

ΣΥΝΟΔΟΣ "ΑΘΗΝΑ 2011"

15 & 16 Δεκεμβρίου 2011

ΧΡΗΣΗ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΙΩΣΗΣ

Β.Π. Ανδροβιτσανέας¹ Φ.Η. Ασημακοπούλου¹ Ι.Φ. Γκόνος¹ Ι.Α. Σταθόπουλος¹
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η χρονική συμπεριφορά έξι συστημάτων γείωσης. Κάθε σύστημα αποτελείτο από ένα κατακόρυφο ηλεκτρόδιο τοποθετημένο, είτε απευθείας στο φυσικό έδαφος, είτε εντός βελτιωτικών υλικών. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, σε καθημερινή βάση από το Φεβρουάριο 2011 έως και το Σεπτέμβριο 2011, της ειδικής αντίστασης του εδάφους (σε βάθη 2, 4, 8, 12 και 16m) και της αντίστασης γείωσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, τα δε ληφθέντα αποτελέσματα παρουσιάζονται συναρτήσει του χρόνου και του ύψους της βροχόπτωσης. Επίσης, παρουσιάζονται σχόλια, σκέψεις, προβληματισμοί, προτάσεις, σχετικά με: α) τη σκοπιμότητα χρήσης ή μη των βελτιωτικών εδάφους, β) τον τρόπο επιλογής του κατάλληλου βελτιωτικού, συναρτήσει, τόσο του κόστους, όσο και της επιτυγχανόμενης τιμής της αντίστασης γείωσης, γ) την επίδραση του χρόνου στη συμπεριφορά των εν λόγω βελτιωτικών και δ) μία νέα μεθοδολογία, με χρήση νευρωνικών δικτύων, για την εκτίμηση της μεταβολής της αντίστασης γείωσης, συναρτήσει του χρόνου.

USE OF GROUND ENHANCING COMPOUNDS IN GROUNDING SYSTEMS

V.P. Androvitsaneas¹ F.E. Asimakopoulou¹ I.F. Gonos¹ I.A. Stathopoulos¹
High Voltage Laboratory NTUA

ABSTRACT

This paper deals with the behavior of ground enhancing compounds, which are widely used in grounding systems, aiming to decrease the grounding resistance value. Five grounding rods were driven, each one of them, in different ground enhancing compounds, in the NTUA Zografou Campus. The measurements performed at experimental field, in daily basis, were soil resistivity (at different depths of 2, 4, 8, 12 and 16m) and grounding resistance of grounding rods. The measurement results are presented in relation to time and to rainfall. Furthermore, several thoughts, comments and proposals are presented about: a) the use feasibility of ground enhancing compounds, b) the choice of the suitable compound, in relation with the cost and the achieved grounding resistance value, c) the time influence on ground enhancing compound behavior, and d) a new method, using ANN, in evaluating the grounding resistance variation, in relation to time.

¹ Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Τηλ. 2107723582, Fax 2107723504, e-mail: v.andro@mail.ntua.gr, fasimako@mail.ntua.gr, igonos@ieee.org, stathop@power.ece.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για να είναι ένα σύστημα γείωσης αποτελεσματικό θα πρέπει η αντίσταση γείωσης που παρέχει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους [1-2]. Αυτό δεν είναι πάντοτε εφικτό, αφού κάποιες φορές ο χώρος της εγκατάστασης δεν επαρκεί ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά επίπεδα αντίστασης γείωσης, ενώ ακόμη και αν είναι διαθέσιμος ο απαραίτητος χώρος, μπορεί το κόστος, για την κατασκευή του συγκεκριμένου συστήματος, να είναι απαγορευτικά υψηλό. Ιδιαίτερο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής της αντίστασης γείωσης, πέραν του τύπου του συστήματος γείωσης, διαδραματίζει και ο τύπος του εδάφους στο οποίο θα εγκατασταθεί το σύστημα γείωσης, αφού μπορεί να παρουσιάζει, είτε πολύ μεγάλη ειδική αντίσταση, είτε να είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό. Επίσης, σημαντικά παράγοντα αποτελούν και οι μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην τοποθεσία εγκατάστασης του συστήματος γείωσης, οι οποίες μπορούν να αυξομειώνουν την ειδική αντίσταση του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους [3-4]. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές, για τη μείωση της αντίστασης γείωσης και τη διατήρηση της τιμής της σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους. Επειδή αρκετές φορές, είτε είναι πολύ ακριβή η επέκταση ενός υφιστάμενου συστήματος γείωσης, με την τοποθέτηση επιπρόσθετων ηλεκτροδίων, είτε είναι αδύνατη αυτή η τοποθέτηση, λόγω έλλειψης χώρου ή δομής του εδάφους, έχει αναπτυχθεί μια εναλλακτική τεχνική, αυτή του εμπλουτισμού του εδάφους, γύρω από τα ηλεκτρόδια γείωσης, με βελτιωτικά υλικά εδάφους.

ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Η χρήση βελτιωτικών υλικών του εδάφους πολλές φορές συνιστάται, ειδικά σε βραχώδεις θέσεις, που αποτελούν κύριο χαρακτηριστικό του ελληνικού εδάφους. Τα βελτιωτικά (της ειδικής αντίστασης του εδάφους) υλικά τοποθετούνται εντός του ορύγματος, στο οποίο πρόκειται να εγκατασταθεί το ηλεκτρόδιο γείωσης και αναμειγνύονται με το φυσικό έδαφος, μειώνοντας, τοπικά, πλησίον του ηλεκτροδίου γείωσης, την ειδική αντίσταση του εδάφους: τούτο, με τη σειρά του, συνεπάγεται μείωση της αντίστασης γείωσης.

Η σύσταση, όμως, των βελτιωτικών υλικών πρέπει να εξετάζεται ενδελεχώς [1, 5-13], διότι, η χρήση βελτιωτικών πρόσκαιρης δράσης (π.χ. αλατιού, καρβουνόσκονης ή χημικών), τα οποία στην πραγματικότητα «εξωραίζουν» τα αποτελέσματα της αρχικής μέτρησης, μπορεί, μακροπρόθεσμα, να αποβεί μοιραία, όπως περιγράφεται στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Η πιο οικονομική φυσική χημική ουσία είναι το αλάτι (NaCl). Η χρήση αλατιού, ωστόσο, διαβρώνει το ηλεκτρόδιο, μεγαλώνοντας την αντίσταση διάχυσης, δηλαδή τη δυσκολία με την οποία διαχέεται το ρεύμα σφάλματος προς τη γη. Οι περισσότερες χημικές ουσίες διαλύονται, επίσης, στο νερό και αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την πάροδο του χρόνου λόγω των βροχών, οι ουσίες αυτές να διαλύονται ή να παρασύρονται από το νερό, έχοντας ως αποτέλεσμα το έδαφος να ανακτά την αρχική υψηλή τιμή της ειδικής του αντίστασης.
- Επίσης, ακόμα και σήμερα, επικρατεί η λανθασμένη εντύπωση ότι, η σκόνη άνθρακα (καρβουνόσκονη) είναι κατάλληλη ως βελτιωτικό της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Πράγματι, με τη χρήση της, η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται, η καρβουνόσκονη, όμως, μπορεί να περιέχει οξείδια του άνθρακα, τιτάνιο, νάτριο, μαγνήσιο, άνθρακα και άλλα στοιχεία, τα οποία αναπόφευκτα αντιδρούν, τόσο με το χαλκό, όσο και με το χάλυβα, με αποτέλεσμα τη σίγουρη, αλλά και επιταχυνόμενη διάβρωση των ηλεκτροδίων.
- Η χρήση ρινισμάτων σιδήρου, λόγω της οξειδωσης που προκαλούν, επιφέρει με την πάροδο του χρόνου αρνητικά αποτελέσματα στο σύστημα γείωσης.

Ένα από τα πρώτα βελτιωτικά υλικά γείωσης που εξετάστηκαν ήταν ο μπετονίτης. Το 1967 οι Kutter and Lange [5] και ο Mc Gowan [6] μελέτησαν τις ιδιότητες του μπετονίτη ως βελτιωτικού εδάφους, συγκρίνοντας την ειδική αντίσταση που επιτυγχανόταν με τη χρήση αυτού του υλικού σε διάφορα εδάφη, κάτω από πύργους του συστήματος μεταφοράς, με την ειδική αντίσταση του φυσικού εδάφους.

Στις αρχές της δεκαετίας του 80, ο Warren R. Jones [7] πρότεινε μία μέθοδο εγκατάστασης ράβδου μπετονίτη: στο συγκεκριμένο πείραμα, δοκιμάστηκαν στο ύπαιθρο ράβδοι μπετονίτη, σε σύγκριση με κανονικές ράβδους γείωσης, σε τρεις διαφορετικής εδαφικής σύστασης τοποθεσίες (πολύ πυκνή και σκληρή λάσπη, αργιλώδες χώμα με κροκάλες και χαλίκι, μείγμα χώματος αποτελούμενο από άμμο, ένα στρώμα λάσπης κάτω από την άμμο και ψαμμόλιθο). Σε κάθε τοποθεσία εγκαταστάθηκαν τρεις ράβδοι μπετονίτη και τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι, σημειώθηκε σημαντική μείωση της αντίστασης γείωσης έως 36%, σε σύγκριση με την αντίστοιχη των ράβδων γείωσης στο φυσικό έδαφος. Το αποτέλεσμα ήταν σταθερό καθ' όλο το έτος.

