάστασης, στην επιλογή του βάθους μέτρησης, καθώς και στην επιλογή του συνδυασμού των αξόνων για τον τελικό προσδιορισμό του προφιλ του εδάφους. Γίνεται αναλυτική μελέτη της μεταβολής των τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε συνάρτηση με την απόσταση των αξόνων μέτρησης, καθώς και της επίδρασης που έχει η χωροθέτηση των αξόνων στον προσδιορισμό της αβεβαιότητας της μέτρησης. Επίσης, γίνεται ανάλυση της μεταβολής των τιμών βηματικής τάσης και τάσης επαφής, ως συνάρτηση των αξόνων μέτρησης, καθώς και της επιλογής διστρωματικού ή τριστρωματικού μοντέλου εδάφους, με βάση πειραματικές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους που ελήφθησαν σε υπαίθριο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Με αυτόν τον τρόπο καταδεικνύεται η σπουδαιότητα της σωστής και προμελετημένης μέτρησης της ειδικής αντίστασης σε ανισοτροπικό έδαφος, για τον άρτιο και ασφαλή σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης.

Λέξεις-Κλειδιά: Σύστημα γείωσης, ειδική αντίσταση εδάφους, μοντέλα εδάφους, βηματική τάση, τάση επαφής, αβεβαιότητα μέτρησης

Abstract

The construction of numerous private high voltage substations (wind farms, electromotive train, private power plants), as the installation of a large number of wind turbine generators and photovoltaic parks, involves the requirement for studying in detail and designing carefully the grounding systems of such electric utility facilities, in order to ensure the fullest safety of humans and equipment against faults. A prerequisite for the proper designing of a grounding system is the full knowledge of the ground structure at the terrain of installation, which can be obtained through the measurement of soil resistivity in various depths, as this knowledge is of great importance for engineers. Through soil resistivity measurements and using proper software, engineers are able to illustrate the ground profile, which constitutes the most significant parameter for the design of a grounding system and for determining the maximum permissible limits of step and touch voltages. This paper highlights the high importance and necessity for engineers to choose the proper measurement axes of soil resistivity at the terrain of interest, to choose the proper measurement depths, as well the combination of axes for the final determination of the ground profile. The variance of soil resistivity values as a function of axes distance, and the influence of axes placement on determining the uncertainty of measurements, are also analyzed in detail in this study. Furthermore, this paper studies the variance in values of step and touch voltages as a function of measurement axes and of two-layer or three-layer soil model, based on soil resistivity field measurements performed at the University Campus. Therefore, the proper and premeditated measurement of soil resistivity, at the terrain of interest, particularly in anisotropic ground, is proved to be of major importance for the full designing of a safe grounding system.

Keywords: Grounding system, soil resistivity, soil models, step voltage, touch voltage, uncertainty of measurement

1. Εισαγωγή

Σύστημα γείωσης καλείται το σύνολο των οριζόντιων και κατακόρυφων ηλεκτροδίων γείωσης, που αποτελείται από έναν αριθμό διασυνδεδεμένων, γυμνών αγωγών τοποθετημένων εντός του εδάφους και το οποίο παρέχει μία κοινή γείωση σε ηλεκτρικές συσκευές ή μεταλλικές κατασκευές, συνήθως σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία (IEEE Std. 80-2013). Σκοπός του συστήματος γείωσης είναι η παροχέτευση των υψηλών ρευμάτων σφάλματος στη γη, διαμέσου αγώγιμου δρόμου ελάχιστης, κατά το δυνατόν, αντίστασης και στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Ο σωστός σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος γείωσης στοχεύει στην πλήρη ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων, έτσι ώστε να ελέγχεται η ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και να εξασφαλίζεται ο αποτελεσματικός περιορισμός των κλίσεων δυναμικού γης σε επίπεδα τάσεως κάτω από τα μέγιστα, κατά περίπτωση, επιτρεπόμενα όρια ασφαλείας, με σκοπό να μην τίθενται σε κίνδυνο η ζωή των ατόμων που βρίσκονται στην περιοχή και η ακεραιότητα του εξοπλισμού. Επίσης, η αποτελεσματικότητα ενός συστήματος γείωσης συμβάλλει στους μικρούς χρόνους αντίδρασης και στην άμεση ενεργοποίηση των διατάξεων προστασίας, με συνέπεια την αποτελεσματική και πλήρη προστασία ανθρώπων και εγκαταστάσεων.

Σημαντικό μέγεθος για τον χαρακτηρισμό των συστημάτων γείωσης και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους, ως προς την ασφαλή παροχέτευση των ρευμάτων σφάλματος στη γη και τον περιορισμό των αναπτυσσομένων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής, αποτελεί η αντίσταση γείωσης αυτών των συστημάτων. Ως αντίσταση

γείωσης R_g ορίζεται η αντίσταση που εμφανίζεται από το ηλεκτρόδιο γείωσης μέχρι την άπειρη γη, όταν δεν υπάρχουν άλλα ηλεκτρόδια στο έδαφος. Ως άπειρη γη θεωρείται ένα ηλεκτρόδιο γείωσης μηδενικής αντίστασης, τοποθετημένο σε θεωρητικά «άπειρη» απόσταση από τον εξεταζόμενο γειωτή, δηλαδή πρακτικά, σε σημείο του εδάφους όπου το δυναμικό θεωρείται μηδενικό (IEEE Std. 81-2012). Βηματική τάση E_s ονομάζεται η διαφορά δυναμικού στην επιφάνεια της γης που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1m και το οποίο δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Εφόσον η κλίση δυναμικού στη γη είναι μεγαλύτερη στην περιοχή που γειτονεύει με το ηλεκτρόδιο, συνεπάγεται ότι η μέγιστη βηματική τάση υπό συνθήκες σφάλματος προς γη, προφανώς, προκύπτει στη θέση σφάλματος. Αντίστοιχα, τάση επαφής E_t ονομάζεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) ενός συστήματος γείωσης και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο του εδάφους όπου στέκεται ένα άτομο, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με μια γειωμένη μεταλλική δομή (IEEE Std. 80-2013, IEEE Std. 81-2012).

Γενικά επιδιώκεται η, κατά το δυνατόν, ελάχιστη τιμή της αντίστασης γείωσης για όλες τις περιπτώσεις συστημάτων γείωσης σε μικρής και μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης γείωσης συμβάλλουν η δομή του εδάφους που περιβάλλει τον γειωτή, το εμβαδόν και η γεωμετρία του γειωτή. Στη μελέτη και στον σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ιδιαίτερων απαιτήσεων (υποσταθμοί υψηλής τάσης, αιολικά πάρκα, ηλεκτρικός σιδηρόδρομος, κ.α.) οι διαστάσεις και η γεωμετρία του γειωτή (πλέγμα, κατακόρυφα ηλεκτρόδια, περιμετρική γείωση με μεταλλική ταινία, ή/και συνδυασμός αυτών) είναι συνήθως τυποποιημένες, ανάλογα με την κατασκευή, ή αναπροσαρμόζονται από την αρχική μελέτη, σύμφωνα, πάντα, με την εκτίμηση της δομής του εδάφους στον χώρο ενδιαφέροντος.

