ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΙΔΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΥΠΟ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ

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 ειδική αντίσταση είναι η ηλεκτρική ιδιότητα που χρησιμοποιείται συχνότερα για τον χαρακτηρισμό του εδάφους καθώς η γνώση της είναι απαραίτητη σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών. Στην παρούσα εργασία αρχικά αναλύονται, συγκρίνονται και συζητούνται διαδεδομένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης της DC ειδικής αντίστασης του εδάφους. Εν συνεχεία παρουσιάζονται αναλυτικά οι εργαστηριακές διατάξεις που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης διάφορων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του εδάφους στην ειδική αντίστασή του. Έμφαση δίνεται στην πειραματική διαδικασία για τη διασφάλιση της αντιπροσωπευτικότητας και της επαναληψιμότητας των μετρήσεων. Η πειραματική διερεύνηση περιλαμβάνει 7 κοκκομετρικές διαβαθμίσεις φυσικής πυριτικής άμμου με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υγρασία και ειδική αγωγιμότητα νερού. Η ειδική αντίσταση του εδάφους αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων λόγω του μικρότερου πλήθους διαθέσιμων ιόντων και των μακρύτερων αγώγιμων διαδρομών (μεγαλύτερο δαιδαλώδες). Η αύξηση αυτή γίνεται λιγότερο έντονη με την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του προστιθέμενου νερού εξαιτίας της μειωμένης επίδρασης των ήδη υπαρχόντων ηλεκτρολυτών στο έδαφος.

Λέξεις-Κλειδιά: έδαφος, ειδική αγωγιμότητα, ειδική αντίσταση, εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης, συνεχής τάση

Abstract

Electrical resistivity is the electrical property most commonly used for soil characterization as its knowledge is important for many practical applications. In this work several laboratory measurement methods of soil resistivity are analyzed, compared and discussed. The experimental arrangements that were designed for the investigation of the effects of soil characteristics and conditions on soil resistivity are presented in detail. Emphasis is given to the measurement procedure used in order to obtain representative samples of the tested soils and to achieve repeatability of experimental results. Several natural silica sands of uniform gradations were tested under variable water resistivity and content. Soil resistivity increases with increasing grain size as a result of the lower amount of available electrolytes and the longer current conduction paths (higher tortuosity). This increase is less pronounced for higher added water conductivity due to a reduced effect of the already available electrolytes in soil.

Keywords: direct current, electrical conductivity, electrical resistivity, laboratory measurement methods, soil

---

1. Εισαγωγή

Το έδαφος αποτελείται από διακριτούς στερεούς κόκκους ανάμεσα στους οποίους υπάρχουν κενά που ονομάζονται πόροι και πληρούνται από αέρα ή/και υδατικά ηλεκτρολυτικά διαλύματα. Επομένως, η ισοδύναμη μακροσκοπική συμπεριφορά του εδάφους καθορίζεται από την πολυφασική κοκκώδη φύση του. Από τη σκοπιά του ηλεκτρομαγνητισμού το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μη ιδανικό διηλεκτρικό υλικό χωρίς μαγνητικές ιδιότητες, στο οποίο η αγωγή του ρεύματος είναι ιοντική. Ως εκ τούτου, η συμπεριφορά του εδάφους υπό τη διέγερση ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορεί να περιγραφεί πλήρως μέσω των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του, δηλαδή της ειδικής αντίστασής του υπό διέγερση μηδενικής συχνότητας και της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς του.

Η ειδική αντίσταση υπό συνεχή ή βραδέως μεταβαλλόμενη εναλλασσόμενη τάση είναι η ηλεκτρική ιδιότητα που χρησιμοποιείται πιο συχνά για τον χαρακτηρισμό του εδάφους, καθώς η γνώση της είναι απαραίτητη σε πληθώρα πρακτικών εφαρμογών. Η ειδική αντίσταση του εδάφους διερευνάται πειραματικά από τις αρχές του 20ου αιώνα χωρίς ωστόσο να έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως οι επιδράσεις των παραμέτρων που την επηρεάζουν εξαιτίας της σύνθετης φύσης του εδάφους. Προκειμένου να καταστεί εφικτή η πειραματική διερεύνηση των επιδράσεων αυτών υπό ελεγχόμενες συνθήκες στο εργαστήριο, στην παρούσα εργασία αρχικά αναλύονται, συγκρίνονται και συζητούνται διαδεδομένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Κατόπιν, παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές διατάξεις που σχεδιάστηκαν καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Τα αμμώδη εδάφη που διερευνήθηκαν αποτελούνταν από διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις φυσικής πυριτικής άμμου (Δάτσιος 2017, Datsios et al. 2017). Έτσι κατέστη δυνατή η μελέτη της επίδρασης διάφορων ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών του εδάφους στην ειδική αντίστασή του.

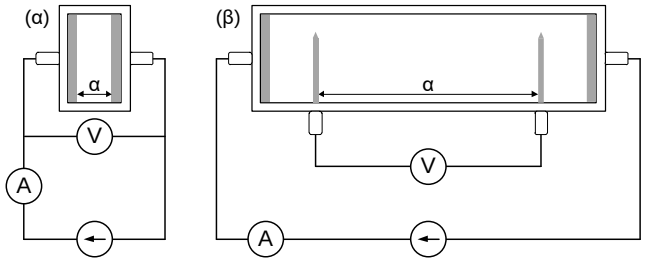
2. Εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης

Γενικά, οι μέθοδοι μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους διαχωρίζονται σε μεθόδους πεδίου και εργαστηριακές μεθόδους. Οι μέθοδοι πεδίου χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του αδιατάρακτου εδάφους μιας περιοχής (ισοδύναμη ειδική αντίσταση των εδαφικών στρωμάτων έως κάποιο βάθος). Αντίθετα, οι εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης αντιπροσωπευτικών δειγμάτων εδάφους προσδιορίζουν την πραγματική τιμή της ειδικής αντίστασης. Οι πιο συνηθισμένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης είναι:

- η μέθοδος δοχείου εδάφους με δύο ηλεκτρόδια (ASTM G187-12a) (Σχήμα 1α)
- η μέθοδος δοχείου εδάφους με τέσσερα ηλεκτρόδια (ASTM G57-06) (Σχήμα 1β)
- η μέθοδος Wenner (τέσσερα ηλεκτρόδια) (IEEE Std 81-2012)
- η μέθοδος Schlumberger-Palmer (τέσσερα ηλεκτρόδια) (IEEE Std 81-2012)

με τις δύο τελευταίες να εφαρμόζονται ευρέως και στο πεδίο. Όλες οι μέθοδοι, ανεξάρτητα από τον αριθμό και τη διάταξη των ηλεκτροδίων τους, βασίζονται στη μέτρηση της αντίστασης ενός δείγματος εδάφους το οποίο τοποθετείται σε ένα μονωτικό δοχείο που ονομάζεται δοχείο εδάφους.

Τα ηλεκτρόδια της μεθόδου δοχείου εδάφους δύο ηλεκτροδίων είναι δύο μεταλλικές πλάκες τοποθετημένες σε δύο απέναντι πλευρές του δείγματος (Σχήμα 1α) και χρησιμοποιούνται τόσο για την έγχυση του ρεύματος όσο και για τη μέτρηση της αναπτυσσόμενης τάσης. Στο δοχείο εδάφους τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 1β) οι πλάκες χρησιμοποιούνται μόνο για την έγχυση του ρεύματος. Η τάση που αναπτύσσεται σε ένα τμήμα του δείγματος μετριέται χρησιμοποιώντας δύο μεταλλικές ακίδες ή ηλεκτρόδια με μορφή πλέγματος (κάθετα στη διεύθυνση ροής του ρεύματος). Από τις τιμές της τάσης και του ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί η αντίσταση του δείγματος



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση των πειραματικών διατάξεων δοχείου εδάφους (α) δύο (ASTM G187-12a) και (β) τεσσάρων (ASTM G57-06) ηλεκτροδίων

εδάφους, *R*, η οποία εξαρτάται τόσο από το ίδιο το έδαφος όσο και από τις διαστάσεις του δοχείου εδάφους. Η ειδική αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = R(A/\alpha) \tag{1}$$

όπου A (m^2) είναι η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του δείγματος στη διεύθυνση ροής του ρεύματος. Στη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων (Σχήμα 1α) α (m) είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ενώ στη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 1β) η απόσταση μεταξύ των εσωτερικών ακμών (ή πλευρών) των ηλεκτροδίων μέτρησης τάσης. Ο λόγος A/α (λόγος ρ/R) ονομάζεται συντελεστής δοχείου εδάφους. Η τιμή του χαρακτηρίζει το δοχείο εδάφους και προσδιορίζεται πειραματικά μέσω υλικού γνωστής ειδικής αντίστασης (π.χ. υδατικό διάλυμα ηλεκτρολύτη). Αυτό είναι απαραίτητο διότι το δοχείο εδάφους ενδέχεται να έχει κατασκευαστικές ατέλειες με συνέπεια ο γεωμετρικός υπολογισμός του συντελεστή A/α να εισάγει σφάλματα στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Το δοχείο εδάφους είναι κατασκευασμένο από κάποιο άκαμπτο μονωτικό υλικό με επαρκή μηχανική αντοχή. Η διατομή του μπορεί να είναι τετραγωνική, ορθογωνική ή κυκλική. Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό ή ορείχαλκο. Οι διαστάσεις του δοχείου και των ηλεκτροδίων όπως και οι αποστάσεις μεταξύ τους πρέπει να επιλέγονται βάσει των προδιαγραφών του κυκλώματος τροφοδοσίας και των οργάνων μέτρησης τάσης και ρεύματος. Πρέπει να λαμβάνεται επίσης υπ' όψιν η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος εδάφους· η ειδική αντίσταση που μετριέται είναι αντιπροσωπευτική αν οι διαστάσεις του δείγματος είναι τουλάχιστον 3-5 φορές μεγαλύτερες από το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκου (Parkhomenko 1967). Επιπλέον, η ποσότητα του δείγματος πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε να είναι εύκολη η προετοιμασία του και να διασφαλιστεί η ομοιογένειά του. Για τη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος και τάσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1 cm (Parkhomenko 1967) ώστε να αποφευχθεί η επίδραση φαινομένων πόλωσης ηλεκτροδίων στα πειραματικά αποτελέσματα. Ακόμη, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων τάσης (μήκος και διάμετρος ακίδων, ανοίγματα πλέγματος) δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Η αντίσταση που μετριέται μέσω της μεθόδου δύο ηλεκτροδίων (Σχήμα 1α) εμπεριέχει εγγενώς, εν σειρά με την αντίσταση του δείγματος εδάφους, την αντίσταση επαφής ηλεκτροδίων–δείγματος. Επιπλέον, καθώς οι φορείς του ρεύματος στο έδαφος είναι ιόντα ενώ στα ηλεκτρόδια ηλεκτρόνια, η διεπαφή ηλεκτροδίων-δείγματος πολώνεται (πόλωση ηλεκτροδίων) με συνέπεια να εισάγεται μια επιπρόσθετη αντίσταση εν σειρά με αυτή του δείγματος. Επομένως, η ειδική αντίσταση του εδάφους που προσδιορίζεται με τη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων είναι μεγαλύτερη από την πραγματική. Η σπουδαιότητα του σφάλματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του εδάφους, όπως η περιεκτικότητά του σε υγρασία και λεπτόκοκκο υλικό.