Προς την ίδια κατεύθυνση, χρησιμοποιώντας όμως περισσότερα του ενός βελτιωτικά υλικά, κινήθηκαν το 1999 και οι Kostic et al [8], παρουσιάζοντας τα αποτελέσματα της βελτίωσης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των βρόχων γείωσης, χρησιμοποιώντας χαλίκια μπετονίτη, πούδρα μπετονίτη και λάσπη εκσκαφής. Τα

ηλεκτροδία γείωσης δοκιμάστηκαν σε δύο τοποθεσίες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σημειώνονταν μικρότερες διακυμάνσεις στην τιμή της αντίστασης γείωσης, στους βρόχους που ήταν καλυμμένοι με βελτιωτικά υλικά. Επιπλέον, η χρήση πούδρας μπετονίτη είχε πολύ καλύτερα αποτελέσματα από τα χαλίκια μπετονίτη.

Επειδή σε αρκετές χώρες ο μπετονίτης εισάγεται, το κόστος για τη μείωση της αντίστασης γείωσης, χρησιμοποιώντας αυτό το βελτιωτικό υλικό, αυξάνεται δραματικά. Άλλωστε, σε μία μελέτη για τον καθορισμό της πιο αποδοτικής μεθόδου για την εγκατάσταση ράβδων γείωσης με χαμηλή αντίσταση, που διεξήχθη από τους Martin et al. [9], οι περισσότερες από τις τυποποιημένες μεθόδους απορρίφθηκαν, για λόγους κόστους. Επομένως, για να μειωθεί το κόστος είναι απαραίτητο να βρεθούν, ως περίπου ισοδύναμα υποκατάστατα του μπετονίτη, τοπικώς διαθέσιμα υλικά, που είναι φθηνότερα.

Για τους λόγους αυτούς, το 2008 ο Nuwan [10], από το τμήμα Μετεωρολογίας της Σρι Λάνκα, πρότεινε ένα χαμηλού κόστους σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χωριό στην πατρίδα του: διεξήγαγε ένα πείραμα, στο οποίο χρησιμοποίησε ως βελτιωτικά υλικά εδάφους φυσικά υλικά, όπως τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας και σκόνη ρυζιού. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αντίστοιχα από τη χρήση μπετονίτη. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, αυτά τα φυσικά βελτιωτικά εδάφους ήταν εξ' ίσου καλά με τον μπετονίτη, για τη βελτίωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Οι Eduful and Cole [11], μελέτησαν το υπόλειμμα από πυρηνέλαιο φοίνικα (Palm Kernel Oil Cake- PKOC), το οποίο είναι ένα παράγωγο από τον πυρήνα του καρπού του φοίνικα, αφού υποστεί επεξεργασία και παραχθεί από αυτόν ένα είδος λαδιού, ως ένας παράγοντας μείωσης της αντίστασης γείωσης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, είχε σημειωθεί μια μέση βελτίωση της αντίστασης γείωσης γύρω στο 50%, σε διάστημα τριών ετών. Η έρευνα συνεχίστηκε για έξι συνολικά χρόνια και φάνηκε ότι το PKOC διατηρούσε την αντίσταση γείωσης σε χαμηλά επίπεδα, χωρίς να χάνεται ή να διαλύεται με τις βροχές.

Ο A. Galván [12-13], σε πειράματα που διεξήγαγε στο Μεξικό, διερεύνησε τη σκοπιμότητα χρήσης βελτιωτικών υλικών, καθώς και το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι, τελικά, το όφελος από τη χρήση τους, σε διάφορους τύπους εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα έδειξε ότι, σε ασβεστολιθικά εδάφη το όφελος από τη χρήση βελτιωτικών σε έδαφος με ρ έως 200Ωm είναι πολύ μικρό, σε έδαφος με ρ από 200Ωm έως 500Ωm παρουσιάζεται μια μέση μείωση της αντίστασης γείωσης της τάξεως του 30% και σε έδαφος με ρ από 500Ωm έως 1000Ωm μια μέση μείωση της τάξεως του 50%. Αντίστοιχα, σε βραχώδη εδάφη, με ρ έως 500Ωm το όφελος είναι μια μέση μείωση της τάξεως του 25%, με ρ από 500Ωm έως 1000Ωm μείωση της τάξεως του 40% και με ρ πάνω από 1000Ωm μείωση της τάξεως του 65%.

Οι Jasni et al [14] μελέτησαν τις ηλεκτρικές ιδιότητες φυσικών βελτιωτικών εδαφους. Τα υλικά που εξετάστηκαν ήταν μπετονίτης, τύρφη από κοκοφοίνικα καρύδας, κηπευτικό αργιλώδες χώμα και σκόνη ρυζιού. Ένα από τα πλεονεκτήματα της χρήσης βελτιωτικών γείωσης, όπως έδειξε η μελέτη, είναι ότι, οι τιμές της αντίστασης γείωσης της ράβδου με βελτιωτικό υλικό θέλουν λιγότερο χρονικό διάστημα για να σταθεροποιηθούν, συγκρινόμενες με αυτές χωρίς βελτιωτικό γείωσης. Τα υλικά καταφέρνουν να διατηρούν, με μεγάλη επιτυχία, την υγρασία του εδάφους και να μειώνουν αποτελεσματικά την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πολύ καλύτερη διάχυση του ρεύματος μέσα στο έδαφος. Ειδικότερα, το αργιλώδες κηπευτικό χώμα παρουσίασε τις χαμηλότερες τιμές από τα υπόλοιπα βελτιωτικά υλικά, σε βάθος χρόνου και εμφάνισε την καλύτερη ικανότητα διατήρησης της υγρασίας εδάφους, αναδεικνύοντάς το ως το πιο αποτελεσματικό βελτιωτικό υλικό, σε σύγκριση με τα άλλα που μελετήθηκαν. Άλλωστε, από αποτελέσματα μελέτης του Gomes et al [15], το αλάτι, όπως και μείγματα αυτού, είναι γνωστό για τις διαβρωτικές του ιδιότητες. Πέραν του προβλήματος διάβρωσης, η απώλεια του αλατιού από το γειτονικό χώρο του ηλεκτροδίου (λόγω του ότι διαλύεται στο νερό της βροχής) μπορεί, επίσης, να προκαλέσει απροσδόκητες αυξήσεις στην αντίσταση γείωσης, ειδικά κατά την περίοδο ξηρασίας. Αυτό μπορεί να γίνει επικίνδυνος παράγοντας για την ασφάλεια σε συστήματα γείωσης ισχύος, όπου τα σφάλματα ως προς γη μπορεί να εμφανισθούν κάτω από εξαιρετικά ξηρές συνθήκες. Ο τελευταίος ερευνητής στην ίδια μελέτη [15] επέλεξε τη σκόνη μεταλλικών οξειδίων (ένα απόβλητο της βιομηχανίας χάλυβα), τη σκόνη γρανίτη, τη σκόνη ασβέστη και κοκ και σκυροδέματος ως βελτιωτικά υλικά, προς σύγκριση με άλλα, εμπορικώς διαθέσιμα, βελτιωτικά γείωσης. Οι παρατηρήσεις έδειξαν ότι, τα βιομηχανικά αυτά απόβλητα φθάνουν το επίπεδο απόδοσης εμπορικώς διαθέσιμων βελτιωτικών υλικών μετά από μερικούς μήνες. Βρέθηκε, επίσης, ότι, το επίπεδο διάβρωσης από αυτήν τη σκόνη μεταλλικών οξειδίων είναι μικρότερο από 1%, μετά από δύο χρόνια επαφής. Το σκυροδέμα από ασβέστη και κοκ έδειξε, επίσης, καλή απόδοση, όσον αφορά στη διάβρωση. Ωστόσο, η μεγάλη περίοδος που απαιτείται, για τα περισσότερα από αυτά τα υλικά, για να επιτύχουν χαμηλή και σταθερή αντίσταση γείωσης είναι σημαντικό μειονέκτημά τους, αν συγκριθούν με άλλα εμπορικώς διαθέσιμα βελτιωτικά, όπως ο μπετονίτης.

