

## Κεφάλαιο 3

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

*Αυτό που ακούγεται συχνότερα στα ερευνητικά εργαστήρια δεν είναι το "Εύρηκα"  
αλλά το "Τι περιέργο πράγμα είναι αυτό;"*

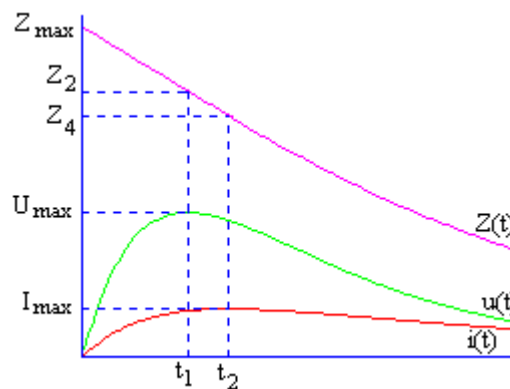
*Arthur C. Clarke*

#### 3.1 Κρουστική σύνθετη αντίσταση

Η κρουστική (μεταβατική) σύνθετη αντίσταση ενός συστήματος γείωσης ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης του ρεύματος ως προς την άπειρη γη προς το εγχυόμενο ρεύμα [71-74,80,81,131].

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (3.1)$$

Επειδή η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι χρονικά μεταβαλλόμενη κρίνεται απαραίτητος ο ορισμός κάποιων παραμέτρων της. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον ορισμό των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης.



Σχήμα 3.1: Προσδιορισμός των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης

Οι σχέσεις 3.2 - 3.5 εκφράζουν τους ορισμούς των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  [71-74,80,81,131].

$$Z_1 = \max(z(t)) \quad (3.2)$$

$$Z_2 = \frac{u(t_1)}{i(t_1)} \quad (3.3)$$

$$Z_3 = \frac{u(t_1)}{i(t_2)} \quad (3.4)$$

$$Z_4 = \frac{u(t_2)}{i(t_2)} \quad (3.5)$$

όπου  $Z_1$  είναι η μέγιστη τιμή του λόγου της τάσης προς το ρεύμα,  $Z_2$  είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς την αντίστοιχη στιγμιαία τιμή του ρεύματος,  $Z_3$  είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της τάσης προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος και  $Z_4$  είναι ο λόγος της τάσης, όταν το ρεύμα γίνεται μέγιστο, προς τη μέγιστη τιμή του ρεύματος. Είναι προφανές ότι:

$$Z_1 > Z_2 > Z_3 > Z_4 \quad (3.6)$$

Είναι φανερό πως η μέγιστη τιμή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης είναι μεγαλύτερη από την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση (η τιμή που μετριέται με ένα γειωσόμετρο [6-9]). Επομένως, το ζητούμενο για ένα κατασκευαστή συστημάτων γείωσης δεν είναι η τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση, αλλά η χρονική μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης έως ότου καταλήξει, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, στην τιμή της μόνιμου καταστάσεως.

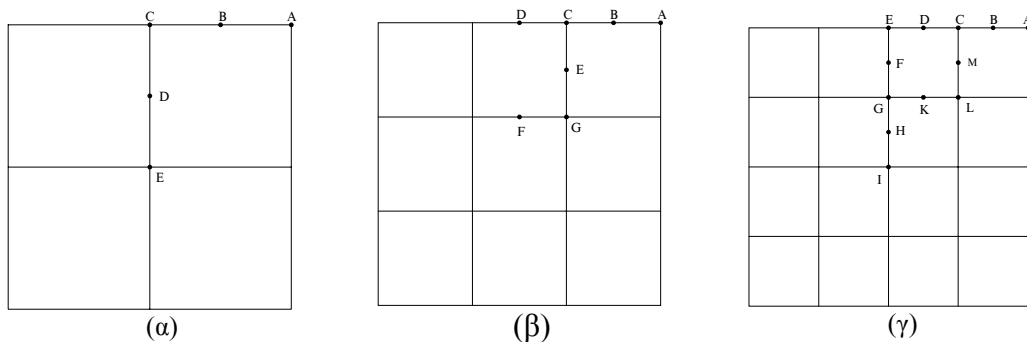
Για το σκοπό αυτό, στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκαν σειρές πειραμάτων τόσο σε πραγματικά συστήματα γείωσης όσο και σε συστήματα γείωσης τα οποία ήταν κατασκευασμένα υπό κλίμακα. Τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων παρέχουν όχι μόνο την απαραίτητη πειραματική επιβεβαίωση των γενομένων προσομοιώσεων των συστημάτων γείωσης, αλλά και τη δυνατότητα για διασύνδεση των αποτελεσμάτων της μόνιμης με τα αντίστοιχα της κρουστικής σύνθετης αντίστασης γείωσης, αφού προκύπτουν σχέσεις που δεικνύουν αυτή την αλληλεξάρτηση των αποτελεσμάτων της μόνιμης και της μεταβατικής κατάστασης.

## 3.2 Πειράματα υπό κλίμακα

### 3.2.1 Διεξαγωγή των πειραμάτων

Σκοπός των πειραμάτων υπό κλίμακα είναι η διερεύνηση της μεταβολής της μεταβατικής αντίστασης των πλεγμάτων γείωσης, όταν η έγχυση του κρουστικού ρεύματος γίνεται σε διαφορετικό, κάθε φορά, σημείο του πλέγματος γείωσης. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκε η συνδεσμολογία του σχήματος 2.1 και χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που παρουσιάστηκε στην §2.2.1 και στο Παράρτημα Π1.

Το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο μεταλλικό πλέγμα τοποθετήθηκε σε προεπιλεγμένα βάθη (2cm, 4cm, 6cm) κάτω από την επιφάνεια του νερού, στο κέντρο της γεμάτης με νερό δεξαμενής. Η έγχυση του ρεύματος έγινε σε διάφορα σημεία ξεκινώντας από τη γωνία του κάθε πλέγματος και πηγαίνοντας προς τα εσωτερικά του σημεία. Αξιοποιώντας τις συμμετρίες που υπήρχαν στα πλέγματα, δεν ελήφθησαν μετρήσεις σε όλα τα σημεία, αλλά οι δοκιμές έγιναν μόνο στα σημεία που καθορίζονται με κεφαλαία γράμματα στο σχήμα 3.2.



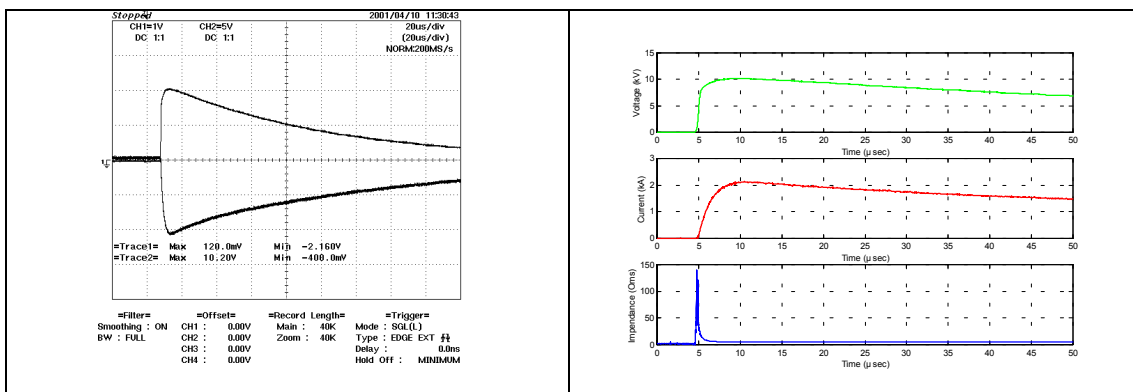
Σχήμα 3.2: α) Το πλέγμα 1 με τα 4 τετράγωνα (G4), β) Το πλέγμα 2 με τα 9 τετράγωνα (G9), γ) Το πλέγμα 3 με τα 16 τετράγωνα (G16).

Σε καθένα από τα σημεία εφαρμόστηκαν κατ' επανάληψη κρουστικά ρεύματα διαφορετικής μέγιστης τιμής. Για την τροποποίηση της μέγιστης τιμής του εγχυόμενου ρεύματος, μεταβαλλόταν η τάση φόρτισης της γεννήτριας κρουστικού ρεύματος (EMC 1024). Η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος όπως φαίνεται και από τα σχήματα 3.3-3.5 έχει την μορφή  $8\mu s \pm 20\%$  /  $80\mu s \pm 20\%$ .

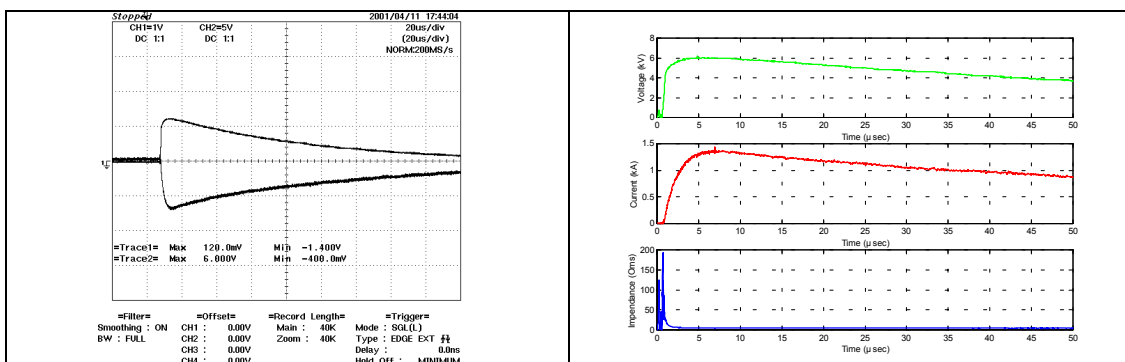
Σε κάθε επιλεγμένο σημείο του πλέγματος εγχύθηκαν μια σειρά από κρουστικά ρεύματα (με διαφορετική μέγιστη τιμή) και καταγράφηκε η διαφορά δυναμικού

μεταξύ του σημείου έγχυσης και του γειωμένου μεταλλικού περιβλήματος της δεξαμενής (σχήματα 3.3-3.5) [84, 85]. Με τη χρήση του πρώτου καναλιού του παλμογράφου (DLWAVE 1504) και της ενσωματωμένης, στη γεννήτρια κρουστικού ρεύματος, αντίστασης μέτρησης, καταγράφηκε το εγχυόμενο ρεύμα στα διάφορα σημεία των πλεγμάτων (σχήμα 3.2). Χρησιμοποιώντας το δεύτερο κανάλι του παλμογράφου και του, ενσωματωμένου στη γεννήτρια, ωμικού καταμεριστή, καταγράφηκε η τάση [199, 200, 204].

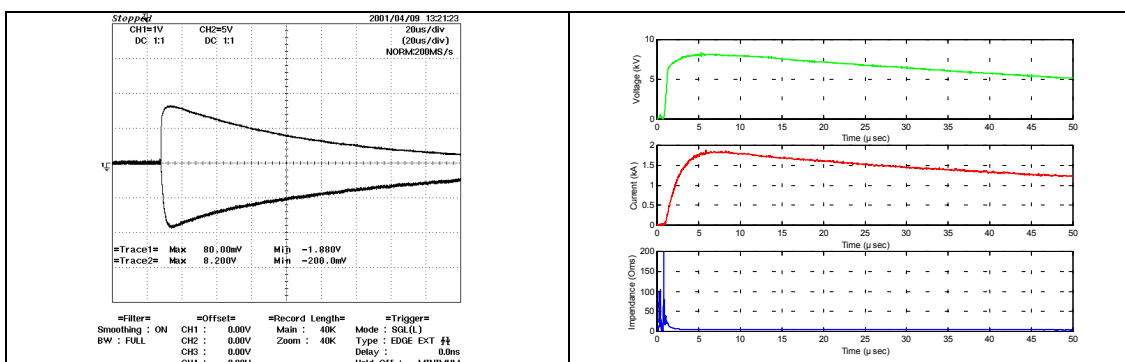
Στα παλμογραφήματα που παρατίθενται στην αριστερή στήλη των σχημάτων 3.3-3.4 η θετική κυματομορφή αντιστοιχεί στην καταγραφόμενη τάση ενώ η αρνητική κυματομορφή αντιστοιχεί στην κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος. Το ρεύμα δεν είναι αρνητικό, αλλά για καλύτερη απεικόνιση των παλμογραφήματων, έχει επιλεγεί (με το πλήκτρο Invert) η εμφάνιση του αντιθέτου του εγχυόμενου ρεύματος έτσι ώστε να είναι ευδιάκριτα τα προς μελέτη σήματα. Στη δεξιά στήλη των αντιστοιχών σχημάτων υπάρχει: α) η κυματομορφή της τάσεως (επάνω πράσινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη ο λόγος του ωμικού καταμεριστή, β) η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος (μεσαία κόκκινη καμπύλη), έχει ληφθεί υπόψη η τιμή της αντίστασης μέτρησης για μετατροπή της τάσης του παλμογραφήματος σε ρεύμα και γ) η κυματομορφή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (κάτω μπλε καμπύλη) που προέκυψε με εφαρμογή της εξίσωσης 3.1



Σχήμα 3.3: Πλέγμα 1 (G4), βάθος 2 cm, σημείο A, αγωγιμότητα 2,5 mS/cm



Σχήμα 3.4: Πλέγμα 2 (G9), βάθος 4 cm, σημείο F, αγωγιμότητα 4,0 mS/cm



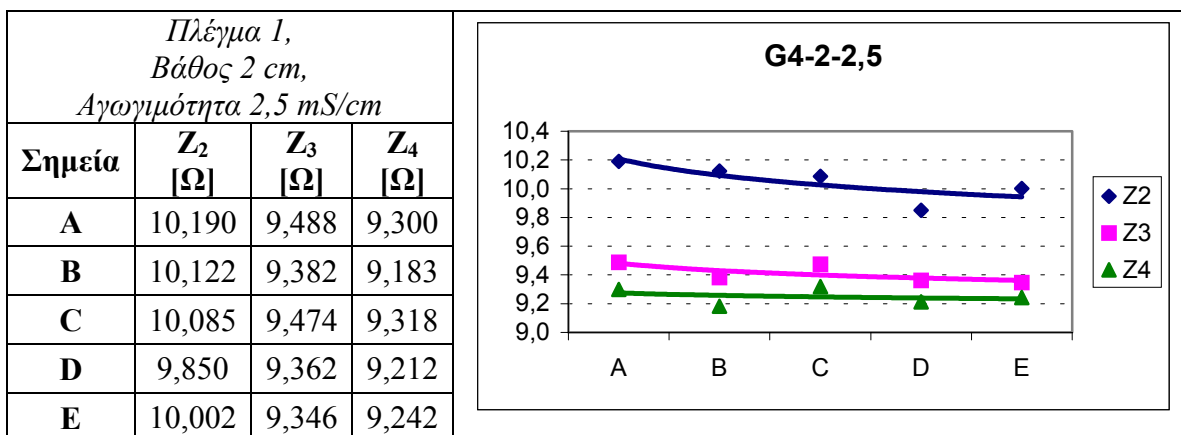
Σχήμα 3.5: Πλέγμα 3 (G16), βάθος 2 cm, σημείο E, αγωγιμότητα 4,0 mS/cm

### 3.2.2 Αποτελέσματα των πειραμάτων

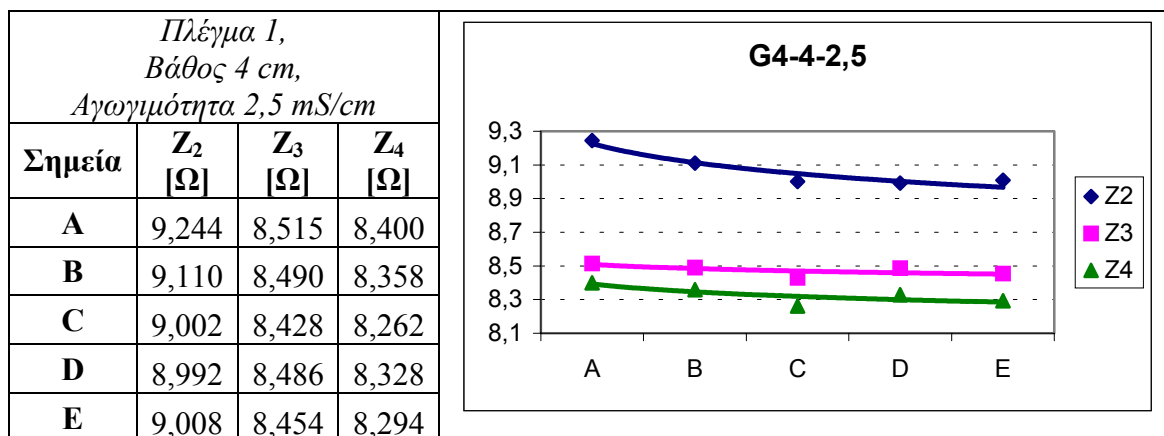
Η πειραματική διαδικασία, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, επαναλήφθηκε για όλα τα πλέγματα γείωσης του σχήματος 3.2, για τα επιλεγμένα σημεία έγχυσης του κρουστικού ρεύματος και για τιμές της αγωγιμότητας του νερού της δεξαμενής: 2,5 – 4,0 – 5,0 – 7,5 – 10,0 mS/cm.

Είναι προφανές ότι προέκυψε σειρά παλμογραφημάτων που έχουν μορφή ανάλογη με αυτή των σχημάτων 3.3-3.5 [84, 85]. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων (παλμογραφήματα) ήταν διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή. Έτσι από την κάθε προκύπτουσα σειρά μετρήσεων υπολογίστηκε ο μέσος όρος της κάθε παραμέτρου της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (εξισώσεις 3.2-3.5). Στη συνέχεια υπολογίστηκε η διασπορά των μετρήσεων. Αφού αφαιρέθηκαν οι τιμές εκείνες από κάθε παράμετρο που βρίσκονταν εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης 95% (που παρουσίαζαν δηλαδή τη μεγαλύτερη απόκλιση από το μέσο όρο των μετρήσεων) υπολογίστηκε ξανά ο μέσος όρος των μετρήσεων.