Απαραίτητη προϋπόθεση, λοιπόν, για τον σωστό σχεδιασμό ενός συστήματος γείωσης είναι η λεπτομερής γνώση της δομής του εδάφους, στην τοποθεσία που πρόκειται να χωροθετηθεί η υπό προστασία εγκατάσταση. Συνεπώς, πρώτο και εξαιρετικής σημασίας βήμα στη φάση σχεδιασμού και μελέτης των συστημάτων γείωσης είναι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της δομής του εδάφους (πλήθος στρωμάτων, βάθος και ειδική αντίσταση κάθε στρώματος). Μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους, που έχουν διεξαχθεί σε διάφορες περιοχές της χώρας από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., έδειξαν ότι το έδαφος παρουσιάζει, κατά κόρον, πολυστρωματική δομή. Επομένως, για τον σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση της πολυστρωματικής δομής του εδάφους μέσω κατάλληλων τεχνικών που αποσκοπούν στον προσδιορισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους, δηλαδή του πλήθους στρωμάτων του μοντέλου εδάφους που θα χρησιμοποιηθεί, της ειδικής αντίστασης και του βάθους του κάθε στρώματος. Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική (Meliopoulos et al. 1986, Seedher et al. 1992, Gonos et al. 2005, Gonos et al. 2007), τριστρωματική Yang et al. (2001) και πολυστρωματική δομή (Takahashi et al. 1990, Gonos et al. 2005, Galixto et al. 2010), οι οποίες χρησιμοποιούν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Επειδή οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους αποτελούν το κύριο διάνυσμα δεδομένων εισόδου στα διάφορα λογισμικά πακέτα υπολογισμού των παραμέτρων πολυστρωματικής δομής, γίνεται κατανοητό ότι σφάλματα στην πραγματοποίηση των μετρήσεων, είτε λόγω εσφαλμένης εφαρμογής της εκάστοτε μεθόδου μέτρησης, είτε λόγω λανθασμένης επιλογής των αξόνων μέτρησης, είτε ακόμη και λόγω λανθασμένης χρονικής περιόδου στην οποία πραγματοποιείται η μέτρηση, μπορούν να οδηγήσουν σε

εσφαλμένους υπολογισμούς των παραμέτρων των μοντέλων εδάφους και, συνεπακόλουθα, σε εσφαλμένο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης. Η παρούσα μελέτη σκοπό έχει να αναδείξει τις αιτίες πιθανών σφαλμάτων στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και τον βαθμό που αυτά επηρεάζουν, τόσο τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου εδάφους, άρα και την εκτίμηση της πολυστρωματικής δομής του, όσο και τον προσδιορισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στη μη λήψη απαραίτητων επιπρόσθετων μέτρων ασφαλείας έναντι σφαλμάτων.

2. Μέτρηση της ειδικής αντίστασης εδάφους

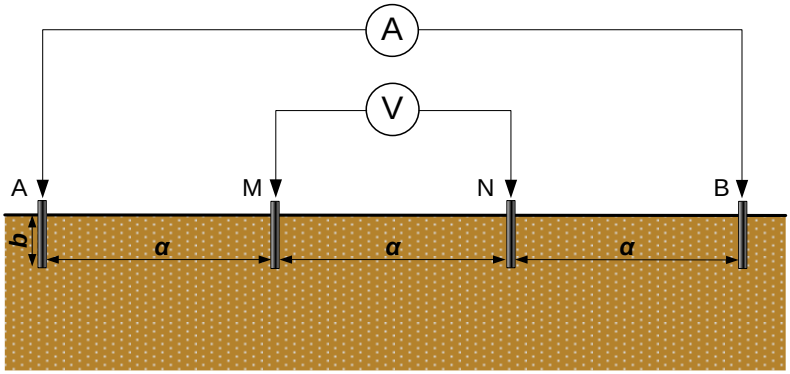
Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι απαραίτητη η ροή ρεύματος μέσω αυτού. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο τοποθετώντας ηλεκτρόδια μέσα στη γη τα οποία τροφοδοτούνται με ρεύμα. Ως εκ τούτου, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί πολλές τεχνικές, ορισμένες από τις οποίες εφαρμόζονται ευρύτατα για τις μελέτες των συστημάτων γείωσης. Οι κυριότερες μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους οι οποίες αναφέρονται και στα διεθνή πρότυπα (IEEE Std. 80-2013, IEEE Std. 81-2012) είναι α) η μέθοδος των τεσσάρων σημείων, β) η μέθοδος των τριών σημείων και γ) η μέθοδος των δύο σημείων. Η ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος μέτρησης της ειδική αντίστασης είναι αυτή «των τεσσάρων σημείων», η οποία εφαρμόζεται με αρκετές παραλλαγές ως προς τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων μέτρησης. Οι βασικές παραλλαγές αυτής της μεθόδου είναι (Ανδροβιτσανέας 2016): 1) Μέθοδος Wenner, 2) Μέθοδος Schlumberger-Palmer, 3) Διάταξη κεντρικού ηλεκτροδίου, 4) Μέθοδος Lee, 5) Μέθοδος διπόλου-διπόλου, 6) Τετραγωνική διάταξη.

Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος μέτρησης είναι η μέθοδος Wenner, λόγω της απλότητας εφαρμογής της, η οποία χρησιμοποιήθηκε και για τις ανάγκες αυτής της εργασίας. Η συνδεσμολογία των βοηθητικών ηλεκτροδίων κατά τη μέθοδο αυτή εικονίζεται στο σχήμα 1 (Ανδροβιτσανέας 2016). Σύμφωνα με τη μέθοδο Wenner χρησιμοποιούνται τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή και ισαπέχοντα μεταξύ τους σε απόσταση a. Τα ηλεκτρόδια εμπήγνυνται μερικώς στο έδαφος (σε βάθος b), ενώ το άνω άκρο τους συνδέεται στο γειωσόμετρο, το οποίο εγχύει AC ρεύμα χαμηλής τάσης στα ακραία ηλεκτρόδια της διάταξης. Το ρεύμα κυκλοφορεί μεταξύ των δύο ακραίων ηλεκτροδίων (A και B) και μετριέται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο μεσαία ηλεκτρόδια (M και N). Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς την ένταση του ρεύματος ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση (ένδειξη του οργάνου) και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Σε ανισοτροπικά εδάφη, η παρουσία ανομοιογενειών στο έδαφος έχει ως συνέπεια τη διαρκή μεταβολή των τιμών της ειδικής αντίστασης από σημείο σε σημείο. Η μέτρηση, δε, της ειδικής αντίστασης είναι ανάλογη της σχετικής θέσης των ηλεκτροδίων. Η υπολογιζόμενη ειδική αντίσταση, τότε, είναι γνωστή ως *φαινόμενη ειδική αντίσταση*. Αυτή, καθιστά δυνατή την ποιοτική εκτίμηση των ηλεκτρικών παραμέτρων του μέσου, δε δίνει όμως την πραγματική ειδική αντίσταση και τα σχήματα των ανομοιογενειών, παρά μόνο την προσεγγίζει. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ, με εφαρμογή της μεθόδου Wenner, υπολογίζεται από τη σχέση (IEEE Std. 81-2012):