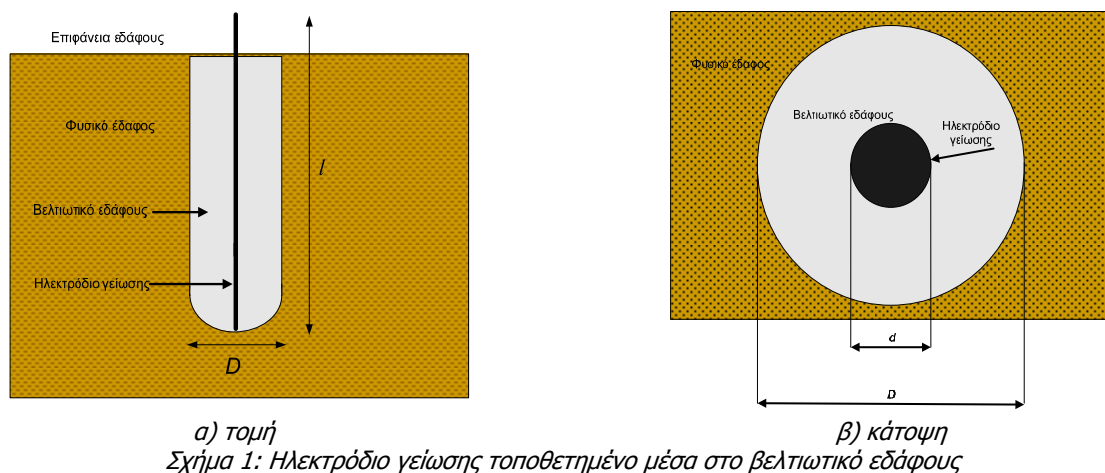
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στην παρούσα εργασία τοποθετήθηκαν πέντε κατακόρυφα ηλεκτρόδια γείωσης μέσα σε διαφορετικό βελτιωτικό υλικό το καθένα, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, σε καθημερινή βάση, της ειδικής αντίστασης του εδάφους (σε βάθη 2, 4, 8, 12 και 16m) και της αντίστασης γείωσης των κατακόρυφων ηλεκτροδίων, τα δε ληφθέντα αποτελέσματα παρουσιάζονται συναρτήσει του χρόνου και του ύψους της βροχόπτωσης. Ο υπαίθριος χώρος στον οποίον εγκαταστάθηκαν τα ηλεκτρόδια (Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου) είναι ιδανικός για συχνή λήψη μετρήσεων αφού:

- είναι ελεύθερος και δεν χρησιμοποιείται από κάποια σχολή ή υπηρεσία
- είναι φυσική απόληξη στους πρόποδες του Υμηττού και δεν έχει γίνει καμιά τεχνική παρέμβαση στο έδαφος και το περιβάλλον
- η περιοχή του λόφου, όπου τοποθετήθηκαν τα ηλεκτρόδια, είναι εντελώς επίπεδη, επιτρέποντας την εύκολη λήψη των μετρήσεων (συχνά μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους ή της αντίστασης γείωσης πρέπει να πραγματοποιηθούν σε περιοχές με απότομες πλαγιές, δυσκολία η οποία αποφεύγεται στο πείραμά μας)
- η περιοχή είναι τέτοιας έκτασης, ώστε να επιτρέπει την τοποθέτηση πολλών ηλεκτροδίων και σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, γεγονός που συμβάλλει στην εγκυρότητα και ακρίβεια των μετρήσεων.

Το έδαφος της περιοχής χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκη άμμος με χαλίκια και κροκάλες. Πιο συγκεκριμένα, κατόπιν κοκκομετρικής ανάλυσης που διεξήχθη σε σχετική μελέτη [16], το συγκεκριμένο έδαφος αποτελείται από: α) χαλίκι και κροκάλες σε ποσοστό 54,78%, β) άμμο σε ποσοστό 39,47% και γ) άργιλο σε ποσοστό 5,74%. Το σύστημα κατηγοριοποίησης του εδάφους που εφαρμόστηκε ήταν κατά *AASHTO*. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος χώματος μετρήθηκε και βρέθηκε ότι είναι υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το νερό αποστραγγίζεται πολύ γρήγορα από το έδαφος.

Στο χώρο μετρήσεων τοποθετήθηκαν έξι κύρια ηλεκτρόδια ράβδου *St/e-Cu* τύπου A, διαστάσεων $17 \times 1500 \text{ mm}$, με πάχος επιχάλκωσης $254 \mu\text{m}$, σε απόσταση 10 m το ένα από το άλλο, εκ των οποίων τα πέντε τοποθετήθηκαν μέσα σε βελτιωτικά υλικά γείωσης (Σχήμα 1) και το ένα απευθείας στο φυσικό έδαφος. Τα έξι ηλεκτρόδια γείωσης ονοματοδοτήθηκαν $G_1, G_2, \dots, G_6$, ανάλογα με το περιβάλλον τοποθέτησής τους, ως εξής: α) G_1 : Φυσικό έδαφος, β) G_2 : Σκυρόδεμα, γ) G_3 : Μπετονίτης, δ) G_4 : Χημικό υλικό A, ε) G_5 : Χημικό υλικό B, στ) G_6 : Χημικό υλικό C



α) τομή
β) κάτοψη
Σχήμα 1: Ηλεκτρόδιο γείωσης τοποθετημένο μέσα στο βελτιωτικό έδαφος

Επίσης, τοποθετήθηκαν μόνιμα στο έδαφος σε διάφορες θέσεις δεκαπέντε (15) βοηθητικά ηλεκτρόδια, του ίδιου τύπου με τα κύρια, αλλά μήκους $0,5 \text{ m}$, για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης ρ και της αντίστασης γείωσης R .

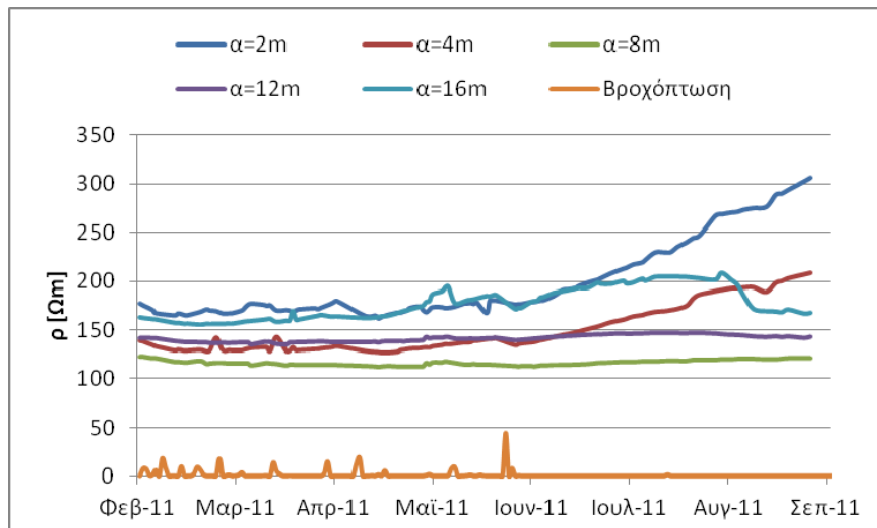
Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ο διακριβωμένος εξοπλισμός του διαπιστευμένου κατά ΕΛΟΤ EN ISO 17025, για τη διεξαγωγή μέτρησης ειδικής αντίστασης του εδάφους, Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Για τις μετρήσεις της αντίστασης γείωσης των ηλεκτροδίων και της ειδικής αντίστασης του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το γειωσόμετρο MEGGER DET2/2. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, *in situ*, καταγράφονταν με το θερμο-υγρόμετρο OMEGAETTE HH314. Οι μετρήσεις των αποστάσεων έγινε με μετροταινία ESLON.

Επειδή για τη μέτρηση της υγρασίας εδάφους δεν ήταν διαθέσιμο κάποιο όργανο μέτρησης, οι τιμές του μεγέθους αυτού, καθώς και του ύψους βροχοπτώσεως λαμβάνονται *on line* από τα όργανα καταγραφής του μετεωρολογικού σταθμού της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου, ο οποίος λειτουργεί υπό την εποπτεία του Εργαστηρίου Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων της Σχολής

Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.. Αποτελεί μέρος του παλαιότερου Meteonet, το οποίο πλέον έχει εξελιχθεί στο Υδρολογικό Παρατηρητήριο Αθήνας. Το όργανο μέτρησης της υγρασίας εδάφους (Water Content Reflectometer) είναι το CS616-L της Campbell Scientific Inc και του ύψους βροχοπτώσεως είναι το ARG-100 της Campbell Scientific Inc.