Η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 1β) αφενός δεν επηρεάζεται από την αντίσταση επαφής ηλεκτροδίων ρεύματος–δείγματος, διότι η τάση μετριέται μέσω

διαφορετικών ηλεκτροδίων, και αφετέρου δεν επηρεάζεται από την πόλωση των ηλεκτροδίων, αρκεί το όργανο μέτρησης τάσης να έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου (>10 ΜΩ (ASTM G57-06)) ώστε να μην υπάρχει σημαντική ροή ρεύματος μεταξύ του δείγματος και των ηλεκτροδίων τάσης. Συνεπώς, μέσω της μεθόδου αυτής μπορεί να προσδιοριστεί η πραγματική τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Το ίδιο ισχύει και για τις μεθόδους Wenner και Schlumberger-Palmer (τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή), οι οποίες όμως απαιτούν δείγμα σχετικά μεγάλων διαστάσεων σε σχέση με τη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων με συνέπεια τη δυσκολότερη προετοιμασία του. Αν το μέγεθος του δείγματος δεν είναι επαρκές σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων και το βάθος τοποθέτησής τους εισάγονται σφάλματα στις μετρήσεις ειδικής αντίστασης (Kuranchie et al. 2014).

Σφάλματα εισάγονται επίσης από το ρεύμα που ρέει στην επιφάνεια των δειγμάτων, το οποίο είναι σημαντικό σε εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης. Στη μέθοδο δύο ηλεκτροδίων τα σφάλματα αυτά μπορούν να εξαλειφθούν μέσω ηλεκτροδίου θωράκισης που μπορεί να σχεδιαστεί βάσει του προτύπου ASTM D257-14. Το ηλεκτρόδιο αυτό οδηγεί το επιφανειακό ρεύμα στη γη του κυκλώματος τροφοδοσίας με συνέπεια να μετριέται μόνο το ρεύμα που ρέει διαμέσου του δείγματος. Στη μέθοδο τεσσάρων ηλεκτροδίων, η επίδραση επιφανειακών ρευμάτων μπορεί να εξαλειφθεί χρησιμοποιώντας μεταλλικούς δακτυλίους θωράκισης, οι οποίοι εγκαθίστανται είτε ανάμεσα (Parkhomenko 1967) είτε πριν (Olhoeft 1980) τα ηλεκτρόδια τάσης και διατηρούνται συνεχώς στο ίδιο δυναμικό με τα ηλεκτρόδια αυτά. Επιπρόσθετα, πρέπει να τονιστεί ότι είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων για εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια μεγάλης επιφάνειας σε σχέση με τη μεταξύ τους απόσταση ώστε να μειωθεί η αντίσταση του δείγματος και να αυξηθεί το ρεύμα. Για εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης τα σφάλματα πόλωσης των ηλεκτροδίων δεν είναι τόσο σημαντικά.

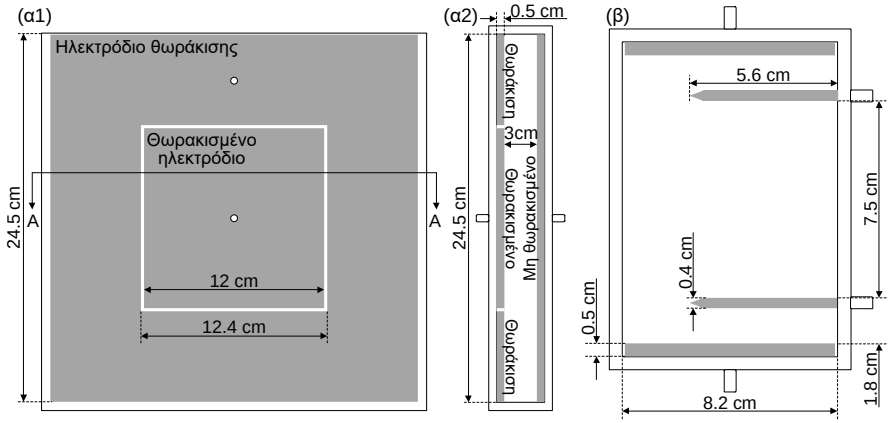
3. Πειραματικές διατάξεις

Για την πειραματική διερεύνηση της ειδικής αντίστασης αμμωδών εδαφών όπως αυτών του Παραρτήματος υπό συνεχή τάση σχεδιάστηκαν βάσει της παραπάνω ανάλυσης και κατασκευάστηκαν τα δοχεία εδάφους του Σχήματος 2. Στα ξηρά εδάφη εφαρμόστηκε η μέθοδος δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης λόγω των μεγάλων τιμών ειδικής αντίστασης ενώ στα υγρά εδάφη η ακριβέστερη μέθοδος τεσσάρων ηλεκτροδίων.

3.1 Ξηρό έδαφος

Το δοχείο εδάφους δύο ηλεκτροδίων (Σχήμα 2α) για το ξηρό έδαφος κατασκευάστηκε από Plexiglas και διαθέτει τρία αποσπώμενα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα: ένα ηλεκτρόδιο θωράκισης και δύο ηλεκτρόδια μέτρησης (θωρακισμένο και μη θωρακισμένο ηλεκτρόδιο). Οι διαστάσεις του επιλέχθηκαν έτσι ώστε το δείγμα να μην έχει μεγάλο όγκο, το μικρό ρεύμα που το διαρρέει να είναι ανιχνεύσιμο και η ειδική αντίσταση που μετριέται να είναι αντιπροσωπευτική του εδάφους. Οι διαστάσεις του ηλεκτροδίου θωράκισης και του θωρακισμένου ηλεκτροδίου είναι αντίστοιχα 2 και 4 φορές μεγαλύτερες του πάχους του δείγματος σε συμφωνία με το ASTM D257-14.

