ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

Ζ.Γ. Δάτσιος, Π.Ν. Μικρόπουλος και Ι. Καρακούσης
Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
e-mail: zdatsios@auth.gr

Περίληψη

Η γνώση της εξάρτησης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους από τη συχνότητα διέγερσης είναι απαραίτητη σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και αναλύονται διαδεδομένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης χαμηλών συχνοτήτων των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους. Κατόπιν παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές διατάξεις δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης που σχεδιάστηκαν με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης διάφορων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του εδάφους στις ηλεκτρικές ιδιότητές του. Έμφαση δίνεται στη διακρίβωση των διατάξεων καθώς και στην πειραματική διαδικασία για τη διασφάλιση της αντιπροσωπευτικότητας και επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Προτείνεται μία προσεγγιστική μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης συχνότητας κάτω από την οποία εισάγονται σφάλματα στις μετρήσεις λόγω της πόλωσης των ηλεκτροδίων. Τα αμμώδη εδάφη που διερευνήθηκαν αποτελούνται από διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις τυποποιημένης φυσικής πυριτικής άμμου με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υγρασία. Οι τιμές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους γενικά αυξάνονται με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων λόγω ενίσχυσης της χωρικής πόλωσης και αύξησης της DC ειδικής αγωγιμότητας του εδάφους.

Λέξεις-Κλειδιά: διηλεκτρική σταθερά, έδαφος, ενεργός ειδική αγωγιμότητα, εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης, ηλεκτρικές ιδιότητες

Abstract

Knowledge on the electrical properties of soil is important for many practical applications. In this work several low-frequency laboratory measurement methods of soil electrical properties are analyzed and discussed. The two-electrode experimental arrangements (with guard electrodes) that were designed for the investigation of the effects of soil characteristics and conditions on soil electrical properties are presented in detail. Emphasis is given to the calibration of the experimental setup and to the measurement procedure used in order to obtain representative samples of the tested soils and to achieve repeatability of experimental results. A methodology is proposed to approximately estimate the critical frequency below which measurements are significantly affected by electrode polarization effects. Several natural silica sands of uniform gradations were tested under variable water content. Soil electrical properties generally increase with decreasing grain size due to enhanced interfacial polarization effects and higher DC electrical conductivity of soil.

Keywords: effective conductivity, electrical properties, laboratory measurement methods, permittivity, soil

---

1. Εισαγωγή

Το έδαφος αποτελείται από διακριτούς στερεούς (μη αγώγιμους και μη μαγνητικούς) κόκκους ανάμεσα στους οποίους υπάρχουν κενά, οι πόροι, που πληρούνται από αέρα ή/και υδατικά ηλεκτρολυτικά (αγώγιμα) διαλύματα. Συνεπώς, το έδαφος ανήκει στην κατηγορία των μη ιδανικών διηλεκτρικών υλικών χωρίς μαγνητικές ιδιότητες (ιοντική αγωγή) και η συμπεριφορά του υπό τη διέγερση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί πλήρως μέσω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του: ειδική αγωγιμότητα υπό διέγερση μηδενικής συχνότητας (DC), σ, και μιγαδική διηλεκτρική σταθερά, ε^*.

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_0 \varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_0[\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)] \quad (1)$$

Στη σχέση (1) ω (rad/s) είναι η γωνιακή συχνότητα, ε_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m), ε' και ε'' το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της ε^* και $\varepsilon_r{}^*$ η μιγαδική σχετική διηλεκτρική σταθερά (δείκτης r: κανονικοποίηση ως προς ε_0). Το φανταστικό μέρος της ε^* υποδηλώνει απώλειες πόλωσης, οι οποίες κατά τις μετρήσεις σε ένα μη ιδανικό διηλεκτρικό, όπως το έδαφος, μετριούνται μαζί με τις απώλειες αγωγιμότητας διότι η σ είναι συμφασική με το ε''. Έτσι ορίζεται το ενεργό φανταστικό μέρος, $\varepsilon_{r,eff}''$, της $\varepsilon_r{}^*$, το οποίο περιλαμβάνει και τα δύο είδη απωλειών:

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_{r,eff}''(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j(\varepsilon_r''(\omega) + \sigma/\varepsilon_0\omega) \quad (2)$$

$$\varepsilon_{r,eff}''(\omega) = \varepsilon_r''(\omega) + \sigma/\varepsilon_0\omega. \quad (3)$$

Από τη σχέση (3) φαίνεται ότι η επίδραση της σ στο $\varepsilon_{r,eff}''$ είναι σημαντική στις χαμηλές συχνότητες. Επίσης, μπορεί να οριστεί η ενεργός ειδική αγωγιμότητα του υλικού, σ_{eff}, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα μέσω των απωλειών πόλωσης:

$$\sigma_{eff}(\omega) = \sigma + \omega\varepsilon_0\varepsilon_r''(\omega) = \omega\varepsilon_0\varepsilon_{r,eff}''(\omega). \quad (4)$$

Η γνώση της εξάρτησης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους από τη συχνότητα διέγερσης είναι απαραίτητη σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών. Επομένως, συχνά απαιτείται η μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους, η οποία πραγματοποιείται συνηθέστερα σε αντιπροσωπευτικά δείγματα στο εργαστήριο. Στην παρούσα εργασία, έχοντας ως στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης διάφορων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του εδάφους στις ηλεκτρικές ιδιότητές του, παρουσιάζεται αρχικά η επισκόπηση, ανάλυση και σύγκριση μεθόδων μέτρησης χαμηλών συχνοτήτων (κάτω των ~10 MHz). Κατόπιν παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές διατάξεις που σχεδιάστηκαν, η διακρίβωσή τους καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Τα αμμώδη εδάφη που διερευνήθηκαν αποτελούνταν από διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις τυποποιημένης φυσικής πυριτικής άμμου (Δάτσιος 2017, Datsios et al. 2017). Έτσι κατέστη δυνατή η μελέτη της επίδρασης τόσο της συχνότητας διέγερσης όσο και διάφορων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών του εδάφους στις ηλεκτρικές ιδιότητές του.

2. Εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης

Οι εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης, f, πραγματοποιούνται σε αντιπροσωπευτικά δείγματα εδάφους και μπορούν να διαχωριστούν σε μεθόδους στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Οι πρώτες αναφέρονται στη χρήση μιας κρούσης για τη διέγερση του εδάφους ενώ οι δεύτερες στη χρήση ημιτονοειδούς κυματομορφής συγκεκριμένης συχνότητας· τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών είναι ισοδύναμα. Επιπρόσθετα, διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το εύρος συχνοτήτων που διερευνάται πειραματικά: μέθοδοι υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων. Οι πρώτες (f>δεκάδες MHz) βασίζονται στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ενώ οι τελευταίες σε κυκλωματική ανάλυση. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι χαμηλών συχνοτήτων είναι η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων (Σχήμα 1α) και η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 1β). Και οι δύο βασίζονται στη

μέτρηση της μιγαδικής σύνθετης αντίστασης, Z^*, (ή αγωγιμότητας, Y^*) ενός δείγματος εδάφους το οποίο τοποθετείται σε ένα μονωτικό δοχείο. Κατόπιν, η μιγαδική σχετική διηλεκτρική σταθερά, ε_r^*, και η ενεργός ειδική αγωγιμότητα, σ_{eff}, μπορούν να προσδιοριστούν μέσω απλής κυκλωματικής ανάλυσης.

Τα ηλεκτρόδια της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων είναι δύο μεταλλικές πλάκες τοποθετημένες σε δύο απέναντι πλευρές του δείγματος εδάφους (Σχήμα 1α), δημιουργώντας έτσι έναν πυκνωτή παραλλήλων πλακών. Οι πλάκες αυτές χρησιμοποιούνται τόσο για την έγχυση του ρεύματος όσο και για τη μέτρηση της τάσης. Αντίθετα, στη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 1β) τα ηλεκτρόδια μέτρησης τάσης είναι διαφορετικά και η τάση που αναπτύσσεται σε ένα τμήμα του δείγματος μετριέται μέσω δύο μεταλλικών ακίδων ή ηλεκτροδίων με μορφή πλέγματος (κάθετα στη διεύθυνση ροής του ρεύματος). Από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος μπορεί να προσδιοριστεί η Z^*, η οποία εξαρτάται από το έδαφος και τις διαστάσεις του δείγματος. Για τον υπολογισμό της ε_r^* και της σ_{eff} από τη Z^* το δείγμα εδάφους αναπαριστάται από μία χωρητικότητα, C, εν παραλλήλω με μία αγωγιμότητα, G. Συνεπώς, για τη Y^* ισχύει:

$$Y^*(\omega) = G(\omega) + jB(\omega) = 1/R(\omega) + j\omega C(\omega) \quad (5)$$

όπου B η επιδεκτικότητα και R η αντίσταση του δείγματος. Σε έναν πυκνωτή παραλλήλων πλακών με απώλειες ισχύει η εξής σχέση:

$$Y^*(\omega) = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r^*(\omega)A/\alpha = j\omega\varepsilon_0 A\left(\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_{r,eff}''(\omega)\right)/\alpha = j\omega C_0\left(\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_{r,eff}''(\omega)\right) \quad (6)$$

όπου A (m^2) είναι η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του δείγματος στη διεύθυνση ροής του ρεύματος και α (m) το πάχος του, δηλαδή η απόσταση των πλακών για τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων και η απόσταση μεταξύ των εσωτερικών ακμών (πλευρών) των ακίδων (πλεγμάτων) για τη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων. C_0 (F) είναι η χωρητικότητα του δοχείου όταν το διηλεκτρικό είναι αέρας (ή κενό):

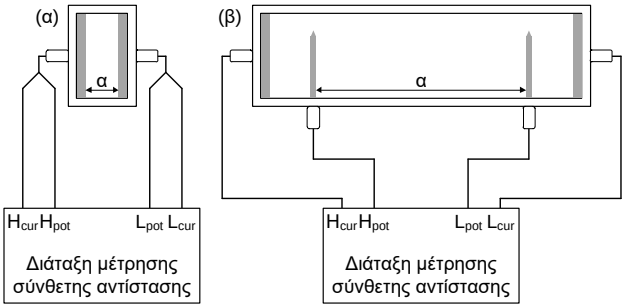
$$C_0 = \varepsilon_0 A/\alpha. \quad (7)$$

Από τις σχέσεις (5) και (6) προκύπτει ότι το πραγματικό, ε_r', και το ενεργό φανταστικό μέρος, $\varepsilon_{r,eff}''$, της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους είναι αντίστοιχα:

$$\varepsilon_r'(\omega) = Im\left(Y^*(\omega)\right)/\omega C_0 = C(\omega)/C_0 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{r,eff}''(\omega) = Re\left(Y^*(\omega)\right)/\omega C_0 = 1/\omega C_0 R(\omega). \quad (9)$$

Το δοχείο στο οποίο τοποθετείται το δείγμα μπορεί να έχει τετραγωνική, ορθογωνική ή κυκλική διατομή και είναι κατασκευασμένο από άκαμπτο μονωτικό υλικό επαρκούς μηχανικής αντοχής. Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι είτε άκαμπτα (ανοξείδωτος χάλυβας, χαλκός ή ορείχαλκος) ή από λεπτό φύλλο μετάλλου. Συχνά χρησιμοποιούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια (χρυσός ή λευκόχρυσος) για τη μείωση ηλεκτροχημικών φαινομένων ή φαινομένων πόλωσης. Στην επιλογή των διαστάσεων λαμβάνεται υπ' όψιν το επιθυμητό



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση των διατάξεων μέτρησης των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους συναρτήσει της συχνότητας διέγερσης: Μέθοδος (α) δύο και (β) τεσσάρων ηλεκτροδίων.

εύρος συχνοτήτων, οι προδιαγραφές της διάταξης μέτρησης σύνθετης αντίστασης και οι ιδιότητες του υπό δοκιμή εδάφους. Η μέγιστη f των μετρήσεων θέτει το άνω όριο των διαστάσεων, καθώς σε όλο το εύρος πρέπει να υπάρχει σχεδόν-στασιμότητα (quasi-stationarity), δηλαδή ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο δείγμα εδάφους. Για να ισχύει αυτό, οι διαστάσεις πρέπει να είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος της διέγερσης, λ. Συγκεκριμένα, ένας πυκνωτής παραλλήλων πλακών είναι σχεδόν-στατικός όταν για την ακτίνα του, r_{qs}, ισχύει (Parkhomenko 1967, Grigas 1996):

$$r_{qs} \leq 0.24\lambda/2\pi\sqrt{\varepsilon_r'\mu_r'} \tag{10}$$

όπου μ_r' το πραγματικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας του εδάφους. Το αντίστοιχο άνω όριο για το πάχος του δείγματος, α_{qs}, δίνεται από τη σχέση (Grigas 1996):

$$a_{qs} \leq \lambda/2\sqrt{\varepsilon_r'\mu_r'}. \tag{11}$$

Επιπλέον, όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του δείγματος και όσο μικρότερο το πάχος του τόσο αυξάνεται η χωρητικότητά του με συνέπεια η μέτρηση να καθίσταται πιο ακριβής. Οι μετρήσεις πρέπει να είναι επίσης αντιπροσωπευτικές του υπό δοκιμή εδάφους και έτσι οι διαστάσεις του δείγματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 3-5 φορές μεγαλύτερες από το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου του εδάφους (Parkhomenko 1967). Συνεπώς, για την επιλογή των διαστάσεων πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν όλοι οι παραπάνω περιορισμοί σε συνδυασμό με την ευκολία προετοιμασίας και επίτευξης ομοιογένειας του δείγματος.