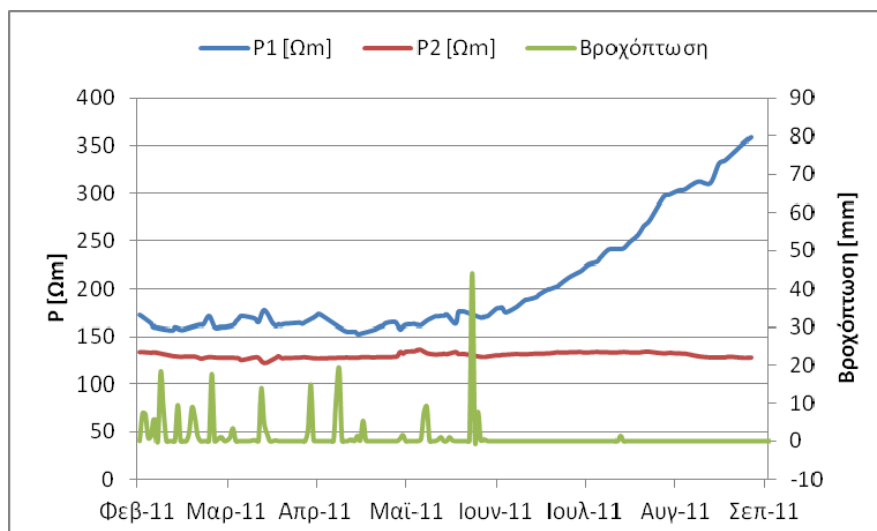
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης εφαρμόσθηκε η μέθοδος των 4 ηλεκτροδίων και συγκεκριμένα η μέθοδος Wenner [1-4]. Με την αντίστοιχη διάταξη ηλεκτροδίων, λαμβάνονται μετρήσεις της ειδικής αντίστασης για διάφορες τιμές της απόστασης a μεταξύ των ηλεκτροδίων και πιο συγκεκριμένα για $a=2, 4, 8, 12$ και $16m$. Τα αποτελέσματα, συναρτήσει του χρόνου παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει του χρόνου

Οι μετρήσεις αυτές εισάγονται σε κατάλληλο λογισμικό [3, 4, 17] και υπολογίζονται οι παράμετροι (ειδική αντίσταση άνω (ρ_1) και κάτω (ρ_2) στρώματος καθώς και το πάχος (h) του άνω στρώματος) του διστρωματικού μοντέλου του εδάφους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Μεταβολή των παραμέτρων του εδάφους (ρ_1 , ρ_2 , βροχοπτώση) συναρτήσει του χρόνου

Όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 3, η ειδική αντίσταση του άνω στρώματος μεταβάλλεται πολύ περισσότερο από την ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι, η επίδραση της βροχοπτώσης στη μεταβολή της ειδικής αντίστασης είναι άμεση. Παρατηρούμε ότι η ρ_1 διατηρεί μία χαμηλή τιμή σε περίοδο με βροχοπτώσεις και αυξάνει όταν υπάρχει ξηρασία (μία παρατεταμένη περίοδος ανομβρίας).

Πολύ λιγότερο μεταβάλλεται η τιμή της ρ_2 καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων, γεγονός που οφείλεται στη μη μεταβολή της υγρασίας του εδάφους, άρα και της ειδικής αντίστασης, σε μεγάλο βάθος.

Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης του άνω στρώματος ρ_1 είναι σημαντική γιατί είναι ο καθοριστικός παράγοντας για τον καθορισμό των μεγίστων επιτρεπτών αναπτυσσομένων τάσεων επαφής (E_{touch}) και βηματικής (E_{step}), αντίστοιχα.

Πολλές φορές, στην επιφάνεια του εδάφους τοποθετείται το λεγόμενο «υλικό επιφανείας» (υλικό με υψηλότερη ειδική αντίσταση από το άνω στρώμα του χώματος) σε στρώμα πάχους μερικών εκατοστών, με σκοπό την αύξηση της αντίστασης επαφής. Έτσι, σε περίπτωση που το έδαφος κάτω από το υλικό επιφανείας έχει μικρότερη ειδική αντίσταση από αυτό, μόνο ένα μικρό μέρος του ρεύματος σφάλματος θα κινηθεί προς τα επάνω και το ρεύμα, που θα διαρρέει το άτομο (που είναι σε επαφή), θα μειωθεί. Η μείωση αυτή εξαρτάται, τόσο από τη διαφορά της ειδικής αντίστασης του υλικού επιφανείας από εκείνη του υποκείμενου στρώματος εδάφους, όσο και από το πάχος του υλικού επιφανείας. Η επίδραση των δύο αυτών παραγόντων εκφράζεται από έναν εμπειρικό συντελεστή, C_s [1]:

$$C_s = 1 - 0.09 \cdot (1 - \rho / \rho_s) / (2 \cdot h_s + 0.09) \quad (1)$$

όπου ρ_s και h_s η ειδική αντίσταση και το πάχος του υλικού επιφανείας (σε $\Omega \cdot m$ και m, αντίστοιχα).

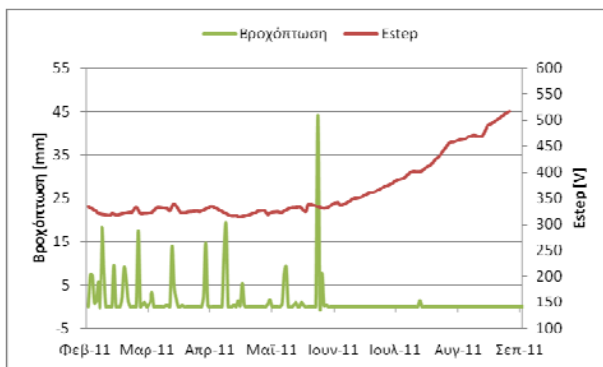
Τα μέγιστα επιτρεπτά όρια [1] της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής (σε V) δίνονται από τις εξισώσεις (2) και (3):

$$E_{step} = (1000 + 6 \cdot C_c \cdot \rho_s) \cdot C_w / \sqrt{t_s} \quad (2)$$

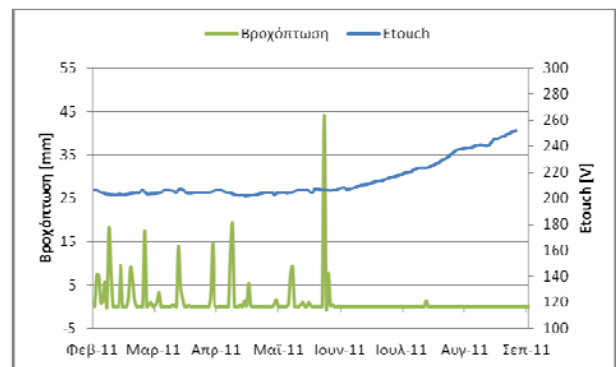
$$E_{touch} = (1000 + 1.5 \cdot C_c \cdot \rho_s) \cdot C_w / \sqrt{t_s} \quad (3)$$

όπου t_s είναι η διάρκεια που διαρρέει το ρεύμα το ανθρώπινο σώμα (σε s) και C_w σταθερά με τιμές 0.116 / 0.157 για σωματικό βάρος 50kg / 70kg αντίστοιχα. Όταν δεν χρησιμοποιείται υλικό επιφανείας, τότε $C_s = 1$ και ρ_s ίσο προς την ειδική αντίσταση του άνω στρώματος του εδάφους ρ_1 .

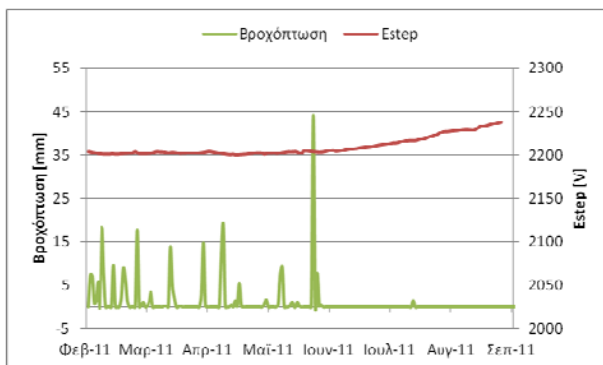
Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή με το χρόνο της μέγιστης επιτρεπόμενης βηματικής τάσης και της βροχόπτωσης, χωρίς την προσθήκη υλικού επιφανείας. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η μεταβολή με το χρόνο της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης επαφής και της βροχόπτωσης, χωρίς την προσθήκη υλικού επιφανείας. Παρατηρούμε και στα δύο σχήματα ότι, το επιτρεπόμενο όριο τάσης παρουσιάζει μία έντονη μεταβολή, κάτι που υπογραμίζει την ιδιαίτερη επικινδυνότητα ενός συστήματος χωρίς υλικό επιφανείας. Μία ορισμένη τιμή αναπτυσσόμενης τάσης μπορεί να είναι ασφαλής το καλοκαίρι (περίοδος ανομβρίας), αλλά να γίνεται επικίνδυνη αν αναπτυχθεί το χειμώνα (περίοδος βροχοπτώσεων).