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

όπου R η μετρούμενη φαινόμενη αντίσταση. Στην περίπτωση όπου $b<0,1\alpha$ τότε η εξίσωση (1) απλοποιείται στην έκφραση:

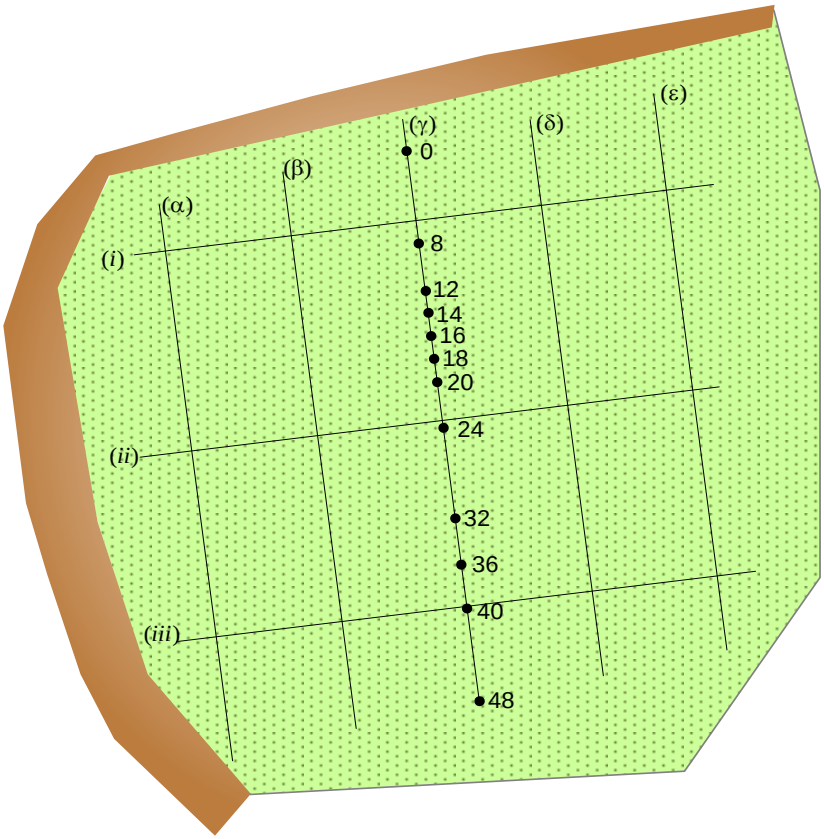
$$\rho = 2\pi\alpha R \tag{2}$$



Σχήμα 1: Μέθοδος Wenner

Για τη μελέτη του συστήματος γείωσης είναι απαραίτητα δεδομένα μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Αυτό προϋποθέτει, όπως έχει προαναφερθεί, κατάλληλη επιλογή α) των αξόνων μέτρησης (πλήθος μετρήσεων, θέσεις, αποστάσεις) και β) της εποχής του έτους που θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μεταβάλλεται σε σημαντικό βαθμό κατά τη διάρκεια του έτους ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Γι' αυτόν τον λόγο κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιείται η μέτρηση της ειδικής αντίστασης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες ή αρχές φθινοπώρου και με στεγνό έδαφος, οπότε και να εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της, άρα και το σύστημα γείωσης να υπολογίζεται στην ασφαλή πλευρά.

Οι μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν σε υπαίθριο χώρο της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου τον Οκτώβριο του 2017, σε εντελώς στεγνό έδαφος και όλες την ίδια ημέρα, ώστε να εξασφαλιστεί το αμετάβλητο των συνθηκών του πειράματος. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε οκτώ (8) άξονες με τη διάταξη που εικονίζεται στο σχήμα 2 και με αποστάσεις μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων 2m, 4m, 8m, 12m και 16m σε κάθε άξονα, ώστε να αποτυπωθεί, όσο το δυνατόν καλύτερα, η δομή του εδάφους σε όλη την έκταση της συγκεκριμένης περιοχής. Η απόσταση μεταξύ των αξόνων (α)–(ε) καθορίστηκε στα 5 μέτρα, ενώ των αξόνων (*i*)–(*iii*) ήταν περίπου 15m. Στον κεντρικό άξονα (γ) του σχήματος αποτυπώνονται οι θέσεις και οι αποστάσεις των βοηθητικών ηλεκτροδίων, που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου Wenner. Ο αριθμός δίπλα σε κάθε ηλεκτρόδιο υποδηλώνει την απόστασή του από το πρώτο της διάταξης (0). Σε κάθε άξονα τοποθετούνταν σε βάθος 0,4m δώδεκα (12) βοηθητικά ηλεκτρόδια μήκους 0,5m το καθένα, και χρησιμοποιούνταν 4 ηλεκτρόδια κάθε φορά ανάλογα με το επιθυμητό βάθος, π.χ. για βάθος μέτρησης 8m η απόσταση ηλεκτροδίων αντιστοιχεί σε 16m, οπότε η μέτρηση πραγματοποιούταν με τα ηλεκτρόδια 0–16–32–48. Με αυτόν τον τρόπο, μετρήθηκε η φαινόμενη αντίσταση σε βάθη 1m, 2m, 4m, 6m και 8m, σε κάθε άξονα μέτρησης και στη συνέχεια μέσω της σχέσης (1) υπολογίστηκε η φαινόμενη ειδική αντίσταση εδάφους για κάθε βάθος μέτρησης. Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το διακριβωμένο γειωσόμετρο MEGGER DET2/2 Auto Earth Tester, που διαθέτει το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., και με συχνότητα ρεύματος στα 128*Hz*.