Στη Z^* που μετριέται με τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων (Σχήμα 1α) εκτός από τη σύνθετη αντίσταση του δείγματος εμπεριέχεται η αντίσταση επαφής ηλεκτροδίων–δείγματος και η σύνθετη αντίσταση που οφείλεται στην πόλωση της διεπαφής αυτής, καθώς οι φορείς στο έδαφος είναι ιόντα ενώ στα ηλεκτρόδια ηλεκτρόνια. Η επίδραση της πόλωσης των ηλεκτροδίων γίνεται εντονότερη όσο πιο αγώγιμο είναι το έδαφος και όσο μικρότερη η συχνότητα. Η κρίσιμη συχνότητα, f_{cr}, ορίζεται ως η f κάτω από την οποία η μετρηθείσα τιμή του ε_r', επηρεαζόμενη από την πόλωση των ηλεκτροδίων, λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες από την πραγματική (συνήθως ~1<f_{cr}<200 kHz). Στη μέθοδο αυτή επιπρόσθετο σφάλμα εισάγεται από την ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα των ηλεκτροδίων (φαινόμενα άκρων), η οποία εισάγει μία επιπλέον χωρητικότητα, C_e, παράλληλα σε αυτή του δείγματος. Η επίδραση της C_e εξαρτάται από το ε_r' του εδάφους (μείωση με την αύξηση του ε_r') και τις διαστάσεις του δείγματος (μείωση με την αύξηση της επιφάνειας και τη μείωση του πάχους) και μπορεί να ληφθεί υπ' όψιν με απλούς υπολογισμούς σύμφωνα με το ASTM D150-11. Η επίδραση της C_e μπορεί να εξαλειφθεί μέσω ηλεκτροδίου θωράκισης κατάλληλων διαστάσεων (ASTM D150-11), το οποίο επιπρόσθετα οδηγεί το ρεύμα που ρέει στην επιφάνεια του δείγματος στη γη του οργάνου μέτρησης. Η σημαντικότητα των σφαλμάτων της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων (αντίσταση επαφής, πόλωση ηλεκτροδίων, επιφανειακό ρεύμα και φαινόμενα άκρων) εξαρτάται έντονα από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του υπό δοκιμή εδάφους.

Η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 1β) δεν επηρεάζεται από την αντίσταση επαφής και την πόλωση των ηλεκτροδίων διότι η τάση μετριέται μέσω ξεχωριστών ηλεκτροδίων. Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο εφόσον η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και τάσης είναι μεγαλύτερη από 1 cm (Parkhomenko 1967) και το κύκλωμα μέτρησης τάσης έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου έτσι ώστε να μην υπάρχει σημαντική ροή ρεύματος μεταξύ του δείγματος και των ηλεκτροδίων τάσης. Στην ίδια μέθοδο, σφάλματα λόγω επιφανειακών ρευμάτων εξαλείφονται χρησιμοποιώντας μεταλλικούς δακτυλίους θωράκισης οι οποίοι εγκαθίστανται είτε ανάμεσα (Parkhomenko 1967) είτε πριν (Olhoeft 1980) τα ηλεκτρόδια τάσης και διατηρούνται στο ίδιο δυναμικό με αυτά. Επιπλέον, η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε εδάφη μικρής ειδικής

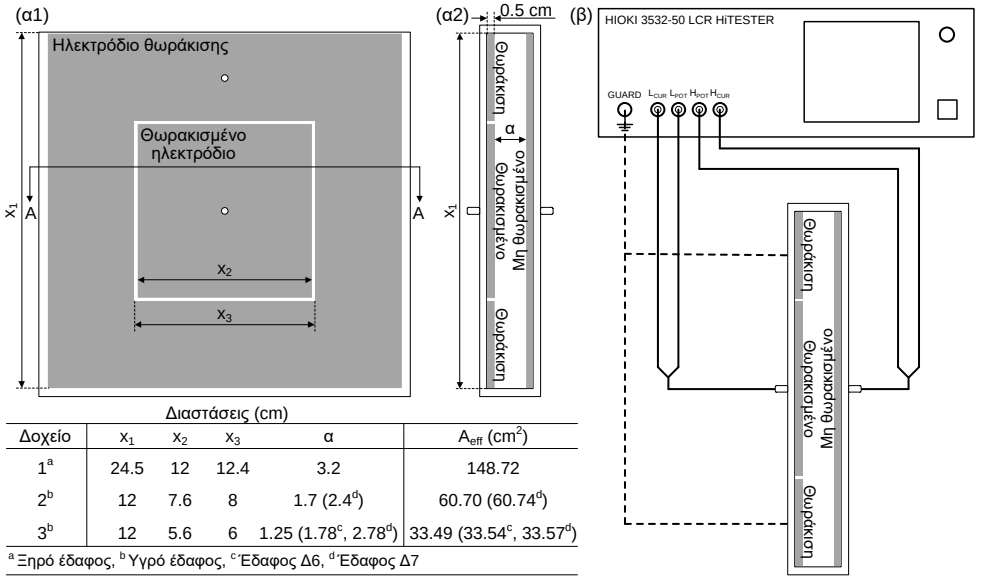
αγωγιμότητας λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζεται η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης και ηλεκτρόδια μεγάλης επιφάνειας σε σχέση με τη μεταξύ τους απόσταση.