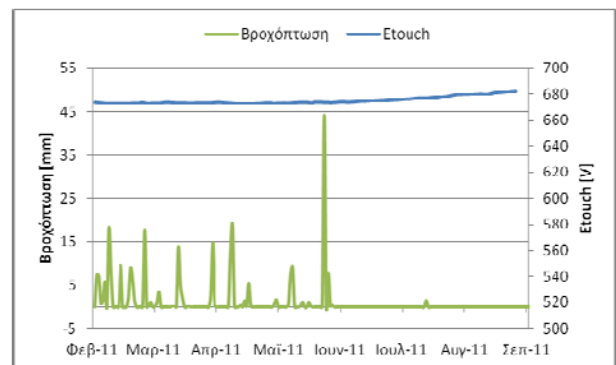
Σχήμα 4: Μεταβολή της βροχόπτωσης και της E_{step} με το χρόνο χωρίς υλικό επιφανείας



Σχήμα 5: Μεταβολή της βροχόπτωσης και της E_{touch} με το χρόνο χωρίς υλικό επιφανείας



Σχήμα 6: Μεταβολή της βροχόπτωσης και της E_{step} με το χρόνο με υλικό επιφανείας ($\rho_s = 2000\Omega m$, $h_s = 20cm$)

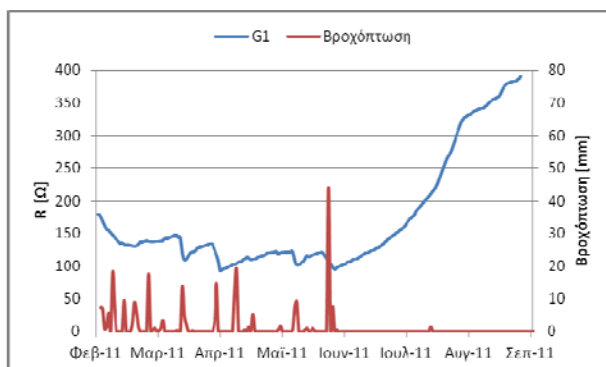


Σχήμα 7: Μεταβολή της βροχόπτωσης και της E_{touch} με το χρόνο με υλικό επιφανείας ($\rho_s = 2000\Omega m$, $h_s = 20cm$)

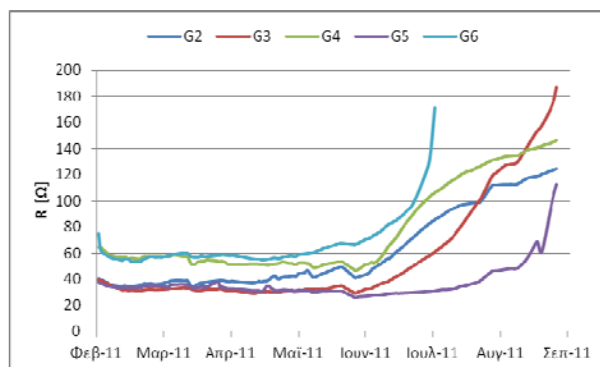
Η προσθήκη υλικού επιφανείας ($\rho_s=2500\Omega m$, $h_s=20cm$, για άνθρωπο βάρους 50kgr) αυξάνει τα επιτρεπόμενα όρια τάσεων (Σχήματα 6, 7) και μειώνει τη διακύμανσή τους (με την παραδοχή ότι, η ειδική αντίσταση του υλικού επιφανείας δεν επηρεάζεται από τη βροχόπτωση). Γενικά, δηλαδή, επιδιώκουμε όχι μόνο υψηλά όρια βηματικής τάσης και τάσης επαφής, αλλά και μία σταθερότητα των ορίων αυτών κατά τη διάρκεια του έτους, στόχους που επιτυγχάνουμε με τη χρήση υλικού επιφανείας.

Βέβαια, για να είναι μία εγκατάσταση ασφαλής, δεν αρκεί μόνο μία επίστρωση με υλικό επιφανείας, αφού έτσι αυξάνου τα όρια των μέγιστων επιτρεπόμενων τάσεων, δεν είμαστε όμως σίγουροι για το αν θα καταφέρουμε να τηρήσουμε τα όρια αυτά. Για να το επιτύχουμε αυτό, πρέπει να έχουμε και ένα σύστημα γείωσης, η χαμηλή αντίσταση του οποίου θα διασφαλίζει ότι, τόσο η τάση επαφής, όσο και η βηματική τάση θα έχουν τιμές χαμηλότερες από τα όρια αυτά. Μία μέθοδος για επίτευξη χαμηλής αντίστασης γείωσης είναι η χρήση βελτιωτικών υλικών εδάφους.

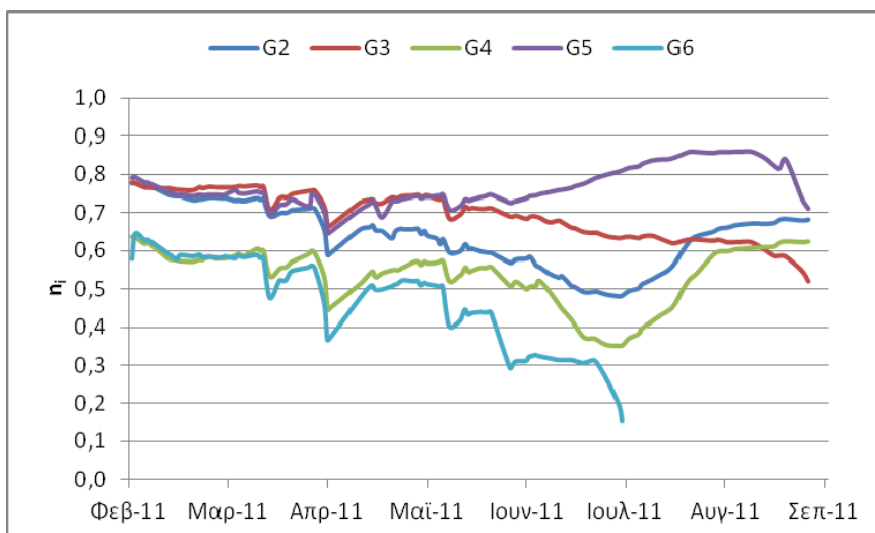
Για το λόγο αυτό, μετρήθηκε, παράλληλα με την ειδική αντίσταση του εδάφους, και η αντίσταση γείωσης ηλεκτροδίων που περιβάλλονταν από βελτιωτικά υλικά γειώσεων. Για τη μέτρηση της αντίστασης γείωσης των κυρίων ηλεκτροδίων εφαρμόστηκε η μεθοδολογία πτώσης δυναμικού [1-4]. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα σε αποστάσεις 20m και 40m από το εκάστοτε προς μέτρηση ηλεκτρόδιο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 8 και 9. Στο Σχήμα 8 δίνεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης με το χρόνο για το ηλεκτρόδιο αναφοράς G_1 (το ηλεκτρόδιο που έχει τοποθετηθεί απευθείας στο φυσικό έδαφος) ενώ στο Σχήμα 9 είναι τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια, τα οποία περιβάλλονται από βελτιωτικό υλικό.



Σχήμα 8: Μεταβολή της αντίστασης γείωσης του συστήματος G_1 και της βροχόπτωσης



Σχήμα 9: Μεταβολή της αντίστασης των συστημάτων γείωσης G_2-G_6



Σχήμα 10: Μεταβολή της απόδοσης των βελτιωτικών υλικών με την πάροδο του χρόνου

Στα Σχήματα 8 και 9 παρατηρούμε ότι η αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο, για κάθε σύστημα γείωσης. Επομένως, είναι απαραίτητος ο ορισμός της απόδοσης ενός βελτιωτικού υλικού. Αυτό μπορεί να γίνει με τη σύγκριση της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου όταν τοποθετείται απευθείας στο φυσικό έδαφος με την αντίσταση γείωσης όταν τοποθετείται σε βελτιωτικό

υλικό. Συνεπώς, ορίζουμε ως απόδοση n_i την ικανότητα των βελτιωτικών υλικών να μειώνουν την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου.

$$n_i = \left(1 - \frac{R_i}{R_1}\right) \quad (4)$$

Ουσιαστικά, δηλαδή, έχουμε το ποσοστό μείωσης της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου στο φυσικό έδαφος που επιτυγχάνει το κάθε βελτιωτικό υλικό εν συγκρίσει με το ηλεκτρόδιο αναφοράς.

Είναι κατανοητό ότι, η απόδοση του κάθε βελτιωτικού θα μεταβάλλεται με το χρόνο. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η απόδοση των βελτιωτικών υλικών. Εξετάστηκε, έτσι, η απόδοση των βελτιωτικών αυτών υλικών, σε σχέση με το χρόνο και το ύψος βροχόπτωσης. Μελετήθηκε η μεταβολή της απόδοσης ευρέως χρησιμοποιούμενων βελτιωτικών υλικών γειώσεων, όπως ο μπετονίτης (G_3) και το σκυρόδεμα (G_2), καθώς και άλλων εμπορικών διαθέσιμων, όπως των χημικών υλικών (G_4), (G_5) και (G_6).

Από τα Σχήματα 9-10 παρατηρούμε ότι, όλα τα βελτιωτικά υλικά ξεκινούν έχοντας μία απόδοση ιδιαίτερα υψηλή, η οποία, όμως, με την πάροδο του χρόνου αρχίζει να μειώνεται. Για το λόγο αυτό υπερέχουν τα βελτιωτικά που έχουν εξ αρχής μία καλή απόδοση, όπως ο μπετονίτης (G_3), το σκυρόδεμα (G_2) και κυρίως το βελτιωτικό υλικό (G_5). Η μείωση αυτή στην απόδοση σχετίζεται, πιθανώς, με την απορρόφηση των υλικών από το περιβάλλον έδαφος, που, άλλοτε είναι περισσότερο (G_6) και άλλοτε λιγότερο (G_3) έντονη.