Ο συντελεστής δοχείου εδάφους, A/α, υπολογίστηκε 49.57 cm λαμβάνοντας υπ’ όψιν την ενεργό επιφάνεια του θωρακισμένου ηλεκτροδίου (ASTM D257-14) και τις ακριβείς διαστάσεις του δοχείου ενώ προσδιορίστηκε πειραματικά ως 46.48 cm χρησιμοποιώντας απιονισμένο νερό και ένα πολύ αραιό υδατικό διάλυμα NaCl γνωστής ειδικής αντίστασης. Η ακριβής πειραματική τιμή χρησιμοποιήθηκε στη σχέση (1) για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους από τη μετρηθείσα αντίσταση του δείγματος.



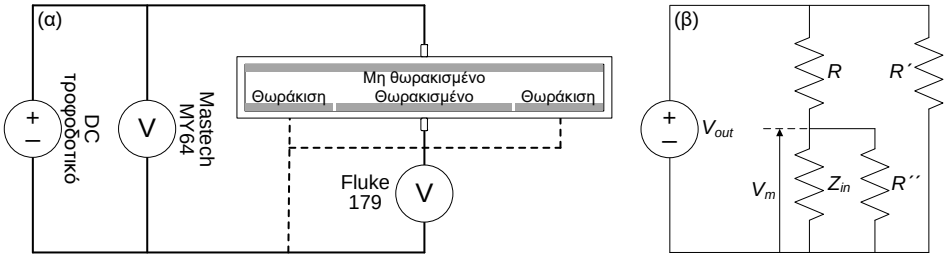
Σχήμα 2: (α) Δοχείο εδάφους δύο ηλεκτροδίων για το ξηρό έδαφος: (α1) πλάγια όψη και (α2) τομή ΑΑ. (β) Δοχείο εδάφους τεσσάρων ηλεκτροδίων για το υγρό έδαφος, εσωτερικό ύψος: 6.2 cm. Συντελεστής δοχείου εδάφους, A/α, (α) 46.48 cm και (β) 6.76 cm.

Ο εξοπλισμός (Σχήμα 3α) για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του ξηρού εδάφους αποτελείται από τροφοδοτικό συνεχούς τάσης μεταβλητής εξόδου (έως 325 V, 1 A, κυμάτωση<3%) και τα ψηφιακά πολύμετρα Fluke 179 (Z_{in}=11.11 MΩ) και Mastech MY64. Το τελευταίο χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της τάσης εξόδου του τροφοδοτικού (320 V), ενώ το Fluke 179 για τον προσδιορισμό του ρεύματος που διαρρέει το δείγμα. Το ρεύμα αυτό είναι πολύ μικρό λόγω της μεγάλης αντίστασης των δειγμάτων με συνέπεια να επηρεάζεται ιδιαίτερα από θόρυβο. Γι' αυτό το πολύμετρο Fluke 179 συνδέθηκε ως βολτόμετρο σε σειρά με το θωρακισμένο ηλεκτρόδιο. Έτσι, δημιουργείται ένας ωμικός καταμεριστής (Σχήμα 3β) ανάμεσα στην πολύ μεγάλη αντίσταση του δείγματος, R, και τη Z_{in} εφόσον η αντίσταση θωρακισμένου ηλεκτροδίου–θωράκισης, R'', είναι πολύ μεγαλύτερη από τη Z_{in}. Από το κυκλωματικό ισοδύναμο του Σχήματος 3β προκύπτει ότι η R είναι ίση με:

$$R = Z_{in}(V_{out} - V_m)/V_m \quad (2)$$

όπου V_{out} η τάση εξόδου του τροφοδοτικού και V_m η ένδειξη του πολυμέτρου Fluke 179. Η μέτρηση της R κάθε δείγματος έγινε αμέσως μετά την τροφοδότηση διότι η R αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου με συνεχώς μειούμενο ρυθμό. Η αύξηση αυτή (μείωση του ρεύματος που διαρρέει το δείγμα) μπορεί να αποδοθεί στη διηλεκτρική απορρόφηση και στη συσσώρευση ιόντων στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων (ASTM D257-14).

Μετά από τη μέτρηση της R μετρήθηκε επιπλέον η αντίσταση θωρακισμένου ηλεκτροδίου–θωράκισης, R'', χρησιμοποιώντας το μη θωρακισμένο ηλεκτρόδιο ως θωράκιση. Σε όλες τις περιπτώσεις βρέθηκε ότι η R'' ήταν τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από τη Z_{in}, όπως απαιτείται από το ASTM D257-14. Σε διαφορετική περίπτωση η R'' οδηγεί μέρος του ρεύματος που διαρρέει το δείγμα κατευθείαν στη γη της τροφοδοσίας με συνέπεια να εισάγεται σφάλμα καθώς δεν ισχύει πλέον η σχέση (2).



Σχήμα 3: (α) Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για το ξηρό έδαφος. (β) Κυκλωματικό ισοδύναμο. Αντιστάσεις: R: δείγματος, Z_{in}: εισόδου Fluke 179, R' και R'': μη θωρακισμένου ηλεκτροδίου–θωράκισης και θωρακισμένου ηλεκτροδίου–θωράκισης, αντίστοιχα.

3.2 Υγρό έδαφος

Το δοχείο εδάφους τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 2β) για το υγρό έδαφος είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο υδατοστεγές δοχείο από Plexiglas με αποσπώμενα ηλεκτρόδια από ανοξείδωτο χάλυβα: δύο πλάκες για την έγχυση του ρεύματος και δύο ακίδες για τη μέτρηση της τάσης. Οι διαστάσεις του δοχείου εδάφους επιλέχθηκαν έτσι ώστε το δείγμα εδάφους να είναι αντιπροσωπευτικό και να μην έχει μεγάλο μέγεθος. Ο συντελεστής δοχείου εδάφους, A/a, υπολογίστηκε 6.78 cm λαμβάνοντας υπ' όψιν τις ακριβείς διαστάσεις του δοχείου ενώ προσδιορίστηκε με ακρίβεια πειραματικά ως 6.76 cm με τη χρήση υδατικών διαλυμάτων KCl γνωστής ειδικής αντίστασης.