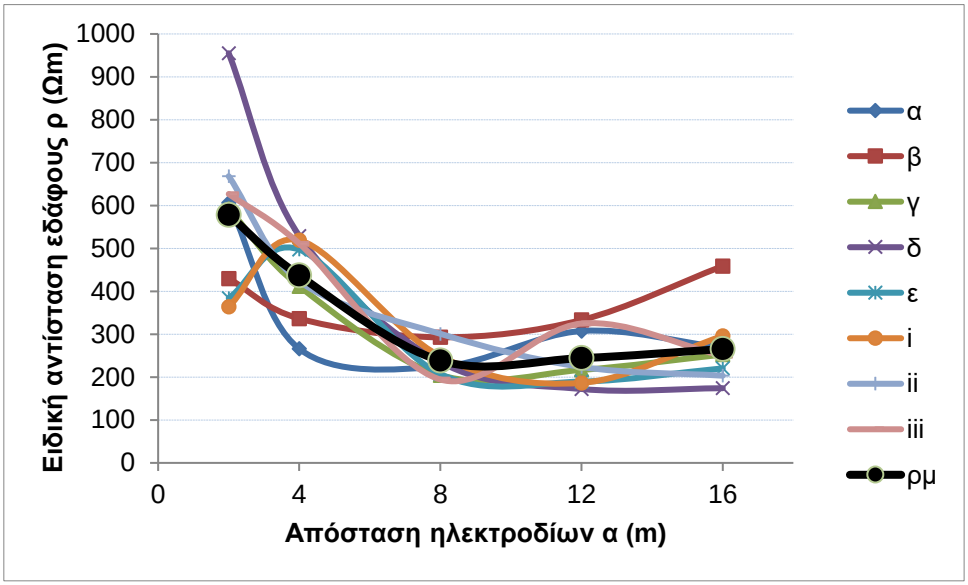
Σχήμα 2: Άξονες μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

3. Αποτελέσματα μετρήσεων και υπολογισμός διστρωματικού και τριστρωματικού μοντέλου εδάφους

Μετά την λήψη των μετρήσεων της φαινόμενης αντίστασης και στους οκτώ άξονες, υπολογίστηκε η τιμή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για τις προκαθορισμένες αποστάσεις *α* των ηλεκτροδίων κατά Wenner σε όλους τους άξονες, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον πίνακα 1 με την αντίστοιχη διευρυμένη αβεβαιότητα τύπου Α και με πιθανότητα κάλυψης 95% (ΕΛΟΤ ΕΝ 60060.02 2011, Μαθιουλάκης 2004) για κάθε απόσταση. Στην παρούσα εργασία, η μελέτη της μεταβολής στη μετρούμενη τιμή της ειδικής αντίστασης εδάφους έγινε με όρους αβεβαιότητας τύπου Α, αφού από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα ($u_c(y)$), αυτή η συνιστώσα επηρεάζεται ουσιαστικά από την αλλαγή της θέσης του άξονα μέτρησης. Ακολούθως, στο γράφημα του σχήματος 3 απεικονίζονται οι μεταβολές των τιμών της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της θέσης του άξονα μέτρησης, όπως επίσης αποτυπώνεται και η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εκάστοτε βάθους μέτρησης (απόσταση ηλεκτροδίων) συναρτήσει της θέσης του άξονα μέτρησης.

Πίνακας 1: Μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους (Ω·m) στους 8 άξονες μέτρησης.

α(m)	(*α*)	(*β*)	(*γ*)	(*δ*)	(*ε*)	(*i*)	(*ii*)	(*iii*)	U(%)
2	607	430	592	955	384	364	668	627	28,6
4	266	336	412	529	497	519	424	511	18,9
8	224	293	204	235	207	248	301	194	14,4
12	307	333	217	172	190	187	224	325	23,4
16	268	459	253	174	220	296	203	250	28,2



Σχήμα 3: Μεταβολή των τιμών της ειδικής αντίστασης εδάφους ανά βάθος μέτρησης σε συνάρτηση με τη θέση του άξονα μέτρησης.

Ο διαφορετικός ρυθμός μεταβολής της ειδικής αντίστασης από άξονα σε άξονα, καθώς και η διαφορετικότητα στη μορφή των καμπυλών, αποδεικνύουν την έντονη ανομοιογένεια του εξεταζόμενου εδάφους, η οποία εκφράζεται με απότομες μεταβολές της ρ, τόσο σε βάθος, όσο και σε επιφανειακή απόσταση λίγων μέτρων. Επίσης, γίνεται φανερό ότι η επιλογή της θέσης του άξονα μέτρησης έχει ως αποτέλεσμα σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των μετρούμενων τιμών της ειδικής αντίστασης για την ίδια απόσταση ηλεκτροδίων (ίδιο βάθος μέτρησης). Χαρακτηριστική περίπτωση αυτού του γεγονότος είναι η μέτρηση της ρ σε α=2m, όπου η μέγιστη μετρούμενη τιμή από τους 8 άξονες μέτρησης φθάνει τα 955Ω·m ενώ η αντίστοιχη ελάχιστη τιμή τα 364Ω·m, με εμφανιζόμενη απόκλιση μεταξύ τους της τάξης του 62%, τυπική απόκλιση δείγματος 192Ω·m και με την αβεβαιότητα της μέτρησης να φθάνει το 28,6% για πιθανότητα κάλυψης 95%. Ανάλογα, η τυπική απόκλιση του δείγματος των μετρήσεων σε απόσταση α=4m φθάνει την τιμή των 96Ω·m, τη δεύτερη μεγαλύτερη μετά την απόσταση των 2m, ενώ παρόμοια αβεβαιότητα μέτρησης με τα 2m εμφανίζει και η μέτρηση στα 16m, η οποία φθάνει το ποσοστό του 28,2%. Η μεγάλη διακύμανση των τιμών στα ανώτερα στρώματα του εδάφους, από περιοχή σε περιοχή μέτρησης, υποδηλώνει και τη διαφορετικότητα που εμφανίζει στη σύστασή του παρόλο το σχετικά μικρό εμβαδόν του εξεταζόμενου χώρου και τη μικρή απόσταση μεταξύ των αξόνων μέτρησης. Μάλιστα, οι έντονες διαφορές στη σύσταση που εμφανίζονται από περιοχή σε περιοχή, αλλά στο ίδιο στρώμα μέτρησης, επιφέρουν σημαντική αύξηση στην αβεβαιότητα της μέτρησης της ρ σε συγκεκριμένο βάθος, όπως π.χ. συμβαίνει για α=2m και α=16m. Αποτέλεσμα αυτού είναι, η μέση τιμή των μετρήσεων που λαμβάνεται για κάθε βάθος μέτρησης και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του πολυστρωματικού μοντέλου εδάφους, να αποκλίνει σημαντικά από την πιο αντιπροσωπευτική τιμή της ρ για το εκάστοτε βάθος, άρα να μεγαλώνει και η αντίστοιχη αβεβαιότητα στον υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους.