3. Πειραματικές διατάξεις

Για την διερεύνηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων αμμωδών εδαφών (βλ. Παράρτημα) υπό μεταβαλλόμενη συχνότητα αρχικά κατασκευάστηκε διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων βάσει της παραπάνω ανάλυσης. Ωστόσο, δεν κατέστη εφικτή η διακρίβωσή της με αραιά υδατικά διαλύματα NaCl για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων τάσης. Το ίδιο συνέβη και με μία αντίστοιχη διάταξη σχεδιασμένη για μετρήσεις της DC ειδικής αντίστασης του εδάφους (Δάτσιος 2017, Datsios et al. 2017). Η αδυναμία μέτρησης με τις διατάξεις αυτές μπορεί να αποδοθεί στην έλλειψη επαρκούς διακριτικής ικανότητας και ακρίβειας του οργάνου μέτρησης σύνθετης αντίστασης, Z^*, Hioki LCR HiTESTER 3532-50 διότι στη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων ακόμα και ένα μικρό σφάλμα στη φάση της Z^* καθίσταται πολύ σημαντικό (Snowden et al. 1985, Santamarina et al. 2001).

Επομένως στην πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης. Κατασκευάστηκαν τρία δοχεία από Plexiglas (Σχήμα 2α) με δυνατότητα μεταβολής του πάχους του δείγματος (μέγιστο: ~3 cm, μείωση με φύλλα Plexiglas πίσω από τα ηλεκτρόδια). Τα δοχεία διαθέτουν τρία αποσπώμενα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα: ηλεκτρόδιο θωράκισης και ηλεκτρόδια μέτρησης (θωρακισμένο και μη θωρακισμένο ηλεκτρόδιο)· οι διαστάσεις επιλέχθηκαν βάσει των κριτηρίων της προηγούμενης ενότητας. Η ομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου στη θωρακισμένη περιοχή διερευνήθηκε μέσω του λογισμικού προσομοίωσης ηλεκτροστατικού πεδίου COMSOL Multiphysics. Η ενεργός επιφάνεια, A_{eff}, των θωρακισμένων ηλεκτροδίων (πίνακας Σχήματος 2α) υπολογίστηκε βάσει του ASTM D150-11 λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ακριβείς διαστάσεις των ηλεκτροδίων και το πάχος του δείγματος, α.

Η Z^* μετρήθηκε μέσω του οργάνου Hioki 3532-50 (Σχήμα 2β), το οποίο συνδέθηκε με τα ηλεκτρόδια μέτρησης με ομοαξονικά καλώδια (χαρακτηριστική αντίσταση: 75 Ω, μήκος: 1 m). Το όργανο αυτό μπορεί να πραγματοποιήσει σάρωση συχνοτήτων από 42 Hz έως 5 MHz, ωστόσο σύμφωνα με τις προδιαγραφές του οι τιμές της Z^* εμπεριέχουν μεγάλο σφάλμα για f>1 MHz γεγονός που επιβεβαιώθηκε κατά τη διακρίβωση της διάταξης



Διαστάσεις (cm)

Δοχείο	x_1	x_2	x_3	α	A_{eff} (cm^2)
1[a]	24.5	12	12.4	3.2	148.72
2[b]	12	7.6	8	1.7 (2.4[d])	60.70 (60.74[d])
3[b]	12	5.6	6	1.25 (1.78[c], 2.78[d])	33.49 (33.54[c], 33.57[d])

[a] Ξηρό έδαφος, [b] Υγρό έδαφος, [c] Έδαφος Δ6, [d] Έδαφος Δ7

Σχήμα 2: (α) Δοχεία δύο ηλεκτροδίων για τη μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των εδαφών του Παραρτήματος: (α1) πλάγια όψη και (α2) τομή ΑΑ. Οι χωρητικότητες των τριών δοχείων είναι αντίστοιχα: 12.7, 5.1 και 2.8 pF·cm. (β) Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης.

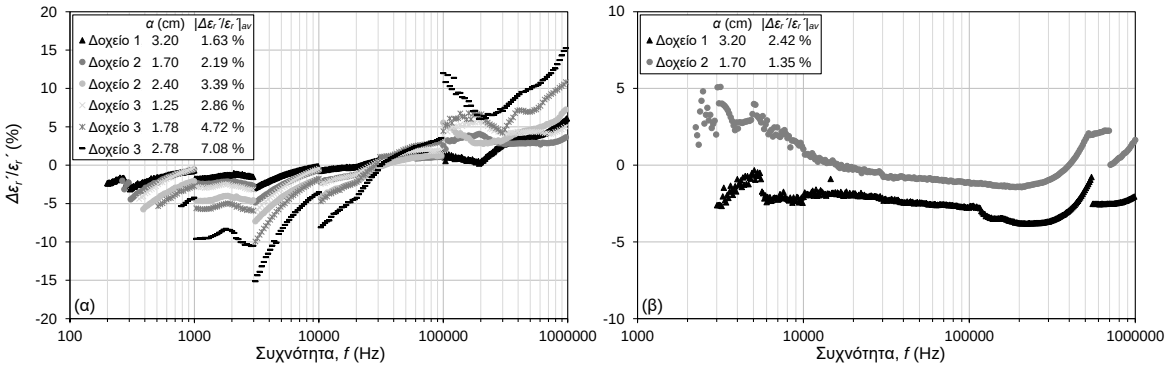
μέτρησης καθώς και από μετρήσεις σε αντιστάτες και πυκνωτές. Επομένως, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συχνότητες 42 Hz–1 MHz (τάση εξόδου: 1 V). Η μετρηθείσα Z^* του δείγματος εδάφους (πολική μορφή) μετατράπηκε σε Y^* (ορθογώνια μορφή) και κατόπιν από τις σχέσεις (7)-(9) υπολογίστηκαν το πραγματικό, ε_r', και το ενεργό φανταστικό, $\varepsilon_{r,eff}''$, μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους. Στη συνέχεια, από τη σχέση (4) υπολογίστηκε η ενεργός ειδική αγωγιμότητα, σ_{eff}.