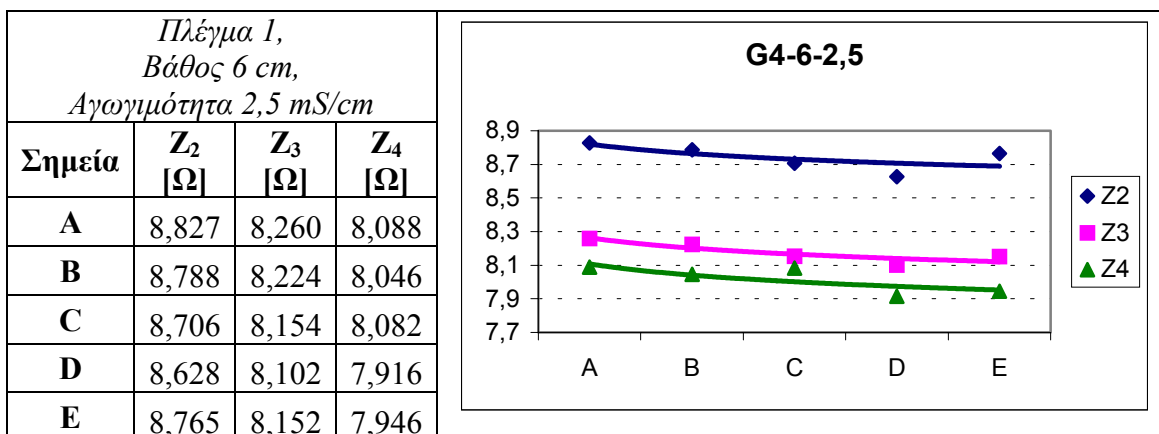
Στους πίνακες που ακολουθούν μαζί με τα αντίστοιχα σχήματα 3.6 -3.41 παρουσιάζεται η μεταβολή του μέσου όρου των τιμών των παραμέτρων  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για όλα τα πλέγματα, για τα διαφορετικά βάθη τοποθέτησης και για τις τιμές της αγωγιμότητας, στις οποίες ελήφθησαν οι μετρήσεις, συναρτήσει του σημείου έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος.



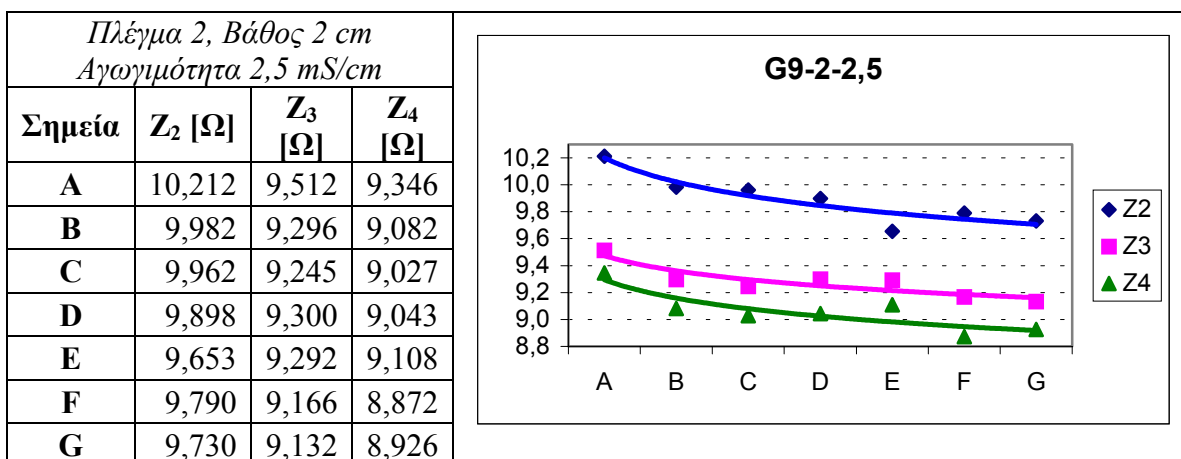
Σχήμα 3.6: Μεταβολή των παραμέτρων  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm



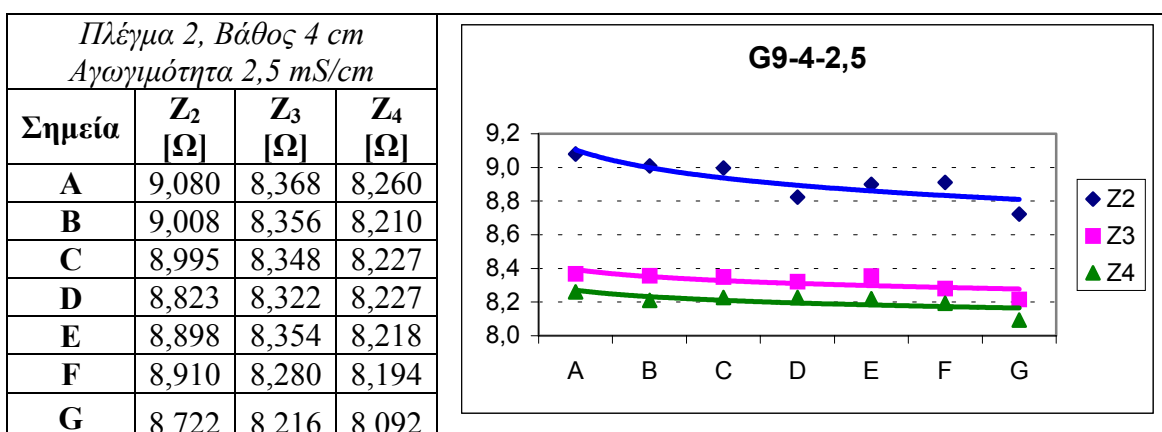
Σχήμα 3.7: Μεταβολή των παραμέτρων  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm



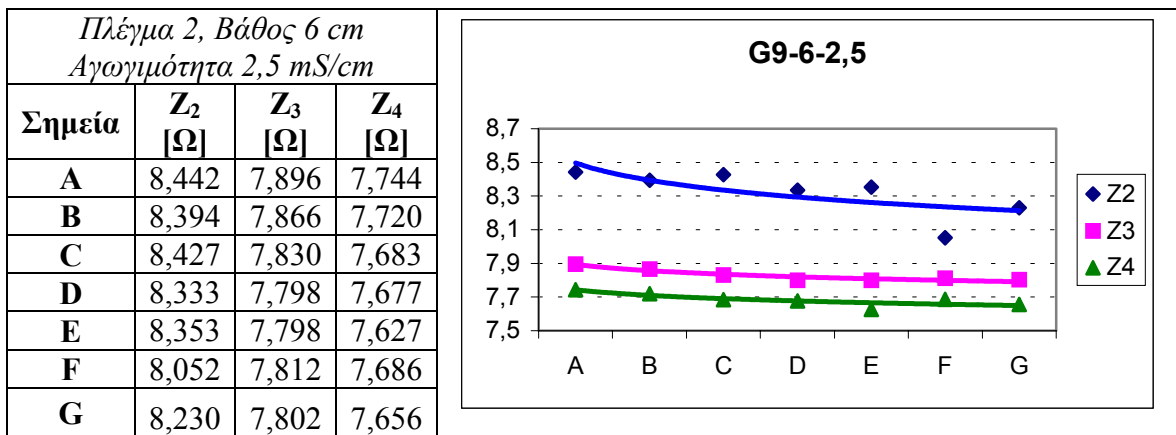
Σχήμα 3.8: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm



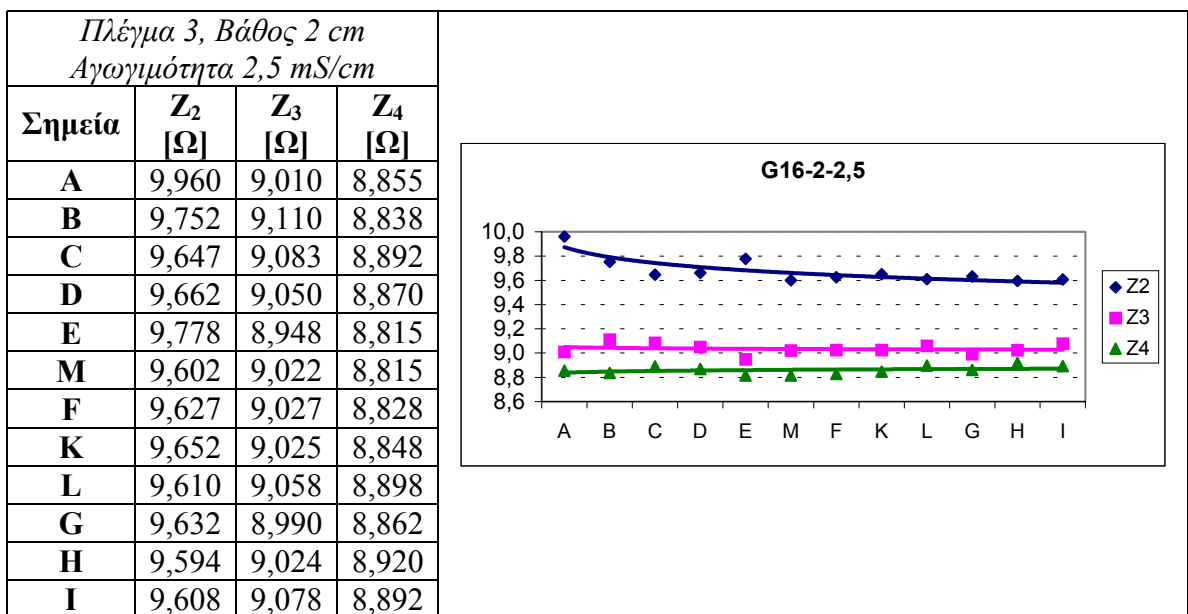
Σχήμα 3.9: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm



Σχήμα 3.10: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm

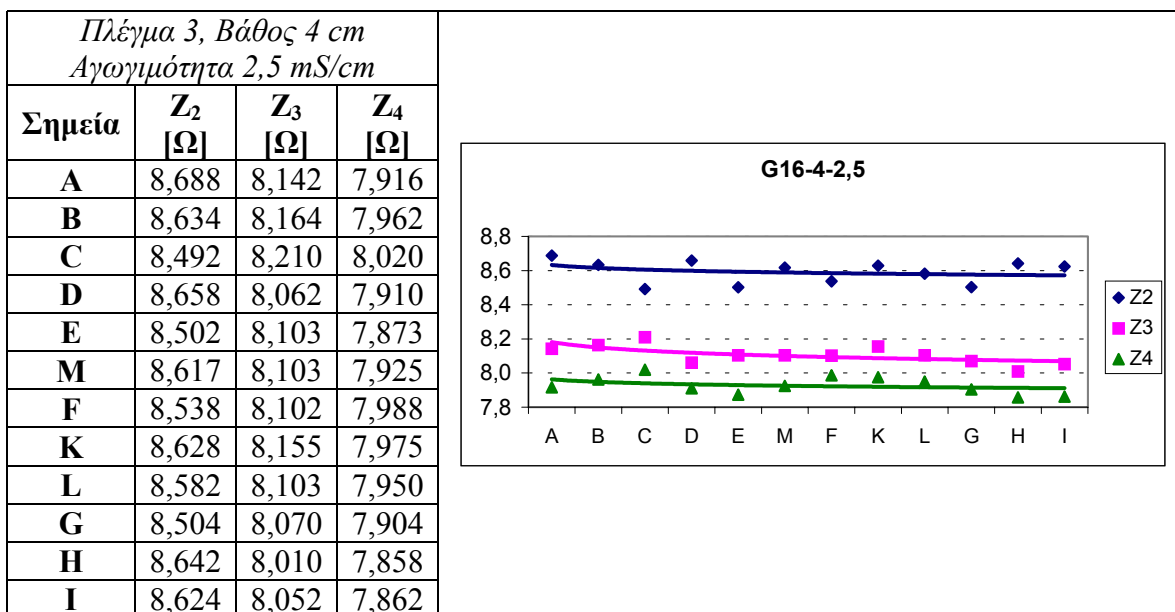


Σχήμα 3.11: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm

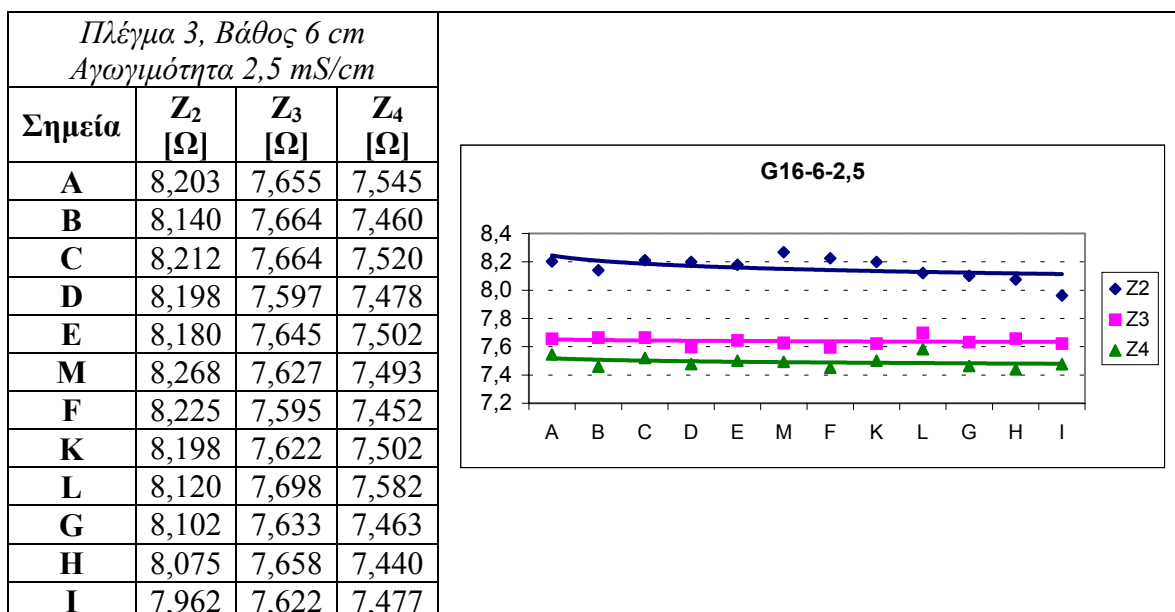


Σχήμα 3.12: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm

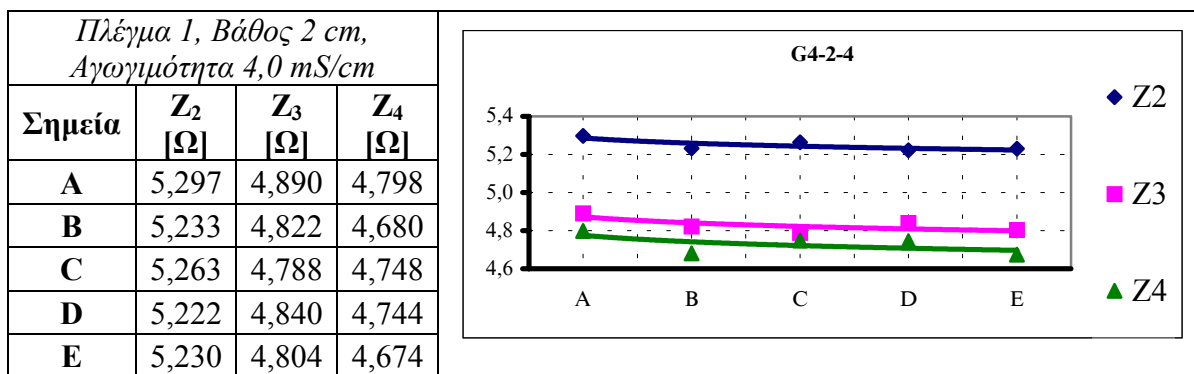




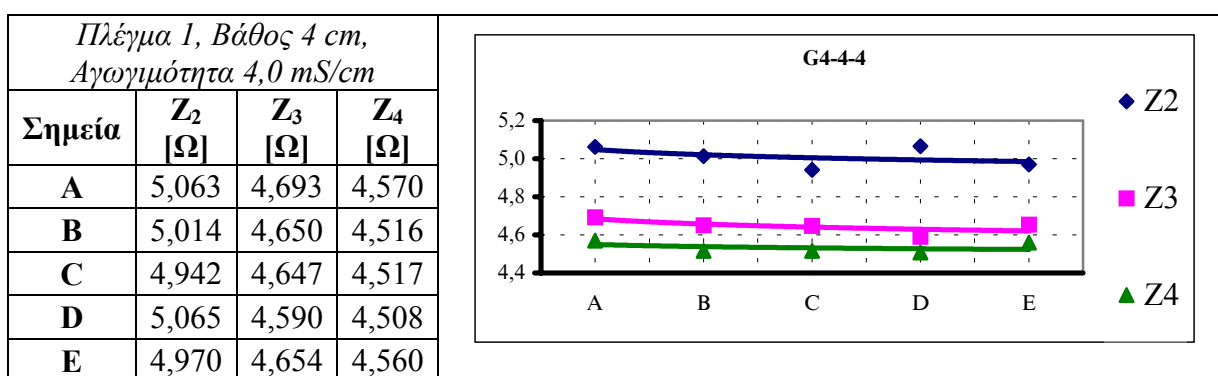
Σχήμα 3.13: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm



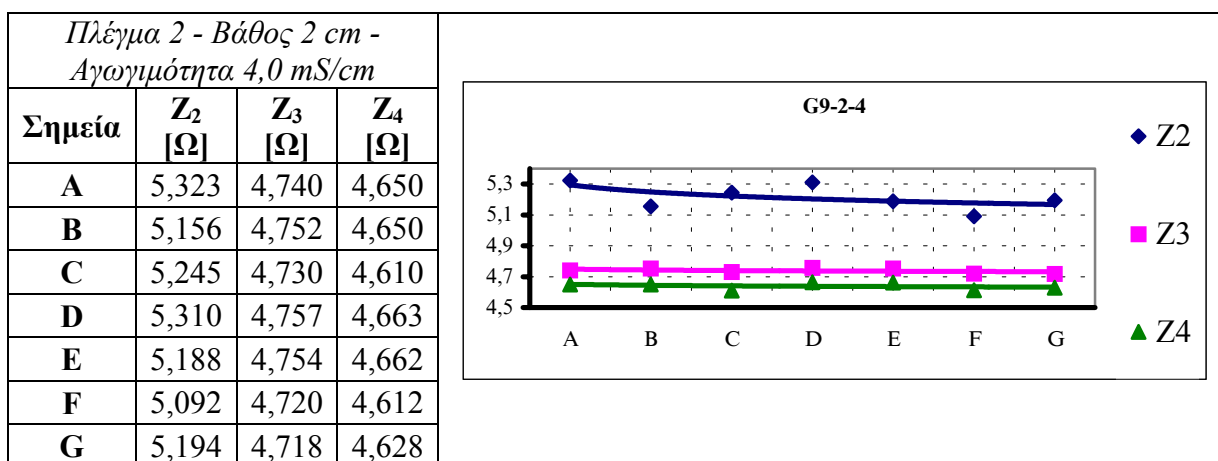
Σχήμα 3.14: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 2,5mS/cm



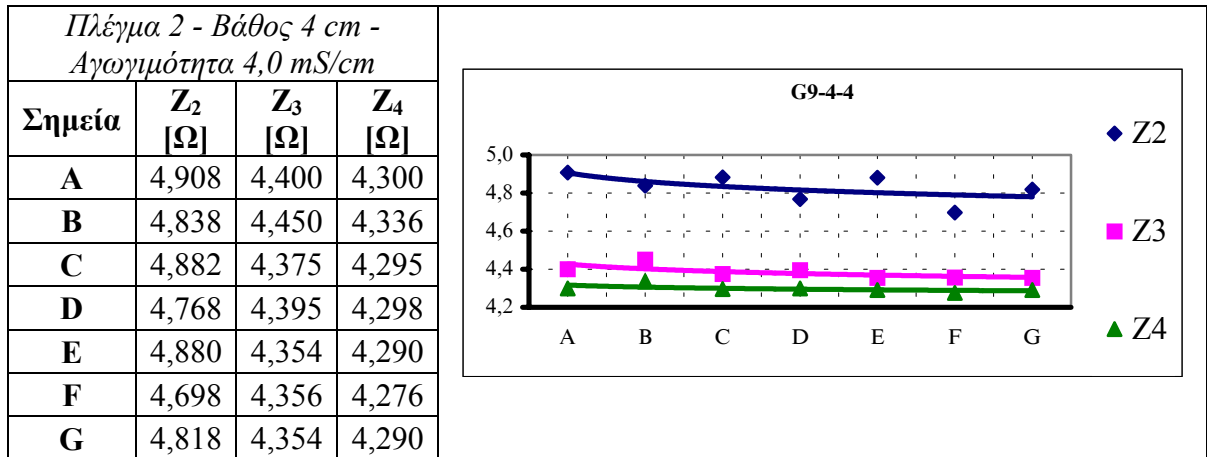
Σχήμα 3.15: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 4,0mS/cm