Οι διαφορές στις μετρούμενες τιμές της ρ που εμφανίζονται με την αλλαγή της θέσης του άξονα μέτρησης έχουν άμεση επίπτωση και στον υπολογισμό των παραμέτρων του εδάφους κατά τον προσδιορισμό του πολυστρωματικού μοντέλου του. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα πρότυπα (IEEE Std. 80-2013, IEEE Std. 81-2012) τα δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα εδάφους είναι το ομοιόμορφο και το διστρωματικό μοντέλο, με το δεύτερο, να αποτελεί μια καλή προσέγγιση αρκετών δομών εδάφους και

ακριβέστερη αναπαράσταση της διαστρωμάτωσης και των συνθηκών του. Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι το ομοιόμορφο μοντέλο δε θα αποτελούσε καθόλου καλή επιλογή για την αναπαράσταση της εξεταζόμενης δομής, μιας και το έδαφος στον χώρο των μετρήσεων παρουσιάζει ποικιλομορφία στη διαστρωμάτωσή του. Το διστρωματικό μοντέλο αποτελείται από δύο στρώματα, το ανώτερο και το κατώτερο, με ειδικές αντιστάσεις και ύψη ρ_1, h_1 και ρ_2, άπειρο, αντίστοιχα, οι τιμές των οποίων προκύπτουν μετά από επεξεργασία των μετρήσεων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης με κατάλληλα εργαλεία προσομοίωσης.

Για τον προσδιορισμό του διστρωματικού, τριστρωματικού ή, γενικότερα, πολυστρωματικού μοντέλου εδάφους σε θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών, φωτοβολταϊκών πάρκων, υποσταθμών ΥΤ, κ.α., συνήθως λαμβάνονται μετρήσεις της φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε παραπάνω από δύο άξονες μέτρησης σε σχήμα σταυρού ή ορθογωνίου με μία διαγώνιό του, ανάλογα αν το πλήθος είναι δύο, τέσσερις ή πέντε άξονες το οποίο καθορίζεται από το είδος της ηλεκτρικής εγκατάστασης (ανεμογεννήτρια, υποσταθμός, κ.α.). Οι τιμές των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου, δηλαδή ρ_1, ρ_2 και h_1, καθορίζουν στη συνέχεια τόσο την επιλογή της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου γείωσης για επίτευξη χαμηλής αντίστασης γείωσης, όσο και τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για τις αναπτυχθείσες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Κατά τον σχεδιασμό του συστήματος γείωσης θα πρέπει οι αναπτυχθείσες τάσεις υπό πραγματικές συνθήκες σφάλματος να διατηρηθούν κάτω των επιτρεπόμενων ορίων, για την ασφάλεια των ατόμων που κινούνται γύρω από την εγκατάσταση. Τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής σε συγκεκριμένο τύπο εδάφους, για δεδομένο χρόνο εκκαθάρισης σφάλματος και για σωματικό βάρος ανθρώπου 70kg, δίνονται από τους ακόλουθους τύπους IEEE Std. 80-2013:

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \times \rho_s)\frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \tag{3}$$

$$E_{touch70} = (1000 + 1,5C_s \times \rho_s)\frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \tag{4}$$

όπου ρ_s η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας, C_s συντελεστής εξαρτώμενος από την ειδική αντίσταση του εδάφους, την ειδική αντίσταση και το πάχος του υλικού επιφανείας και t_s ο χρόνος εκκαθάρισης του σφάλματος.

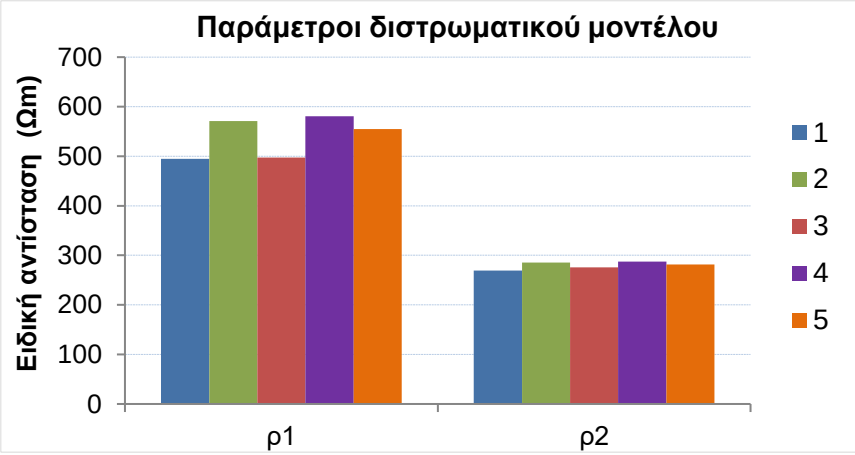
Για τη μελέτη της μεταβολής των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου εδάφους επιλέχθηκαν πέντε (5) περιπτώσεις συνδυασμών των αξόνων μέτρησης με κριτήριο την επαρκή κάλυψη όλου του εξεταζόμενου χώρου, οι οποίες είναι: 1) α-γ-ε-*i*-*iii*, 2) β-δ-*i*-*ii*-*iii*, 3) α-ε-*i*-*ii*-*iii*, 4) β-γ-δ-*i*-*iii*, 5) α-β-γ-δ-ε-*i*-*ii*-*iii*. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου και τα αντίστοιχα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια των τάσεων χρησιμοποιήθηκε το κατάλληλο πακέτο λογισμικού SES/CDEGS. Ο υπολογισμός των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων για τις τάσεις πραγματοποιήθηκε για συχνότητα 50Hz, σωματικό βάρος ανθρώπου 70kg, χωρίς προσθήκη υλικού επιφανείας και για χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος 0,2s, 0,35s και 0,5s. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατίθενται στους πίνακες 2 και 3, ενώ γραφική απεικόνισή τους δίνεται στα σχήματα 4 και 5.

Πίνακας 2: Παράμετροι διστρωματικού μοντέλου για τους 5 συνδυασμούς των αξόνων μέτρησης της ρ.

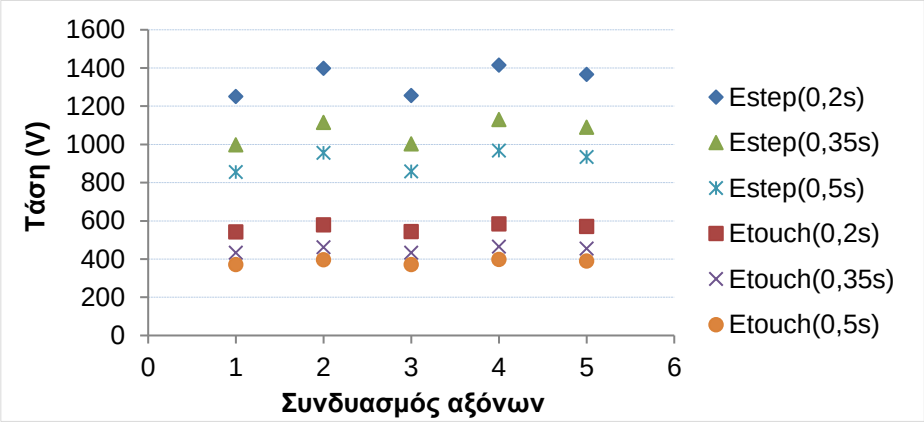
Περίπτωση	ρ_1(Ωm)	ρ_2(Ωm)	h_1(m)
1	494,65	268,95	0,21
2	571,27	285,48	0,78
3	497,38	275,48	0,22
4	580,58	287,19	0,22
5	555,02	281,71	0,21

Πίνακας 3: Μέγιστες επιτρεπόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.