3.1 Διακρίβωση

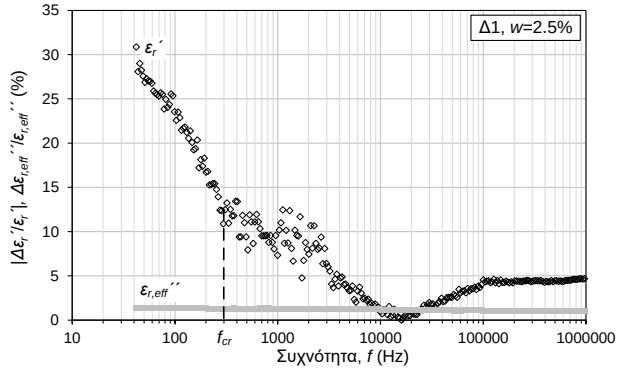
Οι ακριβείς τιμές της απόστασης των ηλεκτροδίων, α, (πίνακας Σχήματος 2α) προέκυψαν μέσω διακρίβωσης των διατάξεων με αέρα ως διηλεκτρικό. Το Σχήμα 3α απεικονίζει το σχετικό σφάλμα του ε_r', $\Delta\varepsilon_r'/\varepsilon_r'$, συναρτήσει της f. Η μέση τιμή του σχετικού σφάλματος (κατ' απόλυτη τιμή), $|\Delta\varepsilon_r'/\varepsilon_r'|_{av}$, αυξάνεται με τη μείωση της C_0 των δοχείων. Τα σχετικά σφάλματα είναι ικανοποιητικά ιδίως αν ληφθεί υπ' όψιν ότι για το ξηρό έδαφος οι μετρήσεις έγιναν με το Δοχείο 1 ενώ για το υγρό έδαφος στη συντριπτική πλειονότητά τους με το Δοχείο 2 με α=1.7 cm. Η ελάχιστη συχνότητα στην οποία αντιστοιχεί η πρώτη τιμή του ε_r' (Σχήμα 3α) σχετίζεται με τη μέγιστη τιμή Z^* του Hioki 3532-50 και αυξάνεται με τη μείωση της C_0. Οι ασυνέχειες των καμπυλών του Σχήματος 3α οφείλονται στη διαφορετική ακρίβεια του οργάνου σε διαφορετικές κλίμακες μέτρησης. Το Σχήμα 3β παρουσιάζει το $\Delta\varepsilon_r'/\varepsilon_r'$ απιονισμένου νερού για τα Δοχεία 1 και 2 με α=3.2 και 1.7 cm, αντίστοιχα ($f>f_{cr}$, τιμή αναφοράς: ε_r'=79.25, 22.5ºC, 42 Hz≤f≤1 MHz (Haynes 2014)). Το $\Delta\varepsilon_r'/\varepsilon_r'$ είναι ικανοποιητικά μικρό· οι μεγαλύτερες τιμές του Δοχείου 1 αποδίδονται σε απώλειες νερού καθώς το δοχείο προορίζεται για ξηρό έδαφος και δεν είναι υδατοστεγές.

3.2 Εκτίμηση της κρίσιμης συχνότητας

Η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων επηρεάζεται από την πόλωση των ηλεκτροδίων, η οποία εξαρτάται από το υλικό τους, τις διαστάσεις τους και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Καθώς δεν υφίσταται αξιόπιστη μέθοδος εξάλειψης της επίδρασης του φαινομένου στα πειραματικά αποτελέσματα (Santamarina et al. 2001), έγινε απόπειρα εκτίμησης της κρίσιμης συχνότητας, f_{cr}, κάτω από την οποία εισάγονται σημαντικά σφάλματα. Για κάθε υγρό έδαφος χρησιμοποιήθηκαν δύο δοχεία με διαφορετικό πάχος δείγματος και επιφάνεια θωρακισμένου ηλεκτροδίου (Δοχεία 2 και 3, Σχήμα 2α). Εφόσον η συνεισφορά της πόλωσης των ηλεκτροδίων είναι διαφορετική για κάθε δοχείο, η f_{cr} μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά συγκρίνοντας τις μετρήσεις τους. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η σχετική διαφορά μεταξύ των ε_r' και $\varepsilon_{r,eff}''$ των Δοχείων 2 και 3 για το έδαφος Δ1 (Παράρτημα) συναρτήσει της f (περιεκτικότητα σε υγρασία, w=2.5%). Η f_{cr} είναι περίπου ίση με 300 Hz καθώς η σχετική διαφορά του ε_r' είναι ιδιαίτερα σημαντική για μικρότερες f. Επίσης, από το Σχήμα 4 διαπιστώνεται ότι η πόλωση των ηλεκτροδίων δεν επιδρά στο $\varepsilon_{r,eff}''$ σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων που εξετάζεται καθώς η σχετική



Σχήμα 3: Σχετικό σφάλμα του πραγματικού μέρους της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, $\Delta\varepsilon_r'/\varepsilon_r'$, συναρτήσει της συχνότητας, f, για τις διατάξεις δύο ηλεκτροδίων του Σχήματος 2. Διηλεκτρικό: (α) αέρας και (β) απιονισμένο νερό.



Σχήμα 4: Σχετική διαφορά για το πραγματικό, ε_r', και το ενεργό φανταστικό, $\varepsilon_{r,eff}''$, μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς του εδάφους Δ1 (Παράρτημα) συναρτήσει της συχνότητας, *f*, μεταξύ των μετρήσεων με τα Δοχεία 2 και 3 (Σχήμα 2α). Αναφορά: μετρήσεις με το Δοχείο 2.

διαφορά παραμένει σταθερή γεγονός που αποδίδεται στη διαφορετική αντίσταση επαφής των δύο δοχείων. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα υπόλοιπα εδάφη του Παραρτήματος σε όλες τις τιμές *w* που μελετήθηκαν. Η f_{cr} βρέθηκε γενικά να αυξάνεται (έως ~3 kHz) με την αύξηση της *w*, τη μείωση του μεγέθους του κόκκου και την αύξηση της *σ* του εδάφους (λόγω αύξησης του αριθμού των φορέων). Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα πειραματικά αποτελέσματα της Ενότητας 5 για τα υγρά εδάφη αντιστοιχούν στο Δοχείο 2 (Σχήμα 2α), το οποίο διαθέτει μεγαλύτερο θωρακισμένο ηλεκτρόδιο (άρα και χωρητικότητα) οδηγώντας έτσι σε πιο ακριβείς μετρήσεις.

4. Πειραματική διαδικασία

Πριν από τις μετρήσεις όλα τα δείγματα αμμώδους εδάφους (Παράρτημα), αν και ήδη ξηρά, ξηράθηκαν εκ νέου σε εργαστηριακό φούρνο ξήρανσης ELVEM T101 για τουλάχιστον 12 ώρες στους 110^{o}C ώστε να απομακρυνθεί τελείως η υγρασία. Τα μεταλλικά σκεύη ξήρανσης καλύφθηκαν με αλουμινόχαρτο μέχρι να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου. Τα ξηρά δείγματα αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή γυάλινα δοχεία εντός των οποίων τοποθετήθηκε silica gel για την απορρόφηση της υγρασίας του αέρα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία ~22^{o}C· η θερμοκρασία του δείγματος καταγραφόταν πριν και μετά τις μετρήσεις μέσω ψηφιακού θερμομέτρου GMH 2710-K με δοκιμαστήρα τύπου Pt1000. Σε καμία περίπτωση δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή της θερμοκρασίας εξαιτίας του μικρού ρεύματος που διαρρέει το δείγμα.