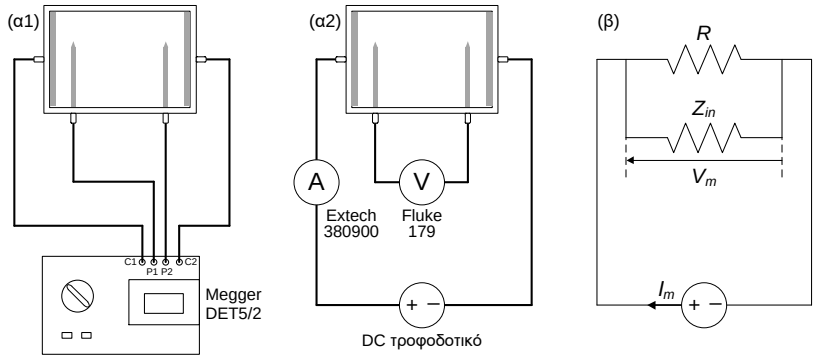
Ο εξοπλισμός μέτρησης της ειδικής αντίστασης του υγρού εδάφους αποτελείται από ένα όργανο μέτρησης αντιστάσεων γείωσης Megger DET5/2 Digital Earth Tester (έως 19.99 kΩ), τροφοδοτικό συνεχούς τάσης μεταβλητής εξόδου (έως 325 V, 1 A, κυμάτωση<3%) και ψηφιακά πολύμετρα Extech 380900 και Fluke 179 (Z_{in}=11.11 MΩ). Συγκεκριμένα, για εδάφη ειδικής αντίστασης έως ~1350 Ωm (R<20 kΩ) χρησιμοποιήθηκε το όργανο Megger DET5/2 (Σχήμα 4α1) που διαθέτει τέσσερις ακροδέκτες: δύο για την έγχυση του ρεύματος και δύο για τη μέτρηση της τάσης. Η τάση εξόδου του οργάνου έχει τη μορφή τετραγωνικών παλμών (50 V, 128 Hz, θετική και αρνητική πολικότητα). Η κυματομορφή αυτή, σε συνδυασμό με τη μεγάλη αντίσταση εισόδου του κυκλώματος μέτρησης τάσης, μειώνει την πόλωση των ηλεκτροδίων. Για εδάφη ειδικής αντίστασης μεγαλύτερης από ~1350 Ωm (R>20 kΩ) χρησιμοποιήθηκε το DC τροφοδοτικό μαζί με τα δύο πολύμετρα (Fluke 179 και Extech 380900: μέτρηση τάσης και ρεύματος, αντίστοιχα (Σχήμα 4α2)). Η τάση εξόδου του τροφοδοτικού ρυθμίστηκε στα 50 V ώστε να είναι ίση με αυτή του Megger DET5/2. Σε κάθε δείγμα γίνονταν δύο μετρήσεις με αντιστροφή της πολικότητας της εφαρμοζόμενης τάσης και υπολογιζόταν η μέση τιμή τους. Η αντίσταση του δείγματος, R, δίνεται από την εξής σχέση (Σχήμα 4β):

$$R = Z_{in}V_m/(Z_{in}I_m - V_m) \quad (3)$$

όπου I_m και V_m οι ενδείξεις των Extech 380900 και Fluke 179. Οι μετρήσεις γίνονταν κατευθείαν μετά την τροφοδότηση ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα πόλωσης των ηλεκτροδίων, μετακίνησης της υγρασίας και ηλεκτρόλυσης (Higgs 1930). Η διάταξη του Σχήματος 4α2 χρησιμοποιήθηκε επιπλέον και σε όλες τις μετρήσεις που έγιναν με αυτή του Σχήματος 4α1 (ρ<1350 Ωm, R<20 kΩ). Διαπιστώθηκε ότι οι τιμές ειδικής αντίστασης που προκύπτουν με τις δύο διατάξεις μέτρησης είναι ισοδύναμες, καθώς τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκαν σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους.

4. Πειραματική διαδικασία

Αρχικά πριν από τις μετρήσεις όλα τα δείγματα αμμώδους εδάφους του Παραρτήματος, αν και ήδη ξηρά, ξηράθηκαν εκ νέου σε εργαστηριακό φούρνο ξήρανσης ELVEM T101



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση των πειραματικών διατάξεων για το υγρό έδαφος: (α1) ρ<1350 Ωm (R<20 kΩ) και (α2) ρ>1350 Ωm (R>20 kΩ). (β) Κυκλωματικό ισοδύναμο της διάταξης (α2). R: αντίσταση δείγματος, Z_{in}: αντίσταση εισόδου Fluke 179.

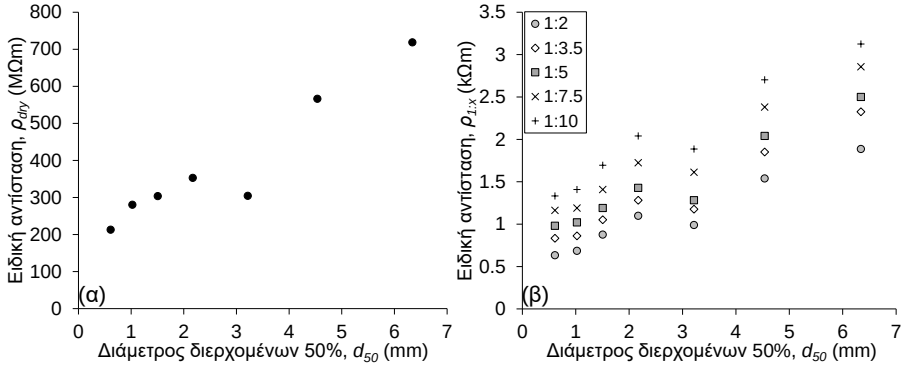
για τουλάχιστον 12 ώρες στους 110^{o}C ώστε να απομακρυνθεί τελείως η υγρασία. Τα μεταλλικά σκεύη ξήρανσης καλύφθηκαν με αλουμινόχαρτο και αφέθηκαν να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου. Τα ξηρά δείγματα αποθηκεύτηκαν σε αεροστεγή γυάλινα δοχεία εντός των οποίων τοποθετήθηκε κατάλληλο υλικό (silica gel) για την απορρόφηση της υγρασίας του αέρα που παραμένει στο δοχείο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου (~22^{o}C)· η θερμοκρασία του δείγματος καταγραφόταν πριν και μετά τις μετρήσεις μέσω ενός ψηφιακού θερμομέτρου GMH 2710-K με δοκιμαστήρα τύπου Pt1000. Σε καμία περίπτωση δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη μεταβολή της θερμοκρασίας αυτής εξαιτίας του μικρού χρόνου τροφοδότησης.