	200ms		350ms		500ms	
Περίπτωση	E_{step}(V)	E_{touch}(V)	E_{step}(V)	E_{touch}(V)	E_{step}(V)	E_{touch}(V)
1	1251,3	542,2	998,8	432,8	855,6	370,7
2	1397,8	578,8	1115,7	462,0	955,8	395,8
3	1256,5	543,5	1002,9	433,8	859,2	371,6
4	1415,6	583,3	1129,9	465,5	967,9	398,8
5	1366,7	571,0	1090,9	455,8	934,5	390,5



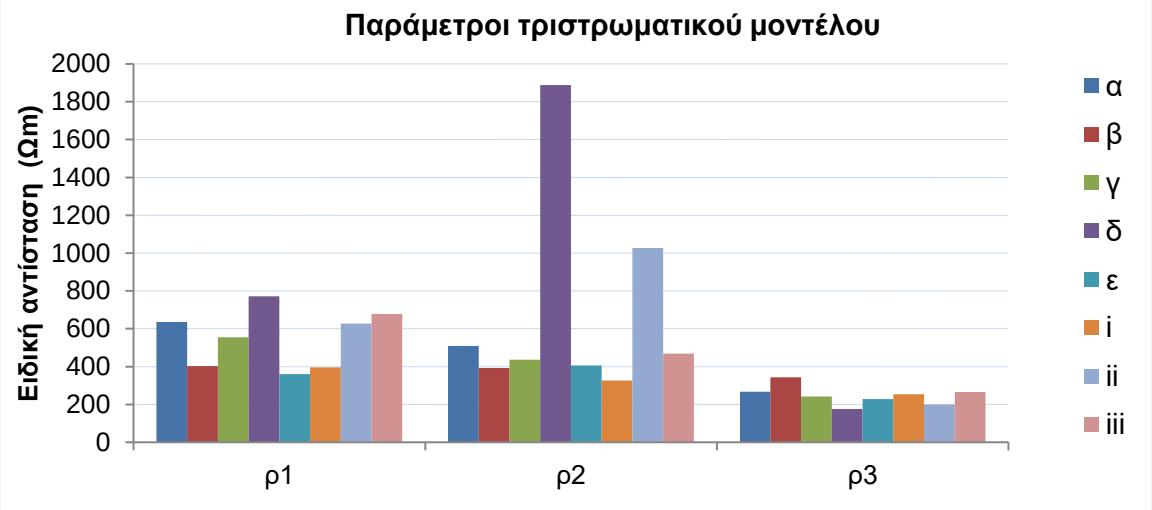
Σχήμα 4: Μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του διστρωματικού μοντέλου εδάφους σε συνάρτηση με την επιλογή των αξόνων μέτρησης (Πίνακας 2) της ρ.



Σχήμα 5: Μεταβολή των τιμών των μέγιστων επιτρεπόμενων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής σε συνάρτηση με την επιλογή των αξόνων μέτρησης της ρ.

Οι έντονες διακυμάνσεις στις μετρούμενες τιμές της ειδικής αντίστασης των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους στον εξεταζόμενο χώρο, οι οποίες επισημάνθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, επιβεβαιώνονται από τα γραφήματα του σχήματος 4. Η αλλαγή θέσης των αξόνων μέτρησης της ρ και οι διαφορετικοί συνδυασμοί μεταξύ τους έχουν ως αποτέλεσμα την διακύμανση των τιμών της ειδικής αντίστασης του ανώτερου στρώματος στο προκύπτον διστρωματικό μοντέλο. Αυτές οι μεταβολές στην τιμή, κυρίως της ρ_1, αποτυπώνονται στη συνέχεια και στις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής (Σχήμα 5), με εντονότερη τη διακύμανση στις βηματικές τάσεις και, μάλιστα, στους μικρότερους χρόνους εκκαθάρισης σφάλματος.