Πριν από τις μετρήσεις πραγματοποιούταν αντιστάθμιση ανοικτού κυκλώματος και βραχυκυκλώματος του οργάνου Hioki 3532-50 σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων του ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των μετρήσεων. Η πρώτη εξαλείφει την επίδραση στη Z^* των παράσιτων αγωγιμοτήτων και χωρητικοτήτων μεταξύ των ομοαξονικών καλωδίων μέτρησης (παράσιτη σύνθετη αντίσταση παράλληλα στο δείγμα) ενώ η δεύτερη εκμηδενίζει την επίδραση της παραμένουσας σύνθετης αντίστασης (αντίσταση και αυτεπαγωγή) των καλωδίων, η οποία συνδέεται σε σειρά με τη Z^*.

Για τα ξηρά εδάφη πραγματοποιήθηκαν 5 διαδοχικές μετρήσεις στο κάθε έδαφος από τις οποίες υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του. Το δείγμα τοποθετούνταν στο Δοχείο 1 (Σχήμα 2α) ρίχνοντάς το από το χείλος του με σταθερό ρυθμό. Έτσι επιτεύχθηκε παρόμοια πυκνότητα αλλά και διάρθρωση του εδάφους (Mahmood et al. 1976) στις διαδοχικές δοκιμές. Σε κάθε μέτρηση προσδιοριζόταν η μάζα του εδάφους μέσω εργαστηριακής ζυγαριάς ακριβείας Kern 572-35.

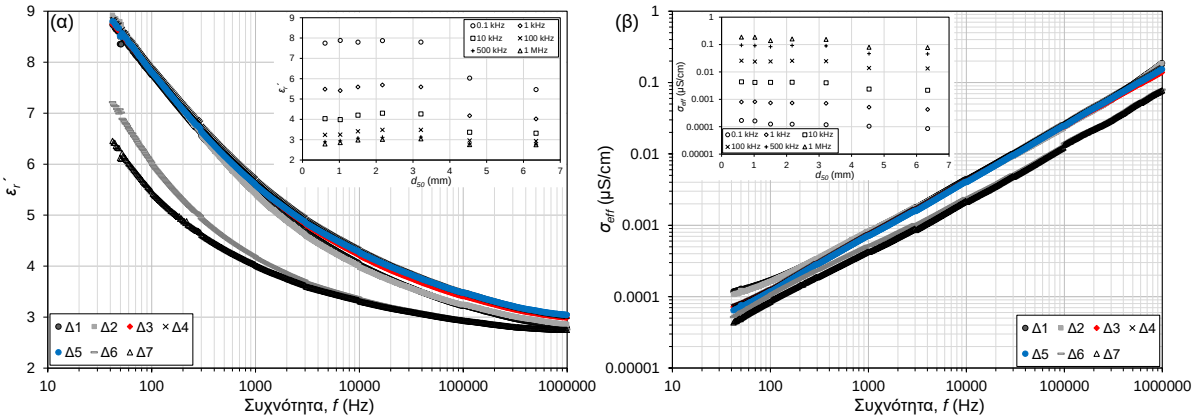
Η κατά βάρος περιεκτικότητα σε υγρασία, *w*, του εδάφους μεταβλήθηκε σε διαδοχικά βήματα από το 2.5% έως τον κορεσμό μέσω της ζυγαριάς ακριβείας Kern 572-35. Το μείγμα εδάφους-νερού αναδευόταν μέχρι να γίνει απόλυτα ομοιογενές και τοποθετούνταν σε στρώσεις στα δοχεία συμπιέζοντας προσεκτικά ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία

κενών μέσα στο δείγμα και να επιτευχθεί καλή επαφή δείγματος–ηλεκτροδίων. Για κάθε *w* έγιναν τρεις διαδοχικές μετρήσεις με τα Δοχεία 2 και 3 (Σχήμα 2α) από τις οποίες υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους για το κάθε δοχείο.

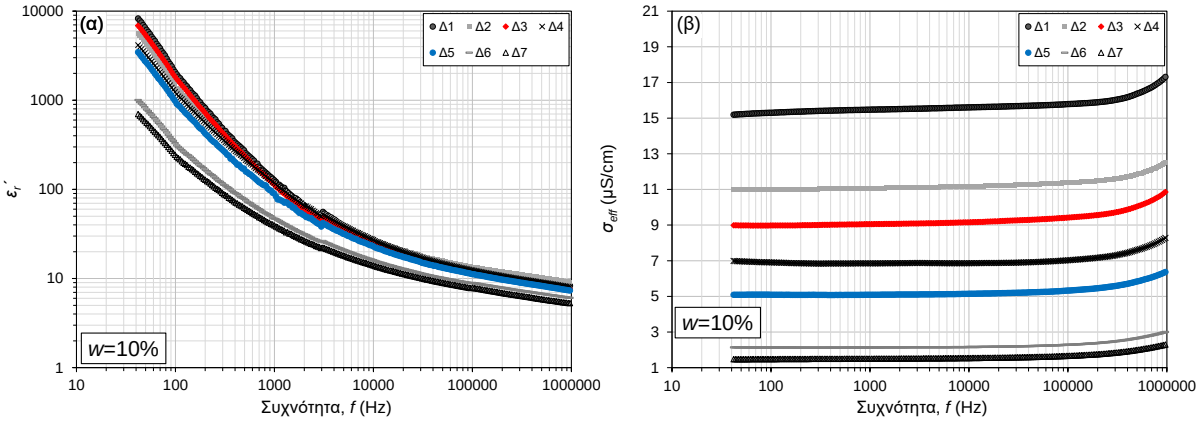
5. Πειραματικά αποτελέσματα – Συζήτηση

Το Σχήμα 5 απεικονίζει τη μεταβολή των ε_r' και σ_{eff} των ξηρών εδαφών (Παράρτημα) συναρτήσει της *f*. Το ε_r' μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της *f* ενώ η σ_{eff} αυξάνεται έντονα γεγονός που υποδηλώνει χαλάρωση του μηχανισμού χωρικής πόλωσης με διασπορά στις τιμές της χαρακτηριστικής συχνότητας χαλάρωσης. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη διφασική κοκκώδη φύση του ξηρού εδάφους σε συνδυασμό με την ατμοσφαιρική υγρασία. Οι μικρότερες τιμές του ε_r' αντιστοιχούν στα εδάφη Δ7 και Δ6 (Σχήμα 5α) λόγω του μεγάλου μεγέθους κόκκων που οδηγεί σε ασθενέστερη χωρική πόλωση. Για τα υπόλοιπα εδάφη (Δ1-Δ5) οι τιμές του ε_r' δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους και δεν παρατηρείται συσχέτιση με το μέγεθος των κόκκων (ένθετο γράφημα, Σχήμα 5α) συμπεριφορά που αποδίδεται κυρίως σε αποκλίσεις από την κοινή μέση χημική σύστασή τους. Αντίθετα, η σ_{eff} γενικά μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους του κόκκου (ένθετο γράφημα, Σχήμα 5β) γεγονός που συνάδει με τις πειραματικές τιμές της DC ειδικής αντίστασης των εδαφών αυτών (Δάτσιος 2017, Datsios et al. 2017).