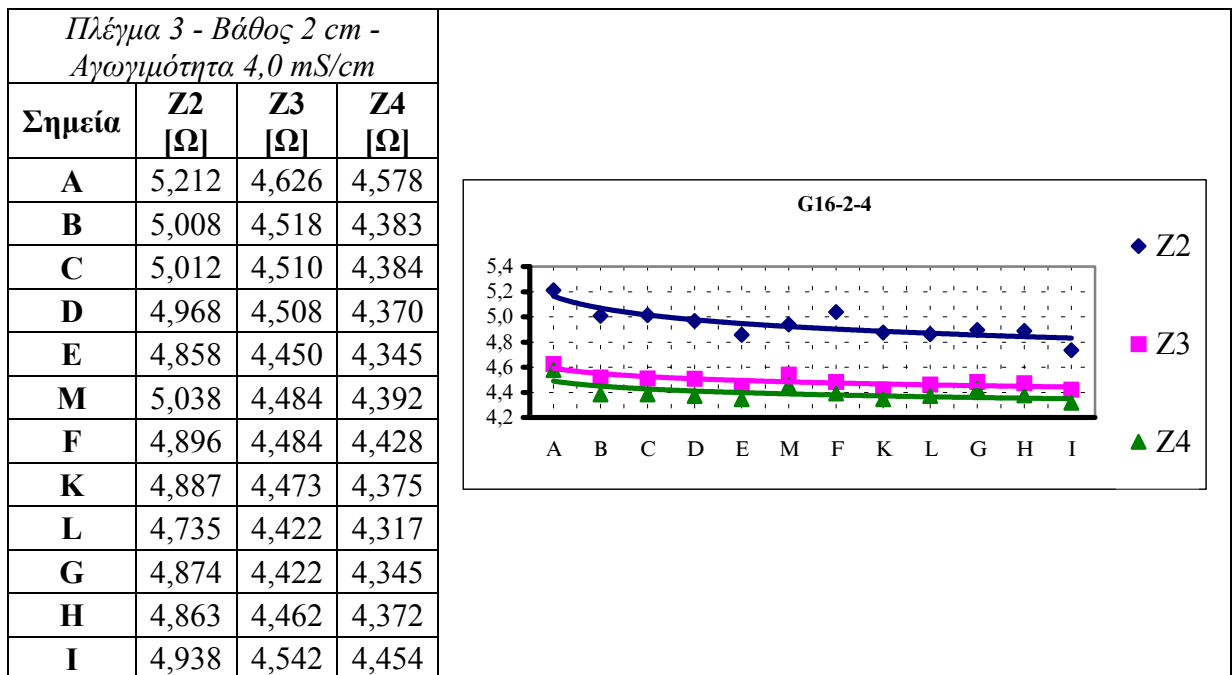
Σχήμα 3.16: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 4,0mS/cm



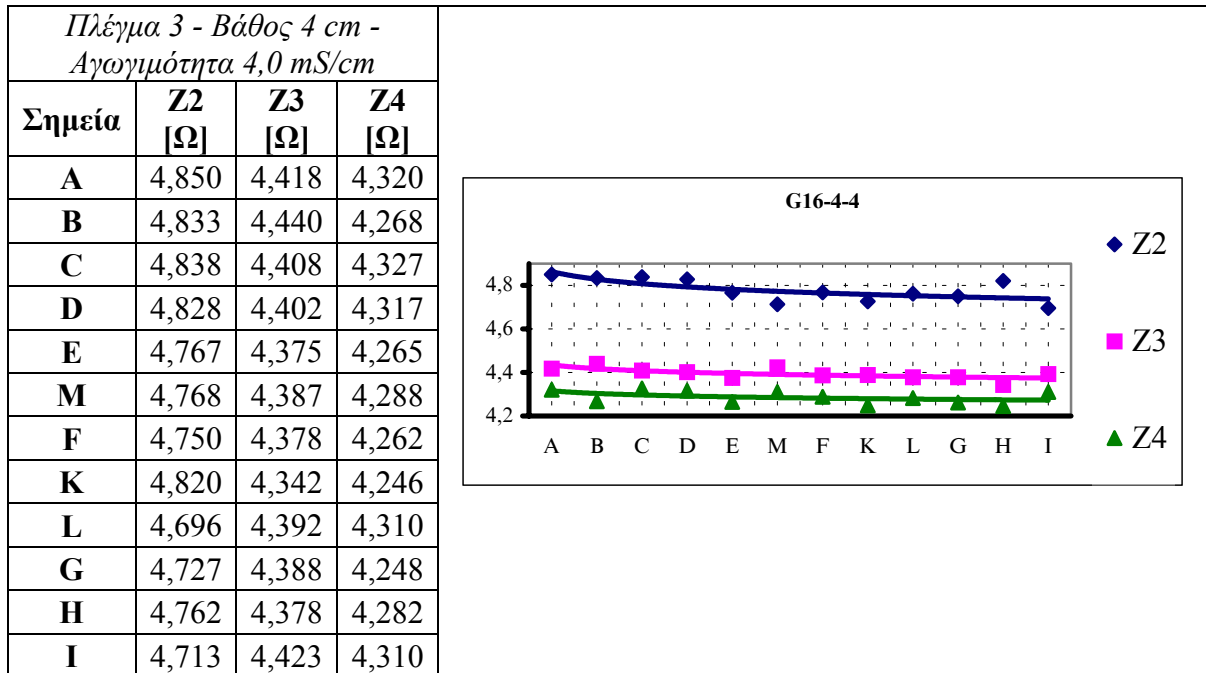
Σχήμα 3.17: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 4,0mS/cm



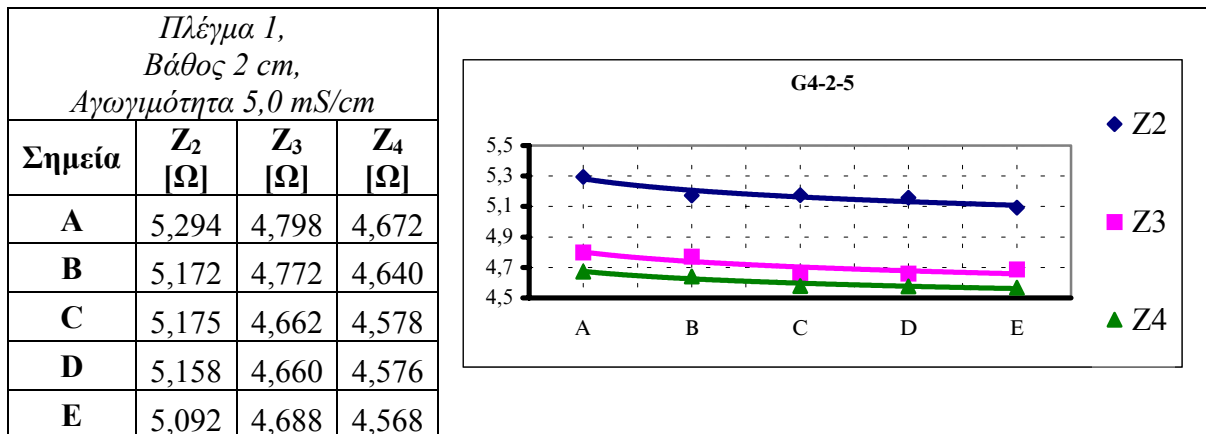
Σχήμα 3.18: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 4,0mS/cm



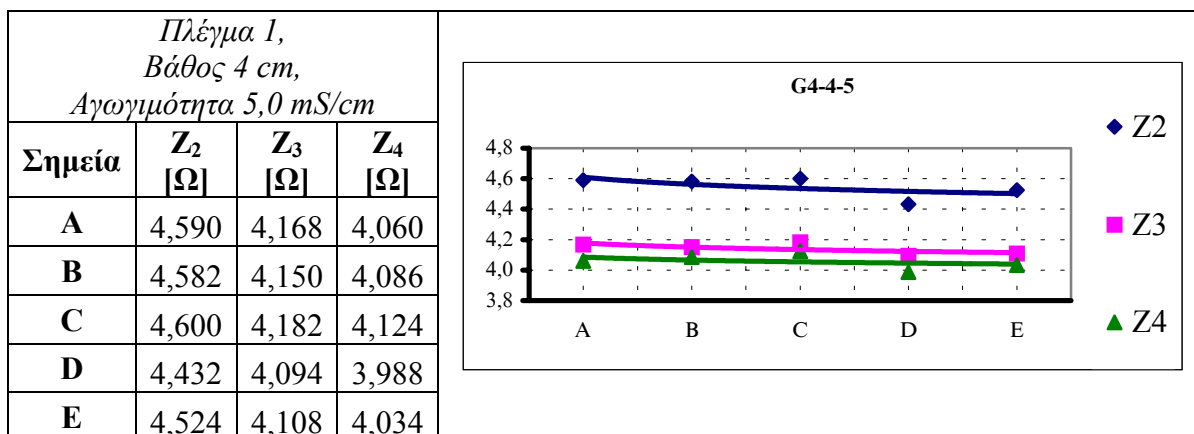
Σχήμα 3.19: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 4,0mS/cm



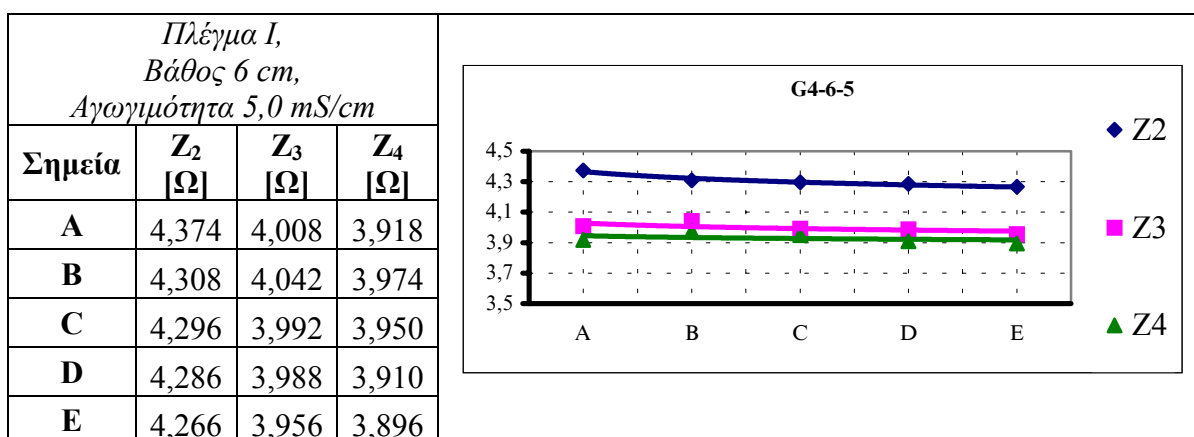
Σχήμα 3.20: Μεταβολή των παραμέτρων  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 4,0mS/cm



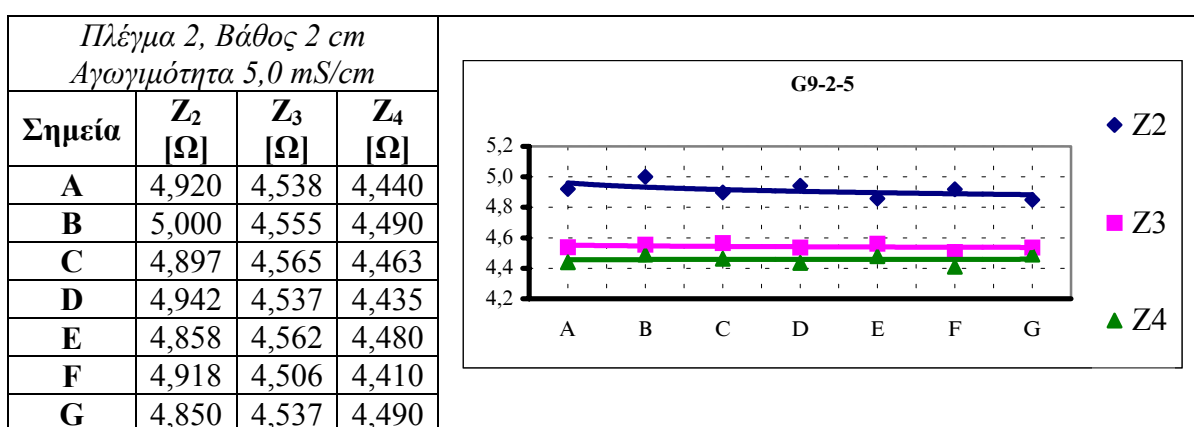
Σχήμα 3.21: Μεταβολή των παραμέτρων  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$  του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



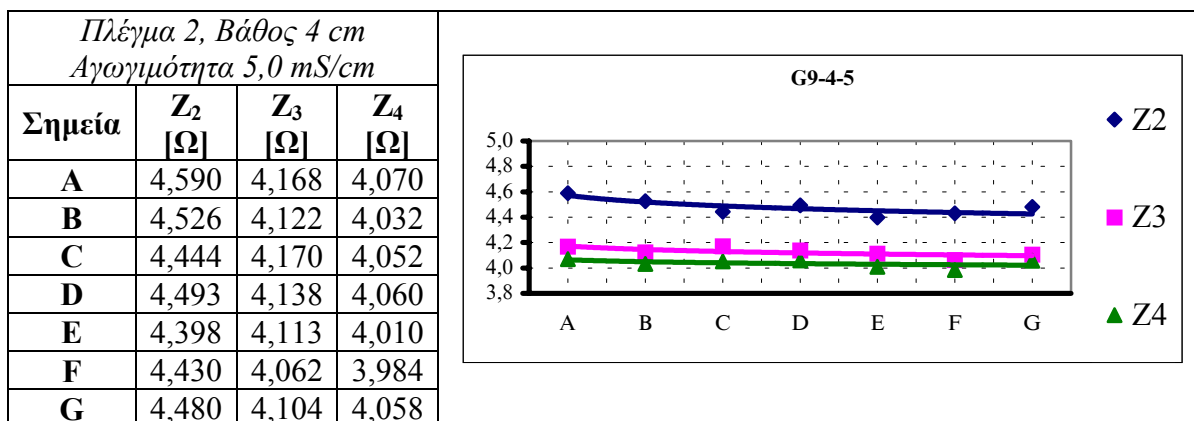
Σχήμα 3.22: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



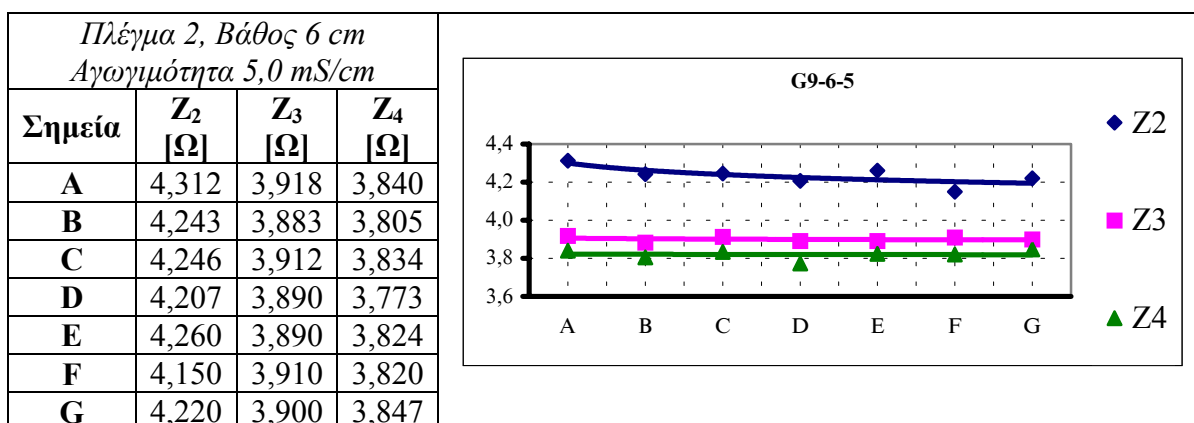
Σχήμα 3.23: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



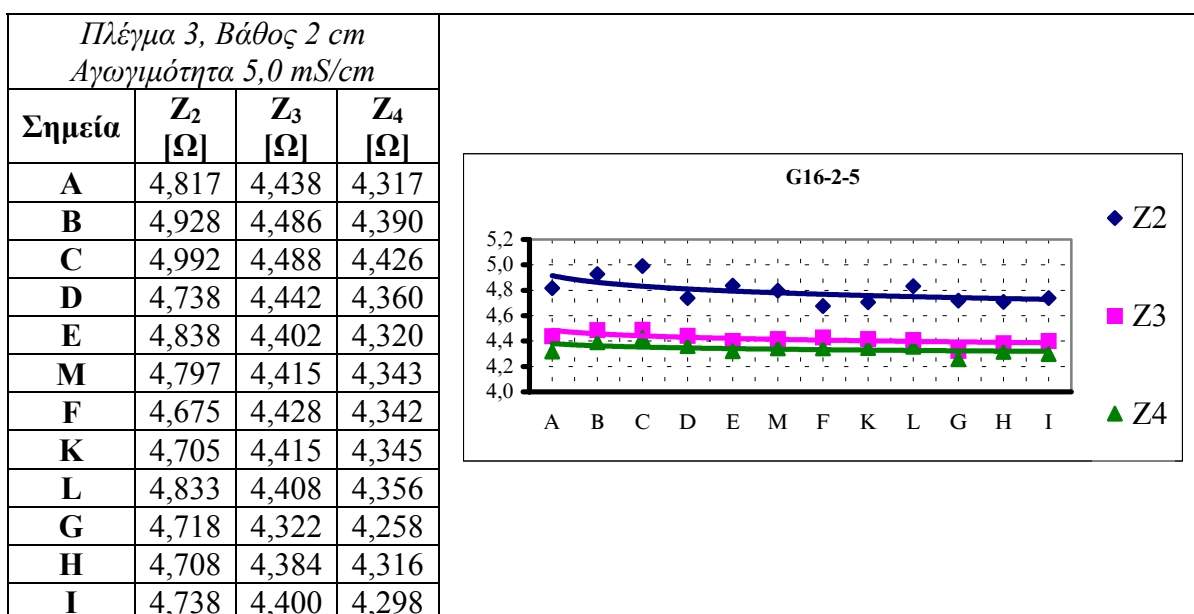
Σχήμα 3.24: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