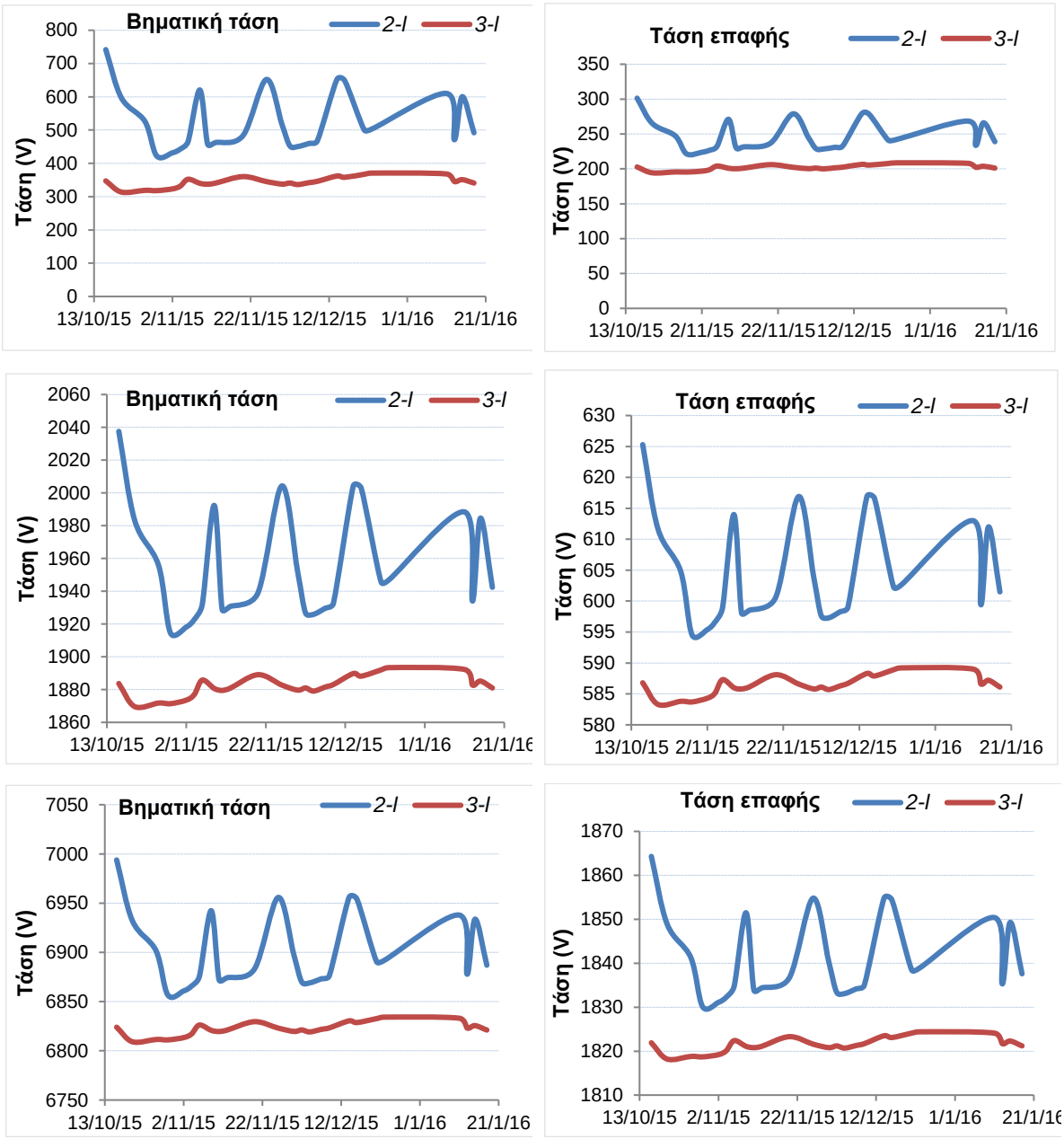
Ανάλογες μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων του εδάφους εμφανίζονται και στο τριστρωματικό μοντέλο, όπως φαίνεται από τα γραφήματα του σχήματος 6. Οι διακυμάνσεις στις μετρούμενες τιμές της ειδικής αντίστασης των ανώτερων στρωμάτων του εδάφους αποτυπώνονται στις υπολογιζόμενες τιμές της ειδικής αντίστασης του ανώτερου και μεσαίου στρώματος του τριστρωματικού μοντέλου, με άμεση συνέπεια και στον υπολογισμό διαφορετικών τιμών βηματικής τάσης και τάσης επαφής, με βάση τις μετρήσεις καθενός από τους 8 άξονες.



Σχήμα 6: Μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του τριστρωματικού μοντέλου εδάφους σε συνάρτηση με τους 8 άξονες μέτρησης (Πίνακας 1) της ρ.

Ένα άλλο σημείο μεγάλου ενδιαφέροντος στη μελέτη των μοντέλων εδάφους, που προκύπτουν από μετρήσεις της ειδικής αντίστασης ρ σε διάφορους άξονες, είναι το κριτήριο επιλογής μεταξύ μονοστρωματικού, διστρωματικού ή τριστρωματικού μοντέλου για την απλούστερη, χωρίς όμως εκπτώσεις στην ακρίβεια, αναπαράσταση του εδάφους στο οποίο θα εγκατασταθεί το υπό μελέτη σύστημα γείωσης. Το πρόβλημα της σωστής επιλογής έγκειται στην αδυναμία ορισμένων αλγορίθμων και εμπορικών πακέτων λογισμικού, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως από μηχανικούς και τεχνικές εταιρίες στις μελέτες συστημάτων γείωσης, να υπολογίσουν τριστρωματικό ή και πολυστρωματικό μοντέλο εδάφους. Αυτό έχει ως συνέπεια, το έδαφος σε ορισμένες κρίσιμες περιοχές όπως σε κορυφογραμμές ορεινών όγκων και στα οροπέδια, όπου η διαστρωμάτωση μπορεί να συντίθεται από στρώματα ασβεστολιθικών πετρωμάτων (βράχος), αργιλικών ιζημάτων και αμμώδους χώματος να μην είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί με καλή ακρίβεια από μονοστρωματικό ή διστρωματικό μοντέλο. Η άκριτη υιοθέτηση μονοστρωματικού ή διστρωματικού μοντέλου, σε τόσο σύνθετες περιπτώσεις υπεδάφους, εγκυμονεί τον κίνδυνο εσφαλμένης εκτίμησης των μέγιστων επιτρεπόμενων τάσεων και, συνεπώς, τον εσφαλμένο σχεδιασμό του συστήματος γείωσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί

ότι κάποια πακέτα λογισμικού, για μελέτη και σχεδιασμό συστημάτων γείωσης, επιλέγουν αυτόματα τον τύπο του πολυστρωματικού μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση της δομής του εδάφους, κατόπιν υπολογισμών, αλλά και σε αυτήν την περίπτωση χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και εμπειρία εκ μέρους του μηχανικού.



Σχήμα 7: Μεταβολή των μέγιστων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο για διστρωματικό και τριστρωματικό μοντέλο για τον άξονα (γ).

Στο σχήμα 7 παριστάνονται οι μεταβολές των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων βηματικής τάσης και τάσης επαφής στον άξονα (γ) του εξεταζόμενου χώρου, όπως αυτά υπολογίζονται με χρήση διστρωματικού και τριστρωματικού μοντέλου εδάφους, στο διάστημα 16/10/2015–18/1/2016. Τα όρια υπολογίστηκαν για συχνότητα ρεύματος 50Hz, βάρος ανθρώπου 70kg, χωρίς προσθήκη και με προσθήκη υλικού επιφανείας πάχους 10cm, ειδικής αντίστασης 2.500Ω·m (χαλίκι) και 10.000Ω·m (άσφαλτος), και για χρόνο εκκαθάρισης 0,5s.

Τα γραφήματα του σχήματος 7 αποδεικνύουν την εξαιρετική σημασία που έχει η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου κάθε φορά για την ακριβέστερη προσέγγιση της δομής του εδάφους. Η μέγιστη απόκλιση των τιμών της επιτρεπόμενης βηματικής τάσης που δίνουν τα δύο μοντέλα, στην περίπτωση χωρίς υλικό επιφανείας, φθάνει το 53% στα μέσα Οκτωβρίου, ενώ η μέση απόκλισή τους στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα κυμαίνεται στο 33%. Ανάλογα για την τάση επαφής, η μέγιστη απόκλιση φθάνει το 33%, ενώ η μέση απόκλιση στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα κυμαίνεται στο 18%. Η υιοθέτηση του διστρωματικού μοντέλου στη συγκεκριμένη περίπτωση εδάφους οδηγεί σε υπερεκτίμηση των μέγιστων ορίων για τις τάσεις, συνεπώς, πιθανότατα και σε ελλιπή σχεδιασμό του συστήματος γείωσης. Βεβαίως αξίζει να σημειωθεί, ότι η προσθήκη υλικού επιφανείας μειώνει σημαντικά την απόκλιση στις εκτιμήσεις των τάσεων από τα δύο μοντέλα. Χαρακτηριστικά, η μέση απόκλιση των τιμών βηματικής τάσης στην περίπτωση υλικού με ρ_c=10.000Ω·m (άσφαλτος) κυμαίνεται στο 1%.