Στο Σχήμα 6 φαίνεται η μεταβολή των ε_r' και σ_{eff} των υγρών εδαφών του Παραρτήματος συναρτήσει της *f* για *w*=10% (απιονισμένο νερό υψηλής καθαρότητας). Το ε_r' μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της *f* πολύ πιο έντονα, ωστόσο, σε σχέση με το ξηρό έδαφος (Σχήμα 5α). Η απότομη μείωση του ε_r' για $f<f_{cr}$ οφείλεται τόσο στην πόλωση των ηλεκτροδίων όσο και σε χαλάρωση του μηχανισμού χωρικής πόλωσης με διασπορά στις τιμές της χαρακτηριστικής συχνότητας χαλάρωσης (λόγω της πολυφασικής κοκκώδους φύσης του υγρού εδάφους). Για $f>f_{cr}$ η μείωση του ε_r' οφείλεται μόνο στην απόκριση του εδάφους. Η αύξηση της σ_{eff} (Σχήμα 6β) με την *f* δεν είναι τόσο έντονη όσο στο ξηρό έδαφος (Σχήμα 5β) καθώς στο υγρό έδαφος κυριαρχούν οι απώλειες αγωγιμότητας. Από τα Σχήματα 5 και 6 διαπιστώνεται επίσης ότι οι τιμές των ε_r' και σ_{eff} αυξάνονται έντονα με την προσθήκη του νερού λόγω της πολικής φύσης του σε συνδυασμό με την κοκκώδη φύση του εδάφους και με τον μεγαλύτερο αριθμό φορέων μεγαλύτερης κινητικότητας. Το ε_r' λαμβάνει στις χαμηλές *f* πολύ μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το ξηρό έδαφος, ενδεχομένως μεγαλύτερες ακόμα και από το ε_r' του νερού (79.25, 22.5ºC), λόγω της ενίσχυσης της χωρικής πόλωσης στο υγρό έδαφος εξαιτίας του ηλεκτρολυτικού διαλύματος στους πόρους του. Σε υψηλότερες *f* η διαφορά των ε_r' μειώνεται λόγω της εντονότερης μείωσης του ε_r' του υγρού εδάφους, ωστόσο, εξακολουθεί να είναι



Σχήμα 5: (α) Πραγματικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, ε_r', και (β) ενεργός ειδική αγωγιμότητα, σ_{eff}, των ξηρών εδαφών (Παράρτημα) συναρτήσει της συχνότητας, *f*. Ένθετα γραφήματα: ε_r' και σ_{eff} συναρτήσει της διαμέτρου του κόκκου που αντιστοιχεί σε ποσοστό διερχομένων 50%, d_{50}, με την *f* ως παράμετρο.



Σχήμα 6: (α) Πραγματικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, ε_r', και (β) ενεργός ειδική αγωγιμότητα, σ_{eff}, των υγρών εδαφών (Παράρτημα) συναρτήσει της συχνότητας, f, για w=10%.

σημαντική. Η μεγάλη διαφορά των τιμών της σ_{eff} (Σχήματα 5β και 6β) οφείλεται στην τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη DC ειδική αγωγιμότητα, σ, του υγρού εδάφους. Ακόμη, από το Σχήμα 6 φαίνεται ότι οι τιμές του ε_r' γενικά αυξάνονται με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων λόγω της αύξησης της επιφάνειάς τους που εντείνει τη χωρική πόλωση. Το ίδιο συμβαίνει και με τη σ_{eff} κυρίως λόγω της αύξησης της σ με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων (Δάτσιος 2017, Datsios et al. 2017). Οι παραπάνω παρατηρήσεις ισχύουν σε γενικές γραμμές για όλες τις περιεκτικότητες σε υγρασία που εξετάστηκαν.

6. Συμπεράσματα

Οι πιο διαδεδομένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης χαμηλών συχνοτήτων των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν με στόχο τη σχεδίαση κατάλληλων διατάξεων για τη διερεύνηση της επίδρασης διάφορων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του εδάφους στις ηλεκτρικές ιδιότητές του. Ως αποτέλεσμα προέκυψε ότι η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων είναι ακριβέστερη διότι δεν επηρεάζεται από αντιστάσεις επαφής και την πόλωση των ηλεκτροδίων. Ωστόσο, απαιτεί ιδιαίτερα αυξημένη ακρίβεια και διακριτική ικανότητα όσον αφορά τη μετρούμενη μιγαδική σύνθετη αντίσταση και επιπλέον είναι ακατάλληλη για εδάφη μικρής ειδικής αγωγιμότητας λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα. Συνεπώς, ως καταλληλότερη προκρίθηκε η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης και οι αντίστοιχες διατάξεις που σχεδιάστηκαν παρουσιάστηκαν μαζί με τη διακρίβωσή τους. Έμφαση δόθηκε στα κριτήρια και τις παραμέτρους σχεδίασης και στην πειραματική διαδικασία για τη διασφάλιση της αντιπροσωπευτικότητας και επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Προτείνεται μια προσεγγιστική μέθοδος για την εκτίμηση της κρίσιμης συχνότητας, f_{cr}, κάτω από την οποία εισάγονται σφάλματα στις τιμές του πραγματικού μέρους της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, ε_r', λόγω της πόλωσης των ηλεκτροδίων· η f_{cr} βρέθηκε γενικά να αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των φορέων στο έδαφος.