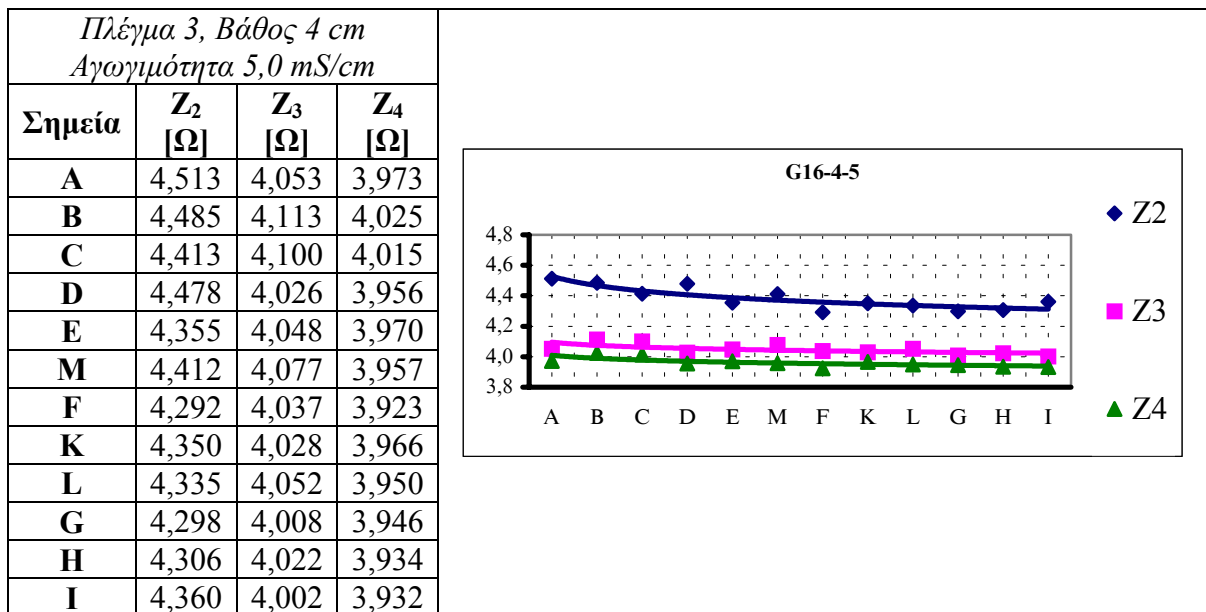
Σχήμα 3.25: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



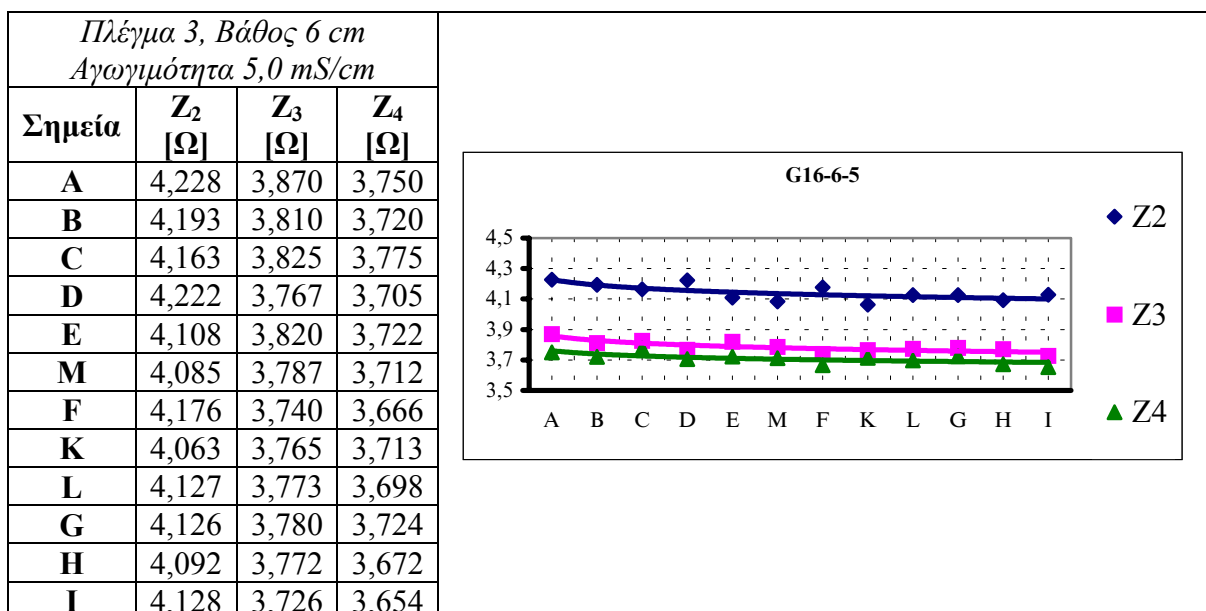
Σχήμα 3.26: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



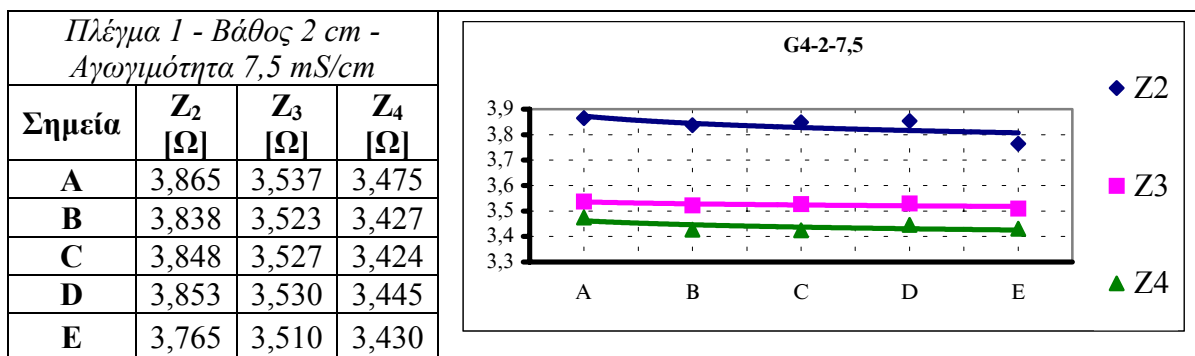
Σχήμα 3.27: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



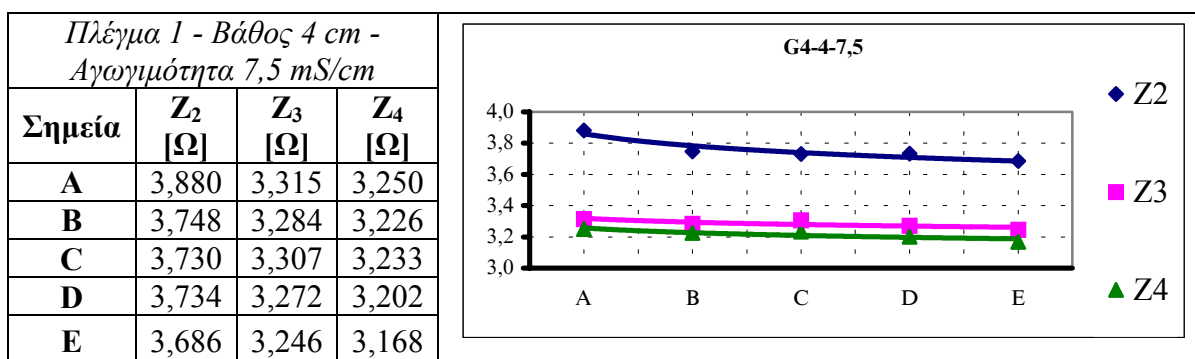
Σχήμα 3.28: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



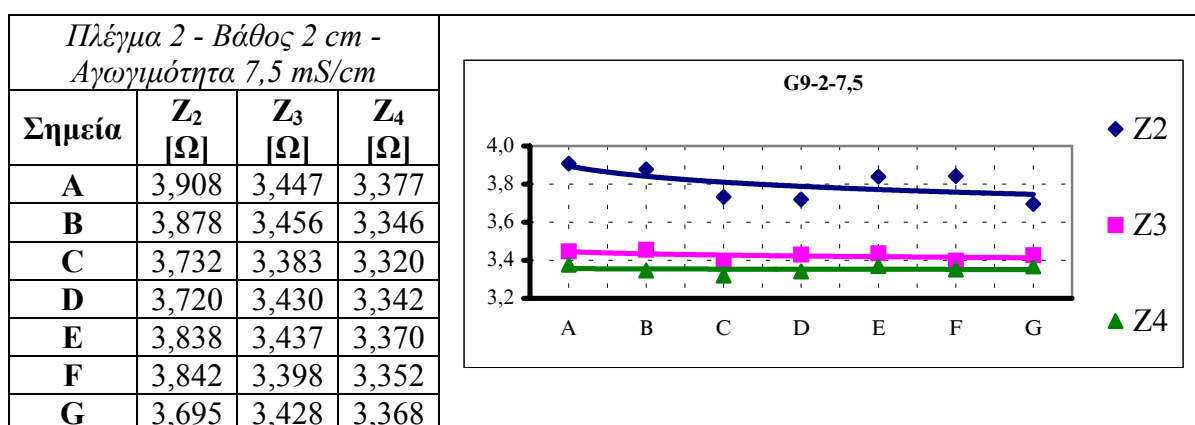
Σχήμα 3.29: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 5,0mS/cm



Σχήμα 3.30: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 7,5mS/cm

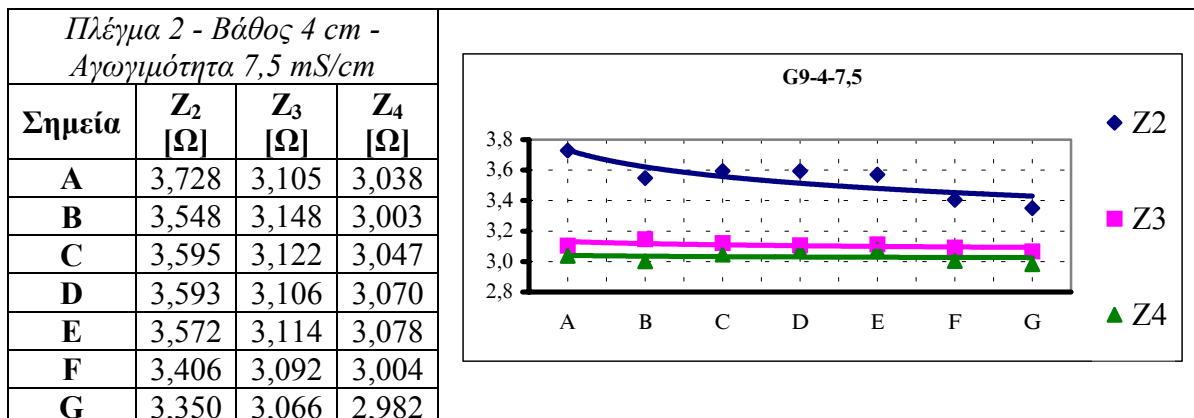


Σχήμα 3.31: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 7,5mS/cm

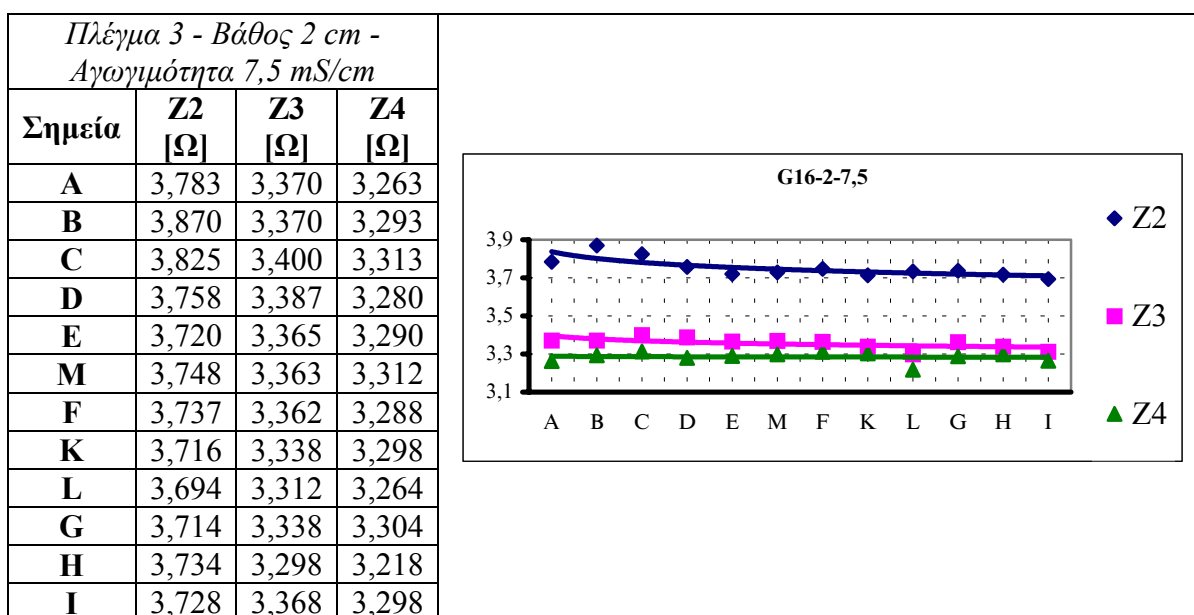


Σχήμα 3.32: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 7,5mS/cm

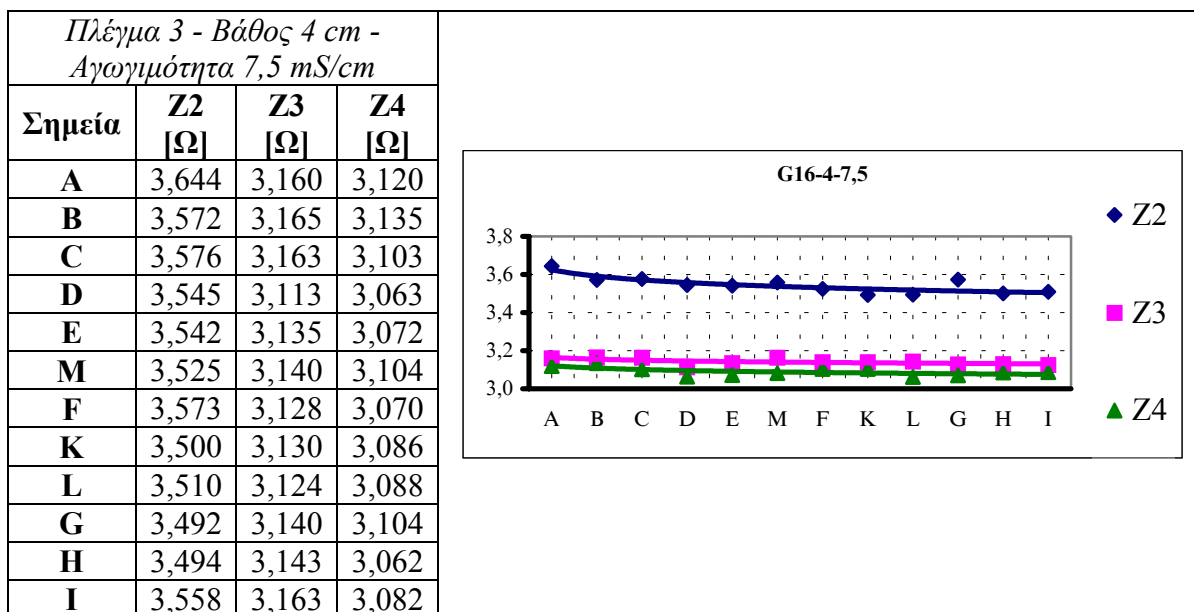




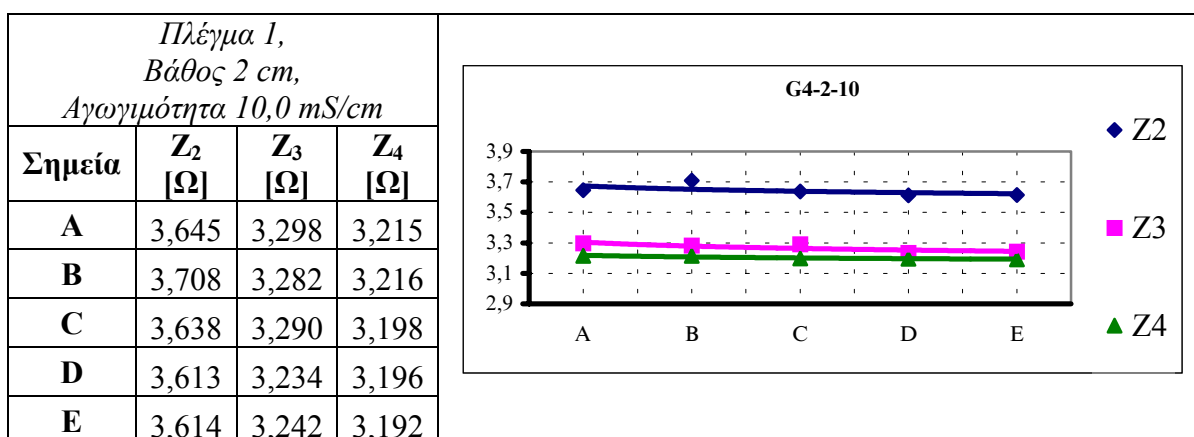
Σχήμα 3.33: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 7,5mS/cm



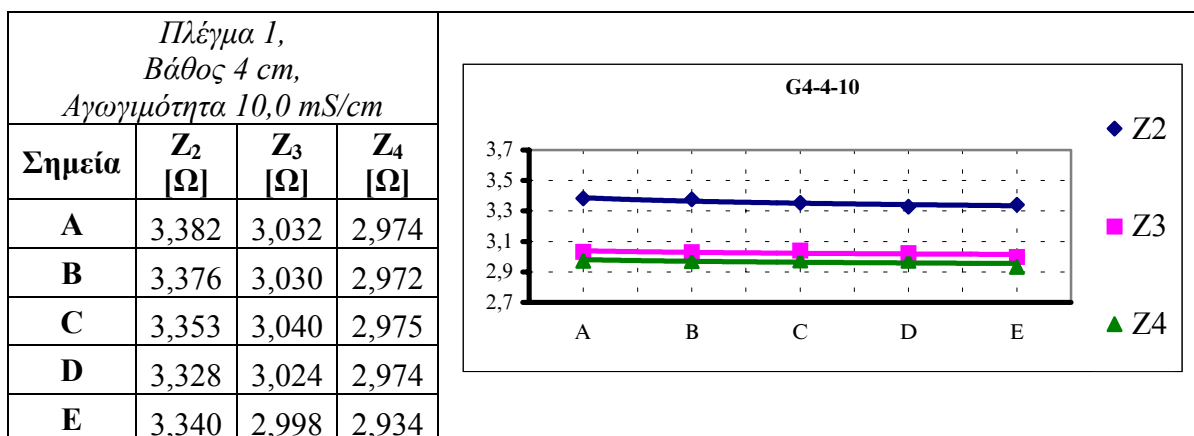
Σχήμα 3.34: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 7,5mS/cm