Αξιοσημείωτη είναι και η έντονη διακύμανση που παρουσιάζουν οι τιμές των επιτρεπόμενων τάσεων από το διστρωματικό μοντέλο, σε αντίθεση με το τριστρωματικό, που παρουσιάζει πολύ καλή σταθερότητα τιμών. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό ύψος του ανώτερου στρώματος μεταξύ των δύο μοντέλων. Στο διστρωματικό μοντέλο, το ανώτερο στρώμα, έχοντας μεγαλύτερο ύψος (0,8m – 1,5m) από το αντίστοιχο του τριστρωματικού (0,3m – 0,5m), περιλαμβάνει στρώματα του εδάφους με διαφορετική περιεκτικότητα υγρασίας τη στιγμή της μέτρησης, δηλαδή διαφορετικό ποσοστό σχετικής υγρασίας μεταξύ επιφανειακού στρώματος και στρώματος κοντά στο 1,5m βάθος, άρα και διαφορετικός ρυθμός μεταβολής της υγρασίας στα διάφορα επίπεδα που αποτελούν το ανώτερο στρώμα του διστρωματικού. Αυτές οι μεγάλες διαφορές υγρασίας που εμφανίζονται στο εσωτερικό του ανώτερου στρώματος του διστρωματικού, σε συνδυασμό με την περιεκτικότητα διαφορετικών συστάσεων του εδάφους στο ανώτερο στρώμα λόγω μεγάλου ύψους σε σχέση με το αντίστοιχο τριστρωματικό, έχουν ως αποτέλεσμα αφενός τις έντονες διακυμάνσεις στις τιμές των βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής και αφετέρου την υπερεκτίμηση των τιμών τους.

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτήν αναδείχθηκε η σημασία της ορθής εφαρμογής των μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους και κυρίως της ορθής επιλογής των κατάλληλων αξόνων για τη μέτρησή της. Για τον σκοπό αυτόν, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ειδικής αντίστασης σε χώρο εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου με χρήση της μεθόδου Wenner, σε διάφορα βάθη και σε 8 διαφορετικούς άξονες καθ’ όλη την έκταση του εξεταζόμενου χώρου. Συγκρίθηκαν οι τιμές μέτρησης της ρ στα αντίστοιχα βάθη από άξονα σε άξονα και αναλύθηκαν διεξοδικά, τόσο η μεταβολή της μετρούμενης τιμής της σε συνάρτηση με την αλλαγή θέσης του άξονα μέτρησης, όσο και οι συνέπειες που έχει αυτή η μεταβολή των τιμών και η αβεβαιότητα μέτρησης στον υπολογισμό των παραμέτρων των πολυστρωματικών μοντέλων. Επίσης υπολογίστηκαν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για τις βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής και αναλύθηκε η επίδραση της μεταβολής της μέτρησης της ρ στον υπολογισμό τους. Η προσεκτικά μελετημένη επιλογή της θέσης και του πλήθους των αξόνων μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους στον χώρο εγκατάστασης του συστήματος γείωσης και η ορθή εφαρμογή της εκάστοτε μεθόδου μέτρησης παίζουν πρωτεύοντα ρόλο στη σωστή, ακριβή και αξιόπιστη προσέγγιση της πραγματικής δομής του εδάφους και κατ’ επέκταση στον ορθό, άρτιο και ασφαλή σχεδιασμό των συστημάτων γείωσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται, άλλωστε,

από τις τιμές των μέγιστων τάσεων που προκύπτουν από κάθε διαφορετικό συνδυασμό αξόνων.

Τέλος, αναλύθηκε ο βαθμός που επηρεάζει η επιλογή διστρωματικού ή τριστρωματικού μοντέλου τον υπολογισμό των μέγιστων επιτρεπόμενων τάσεων για συγκεκριμένους τύπους εδαφών, όπως αυτός στον πειραματικό χώρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μονοστρωματικό ή διστρωματικό μοντέλο δεν αποτελεί πανάκεια για όλες τις δομές εδάφους και ότι ο σχεδιασμός των συστημάτων γείωσης δεν πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά σε αυτά τα δύο μοντέλα, μιας και αυτό πιθανότατα να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των μέγιστων ορίων και να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια των ανθρώπων σε περίπτωση σφάλματος. Η επιλογή του πλήθους των στρωμάτων του μοντέλου θα πρέπει να γίνεται μετά από προσεκτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και της επιλογής που προτείνει το λογισμικό μελετών.

5. Βιβλιογραφία

Ανδροβιτσανέας Β.Π. «*Συμβολή στη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με προσθήκη βελτιωτικών υλικών*», Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.

ΕΛΟΤ ΕΝ 60060.02, «*Τεχνικές δοκιμών υψηλής τάσης-Μέρος 2: Συστήματα μέτρησης*», 2η έκδοση, Ιανουάριος 2011.

Μαθιουλάκης Μ. Ε. «Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα», Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων, Αθήνα, 2004.

Calixto W. P., Neto L. M., Wu M., Yamanaka K., Moreira E. d. P., "*Parameter estimation of a horizontal multilayer soil using genetic algorithm*", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 25, no. 3, pp. 1250–1257, July 2010.

Gonos I. F., Stathopulos I. A., "*Estimation of multilayer soil parameters using genetic algorithms*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 100–106, January 2005.

Gonos I. F., Kontargyri V. T., Stathopulos I. A., Moronis A. X., Sakarellos A. P., Kolliopoulos N. I., "*Determination of two layer earth structure parameters*", Proceedings of the XVII International Conference on Electromagnetic Disturbances (EMD 2007), Bialystok, Poland, September 19th–21st, 2007, pp. 10.1-1–10.1-6.

IEEE Std. 80-2013, "*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*", December 2013.

IEEE Std. 81-2012, "*IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a grounding system*", December 2012.

Meliopoulos A. P., Papalexopoulos A. D., "*Interpretation of soil resistivity measurements: Experience with the model SOMIP*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1, no. 4, pp. 142–151, October 1986.

Seedher H. R., Arora J. K., "*Estimation of two layer soil parameters using finite Wenner resistivity expressions*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1213–1217, July 1992.

Takahashi T., Kawase T., "*Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 604–612, April 1990.

Yang H., Yuan J., Zong W., "*Determination of three-layer earth model from Wenner four-probe test data*", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, no. 5, pp. 3684–3687, September 2001.