Για τα ξηρά εδάφη έγιναν 10 διαδοχικές μετρήσεις στο κάθε έδαφος λόγω διασποράς στις τιμές ειδικής αντίστασης και υπολογίστηκε η μέση τιμή τους. Το δείγμα τοποθετούνταν στο δοχείο εδάφους δύο ηλεκτροδίων (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 10 διαδοχικές δοκιμές. Σε κάθε δοκιμή προσδιοριζόταν η μάζα του εδάφους μέσω εργαστηριακής ζυγαριάς ακριβείας Kern 572-35.

Η κατά βάρος περιεκτικότητα σε υγρασία, *w*, του υγρού εδάφους μεταβλήθηκε σε διαδοχικά βήματα από το 1% έως τον κορεσμό χρησιμοποιώντας τη ζυγαριά ακριβείας Kern 572-35. Μετά την προσθήκη του απαιτούμενου νερού, το μείγμα εδάφους-νερού αναδευόταν ώστε να γίνει απόλυτα ομοιογενές. Στη συνέχεια τοποθετούνταν σε στρώσεις στο δοχείο τεσσάρων ηλεκτροδίων (Σχήμα 2β) συμπιέζοντας προσεκτικά. Ιδιαίτερη προσπάθεια καταβλήθηκε για την αποφυγή δημιουργίας κενών μέσα στο δείγμα και για την επίτευξη καλής επαφής δείγματος και ηλεκτροδίων. Για κάθε *w* πραγματοποιήθηκαν τρεις διαδοχικές μετρήσεις και υπολογίστηκε η μέση τιμή της ειδικής αντίστασης.

5. Πειραματικά αποτελέσματα – Συζήτηση

Το Σχήμα 5α παρουσιάζει τη μεταβολή της ειδικής αντίστασης του ξηρού εδάφους, ρ_{dry}, συναρτήσει της διαμέτρου κόκκου που αντιστοιχεί σε ποσοστό διερχομένων 50%, d_{50}, για τα αμμώδη εδάφη του Παραρτήματος. Όπως φαίνεται από τις πολύ μεγάλες τιμές ειδικής αντίστασης, το ξηρό έδαφος είναι ένα μονωτικό υλικό καθώς ο αριθμός των φορέων είναι μικρός και η κινητικότητά τους χαμηλή. Η ρ_{dry} γενικά αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους του κόκκου λόγω των μακρύτερων διαδρομών αγωγής του ρεύματος εντός της διάρθρωσης που σχηματίζουν οι κόκκοι του εδάφους· το δαιδαλώδες των διαδρομών αυξάνεται εξαιτίας των λιγότερων επαφών μεταξύ των κόκκων. Η ρ_{dry} εξαρτάται, επίσης, από το πλήθος των διαθέσιμων ιόντων, ένδειξη του οποίου αποτελεί η ειδική αντίσταση των αιωρημάτων εδάφους:νερού, $\rho_{1:x}$, (Σχήμα 5β)· η $\rho_{1:x}$ χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ποσότητας των ήδη υπαρχόντων ηλεκτρολυτών στο έδαφος που μπορούν να διαλυθούν στο νερό των πόρων και να σχηματίσουν υδατικά ηλεκτρολυτικά διαλύματα.

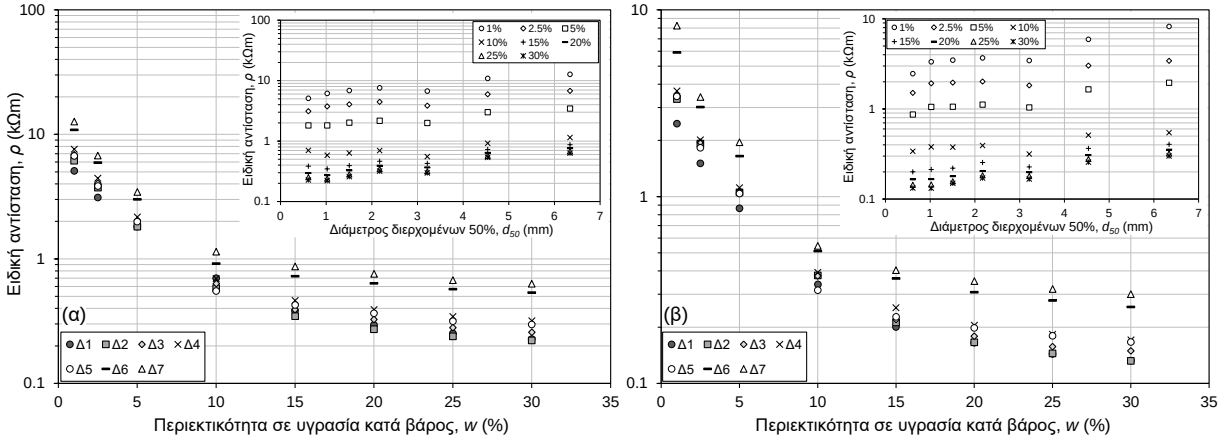


Σχήμα 5: (α) Ειδική αντίσταση του ξηρού εδάφους, ρ_{dry}, και (β) ειδική αντίσταση αιωρημάτων εδάφους:νερού 1:x, $\rho_{1:x}$, συναρτήσει της διαμέτρου του κόκκου που αντιστοιχεί σε ποσοστό διερχομένων 50%, d_{50}, για τα αμμώδη εδάφη του Παραρτήματος.