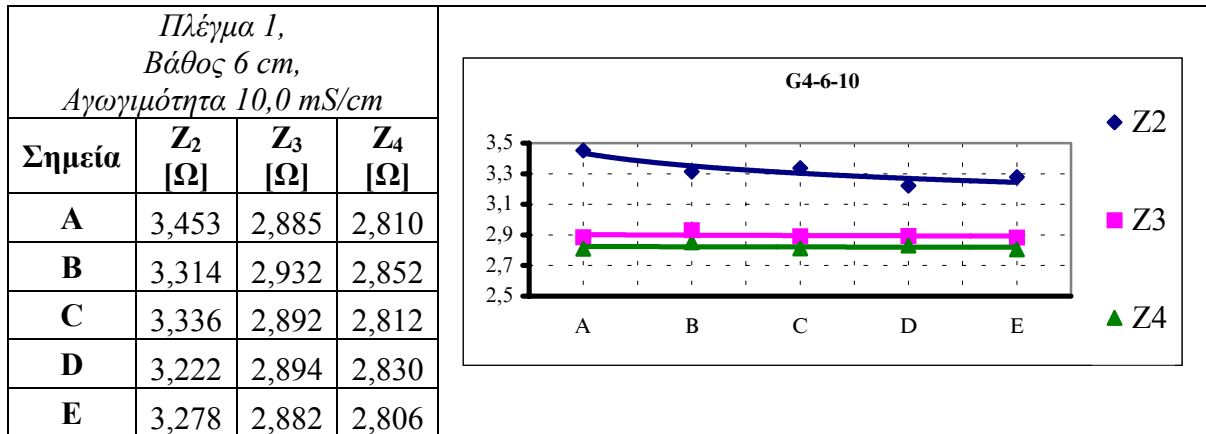
Σχήμα 3.35: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 3, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 7,5mS/cm



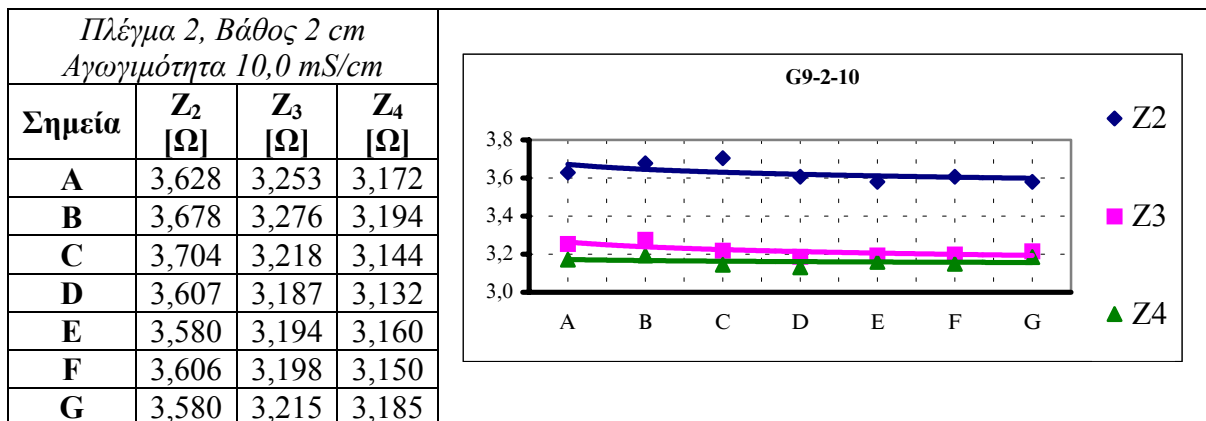
Σχήμα 3.36: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 10,0mS/cm



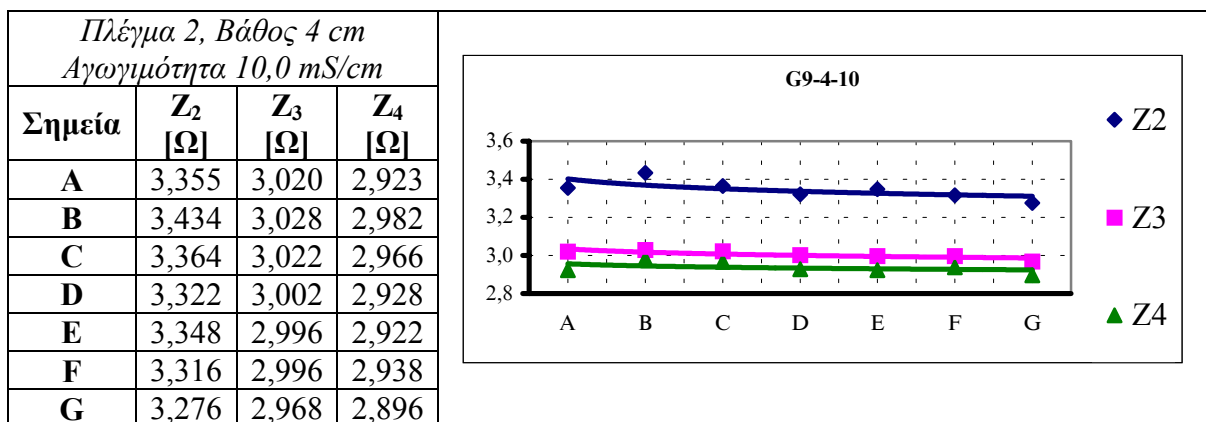
Σχήμα 3.37: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 10,0mS/cm



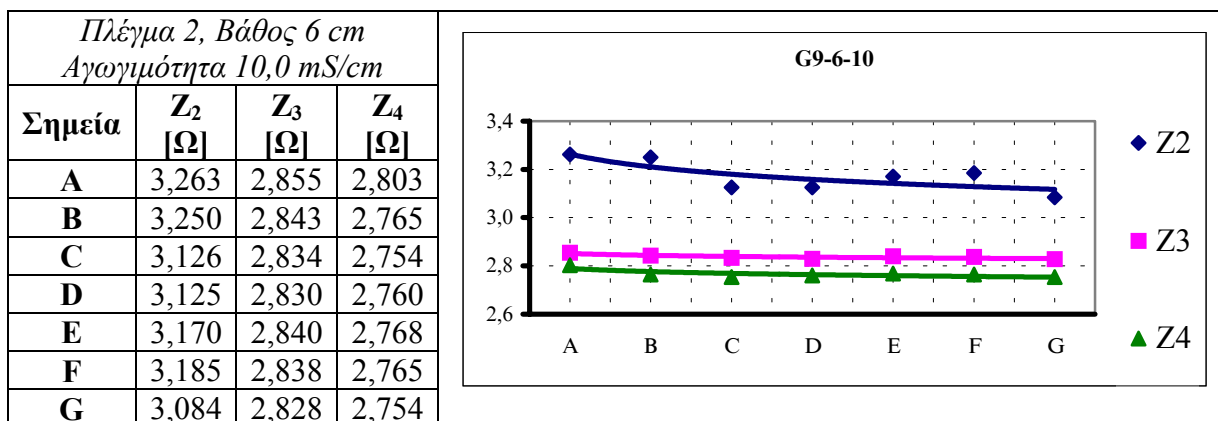
Σχήμα 3.38: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 1, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 10,0mS/cm



Σχήμα 3.39: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 2cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 10,0mS/cm



Σχήμα 3.40: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 4cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 10,0mS/cm



Σχήμα 3.41: Μεταβολή των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> του πλέγματος 2, τοποθετημένου σε βάθος 6cm, για όλα τα σημεία του πλέγματος και αγωγιμότητας ύδατος 10,0mS/cm

### 3.2.3 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα άρθρων για τη συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης, τόσο στη μεταβατική, όσο και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας [14-95]. Η πλειοψηφία τους περιορίζεται σε θεωρητική προσέγγιση του φαινομένου. Ειδικά για τη μελέτη συστημάτων γείωσης στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας (και μάλιστα υπό κρουστική διέγερση), εξ όσων γνωρίζουμε, απουσιάζει η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης εγχύοντας ρεύμα σε κάθε σημείο του πλέγματος. Το κενό αυτό, προσπαθεί να καλύψει η παρούσα εργασία με τη διεξαγωγή των πειραμάτων, που περιγράφηκαν προηγουμένως. Πειράματα που έγιναν από άλλους ερευνητές, αφορούσαν εγχύσεις ρεύματος μόνο σε δύο σημεία (στο κέντρο και στη μία γωνία του πλέγματος) σε πλέγματα υπό κλίμακα [82] ή σε πλέγματα πραγματικών διαστάσεων [76].

Από τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 3.6-3.41, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι μέσες τιμές των παραμέτρων Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub> και Z<sub>4</sub> για το πλέγμα με τα 4 τετράγωνα είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές των Z<sub>2</sub>, Z<sub>3</sub> και Z<sub>4</sub> του πλέγματος με τα 9 τετράγωνα και οι τελευταίες είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παραμέτρους του πλέγματος με τα 16 τετράγωνα. Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί τα πλέγματα με περισσότερα τετράγωνα έχουν μικρότερη αντίσταση, λόγω του μεγαλύτερου μήκους αγωγού. Στο συγκεκριμένο πείραμα μετρήθηκε η αντίσταση του πλέγματος και του νερού της δεξαμενής, μέσω των οποίων απάγεται το κρουστικό ρεύμα στη γη. Επομένως, εφ'

όσον το νερό της δεξαμενής έχει μικρότερη αντίσταση απ' ό,τι το πλέγμα, προκύπτει ότι, στην περίπτωση των πλεγμάτων με πυκνότερη διαμέριση, υπάρχουν περισσότεροι δρόμοι διαφυγής του ρεύματος και συνεπώς, η συνολική αντίσταση του συστήματος γείωσης είναι μικρότερη.

Στα σχήματα 3.6-3.41 απεικονίζεται η μεταβολή των παραμέτρων της κρουστικής σύνθετης αντίστασης συναρτήσει του σημείου έγχυσης για τα διάφορα πλέγματα, βάθη τοποθέτησης και αγωγιμότητες. Από τα παραπάνω σχήματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μέσες τιμές των παραμέτρων της κρουστικής αντίστασης είναι μεγαλύτερες, όταν η έγχυση γίνεται στα εξωτερικά σημεία, σε σχέση με τις τιμές που παρατηρούνται όταν η έγχυση γίνεται στα εσωτερικά σημεία του πλέγματος. Η διαπίστωση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τα πειράματα άλλων ερευνητών [76, 79, 82].

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από την μελέτη των σχημάτων 3.6-3.41 είναι ότι η μορφή της μεταβολής των παραμέτρων  $Z_2$ ,  $Z_3$  και  $Z_4$  είναι παρόμοια. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην απαιτείται η χρήση παλμογράφου για τον υπολογισμό όλων των παραμέτρων, αλλά με τη βοήθεια οργάνων μεγίστου να υπολογίζεται η παράμετρος  $Z_3$ . Έτσι, χαράσσεται μόνο η καμπύλη της μεταβολής της παραμέτρου  $Z_3$  και εκτιμώνται οι άλλες παράμετροι. Η παράμετρος  $Z_3$  παίρνει τιμές που είναι μεγαλύτερες από την παράμετρο  $Z_4$  κατά 1-3%. Η παράμετρος  $Z_2$  παίρνει τιμές που είναι μεγαλύτερες από την παράμετρο  $Z_3$  κατά 6-12%. Η παράμετρος  $Z_2$  παίρνει τιμές που είναι μεγαλύτερες κατά 55-100% της αντίστασης μόνιμου καταστάσεως.

Η αύξηση του βάθους που τοποθετείται το πλέγμα γείωσης, καθώς και η αύξηση του μήκους των αγωγών του πλέγματος (πλέγμα με περισσότερους βρόχους) έχουν ως αποτέλεσμα όχι μόνο τη μείωση της μόνιμης αντίστασης γείωσης, αλλά και των παραμέτρων της μεταβατικής αντίστασης.

Επομένως, τα πειράματα που έγιναν, επιτρέπουν τη βελτίωση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός συστήματος γείωσης, επιλέγοντας το κατάλληλο σημείο σύνδεσης του "αγωγού καθόδου" στο πλέγμα γείωσης, βελτίωση η οποία, προφανώς, επιτυγχάνεται, όταν μειώνεται η μεταβατική αντίσταση γείωσης του πλέγματος. Επομένως, οι "αγωγοί καθόδου" θα πρέπει να συνδέονται στα εσωτερικά σημεία του πλέγματος, όσο γίνεται πλησιέστερα στο γεωμετρικό του κέντρο.

### **3.3 Πειράματα σε πραγματικά συστήματα γείωσης**

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που έγιναν σε πραγματικά συστήματα γείωσης χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που παρουσιάστηκε στην §2.2.2 και στο Παράρτημα Π2. Τα πειράματα διεξήχθησαν στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, στην Πανεπιστημιούπολη Ζωγράφου και στο κηπάριο της οδού Τοσίτσα ανάμεσα στο Πολυτεχνείο και στο Μουσείο, στην Αθήνα.

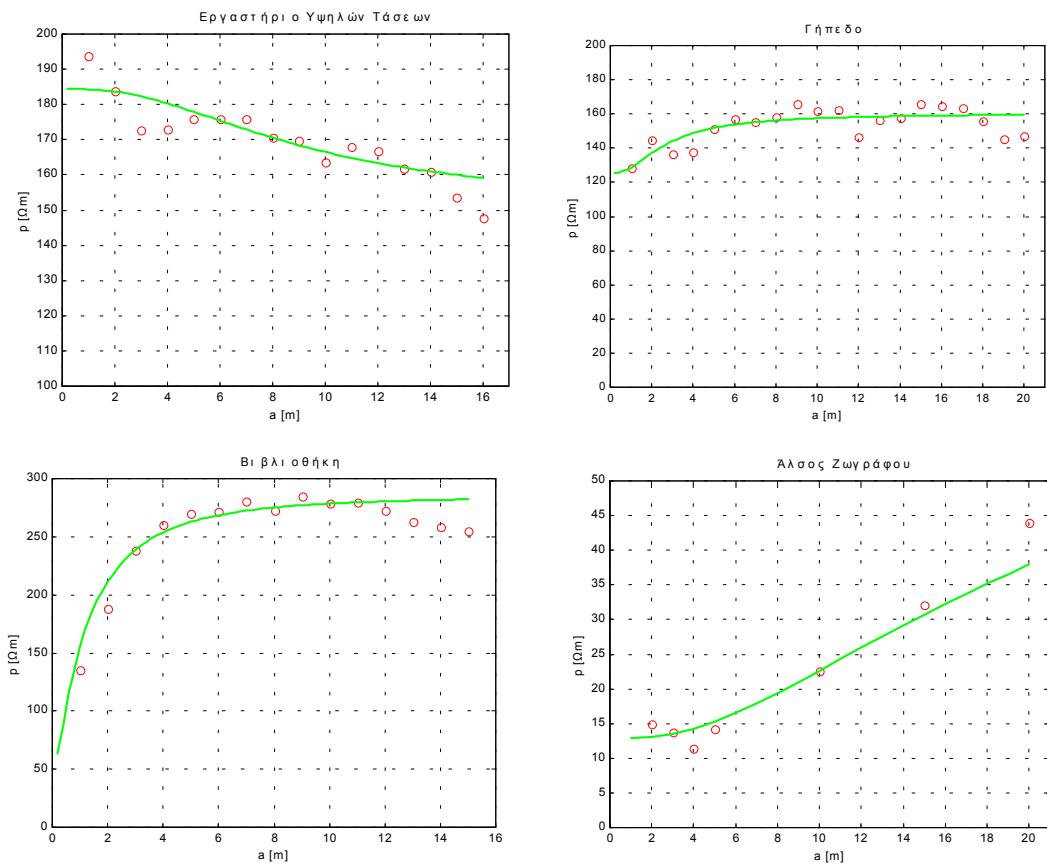
#### **3.3.1 Εύρεση της ειδικής αντίστασης του εδάφους**

Ο σκοπός του πρώτου πειράματος ήταν η μέτρηση της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους και η καταγραφή της μεταβολής της μέσα στο χρονικό διάστημα ενός έτους. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκαν τα γειωσόμετρα της PANTEC μοντέλο MIT 904 και της LEM μοντέλο SATURN GEO-X. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες καταγράφηκαν με την βοήθεια του υγρομέτρου-θερμομέτρου Dostmann H270.

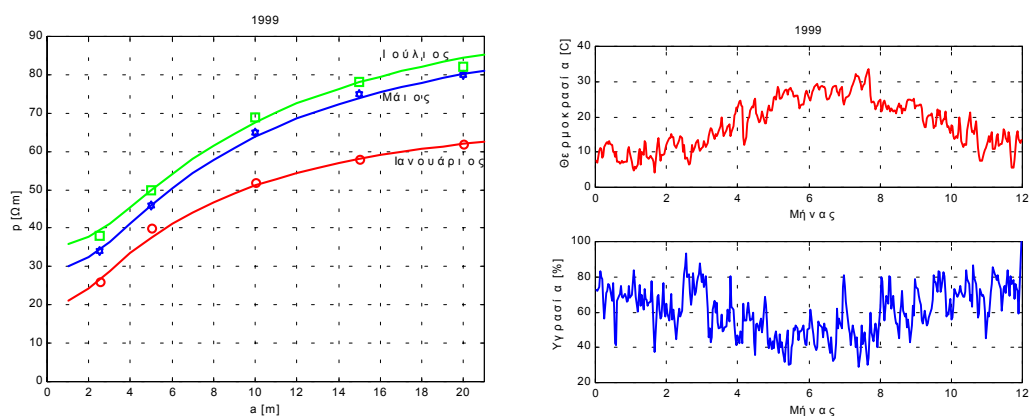
Τα πειράματα διεξήχθησαν σε πέντε διαφορετικά κηπάρια που βρίσκονται εντός των Αθηνών. Όλοι οι χώροι που επιλέχθηκαν είχαν εύκολη πρόσβαση και δυνατότητα να διεξαχθούν μετρήσεις σε μία ευθεία γραμμή μήκους τουλάχιστον 60m. Οι τρεις από τους χώρους μετρήσεων βρίσκονται εντός της Πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου. Ο πρώτος χώρος είναι το κηπάριο που υπάρχει πίσω από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων δίπλα στο πάρκινγκ. Ο δεύτερος χώρος βρίσκεται δίπλα στο ποδοσφαιρικό γήπεδο που υπάρχει στην έξοδο της Κοκκινοπούλου. Ο τρίτος χώρος βρίσκεται ανάμεσα στο κτήριο της βιβλιοθήκη και το δρόμο που οδηγεί στο πάρκιν πίσω από την Πρυτανεία. Ο τέταρτος χώρος είναι το κηπάριο που υπάρχει στην οδό Τοσίτσα ανάμεσα στο Πολυτεχνείο και το Μουσείο. Ο πέμπτος χώρος βρίσκεται στην Πανεπιστημιούπολη Ζωγράφου και είναι το άλσος που βρίσκεται απέναντι από την φοιτητική εστία των Ιλισίων.