Στο ξηρό έδαφος το πραγματικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, ε_r', μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας, f, (42 Hz≤f≤1 MHz) ενώ η ενεργός ειδική αγωγιμότητα, σ_{eff}, αυξάνεται έντονα λόγω χαλάρωσης του μηχανισμού χωρικής πόλωσης (συσσώρευση φορτίων στις διεπαφές)· μεγαλύτεροι κόκκοι συνεπάγονται λιγότερες διεπαφές άρα ασθενέστερη χωρική πόλωση. Η προσθήκη νερού οδηγεί στην αύξηση των τιμών ε_r' και σ_{eff} λόγω της πολικής φύσης του σε συνδυασμό με την κοκκώδη φύση του εδάφους αλλά και λόγω του μεγαλύτερου αριθμού φορέων μεγαλύτερης κινητικότητας. Στο υγρό έδαφος η μείωση του ε_r' με την αύξηση της f είναι πολύ πιο έντονη σε σχέση με το ξηρό έδαφος σε αντίθεση με την αύξηση της σ_{eff} καθώς κυριαρχούν οι απώλειες αγωγιμότητας. Τέλος, οι τιμές των ε_r' και σ_{eff} του υγρού εδάφους αυξάνονται με τη μείωση του μεγέθους των κόκκων λόγω εντονότερης χωρικής πόλωσης και φαινομένων αγωγής.

Παράρτημα

Τα εδάφη που διερευνήθηκαν πειραματικά (Πίνακας 1.1, Δάτσιος 2017, Datsios et al. 2017) αποτελούνται από 7 κοκκομετρικές διαβαθμίσεις τυποποιημένης φυσικής πυριτικής άμμου με ομοιόμορφες κατανομές μεγέθους κόκκων χωρίς ξένα σώματα, οργανικά και λεπτόκοκκα υλικά. Η μέση χημική σύστασή τους είναι η ίδια καθώς προέρχονται από την ίδια αμμοληψία σε κοίτη και όχθες ποταμού. Η κατεργασία του υλικού της αμμοληψίας περιλαμβάνει πλύσιμο, κοσκίνισμα με βιομηχανικά κόσκινα για την επίτευξη της επιθυμητής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ξήρανση σε βιομηχανικούς ξηραντήρες.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των εδαφών που διερευνήθηκαν πειραματικά

Ονομασία εδάφους		Διαβάθμιση (mm)	d_{50} (mm)	Συντελεστής ομοιομορφίας, C_u^{α}	Συντελεστής κυρτότητας, C_c^{β}	Μέγεθος πόρων, d_{pore} (mm)$^{\gamma}$	Ειδική επιφάνεια, $S_{a,mass}$ (cm^2/g)$^{\delta}$	Ειδική επιφάνεια, $S_{a,vol}$ (cm^{-1})$^{\varepsilon}$	Σχήμα/ στρογγυλότητα κόκκων	Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (USCS) (ASTM D2487-11)
Πυριτική Άμμος (ΠΑ)	Δ1	0.4-0.8	0.61	1.36	1.00	0.24	39.84	102.59	Σχεδόν σφαιρικό/ Υποστρόγγυλοι-Υπογωνιώδεις	Χονδρόκοκκο έδαφος, κακά διαβαθμισμένη καθαρή άμμος (SP) *(SP με χάλικες) Χονδρόκοκκο έδαφος, κακά διαβαθμισμένος καθαρός χάλικας (GP)
	Δ2	0.8-1.25	1.02	1.23	1.01	0.41	23.40	60.26		
	Δ3	1.0-2.0	1.51	1.33	1.00	0.60	16.10	41.46		
	Δ4	1.7-2.5	2.17	1.23	1.02	0.87	11.04	28.43		
	Δ5	2.0-4.0	3.22	1.32	1.00	1.29	7.54	19.40		
	Δ6*	3.15-5.6	4.54	1.24	1.01	1.82	5.29	13.62		
	Δ7	5.0-8.0	6.34	1.25	1.02	2.54	3.79	9.76		

Ειδική βαρύτητα, G_s=2.58, Φαινόμενη πυκνότητα, ρ_{bulk} = 1.55 g/cm^3

$^{\alpha}C_u=d_{60}/d_{10}$, $^{\beta}C_c=d_{30}^2/(d_{10}\,d_{60})$, $^{\gamma}d_{pore}=0.4d_{50}$ (Santamarina et al. 2001), $^{\delta}S_{a,mass}$=*Επιφάνεια κόκκων/Μάζα στερεών*$=3(C_u+7)/(4\rho_{water}G_sd_{50})$ (Santamarina et al. 2001, 2002), $^{\varepsilon}S_{a,vol}$= *Επιφάνεια κόκκων/Όγκος στερεών*$=S_{a,mass}G_s\rho_{water}$, όπου ρ_{water} η πυκνότητα του νερού.

Βιβλιογραφία

Δάτσιος Ζ.Γ.: «*Διερεύνηση του Φαινομένου Ιονισμού του Εδάφους γύρω από Συγκεντρωμένα Συστήματα Γείωσης: Επίδραση στην Κεραυνική Συμπεριφορά Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας*», Διδακτορική Διατριβή, 2017, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

ASTM D150-11, "*Standard Test Methods for AC Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation*", 2011.

ASTM D2487-11, "*Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*", 2011.

Datsios Z.G., Mikropoulos P.N., and Karakousis I., "*Laboratory Characterization and Modeling of DC Electrical Resistivity of Sandy Soil with Variable Water Resistivity and Content*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24 (5), pp. 3063-3072, 2017.

Grigas J., "*Microwave Dielectric Spectroscopy of Ferroelectrics and Related Materials*", Gordon and Breach Publishers, 1996, Amsterdam, The Netherlands.

Haynes W.M. (Editor-in-Chief), "*CRC Handbook of Chemistry and Physics*", 95th Edition 2014-2015, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014, Boca Raton, Florida, USA.

Mahmood A., Mitchell J.K., and Lindblom U., "*Effect of Specimen Preparation Method on Grain Arrangement and Compressibility in Sand*", pp. 169-192 in: ASTM STP 599, "*Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing*", American Society for Testing and Materials, 1976, Philadelphia, Pennsylvania, USA.

Olhoeft G.R., "*Initial Report of the Petrophysics Laboratory – 1977-1979 Addendum*", Open File Report 80-522, Geological Survey, United States Department of the Interior, 1980.

Parkhomenko E.I., "*Electrical Properties of Rocks*", Editor: Keller G.V., Plenum Press, 1967, New York, New York, USA.

Santamarina, J.C., Klein K.A., and Fam M.A., "*Soils and Waves, Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*", John Wiley & Sons, 2001, Chichester, England, UK.

Santamarina J.C., Klein K.A., Wang Y.H., and Prencke E., "*Specific Surface: Determination and Relevance*", Canadian Geotechnical Journal, 39 (1), pp. 233-241, 2002.

Snowden D.P., Morris Jr. G.C., and van Lint V.A.J., "*Measurement of the Dielectric Constant of Soil*", IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-32 (6), pp. 4312-4314, 1985.