Οι συχνές βροχοπτώσεις είναι ικανές να διατηρήσουν την αρχική απόδοση σε υψηλά, σχετικά, επίπεδα (ποτέ όμως στα αρχικά), ενώ ξαφνικές έντονες βροχοπτώσεις μειώνουν την απόδοση, επαναφέροντάς τη μετά από μικρό χρονικό διάστημα στα προ της βροχόπτωσης επίπεδα, με αποτέλεσμα τη διατήρηση της αντίστασης γείωσης σε σχετικά σταθερές τιμές. Βέβαια για να επιστρέψει η απόδοση στα υψηλά, πριν τη βροχόπτωση, επίπεδα θα πρέπει να βρισκόμαστε σε περίοδο βροχών, οι οποίες δεν είναι απαραίτητο να είναι έντονες, αρκεί να έχουν διάρκεια αρκετών ημερών.

Αντίθετα, μία μεγάλη περίοδος με έλλειψη βροχών, επιφέρει σε κάποια από τα εξετασθέντα υλικά μία ιδιαίτερα έντονη πτώση στην απόδοση. Η περίοδος αυτή μπορεί να μη σχετίζεται με παντελή έλλειψη βροχοπτώσεων, αφού, όπως βλέπουμε, στο διάστημα 12/6-16/6 παρουσιάζονται βροχοπτώσεις και μάλιστα ιδιαίτερα έντονες (η ημερήσια βροχόπτωση στις 12/6 είναι η μεγαλύτερη στο διάστημα διεξαγωγής των μετρήσεων). Ωστόσο, αν οι βροχοπτώσεις αυτές δεν ακολουθηθούν από βροχοπτώσεις στο προσεχές διάστημα η πτώση της απόδοσης συνεχίζεται. Κάποια από τα βελτιωτικά έχουν την ικανότητα να «ηρσοαρμόζονται» στις συνθήκες αυτές, αυξάνοντας την απόδοσή τους είτε αμέσως (G_5), είτε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα (σκυρόδεμα). Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω, το βελτιωτικό (G_5) είναι το πιο αποδοτικό ακολουθούμενο από το μπετονίτη (G_3) και το σκυρόδεμα (G_2).

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να καταλάβουμε ότι, η απόδοση των υλικών δεν έχει να κάνει, μόνο, με την ικανότητά τους να μειώνουν την αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου που περιβάλλουν, αλλά και με την ικανότητά τους να μην απορροφούνται από το περιβάλλον έδαφος. Είναι η ιδιότητα αυτή ακριβώς του σκυροδέματος (G_2) που το αναδεικνύει σε ένα ιδιαίτερα αποδοτικό υλικό, κάτι το οποίο φαίνεται, μόνο όταν αρχίσει να γίνεται αισθητή η απορρόφηση των υπολοίπων βελτιωτικών.

Βέβαια, παράλληλα με την απόδοση των βελτιωτικών υλικών, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέτασή τους από πλευράς κόστους. Στον Πίνακα 1 παρατίθεται το κόστος, τόσο για την αγορά των βελτιωτικών όσο και για την εγκατάσταση των ηλεκτροδίων γείωσης μέσα σε αυτά καθώς και ο μέσος βαθμός απόδοσης για όλο το διάστημα των μετρήσεων.

	Σύστημα γείωσης G_1	Σύστημα γείωσης G_2	Σύστημα γείωσης G_3	Σύστημα γείωσης G_4	Σύστημα γείωσης G_5	Σύστημα γείωσης G_6
Κόστος ηλεκτροδίου[€]	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48	13,48
Κόστος εργασίας[€]	20	120	115	115	100	100
Κόστος βελτιωτικού[€]	0	19,12	42,75	14,54	224,0	325,20
Σύνολο [€]	33,48	152,60	171,23	143,02	337,48	438,68
Μέση απόδοση (n_i)	-	0,639	0,703	0,536	0,762	0,471

Πίνακας 1: Ανάλυση κόστους εγκατάστασης των συστημάτων γείωσης.

Από τον Πίνακα 1 βλέπουμε ότι, το βελτιωτικό G_4 έχει το μικρότερο κόστος, ωστόσο το βελτιωτικό αυτό δεν έχει καθόλου καλή απόδοση, άρα δεν συνιστάται η χρήση του σε συστήματα γείωσης. Μάλιστα, το

βελτιωτικό αυτό είχε τη χειρότερη απόδοση μαζί με το βελτιωτικό G_6 , το οποίο αν και έχει το μεγαλύτερο κόστος, σε σχέση με όλα τα βελτιωτικά που εξετάσαμε, παρουσιάζει τόσο μεγάλη απορρόφηση από το περιβάλλον έδαφος που γίνεται πρακτικά άχρηστο, αφού έχει ως αποτέλεσμα να εκθέτει στον αέρα το ηλεκτρόδιο που αρχικά περιέβαλλε και να αυξάνει θεαματικά την αντίσταση γείωσής του. Βέβαια, για να διορθωθεί αυτή η απορρόφηση θα έπρεπε να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον βελτιωτικό, κάθε φορά που αυτή συνέβαινε. Δεδομένου του υψηλού, όμως, κόστους του βελτιωτικού, συμπεραίνουμε ότι, πλήρωση με επιπλέον βελτιωτικό θα ήταν απαγορευτική. Συνεπώς, το βελτιωτικό υλικό G_6 έχει ένα κόστος το οποίο είναι δυσανάλογο με την απόδοσή του. Επιπλέον, γίνεται κατανοητό ότι, η διαδικασία διαρκούς αναπλήρωσης του βελτιωτικού υλικού σε συστήματα θεμελειακών γειώσεων κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων είναι πρακτικά αδύνατη, οπότε η χρήση τέτοιου τύπου βελτιωτικού θα ήταν ανεπιτυχής.

Ο μπετονίτης (G_3), αν και δεν έχει ιδιαίτερα υψηλό κόστος, παρουσιάζει μία διαρκή μείωση της απόδοσής του, που πιθανώς οφείλεται στην απορρόφησή του από το έδαφος. Βέβαια και αυτός προτιμάται από τη χρήση των βελτιωτικών υλικών G_4 και G_6 , αφού και φθηνότερος από αυτά είναι και καλύτερη απόδοση παρουσιάζει, τουλάχιστον για το μεγαλύτερο μέρος διεξαγωγής της εργασίας.

Το βελτιωτικό που παρουσιάζει ιδιαίτερα καλή απόδοση, αλλά και πολύ χαμηλό κόστος, είναι το σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα, όπως είδαμε, δεν απορροφάται από το περιβάλλον έδαφος, με αποτέλεσμα να διατηρεί σε όλη τη διάρκεια της χρήσης του την απόδοσή του σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα.

Βέβαια, το σκυρόδεμα, το οποίο παρουσιάζει μία ιδιαίτερα καλή απόδοση, δεν φθάνει, σε καμία περίπτωση, την απόδοση του βελτιωτικού G_5 . Το βελτιωτικό αυτό έχει μία εξαιρετική απόδοση, έχει όμως και μεγάλο κόστος. Η διαφορά αυτή φαίνεται μικρή σε σχέση με τον μπετονίτη στην παρούσα εργασία: είχαμε μόνο ένα ηλεκτρόδιο γείωσης σε κάθε περίπτωση, με αποτέλεσμα η διαφορά να ανέρχεται μόνο στα 166,25€, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις θα πρέπει να εγκατασταθούν περισσότερα από ένα ηλεκτρόδια ή ενδεχομένως να εγκαταστήσουμε και μία διαφορετική διάταξη ηλεκτροδίων, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική τιμή για την αντίσταση γείωσης. Άλλωστε, και στην παρούσα εργασία, χάρη στο βελτιωτικό υλικό G_5 επιτυγχάνεται, στην αρχή τουλάχιστον της εργασίας, τιμή αντίστασης γείωσης περίπου 30Ω, η οποία, όμως, σε καμία περίπτωση δεν φθάνει τιμές κάτω από 10Ω, που είναι ιδανικές για ένα σύστημα γείωσης. Επομένως, για ένα μεγαλύτερο σε έκταση σύστημα γείωσης θα απαιτείτο μεγαλύτερη ποσότητα βελτιωτικού υλικού, με αποτέλεσμα ανάλογη αύξηση και του κόστους (το κόστος του βελτιωτικού υλικού G_5 είναι 121% μεγαλύτερο από αυτό του σκυροδέματος (G_2)).