Για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Wenner. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετήθηκαν σε μία νοητή ευθεία γραμμή και σε βάθος 40cm. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν προκειμένου να καταγραφούν η δομή του εδάφους και οι ανομοιογένειες που υπήρχαν σε αυτό. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων ήταν  $a$  και μεταβαλλόταν με

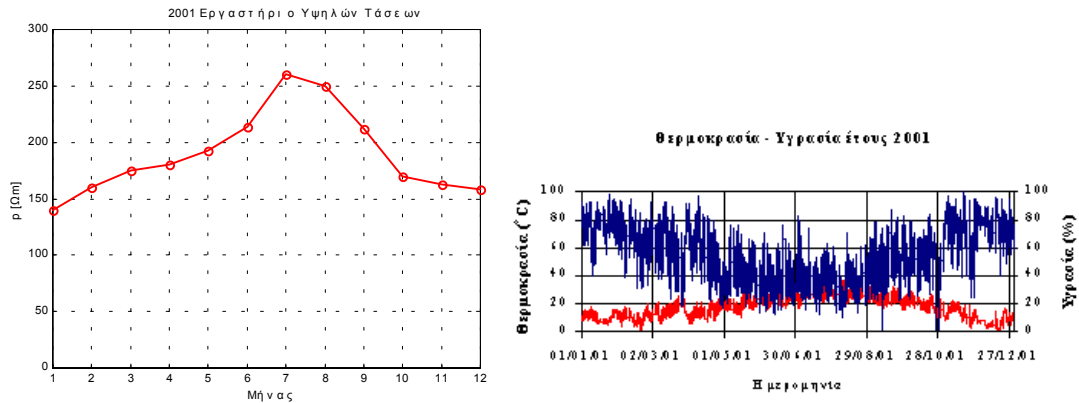
διακριτά βήματα. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.1 τα αποτελέσματα που προκύπτουν, για τους ανωτέρω χώρους, φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 3.42: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης των βοηθητικών ηλεκτροδίων (Μάιος 2002)



Σχήμα 3.43: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους (στο χώρο του κηπαρίου της Τοσίτσα) κατά τη διάρκεια του έτους 1999. Μεταβολή της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας κατά το έτος 1999



Σχήμα 3.44: Μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους (στο κηπάριο πίσω από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων) κατά τη διάρκεια του έτους 2001 για απόσταση βοηθητικών ηλεκτροδίων  $a=10m$ . Μεταβολή της ημερήσιας θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας κατά το έτος 2001

Από τις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 3.42 φαίνεται η πολυστρωματική δομή του εδάφους. Παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση των μετρήσεων συναρτήσει της απόστασης τοποθέτησης των ηλεκτροδίων είναι φθίνουσα για τις μετρήσεις έξω από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων. Αυτό φανερώνει ότι υπάρχει διστρωματική διαμόρφωση του εδάφους με το πάνω στρώμα να έχει υψηλότερη τιμή ειδικής αντίστασης από το κάτω [4, 5, 109]. Διστρωματική, τουλάχιστον, μορφή φαίνεται να έχουν και οι υπόλοιποι χώροι στους οποίους διεξήχθησαν μετρήσεις, μόνο που η μορφή της γραφικής παράστασης είναι αύξουσα. Επομένως, σε αυτές τις περιπτώσεις το πάνω στρώμα αποτελείται από χώμα που έχει χαμηλότερη τιμή ειδικής αντίστασης από την τιμή του από κάτω στρώματος. Στο επόμενο κεφάλαιο, με την βοήθεια του γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε [209-212], αναλύεται η δομή του εδάφους και υπολογίζονται οι παράμετροί της.

Η επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας παρουσιάζεται στα σχήματα 3.43 και 3.44. Οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας που παρουσιάζονται στα σχήματα 3.43 και 3.44 έχουν γίνει από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, του Τομέα Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Είναι εμφανές ότι η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερες τιμές τους καλοκαιρινούς μήνες σε σχέση με τους



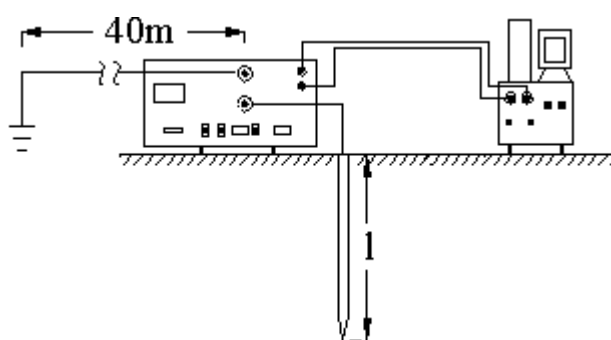
χειμερινούς. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή βροχόπτωση ξηραίνουν το επάνω, τουλάχιστον, στρώμα του εδάφους.

Ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1,5-3 που έχουν καταγραφεί μέσα σε ένα χρονικό διάστημα πέντε ετών (1998-2002).

Παρατηρείται ότι η ετήσια μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης του εδάφους έχει ανάλογη μορφή με τη μεταβολή της θερμοκρασίας και είναι αντιστρόφως ανάλογη της μεταβολής της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια του έτους (σχήμα 3.44).

### 3.3.2 Εύρεση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης κατακόρυφης ράβδου

Σκοπός του πειράματος, που περιγράφεται στη συνέχεια, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του ευρύτατα χρησιμοποιούμενου συστήματος γείωσης, δηλαδή της κατακόρυφης ράβδου, όταν τίθεται υπό κρουστική διέγερση. Η σημασία της γνώσης της προαναφερόμενης συμπεριφοράς είναι προφανής, εφόσον αυτή καθορίζει κατά κύριο λόγο τις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις που οφείλονται είτε σε κεραυνικά πλήγματα, είτε σε λανθασμένους χειρισμούς. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διάφορα συστήματα μεταβάλλοντας το μήκος του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 3.45: Χωροταξικό διάγραμμα διάταξης μετρήσεων

Η διάταξη των πειραμάτων, που έγιναν στην Αθήνα (στο κηπάριο της οδού Τοσίτσα), περιλαμβάνει τη φορητή κρουστική γεννήτρια (PC6-288), το μετρητικό σύστημα, τα ηλεκτρόδια γείωσης και τα απαραίτητα για τις συνδέσεις καλώδια και αγωγούς. Το μετρητικό σύστημα με τη σειρά του αποτελείται από το σύστημα

καταγραφής των κυματομορφών τάσεως και ρεύματος (AID-1) καθώς και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποθήκευσή τους και την περαιτέρω επεξεργασία τους. Στο σχήμα 3.45 παρουσιάζεται η χωροταξία του μετρητικού εξοπλισμού.

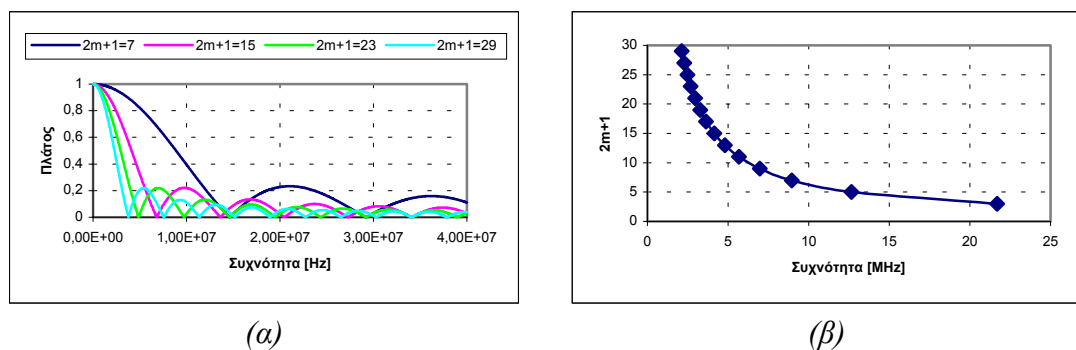
Για την καταγραφή της κρουστικής τάσης ακολουθήθηκε η μέθοδος "self triggering". Σύμφωνα με αυτή, ο ελεγκτής μετρά συνεχώς την τάση στα άκρα του καταμεριστή και μόλις εμφανιστεί διαφορά δυναμικού μεγαλύτερη από μία προεπιλεγμένη από τον χειριστή τιμή, σταματά να δειγματοληπτεί. Βέβαια, κατά αυτόν τον τρόπο υπάρχει κίνδυνος να χαθεί η αρχή της κυματομορφής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε μία "έξυπνη" κάρτα δειγματοληψίας, η οποία είναι εφοδιασμένη με δύο μονάδες μνήμης των 16KB. Από τη στιγμή που τίθεται η κάρτα σε λειτουργία, η κυματομορφή καταχωρείται στα πρώτα 16KB μνήμης. Όταν γεμίσει η μνήμη, τότε κάθε νέο δεδομένο ολισθαίνει τα προηγούμενα δεδομένα της μνήμης αριστερά. Έτσι, έχουμε πάντα την εικόνα της κυματομορφής για χρόνο που αντιστοιχεί σε δείγματα των 16KB. Όταν αναγνωρισθεί μεταβολή τάσης μεγαλύτερη της επιλεγμένης τιμής, τότε σταματά η αποθήκευση των δεδομένων στην πρώτη μονάδα μνήμης και όλα τα δεδομένα οδηγούνται στη δεύτερη μονάδα μνήμης. Με αυτό τον τρόπο περιέχεται ολόκληρη η κυματομορφή της κρουστικής τάσης σε δύο μονάδες μνήμης των 16KB. Από τη στιγμή που θα ολοκληρωθεί η δειγματοληψία από τον ελεγκτή, τα δεδομένα μπορούν να αποσταλούν στον Η/Υ αμέσως μόλις ζητηθούν. Τελικά, ολόκληρη η κυματομορφή περνά, σε ψηφιακή πλέον μορφή, στη μνήμη του Η/Υ για περαιτέρω επεξεργασία [199, 200].

Η επεξεργασία των δεδομένων της κυματομορφής έχει σκοπό την εξομάλυνση του σήματος (smoothing). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, γίνεται η παραδοχή ότι δεν υπάρχουν σημεία ασυνέχειας του σήματος και επομένως η τεταγμένη ενός σημείου, η οποία θεωρείται ότι αποκλίνει από την αναμενόμενη τιμή, μπορεί να προσδιοριστεί από ένα σύνολο γειτονικών σημείων. Η παραδοχή της μη ύπαρξης σημείου ασυνέχειας του σήματος είναι αποδεκτή για τις κρουστικές τάσεις κάθε μορφής. Αυτό γίνεται με την προσθήκη ίσου αριθμού προηγούμενων και επομένων σημείων (τεταγμένων) στην τεταγμένη  $y_k$  του ζητούμενου σημείου και την εξαγωγή του μέσου όρου [213]:

$$y_k^* = \frac{1}{2 \cdot m + 1} \cdot \sum_{n=k-m}^{k+m} y_n$$

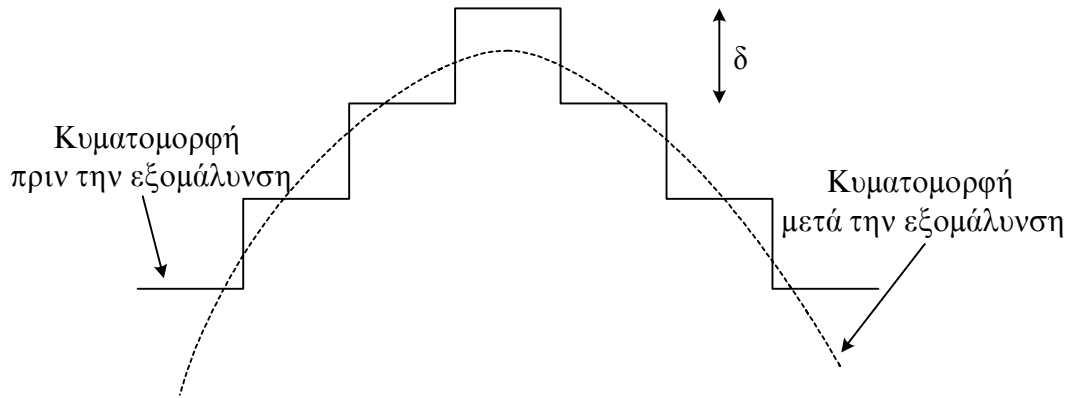
όπου  $2m+1$  ο συνολικός αριθμός των σημείων, που συνεισφέρουν στον προσδιορισμό της τιμής του  $y_k^*$  ( $m$  προηγούμενα +  $m$  επόμενα + σημείο αναφοράς).

Η εξομάλυνση ενός σήματος ισοδυναμεί με την εφαρμογή ενός βαθυπερατού φίλτρου, του οποίου η συχνότητα αποκοπής είναι συνάρτηση του αριθμού των σημείων ( $2m+1$ ) που συμμετέχουν στον υπολογισμό της κάθε τεταγμένης της εξομαλυμένης κυματομορφής. Η χαρακτηριστική συχνότητα του ισοδύναμου βαθυπερατού φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 3.46.α, ενώ στο σχήμα 3.46.β παρουσιάζεται η συχνότητα αποκοπής (-3db) του συγκεκριμένου φίλτρου εξομάλυνσης συναρτήσει του αριθμού δειγμάτων [213].



Σχήμα 3.46: (α) Χαρακτηριστική συχνότητα ισοδύναμου βαθυπερατού φίλτρου εξομάλυνσης με παράμετρο το άθροισμα  $2m+1$ . (β) Συχνότητα αποκοπής (-3db) του ισοδύναμου βαθυπερατού φίλτρου εξομάλυνσης συναρτήσει του αριθμού δειγμάτων .

Το αποτέλεσμα της μεθόδου εξομάλυνσης (smoothing) φαίνεται στο σχήμα 3.47, όπου η κβαντισμένη κυματομορφή (κυματομορφή εισόδου), που λαμβάνεται από το 8-bit σύστημα μέτρησης με μέγεθος βήματος  $\delta=57,0V$  ή  $7,88A$  για  $I>100A$  και  $0,078A$  για  $I<100A$ , υφίσταται τη σχετική επεξεργασία για να μετατραπεί στην ομαλοποιημένη κυματομορφή εξόδου.



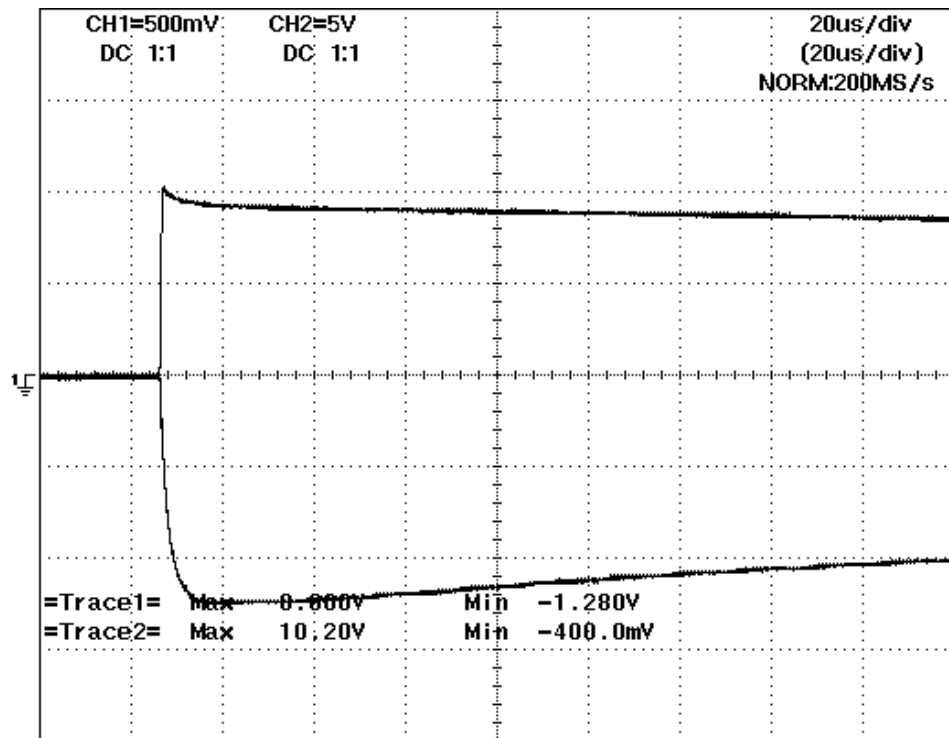
Σχήμα 3.47: Παράδειγμα εξομάλυνσης κυματομορφής αποθηκευμένης με ψηφιακό τρόπο

Η πειραματική διάταξη, που χρησιμοποιήθηκε στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, περιλαμβάνει τη φορητή κρουστική γεννήτρια (EMC 2004), τον παλμογράφο (DL 1540), τα ηλεκτρόδια γείωσης και τους απαραίτητους, για τις συνδέσεις, αγωγούς και ομοαξονικά καλώδια. Ο τρόπος συνδεσμολογίας είναι ίδιος με αυτόν του προηγούμενου πειράματος, που παρουσιάστηκε στο σχήμα 3.45. Προφανώς, και η μεθοδολογία, που ακολουθήθηκε για την συλλογή και την επεξεργασία των μετρήσεων, είναι ανάλογη με αυτή των πειραμάτων στο κηπάριο της Τοσίτσα.

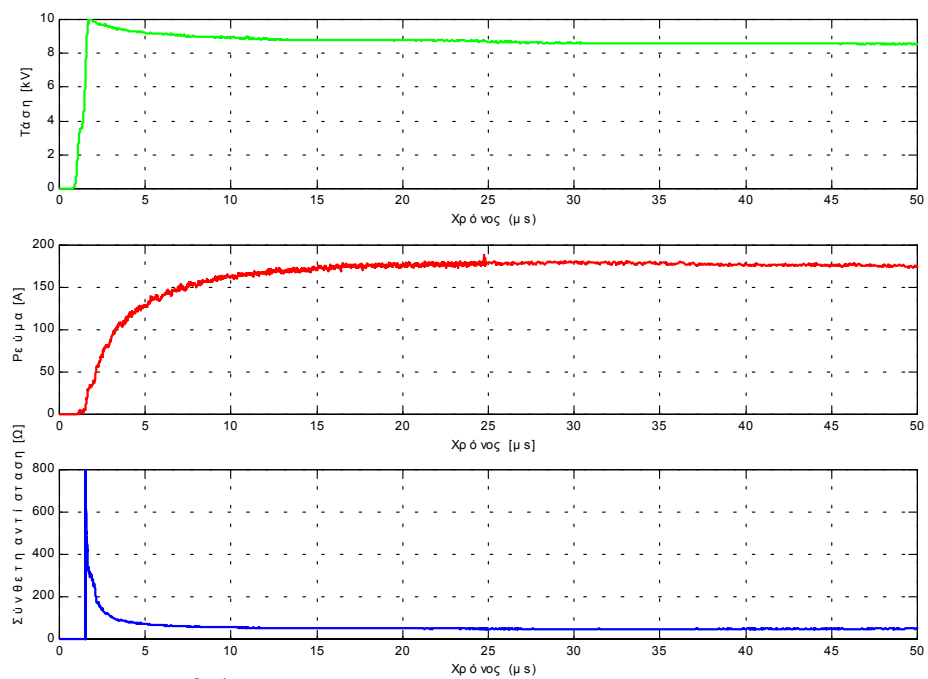
Στα σχήμα 3.48 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε ένα σύστημα γείωσης που αποτελείται από μία κατακόρυφη ράβδο διαμέτρου 20mm και μήκους 100cm. Η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος είναι (για λόγους απεικόνισης και μόνο) η αρνητική κυματομορφή, ενώ η διαφορά δυναμικού ως προς την άπειρη γη είναι η θετική κυματομορφή. Στο σχήμα 3.49 παρουσιάζονται: α) η κυματομορφή της τάσεως (επάνω πράσινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη ο λόγος του ωμικού καταμεριστή, β) η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος (μεσαία κόκκινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη η τιμή της αντίστασης μέτρησης προκειμένου να μετατραπεί η τάση του πρώτου καναλιού του παλμογραφήματος σε ρεύμα και γ) η κυματομορφή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (κάτω μπλε καμπύλη), που προέκυψε με εφαρμογή της εξίσωσης 3.1.