Από το Σχήμα 5 φαίνεται ότι οι $\rho_{1:x}$ και ρ_{dry} παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τη d_{50}. Επιπλέον, από το Σχήμα 5β είναι εμφανές ότι η $\rho_{1:x}$ είναι μεγαλύτερη για μικρότερο λόγο 1:x, ως αποτέλεσμα της διάλυσης σε μεγαλύτερη ποσότητα νερού, καθώς για εδάφη με μεγαλύτερους κόκκους, λόγω μικρότερης ποσότητας ηλεκτρολυτών. Το τελευταίο οφείλεται στη μείωση της ειδικής επιφάνειας των εδαφών, δηλαδή στη μείωση της επιφάνειας που αλληλεπιδρά με το νερό του αιωρήματος. Παρεκκλίσεις από αυτή τη συμπεριφορά (π.χ. Δ5 (d_{50}=3.22 mm), Σχήμα 5β) υποδηλώνουν απόκλιση από την κοινή μέση χημική σύσταση της πυριτικής άμμου που εξετάστηκε.

Στο Σχήμα 6α φαίνεται η μεταβολή της ειδικής αντίστασης, ρ, του υγρού εδάφους με την περιεκτικότητα σε υγρασία κατά βάρος, w, χρησιμοποιώντας απιονισμένο νερό υψηλής καθαρότητας (ειδική αγωγιμότητα, σ_{aw}: <0.1 μS/cm στους ~22°C). Η ρ μειώνεται με την αύξηση της w λόγω του μεγαλύτερου πλήθους ενυδατωμένων ιόντων και του αυξημένου αριθμού αγώγιμων διαδρομών μέσα από το νερό των πόρων. Οι διαδρομές αυτές, όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία, έχουν μικρότερο δαιδαλώδες, μεγαλύτερη συνδεσιμότητα και γίνονται ολοένα και πιο συνεχείς. Ο ρυθμός της μείωσης της ρ με την υγρασία είναι μικρότερος για w μεγαλύτερο από ~10% (Σχήμα 6α), τιμή που αντιστοιχεί στο κατώφλι διέλευσης του εδάφους, δηλαδή στην τιμή της w πάνω από την οποία δημιουργούνται συνεχείς διαδρομές νερού κατά μήκος ολόκληρης της διάρθρωσης του εδάφους. Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς η w τείνει προς την τιμή που αντιστοιχεί στον κορεσμό η ρ προσεγγίζει μια οριακή τιμή η οποία είναι χαρακτηριστική του εκάστοτε εδάφους και ονομάζεται ειδική αντίσταση κορεσμένου εδάφους, ρ_{sat}.

Επιπλέον, από το Σχήμα 6α είναι εμφανές ότι η ρ είναι γενικά μεγαλύτερη για εδάφη με μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων ιδιαίτερα για πολύ μεγάλες ή μικρές τιμές w. Καθώς το μέγεθος του κόκκου αυξάνεται, η ποσότητα των διαθέσιμων για διάλυση ηλεκτρολυτών μειώνεται (Σχήμα 5β) και, επιπρόσθετα, τα ιόντα διασχίζουν μακρύτερες διαδρομές στο διασυνδεδεμένο δίκτυο των πόρων (μεγαλύτερο δαιδαλώδες λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας κόκκων και μεγέθους πόρων). Η επίδραση του μεγέθους των κόκκων στην ρ αποτυπώνεται καλύτερα στο ένθετο γράφημα του Σχήματος 6α. Το έδαφος Δ5 (d_{50}=3.22 mm) παρουσιάζει σχετικά μικρές τιμές ρ λόγω της μεγάλης ποσότητας ηλεκτρολυτών που διαθέτει (Σχήμα 5β). Ακόμη, από το ένθετο γράφημα συμπεραίνεται ότι η μείωση της ρ με την αύξηση της w είναι γενικά πιο έντονη για τα εδάφη με μικρότερο μέγεθος κόκκων. Από τη σύγκριση των Σχημάτων 5α και 6α προκύπτει ότι η ρ_{dry} επηρεάζεται έντονα από την προσθήκη ακόμα και μικρής ποσότητας απιονισμένου νερού λόγω του μεγαλύτερου



Σχήμα 6: Ειδική αντίσταση, ρ, των υγρών αμμωδών εδαφών (Παράρτημα) συναρτήσει της περιεκτικότητας σε υγρασία κατά βάρος, w. (α) Απιονισμένο νερό υψηλής καθαρότητας (σ_{aw}<0.1 μS/cm) και (β) αραιό υδατικό διάλυμα NaCl (σ_{aw}=95.6 μS/cm). Ένθετα γραφήματα: ρ συναρτήσει της διαμέτρου του κόκκου που αντιστοιχεί σε ποσοστό διερχομένων 50%, d_{50}, w: παράμετρος.

αριθμού φορέων μεγαλύτερης κινητικότητας (ρ_{dry} ~3-4 τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη της ρ για w=1%). Επιπλέον, από τα δύο σχήματα φαίνεται ότι η μεταβολή της ρ_{dry} με τη d_{50} (Σχήμα 5α) είναι ποιοτικά παρόμοια με τη μεταβολή της ρ για w=1% και 2.5% (ένθετο γράφημα, Σχήμα 6α) διότι σε αυτά τα επίπεδα υγρασίας η συνέχεια και η συνδεσιμότητα των αγώγιμων διαδρομών μέσα από το νερό των πόρων είναι περιορισμένη και έτσι ο ρόλος της αγωγής μέσα από τους στερεούς κόκκους είναι ακόμα σημαντικός.