Συνεπώς, αν το σύστημα γείωσης, που θέλουμε να εγκαταστήσουμε, αποτελείται από ένα, μόνο, ηλεκτρόδιο, τότε ενδείκνυται η χρήση του βελτιωτικού υλικού G_5 , αφού το κόστος δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Ωστόσο, σε άλλα συστήματα γείωσης, όπου η ποσότητα του απαιτούμενου βελτιωτικού υλικού γίνεται μεγαλύτερη, το κόστος ανεβαίνει σημαντικά και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί υλικό με χαμηλότερο κόστος, αλλά εξ ίσου υψηλή απόδοση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ενδείκνυται η χρήση του σκυροδέματος (G_2), το οποίο έχει μικρό κόστος και ιδιαίτερα καλή απόδοση, σε συνδυασμό με ένα υλικό επιφανείας μεγάλης ειδικής αντίστασης, που θα καλύψει κάποιο μέρος της εγκατάστασης. Μπορεί να έχουμε, έτσι, κάποιες αυξημένες τιμές για την αναπτυσσόμενη βηματική τάση και τάση επαφής, σε περίπτωση σφάλματος, ωστόσο αυτές οι τιμές θα είναι ανεκτές λόγω των ιδιαίτερα αυξημένων επιτρεπόμενων ορίων ασφαλείας, χάρη στο υλικό επιφανείας.

ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Όπως καθίσταται προφανές από την παραπάνω περιγραφείσα πειραματική διαδικασία, η μέτρηση, τόσο της ειδικής αντίστασης του εδάφους, όσο και της αντίστασης γείωσης συγκεκριμένου συστήματος γείωσης, είναι μία χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία. Η πρόβλεψη της μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους και, κατά συνέπεια, της αντίστασης γείωσης, λόγω μεταβολής των καιρικών συνθηκών μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη και σχεδίαση των συστημάτων γείωσης. Μετρήσεις ειδικής αντίστασης προηγούμενων ετών, ληφθείσες σε όμοιο τύπο εδάφους και σύστημα γείωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της ειδικής αντίστασης σε μία νέα τοποθεσία. Μάλιστα, αν λάβει κανείς υπ' όψιν του ότι οι μετρήσεις ειδικής αντίστασης εδάφους που προηγούνται της σχεδίασης του συστήματος γείωσης είναι απαραίτητο να γίνονται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (όταν η ειδική αντίσταση λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές της, ώστε η σχεδίαση του συστήματος γείωσης να γίνεται για τη δυσμενέστερη τιμή ειδικής αντίστασης) υπό αντίξοες συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες, έντονη ηλιοφάνεια, σκληρότητα του εδάφους), γίνεται αντιληπτό ότι, η δυνατότητα εκτίμησης της ειδικής αντίστασης, κατά τη διάρκεια του έτους, αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών. Στη διεθνή βιβλιογραφία δεν έχει γίνει καταγραφή κάποιας μεθόδου για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός συστήματος γείωσης, κατά τη διάρκεια του έτους, βάσει μετρήσεων προηγούμενων ετών. Αυτό έγκειται, εν μέρει, στο γεγονός ότι οι

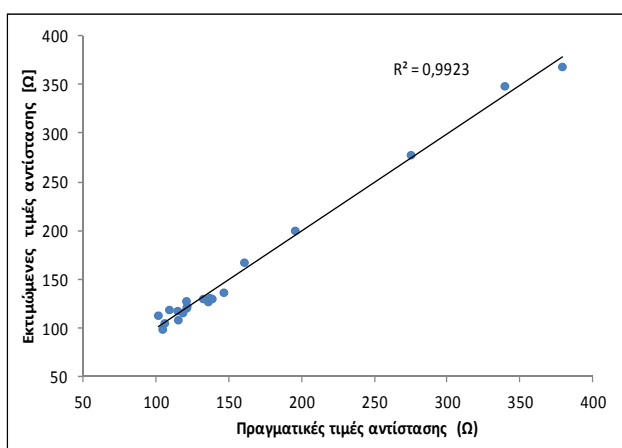
περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται συνεχώς και η επίδρασή τους είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί.

Στο σημείο αυτό, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) έρχονται να αντιμετωπίσουν τις συγκεκριμένες προκλήσεις, μέσω της ικανότητάς τους να αναγνωρίζουν τις σχέσεις μεταξύ ποσοτήτων, οι οποίες είναι δύσκολο να μοντελοποιηθούν. Μέχρι σήμερα ερευνητές όπως οι Salam et al. [17] και ο Ekeonomou [19] έχουν χρησιμοποιήσει επιτυχώς τα ΤΝΔ για να συσχετίσουν και το μήκος του ηλεκτροδίου με την τιμή της αντίστασης γείωσης. Οι Amaral et al. [20] εφήρμοσαν τα ΤΝΔ προκειμένου να συσχετίσουν την ειδική αντίσταση, την αντίσταση γείωσης, τη συχνότητα του εγχεομένου ρεύματος και της μέγιστης τιμής του ρεύματος με την τιμή της αντίστασης γείωσης. Οι Ezzat et al. [21] ανέπτυξαν ένα ΤΝΔ εκπαιδευμένο με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης σφάλματος, για να εκτιμήσουν την αντίσταση πλεγμάτων γείωσης και τη μεταβολή της συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων, όπως ο τύπος (τετράγωνο ή ορθογώνιο), το μέγεθος του πλέγματος, η πυκνότητα του πλέγματος και το μήκος των αγωγών. Οι Gouda et al. [22] ανέπτυξαν ΤΝΔ για τη σχεδίαση συστημάτων γείωσης αποτελούμενων από κατακόρυφους γειωτές. Για το σκοπό αυτόν, ανέπτυξαν ΤΝΔ με εισόδους τις επιθυμητές τιμές της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης και έξοδο τον απαιτούμενο αριθμό γειωτών και το μήκος αυτών σε m. Επιπλέον, εφήρμοσαν συνδυασμό δύο ΤΝΔ, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τις διαστάσεις του πλέγματος γείωσης. Το πρώτο ΤΝΔ έχει ως μεταβλητές εισόδου την ειδική αντίσταση του εδάφους και την τιμή του ρεύματος σφάλματος. Οι έξοδοι του ΤΝΔ, που αποτελούν την είσοδο του δεύτερου ΤΝΔ, είναι η επιτρεπόμενη τάση επαφής και το συνολικό μήκος των αγωγών. Το δεύτερο ΤΝΔ δίνει ως έξοδο τις βέλτιστες διαστάσεις του πλέγματος γείωσης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με τα ΤΝΔ είναι όμοια με τα αντίστοιχα δεδομένα συστήματος γείωσης ενός υποσταθμού, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα ΤΝΔ αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τη σχεδίαση συστημάτων γείωσης και την εκτίμηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, μειώνοντας παράλληλα τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται από το μηχανικό.

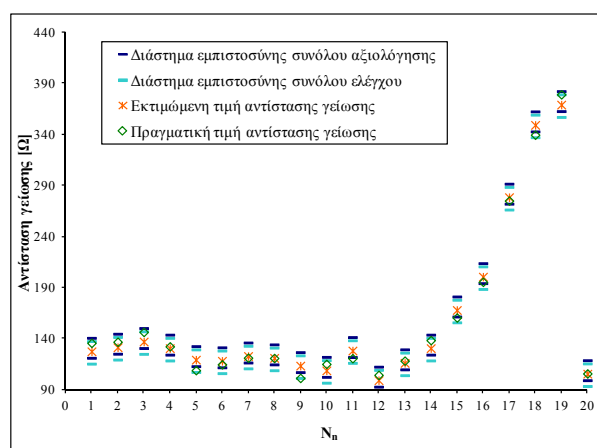
Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ΤΝΔ εκπαιδεύτηκε και αξιολογήθηκε, βάσει πειραματικών δεδομένων ειδικής αντίστασης και του ύψους βροχόπτωσης, με στόχο την πρόβλεψη της αντίστασης γείωσης για τα δεδομένα του συστήματος γείωσης G_1 .

Στο πρόβλημα που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία τα πρότυπα εισόδου/εξόδου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν συνολικά 99. Από τα δεδομένα αυτά, τα σύνολα εκπαίδευσης και αξιολόγησης διαμορφώθηκαν με τυχαίο τρόπο. Το σύνολο ελέγχου περιλαμβάνει 20 διανύσματα, ενώ το σύνολο εκπαίδευσης 79. Συνιστώσες του διανύσματος εισόδου του ΤΝΔ είναι η βροχόπτωση της προηγούμενης ημέρας, η βροχόπτωση της προηγούμενης εβδομάδας, ο μέσος όρος της ειδικής αντίστασης σε βάθος 2m και 4m της προηγούμενης εβδομάδας και ο μέσος όρος της αντίστασης γείωσης της προηγούμενης εβδομάδας. Έξοδος του ΤΝΔ είναι η τιμή της αντίστασης γείωσης την ημέρα, για την οποία θέλουμε να γίνει η πρόβλεψη.

Για την εκπαίδευση του ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ανάστροφης διάδοσης σφάλματος με σταθερό ρυθμό μάθησης και η παρουσίαση των προτύπων εκπαίδευσης έγινε ανά πρότυπο [23-24]. Στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενες και οι πραγματικές τιμές αντίστασης γείωσης μαζί με τη συσχέτισή τους για το σύνολο ελέγχου του ΤΝΔ.