Η μορφή της κυματομορφής του ρεύματος που εγχυόταν ήταν  $8/350\mu\text{s}\pm 20\%$ . Η κυματομορφή του ρεύματος σαφέστατα δεν είναι της μορφής  $8/20\mu\text{s}$  που δίνουν και οι δύο κρουστικές γεννήτριες κατά το βραχυκύκλωμα σύμφωνα με την IEC 60060-1 [203]. Η επίδραση του φορτίου (στην προκειμένη περίπτωση η αντίσταση του

συστήματος γείωσης) της γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων στη μορφή του παραγόμενου ρεύματος μελετήθηκε σε εργασία μας [214].

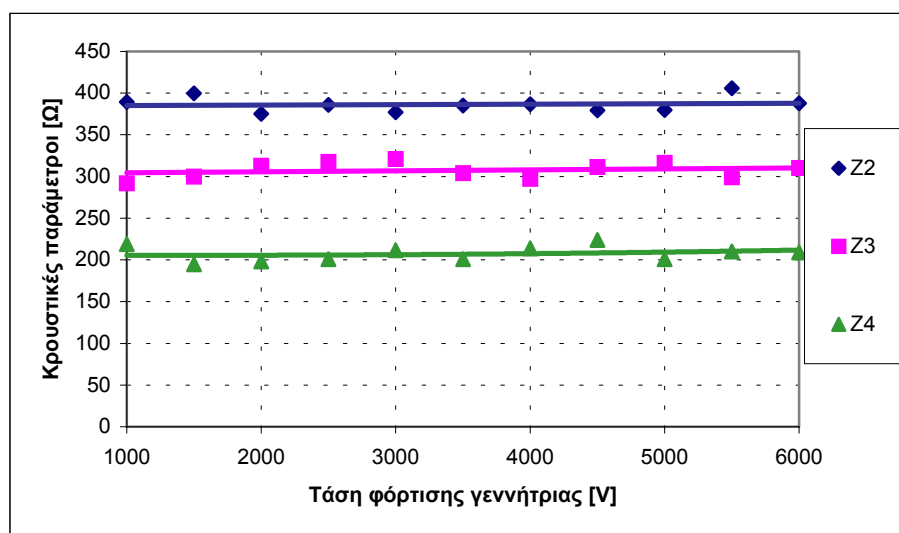


Σχήμα 3.48: Κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος και της τάσης για μία κατακόρυφη ράβδο μήκους  $1m$



Σχήμα 3.49: Μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος, της τάσης και της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για μία κατακόρυφη ράβδο μήκους  $1m$

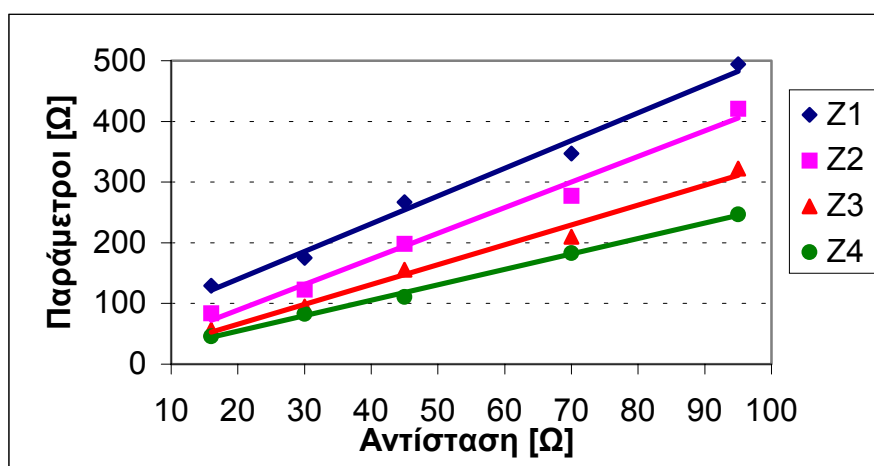
Για τη μελέτη της επίδρασης της τάσης φόρτισης της γεννήτριας στην μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης πραγματοποιήθηκαν σειρές κρούσεων με διαφορετικές τάσεις φόρτισης. Καταγράφηκε το εγχυόμενο ρεύμα και η αναπτυσσόμενη τάση. Η μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων (που υπολογίζονται με χρήση των εξισώσεων 3.3-3.5) συναρτήσει της τάσης φόρτισης της γεννήτριας PC6-288 παρουσιάζεται στο σχήμα 3.50. Παρατηρείται ότι η επίδραση της τάσεως φόρτισης στην τιμή των κρουστικών παραμέτρων είναι αμελητέα, καθώς η μεταβολή τους σε σχέση με τη μέση τιμή είναι λιγότερη από  $\pm 3,5\%$ . Αυτό είναι αναμενόμενο αφού δεν υπάρχει ιονισμός του εδάφους [71-73] για να μεταβάλλει την τιμή της μεταβατικής αντίστασης γείωσης.



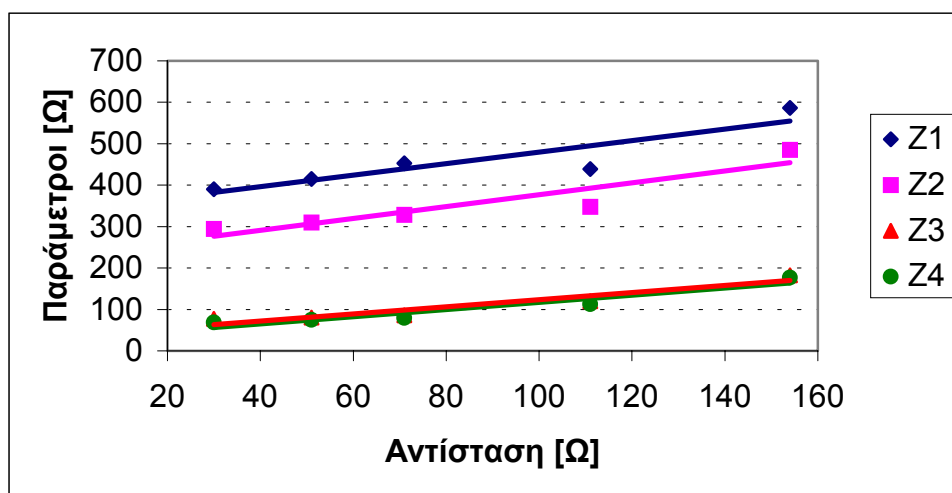
Σχήμα 3.50: Μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων για διάφορες τάσεις φόρτισης της κρουστικής γεννήτριας PC6-288

Στα σχήματα 3.51 και 3.52 παρατηρούμε τη μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης γείωσης (μονίμου καταστάσεως). Το σύστημα γείωσης είναι μία κατακόρυφη ράβδος, που τοποθετείται σε διαφορετικό βάθος κάθε φορά, στο κηπάριο της οδού Τοσίτσα ή στο κηπάριο πίσω από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων στην Πολυτεχνειούπολη. Στο κηπάριο της Τοσίτσα η ειδική αντίσταση του εδάφους ήταν αρκετά μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή στην Πολυτεχνειούπολη (§3.2.1). Αυτό είχε ως συνέπεια η αντίσταση γείωσης μονίμου καταστάσεως, η οποία μετράται με την μέθοδο της παραγράφου §2.2.2.1, να είναι για την ίδια ράβδο σημαντικά μικρότερη στο χώρο της Τοσίτσα (3 φορές περίπου) σε σχέση με την αντίστοιχη στο χώρο στην Πολυτεχνειούπολη. Αυτό όμως, όπως

έχει δειχθεί και στην εργασία [214], έχει σαν αποτέλεσμα για την ίδια τάση φόρτισης της γεννήτριας το εγχυόμενο ρεύμα στη γείωση της Τοσίτσα να έχει υψηλότερη τιμή κορυφής και μικρότερους χρόνους μετώπου και ημίσεος εύρους. Είναι εμφανές (σχήμα 3.51, 3.52) πως η μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων ακολουθεί ανάλογη μορφή για όλες τις παραμέτρους. Επίσης, φαίνεται ότι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση γείωσης και οι παράμετροί της παρουσιάζουν τιμές που είναι πολύ μεγαλύτερες από την τιμή μόνιμου καταστάσεως. Η πιο αργή κυματομορφή του ρεύματος, που εγχύθηκε στη γείωση του κηπαρίου στην Πολυτεχνειούπολη, έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόσημη μεταβολή των παραμέτρων  $Z_3$  και  $Z_4$ .



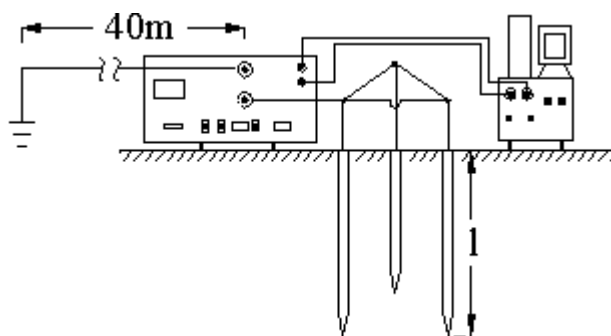
Σχήμα 3.51: Μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης μόνιμου καταστάσεως (στο κηπάριο της Τοσίτσα).



Σχήμα 3.52: Μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης μόνιμου καταστάσεως (στην Πολυτεχνειούπολη).

### 3.3.3 Εύρεση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης τριγώνου γείωσης

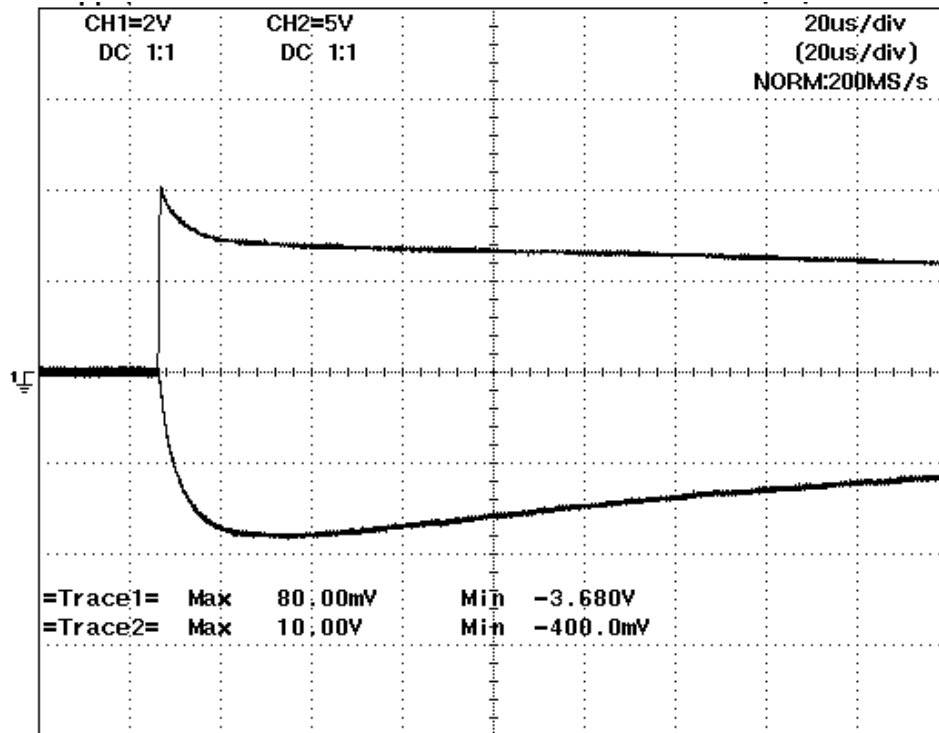
Σκοπός του πειράματος αυτού είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του τριγώνου γείωσης, όταν τίθεται υπό κρουστική διέγερση. Το τρίγωνο γείωσης αποτελείται από τρία κατακόρυφα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στις κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου με μήκος πλευράς 2m. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έγιναν στους ίδιους χώρους και το ίδιο χρονικό διάστημα με τα πειράματα της μίας κατακόρυφης ράβδου. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εξοπλισμός και μεθοδολογία με τα πειράματα που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρίγωνα γείωσης μεταβάλλοντας το μήκος των ράβδων, οι οποίες εμφυτεύονταν στην γη. Στο σχήμα 3.53, που ακολουθεί, φαίνεται η χωροταξία του μετρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.



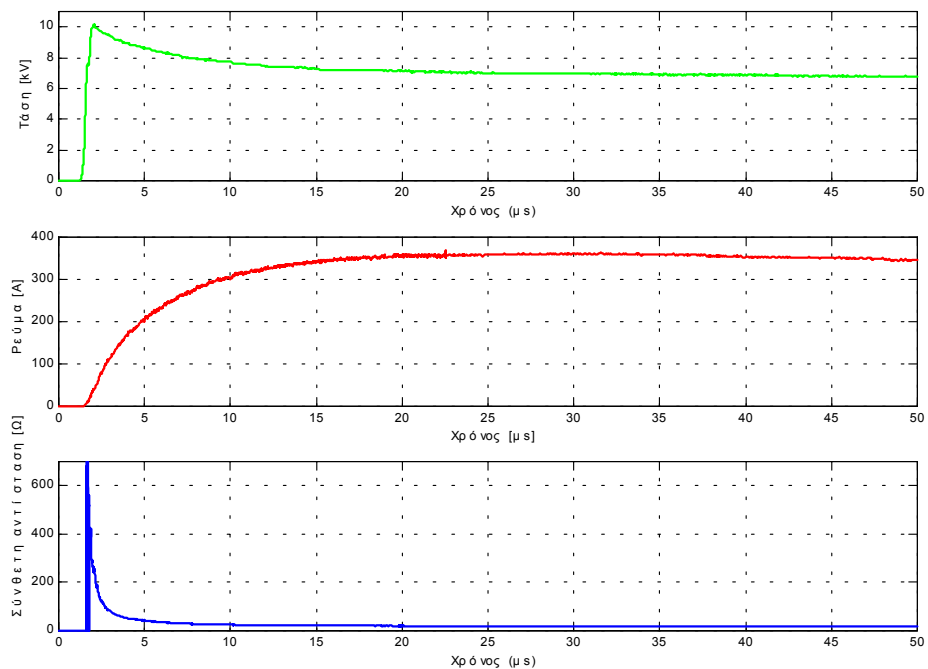
Σχήμα 3.53: Χωροταξικό διάγραμμα διάταξης μετρήσεων

Στα σχήμα 3.54 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα σε ένα τρίγωνο γείωσης που αποτελείται από τρεις κατακόρυφες ράβδους διαμέτρου 20mm, μήκους 100cm τοποθετημένες στις κορυφές ενός ισόπλευρου τριγώνου με μήκος πλευράς 2m. Η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος είναι (για λόγους απεικόνισης και μόνο) η αρνητική κυματομορφή, ενώ η διαφορά δυναμικού ως προς την άπειρη γη είναι η θετική κυματομορφή. Στο σχήμα 3.55 παρουσιάζονται: α) η κυματομορφή της τάσεως (επάνω πράσινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη ο λόγος του ωμικού καταμεριστή, β) η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος (μεσαία κόκκινη καμπύλη), αφού ληφθεί υπόψη η τιμή της αντίστασης μέτρησης προκειμένου να μετατραπεί η τάση του πρώτου καναλιού του παλμογραφήματος σε ρεύμα και γ) η κυματομορφή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης (κάτω μπλε καμπύλη), που προέκυψε με εφαρμογή της εξίσωσης (3.1).

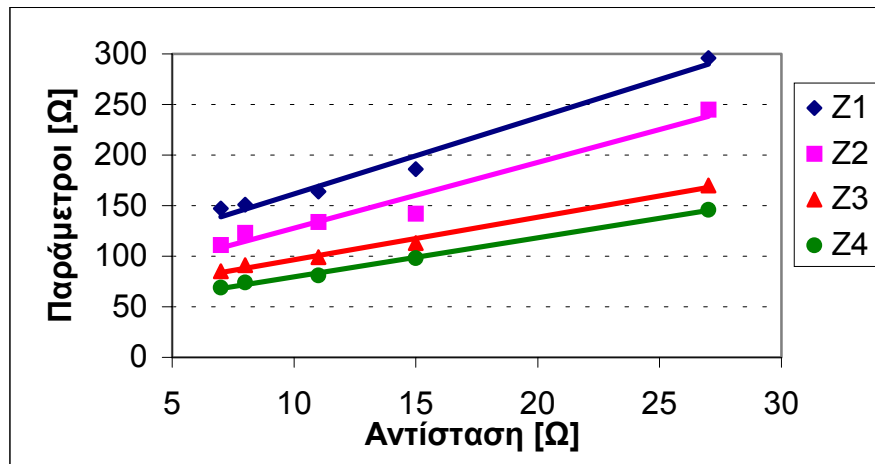




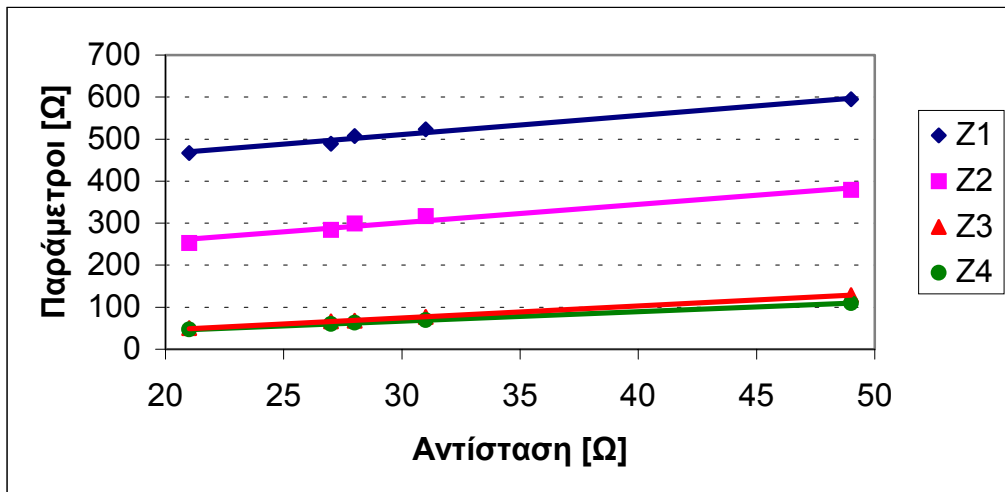
Σχήμα 3.54: Κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος και της τάσης για ένα τρίγωνο γείωσης (μήκος κατακόρυφης ράβδου 1m)



Σχήμα 3.55: Μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος, της τάσης και της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για ένα τρίγωνο γείωσης (μήκος κατακόρυφης ράβδου 1m)



Σχήμα 3.56: Μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης μονίμου καταστάσεως (στο κηπάριο της Τοσίτσα).