Στο Σχήμα 6β παρουσιάζεται η μεταβολή της ρ με τη w, χρησιμοποιώντας αντί του απιονισμένου νερού ένα αραιό υδατικό διάλυμα NaCl (μοριακότητα κατά βάρος: 0.00081 mol/kg, ειδική αγωγιμότητα, σ_{aw}: 95.6 μS/cm στους ~22^{o}C). Από το σχήμα αυτό μπορεί να διαπιστωθεί ότι τα συμπεράσματα (και η ερμηνεία τους) που σχετίζονται με το Σχήμα 6α ισχύουν και εδώ. Συγκρίνοντας αυτά τα δύο σχήματα, είναι φανερό ότι η ρ είναι σημαντικά χαμηλότερη (~35-55%) για το υδατικό διάλυμα NaCl καθώς επηρεάζεται έντονα από τη σ_{aw} (μεγαλύτερος αριθμός φορέων). Επίσης, η μείωση της ρ με την αύξηση της σ_{aw} είναι γενικά μεγαλύτερη για μεγαλύτερες τιμές w και για εδάφη με μεγαλύτερους κόκκους. Η επίδραση του μεγέθους του κόκκου στην ρ είναι μικρότερη όσο αυξάνεται η σ_{aw} διότι μειώνεται η επίδραση των ηλεκτρολυτών που ήδη υπάρχουν στο έδαφος.

6. Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν οι πιο διαδεδομένες εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης της DC ειδικής αντίστασης του εδάφους με στόχο τη σχεδίαση κατάλληλων διατάξεων για την πειραματική διερεύνηση της επίδρασης των ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών του εδάφους στην ειδική αντίστασή του. Από την ανάλυση προέκυψε ότι η μέθοδος δοχείου εδάφους με τέσσερα ηλεκτρόδια είναι η καταλληλότερη καθώς με αυτή μετριέται η πραγματική τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους απαλλαγμένη από σφάλματα αντιστάσεων επαφής και πόλωσης ηλεκτροδίων. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι ακατάλληλη για εδάφη μεγάλης ειδικής αντίστασης λόγω των πολύ μικρών ρευμάτων που διαρρέουν το δείγμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος δοχείου εδάφους δύο ηλεκτροδίων με ηλεκτρόδιο θωράκισης. Βάσει των παραπάνω σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν εργαστηριακές διατάξεις, οι οποίες παρουσιάστηκαν αναλυτικά με έμφαση τόσο στα κριτήρια και τις παραμέτρους σχεδίασης, όπως οι ελάχιστες διαστάσεις του δείγματος εδάφους, όσο και στην πειραματική διαδικασία για τη διασφάλιση της αντιπροσωπευτικότητας και επαναληψιμότητας των μετρήσεων.

Η πειραματική διερεύνηση περιλαμβάνει 7 κοκκομετρικές διαβαθμίσεις πυριτικής άμμου με μεταβλητή περιεκτικότητα σε υγρασία και ειδική αγωγιμότητα νερού. Η ειδική αντίσταση του εδάφους υπό συνεχή τάση αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους των κόκκων λόγω του μικρότερου πλήθους διαθέσιμων ιόντων και των μακρύτερων αγώγιμων διαδρομών (μεγαλύτερο δαιδαλώδες). Στην ξηρή κατάσταση η αύξηση του δαιδαλώδους σχετίζεται με τη διάρθρωση του εδάφους ενώ στην υγρή κατάσταση με το διασυνδεδεμένο δίκτυο των πόρων. Η επίδραση του μεγέθους των κόκκων στην ειδική αντίσταση του υγρού εδάφους γίνεται λιγότερο έντονη με την αύξηση της ειδικής αγωγιμότητας του νερού που προστίθεται εξαιτίας της μειωμένης επίδρασης των ήδη υπαρχόντων ηλεκτρολυτών στο έδαφος. Όταν η περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία είναι χαμηλή (≤2.5% κατά βάρος) η μεταβολή της ειδικής αντίστασης με το μέγεθος των κόκκων είναι ποιοτικά παρόμοια με αυτή του ξηρού εδάφους διότι η αγωγή μέσω των στερεών παραμένει σημαντική. Αυτό δεν ισχύει σε μεγαλύτερες περιεκτικότητες καθώς το ρεύμα ρέει κυρίως διαμέσου του νερού των πόρων.

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

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)
	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		*(SP με χάλικες)
	Δ7	5.0-8.0	6.34	1.25	1.02	2.54	3.79	9.76		Χονδρόκοκκο έδαφος, κακά διαβαθμισμένος καθαρός χάλικας (GP)

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.

λεπτόκοκκα υλικά (εδάφη μικρής ειδικής επιφάνειας, αμελητέα επιφανειακή αγωγή). Η μέση χημική σύστασή τους είναι ίδια καθώς προέρχονται από μία αμμοληψία σε κοίτη και όχθες ποταμού. Η κατεργασία της πρώτης ύλης περιλαμβάνει πλύσιμο, κοσκίνισμα με βιομηχανικά κόσκινα (επίτευξη διαβάθμισης) και ξήρανση σε βιομηχανικούς ξηραντήρες.

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 D257-14, "*Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*", 2014.

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

ASTM G57-06 (Reapproved 2012), "*Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*", 2012.

ASTM G187-12a, "*Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method*", 2013.

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.

Higgs P.J., "*An Investigation of Earthing Resistances*", Journal of the Institution of Electrical Engineers, 68 (402), pp. 736-750, 1930.

IEEE Std 81-2012, "*IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*", 2012.

Kuranchie F.A., Shukla S.K., Habibi D., Zhao X., and Kazi M., "*Studies on Electrical Resistivity of Perth Sand*", International Journal of Geotechnical Engineering, 8 (4), pp. 449-457, 2014.

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.