Σχήμα 11: Συσχέτιση πραγματικών – εκτιμώμενων τιμών αντίστασης γείωσης του συνόλου ελέγχου



Σχήμα 12: Πραγματικές και εκτιμώμενες τιμές αντίστασης γείωσης του συνόλου ελέγχου μαζί με τα διαστήματα εμπιστοσύνης

Οι υψηλοί συντελεστές συσχέτισης R^2 που επιτυγχάνονται, τόσο για το σύνολο αξιολόγησης (99,6%), όσο και για το σύνολο ελέγχου (99,23%) αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των ΤΝΔ στην εκτίμηση της αντίστασης γείωσης.

Προσδιορίστηκαν, επίσης, τα διαστήματα εμπιστοσύνης των συνόλων αξιολόγησης και ελέγχου, με πιθανότητα ουράς ίση με 5%, ώστε το αντίστοιχο διάστημα εμπιστοσύνης να καλύπτει το 90% του πληθυσμού. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες τιμές, καθώς, επίσης, και τα άνω και κάτω όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης του συνόλου ελέγχου. Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται και τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης του συνόλου αξιολόγησης. Όπως παρατηρούμε, οι εκτιμώμενες τιμές είναι πολύ κοντά στις πραγματικές. Επίσης, οι πραγματικές και οι εκτιμώμενες τιμές του συνόλου ελέγχου βρίσκονται εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης και η περιοχή του συνόλου ελέγχου, σχεδόν συμπίπτει απόλυτα με την περιοχή του συνόλου αξιολόγησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η απόδοση των διαφόρων βελτιωτικών εδάφους δεν παραμένει διαχρονικά σταθερή, αλλά μεταβάλλεται σημαντικά και, μάλιστα, παρουσιάζει αξιοσημείωτη εξάρτηση από το ύψος βροχόπτωσης και τις τιμές της υγρασίας εδάφους. Η μεταβολή αυτή προκαλεί μεγάλες μεταβολές στην τιμή της αντίστασης γείωσης, αλλά και στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής, καθώς και στα επιτρεπόμενα όρια της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής. Όταν δεν υπάρχει υλικό επιφανείας, οι μεταβολές στις τάσεις είναι πολύ πιο έντονες σε σχέση με την περίπτωση ύπαρξης υλικού επιφανείας. Τα ακριβή βελτιωτικά, οδηγούν συχνά σε χειρότερα αποτελέσματα, απ' ότι, θα είχαμε με τη χρήση περισσότερων ράβδων ή απλού σκυροδέματος.

Θα μπορούσε να πει κανείς ότι το σκυρόδεμα και ο μπετονίτης, τα οποία είναι τα φθηνότερα και ευρύτερα χρησιμοποιούμενα υλικά, εξακολουθούν και αποτελούν μία σίγουρη, αξιόπιστη και φθηνή λύση στο πρόβλημα των υψηλών τιμών της αντίστασης γείωσης, που εμφανίζεται σε εδάφη με αντιστοίχως υψηλές τιμές ειδικής αντίστασης. Ωστόσο, θα μπορούν να διατυπωθούν πιο έγκυρα και αξιόπιστα συμπεράσματα μετά την πάροδο ικανού χρονικού διαστήματος, ενδεχομένως βάθους μερικών ετών, που θα καλύπτει όλες τις εποχές του έτους και όλες τις μετεωρολογικές μεταβολές.

Σε ό,τι αφορά στη χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, για την πρόβλεψη της τιμής της αντίστασης γείωσης σε μελλοντικές χρονικές στιγμές, φαίνεται ότι τα ΤΝΔ μπορούν να αποτελέσουν ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο. Απαραίτητη προϋπόθεση, βέβαια, είναι η κατάλληλη εκπαίδευση του ΤΝΔ, ώστε να δίνει αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Αντικείμενο μελλοντικής έρευνας μπορεί να αποτελέσει η χρησιμοποίηση δεδομένων αντίστασης γείωσης από διαφορετικά συστήματα γείωσης, με κατάλληλη εισαγωγή αυτής της παραμέτρου στο δiάνυσμα εισόδου του ΤΝΔ, καθώς και η μελέτη και σύγκριση της αποτελεσματικότητας διαφόρων μεθόδων εκπαίδευσης των ΤΝΔ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν ιδιαίτερα τους κ.κ. Ιωάννη Καρακίτσιο, Ιωάννη Ζτούπη και Αριστείδη Γιάννακα για τη συνδρομή τους στην πραγματοποίηση των μετρήσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ANSI/IEEE Std 80-2000, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", 2000.
- [2] IEEE Std 81-1983, "IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a ground system", 11 March 1983.
- [3] Gonos I.F., Moronis A.X., Stathopoulos I.A.: "Variation of Soil Resistivity and Ground Resistance during the Year", Proceedings of the 28th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2006), Kanazawa, Japan, September 18-22, 2006, pp. 740-744.
- [4] Γκόνος Ι.Φ., Κονταργύρη Β.Θ., Σταθόπουλος Ι.Α., Κονταξής Π.Α., Μορώνης Α.Ξ.: "Μεταβολή της πολυστρωματικής δομής του εδάφους κατά τη διάρκεια του έτους", Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκεμβρίου 2005, Ενότητα Δ: Ηλεκτρικές Μονώσεις και Γειώσεις: Δ6, σελ. 209-216.
- [5] Kutter H. and Lange W., "Grounding improvement by using bentonite", *Elektrie*, 21, (11), pp.421-424, 1967.
- [6] Mc Gowan K. L., "Use of conductive backfills in reducing transmission tower surge impedance and footing resistance", IEEE PES Summer Meeting, Paper A 75, pp. 484-486, San Francisco, California, USA, 1975.

- [7] Jones Warren R., "*Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils*", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, (4), pp. 1343–1346, 1980.
- [8] Kostic M. B., Radakovic Z.R., Radovanovic N. S., and Tomasevic-Canovic M. R., "*Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud*", IEE Proc.-Generation Transmission Distribution, vol. 146, (1), 1999.
- [9] Martin D. Conroy and Paul G. Richard, "*Deep earth grounding vs shallow earth grounding*", The Power Quality Conference, 1993
- [10] Kumarasinghe Nuwan, "*A low cost lightning protection system and its effectiveness*", 20th International Lightning detection Conference, Tucson, Arizona, USA, 2008.
- [11] Eduful George and Cole Joseph Ekow, "*Palm kernel oil cake as an alternative to earth resistance resistance-reducing agent*", F.M. Tetteh, Soil Research Institute, Ghana, 2009.
- [12] Galván Arturo D., Gaona Enrique E, Pretelin Gilberto G., "*Practical evaluation of ground enhancing compounds used in grounding rods*", X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009.
- [13] Galván Arturo D., Soto Diana M., Malo G José M., "*Evaluation under controlled conditions of ground enhancing compounds used in grounding rods*", X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9th–13th, 2009.
- [14] Jasni J., Siow L. K., Ab Kadir M. Z. A. and Wan Ahmad W. F., "*Natural materials as grounding filler for lightning protection system*", 30th International Conference on Lightning Protection-ICLP, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010.
- [15] Chandima Gomes, Chamath Lalitha and Chamalee Priyadarshane, "*Improvement of earthing systems with backfill materials*", 30th International Conference on Lightning Protection-ICLP, Cagliari, Italy, September 13th–17th, 2010.
- [16] Fragogiannis Georgios, Papatheodorou Nikolaos and Prof. Stamatakis Sofia, "*Evaluation of Thermal Performance of Ground - Source Energy Systems. A Geophysics Supported Approach*", World Renewable Energy Congress (WRECX), 2008.
- [17] 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.
- [18] Salam M. A., Al-Alawi S.M, Maquashi A. A., "*An artificial neural networks approach to model and predict the relationship between the grounding resistance and the length of the buried electrode in soil*", Journal of Electrostatics, 64, pp. 338-342, 2006.
- [19] Ekonomou L., "*High Voltage transmission lines studies with the use of artificial intelligence*", Electric Power Systems Research, 79, pp. 1655-1660, 2009.
- [20] Amaral F. C. L., de Souza A.N., Zago M.G., "*A novel approach to model grounding systems considering the influence of high frequencies*", CLAGTEE 2003, Sao Pedro, Brazil.
- [21] Ezzat A., Eisawy R., Fahmy A., "*Analysis of power grounding system using Artificial Neural Network*", National Center for Nuclear Safety, Cairo, Egypt 2009.
- [22] Gouda O.E., Amer M.G., El Saied M.T., "*Optimum design of grounding systems in uniform and non-uniform soils using ANN*", International Journal of Soft Computing, Vol. 1, No. 3, pp. 175-180, 2006.
- [23] Asimakopoulou F.E., Kourni E.A, Kontargyri V.T., Tsekouras G.J., Stathopoulos I.A., "*Neural Network Methodology for the Estimation of Ground Resistance*", SYSTEMS Special Session: Computational Intelligence and Simulation Tools for Modern Power Systems, 15th WSEAS International Conference on Systems, Corfu, Greece, July 14 -17 2011, pp. 453-458.
- [24] Asimakopoulou F.E., Tsekouras G.J., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "*Artificial Neural Network approach on the seasonal variation of soil resistance*", 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, China, Nov. 1-4, 2011, pp. 794-799.