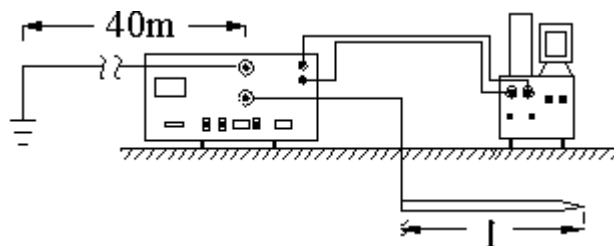
Σχήμα 3.57: Μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης μονίμου καταστάσεως (στην Πολυτεχνειούπολη).

Στα σχήματα 3.56 και 3.57 απεικονίζεται η μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης γείωσης (μονίμου καταστάσεως). Η διαδικασία καταγραφής και υπολογισμού των παραμέτρων είναι ανάλογη με αυτή που πραγματοποιήθηκε για το σύστημα γείωσης που αποτελείται από μία κατακόρυφη ράβδο. Η μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων ακολουθεί ανάλογη μορφή για όλες τις παραμέτρους. Επίσης, φαίνεται ότι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση γείωσης και οι παράμετροί της παρουσιάζουν τιμές που είναι πολύ μεγαλύτερες από την τιμή μονίμου καταστάσεως. Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, έτσι και εδώ, η πιο αργή κυματομορφή του ρεύματος, που εγχύθηκε στη γείωση του

κηπαρίου στην Πολυτεχνειούπολη, έχει σαν αποτέλεσμα τη σχεδόν ίδια μεταβολή των παραμέτρων  $Z_3$  και  $Z_4$ .

### 3.3.4 Εύρεση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης οριζοντίου ηλεκτροδίου

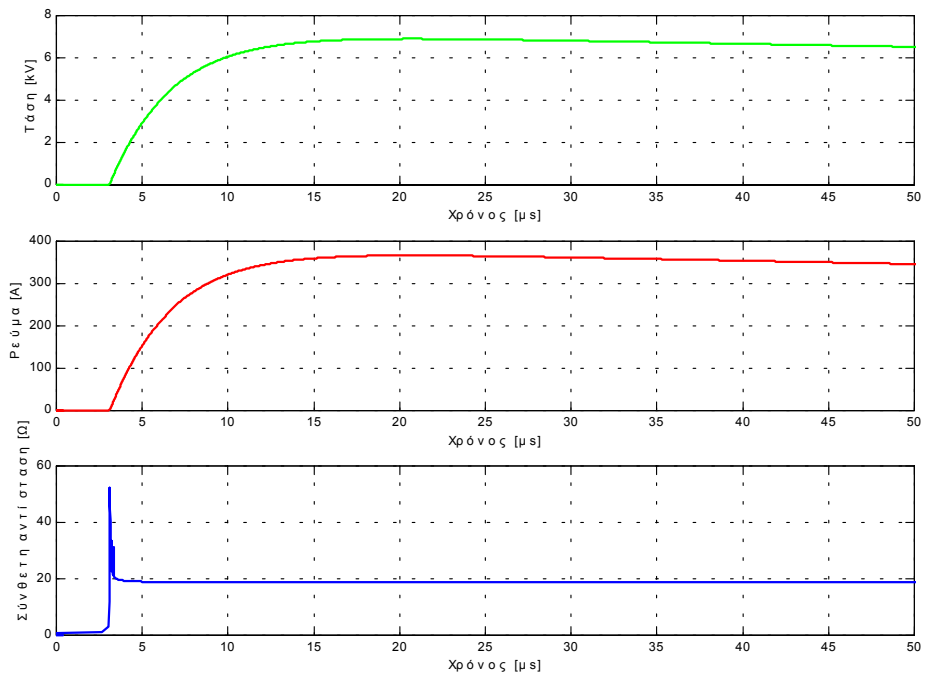
Σκοπός του πειράματος ήταν η καταγραφή της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης οριζοντίων ηλεκτροδίων γείωσης. Το ηλεκτρόδιο έχει μήκος 2 ή 4m και τοποθετείται σε βάθος 60cm στο κηπάριο της Τοσίτσα. Η ειδική αντίσταση του εδάφους μετρήθηκε κατά τη διεξαγωγή του πρώτου πειράματος. Η διάταξη των πειραμάτων που έγιναν στην Τοσίτσα περιλαμβάνει τη φορητή κρουστική γεννήτρια (EMC 2004), το μετρητικό σύστημα, το οριζόντιο ηλεκτρόδιο γείωσης και τα απαραίτητα για τις συνδέσεις καλώδια και αγωγούς. Το μετρητικό σύστημα με τη σειρά του αποτελείται από το σύστημα καταγραφής των κυματομορφών τάσεως και ρεύματος (AID-1) και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή για την αποθήκευσή τους και περαιτέρω επεξεργασίας τους. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η χωροταξία του μετρητικού εξοπλισμού.



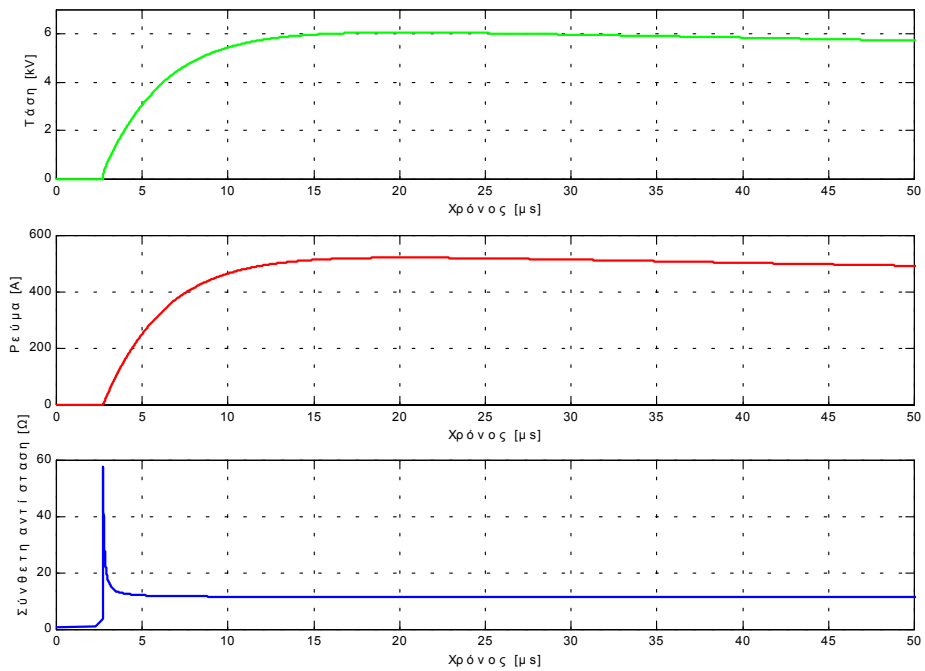
Σχήμα 3.58: Χωροταξικό διάγραμμα διάταξης μετρήσεων

Οι κυματομορφές που μελετώνται παρουσιάζονται για το ηλεκτρόδιο των 2m στο σχήμα 3.59 ενώ για το ηλεκτρόδιο των 4m στο σχήμα 3.60. Το εγχυόμενο ρεύμα (κόκκινες καμπύλες) και η αναπτυσσόμενη διαφορά δυναμικού μεταξύ του άκρου του ηλεκτροδίου που γίνεται η έγχυση του ρεύματος και της άπειρης γης (πράσινες καμπύλες) έχουν την μορφή  $8/70\mu\text{s}\pm 20\%$  και  $7/70\mu\text{s}\pm 20\%$  αντίστοιχα. Από τη μορφή που έχει η μεταβατική σύνθετη αντίσταση (μπλε καμπύλες) παρατηρείται ότι συγκλίνει ταχύτατα (σε λιγότερο από  $4\mu\text{s}$ ) στην τιμή της αντίστασης της μόνιμου καταστάσεως, η οποία, όπως φαίνεται και στα σχήματα, όταν διπλασιάζουμε το μήκος του ηλεκτροδίου δεν υποδιπλασιάζεται, αλλά μειώνεται μόνο κατά 30%

(κατόπιν μέτρησης με το γειωσόμετρο διαπιστώθηκε ότι από τα  $19\Omega$  μειώθηκε στα  $12\Omega$ ).



Σχήμα 3.59: Μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος, της τάσης και της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο (μήκους  $2m$ )



Σχήμα 3.60: Μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος, της τάσης και της κρουστικής σύνθετης αντίστασης για ένα για ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο (μήκους  $4m$ )

### 3.3.5 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Συμπερασματικά, οι παράγοντες που επηρεάζουν την ειδική αντίσταση του εδάφους είναι οι εξής:

Το είδος του εδάφους. Ο Πίνακας 3.1 [8] παρουσιάζει τις ειδικές αντιστάσεις για διάφορα εδάφη. Είναι προφανές ότι το ελώδες έδαφος έχει π.χ. πολύ μικρότερη αντίσταση από ότι η ξηρή άμμος. Αν τώρα προσπαθήσουμε να ταξινομήσουμε τους χώρους που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανάλογα με το είδος του εδάφους μπορεί να ειπωθεί ότι ο χώρος που παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές ειδικής αντίστασης είναι το κηπάριο της Τοσίτσα, που ήταν χώρος ειδικά κατασκευασμένος για να δεχθεί φυτά. Επομένως, το πάνω στρώμα τουλάχιστον ήταν χώμα κήπου (αγρού) πλούσιο σε οργανικά στοιχεία. Ανάλογη διαμόρφωση υπάρχει και στο αλσύλλιο της Πανεπιστημιούπολης. Οι τρεις χώροι της Πολυτεχνειούπολης αποτελούνται από απλό αργιλώδες χώμα, που υπάρχει στην ευρύτερη περιοχή, χωρίς κάποια ιδιαίτερη φροντίδα όταν μετατράπηκαν σε χώρους πρασίνου.

Τύπος εδάφους	Ειδική αντίσταση $\rho_E$ [ $\Omega\text{m}$ ]
Ελώδες έδαφος	30
Αργιλώδες, πηλώδες ή αγρού	100
Υγρή άμμος	200
Υγρά χαλίκια	500
Ξηρή άμμος,	1000
Πετρώδες και ξηρά χαλίκια	3000

Πίνακας 3.1: Ειδικές αντιστάσεις εδαφών, ενδεικτικές μέσες τιμές κατά το άρθρο 27 των Κ.Ε.Η.Ε. [12]

Η υγρασία. Η ειδική αντίσταση μειώνεται αυξανόμενης της υγρασίας του εδάφους. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι το έδαφος μπορεί να ξηραίνεται επιφανειακά, αλλά σε βάθος κάτω του μισού μέτρου (0,5m) διατηρείται συνήθως υγρό σε όλες τις εποχές του έτους. Έτσι, σε κατακόρυφες ράβδους λαμβάνεται σαν ενεργό μήκος αυτό που είναι κάτω από 0,5m. Για τον ίδιο λόγο άλλωστε, τοποθετούνται τα οριζόντια ηλεκτρόδια ή τα πλέγματα σε βάθη μεγαλύτερα από 0,5m. Οι χώροι που είχαν επιλεγεί για τα πειράματα περιείχαν διαφορετική ποσότητα υγρασίας, καθώς

ποτίζονταν με διαφορετικό τρόπο και ρυθμό ο καθένας. Επισημαίνεται ότι ο χώρος της Τοσίτσα ήταν αυτός με τη μεγαλύτερη υγρασία.

Η θερμοκρασία. Τους καλοκαιρινούς μήνες υπάρχει αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους σε σχέση με τους χειμερινούς. Επομένως, η ειδική αντίσταση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και με τη μείωση της υγρασίας. Έχει καταγραφεί λόγος της καλοκαιρινής προς την χειμερινή ειδική αντίσταση που φθάνει έως και το τρία.

Από τη σειρά των μετρήσεων που έγινε σε πραγματικά συστήματα γείωσης είναι προφανές ότι η μεταβατική σύνθετη αντίσταση και οι κρουστικές παράμετροι του συστήματος γειώσεως, καθώς και η αντίσταση μόνιμης κατάστασης μειώνονται αυξανόμενου του βάθους τοποθέτησης των στοιχείων του συστήματος. Το σύστημα γειώσεως του ισοπλεύρου τριγώνου παρουσιάζει, όπως είναι αναμενόμενο, μικρότερη αντίσταση μόνιμου καταστάσεως (περίπου τη μισή τιμή) σε σχέση με αυτή μιας κατακορύφου ράβδου για το ίδιο βάθος.

Οι κρουστικές παράμετροι παίρνουν τιμές που είναι πολλαπλάσιες της τιμής της αντίστασης μόνιμου καταστάσεως. Από τα σχήματα 3.51, 3.52, 3.56 και 3.57 παρατηρείται ότι η μεταβολή των κρουστικών παραμέτρων συναρτήσει της αντίστασης μόνιμου καταστάσεως είναι παραπλήσια. Αυτό αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη μείωση του όγκου δουλειάς που απαιτείται στην πειραματική επαλήθευση της μορφής των καμπυλών. Αν δοθούν απλές σχέσεις που συνδέουν αυτές τις τιμές θα μπορούσε να αντικατασταθεί εν μέρει ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός και αντί να καταγράφεται όλη η κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος να καταγράφονται, με χρήση οργάνων μεγίστου, οι μέγιστες τιμές του εγχυόμενου ρεύματος της αναπτυσσόμενης τάσης και, στη συνέχεια, να γίνεται εκτίμηση των υπολοίπων παραμέτρων. Θα μπορούσαν να εκτιμηθούν επίσης και οι τιμές των παραμέτρων με μέτρηση της αντίστασης μόνιμου καταστάσεως και της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Κάνοντας γραμμική προσαρμογή των τιμών των κρουστικών παραμέτρων, για κάθε ένα διάγραμμα χωριστά, προκύπτουν πρώτου βαθμού εξισώσεις που δείχνουν τη συμπεριφορά των κρουστικών παραμέτρων του συγκεκριμένου συστήματος γείωσης.

Για την κατακόρυφη ράβδο που είναι τοποθετημένη στην Τοσίτσα προκύπτει (από σχήμα 3.51) ότι:

$$Z_1 = 4,6 \cdot R + 48,7 \quad (3.7)$$

$$Z_2 = 4,2 \cdot R + 4,8 \quad (3.8)$$

$$Z_3 = 3,3 \cdot R + 0,6 \quad (3.9)$$

$$Z_4 = 2,5 \cdot R + 3,6 \quad (3.10)$$

Ενώ για την κατακόρυφη ράβδο που είναι τοποθετημένη στην Πολυτεχνειούπολη προκύπτει (από σχήμα 3.52) ότι:

$$Z_1 = 1,6 \cdot R + 338,7 \quad (3.11)$$

$$Z_2 = 1,5 \cdot R + 232,3 \quad (3.12)$$

$$Z_3 = 0,9 \cdot R + 37,4 \quad (3.13)$$

$$Z_4 = 0,9 \cdot R + 30,4 \quad (3.14)$$

Για το τρίγωνο γείωσης που είναι τοποθετημένο στην Τοσίτσα προκύπτει (από σχήμα 3.56) ότι:

$$Z_1 = 7,5 \cdot R + 86,3 \quad (3.15)$$

$$Z_2 = 6,5 \cdot R + 62,5 \quad (3.16)$$

$$Z_3 = 4,2 \cdot R + 54,3 \quad (3.17)$$

$$Z_4 = 3,8 \cdot R + 41,2 \quad (3.18)$$

Ενώ για το τρίγωνο γείωσης που είναι τοποθετημένο στην Πολυτεχνειούπολη προκύπτει (από σχήμα 3.57) ότι:

$$Z_1 = 4,6 \cdot R + 373,9 \quad (3.19)$$

$$Z_2 = 4,4 \cdot R + 170,7 \quad (3.20)$$

$$Z_3 = 2,8 \cdot R - 10,7 \quad (3.21)$$

$$Z_4 = 2,3 \cdot R - 0,5 \quad (3.22)$$

Παρατηρώντας τον πρώτο συντελεστή των εξισώσεων 3.7-3.22 (συντελεστής του  $R$ ) που είναι η κλίση των ευθειών, είναι εμφανές ότι το πεδίο τιμών του είναι θετικοί αριθμοί μεγαλύτεροι της μονάδας. Αυτό δείχνει ότι η οποιαδήποτε αύξηση της τιμής της αντίστασης μόνιμης κατάστασης προκαλεί μεγαλύτερη απόλυτη αύξηση στις κρουστικές παραμέτρους του συστήματος.

Εύκολα διαπιστώνεται ότι για κάθε σύστημα οι συντελεστές του  $R$  μειώνονται προοδευτικά από το  $Z_1$  προς το  $Z_4$ . Επίσης, υπάρχει εντονότερη μείωση στους αντίστοιχους συντελεστές του  $R$  σε έδαφος με χαμηλή τιμή ειδικής αντίστασης (κηπάριο της Τοσίτσα) απ' όσο με έδαφος μεγαλύτερης τιμής ειδικής αντίστασης (χώρος Πολυτεχνειούπολης).

### **3.4 Πειράματα για τον ιονισμό του εδάφους**

#### **3.4.1 Διεξαγωγή των πειραμάτων**

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που έγιναν για τη μελέτη του ιονισμού του εδάφους χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός που παρουσιάστηκε στην §2.2.3 και στο Παράρτημα Π3. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται παρακάτω πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας εντός του εργαστηρίου το διάστημα που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα ήταν περίπου σταθερές, γεγονός που συνέβαλε στο να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις υπό τις ίδιες περίπου συνθήκες και έτσι αυτές να είναι εύκολα συγκρίσιμες, αφού ο παράγοντας μεταβολής των παραπάνω αναφερόμενων συνθηκών δεν επιδρούσε ουσιαστικά. Συγκεκριμένα, για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας χρησιμοποιήθηκε θερμόμετρο/υγρόμετρο κατασκευής Dostmann H270, ενώ για τη μέτρηση της πίεσης βαρόμετρο κατασκευής Greisinger GPB 1300. Πριν την έναρξη των δοκιμών ελέγχθηκε με τον παλμογράφο η μορφή της κρουστικής τάσης χωρίς



δοκίμιο συνδεδεμένο στην κρουστική γεννήτρια τάσης, ώστε να είναι της μορφής 1,2/50 [203].

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι κύλινδροι που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 2.1. Τα μεταλλικά τοιχώματα των κυλίνδρων ήταν κατασκευασμένα από χάλυβα, ενώ οι βάσεις του κάθε κυλίνδρου ήταν ξύλινες. Σε κάθε κύλινδρο τοποθετήθηκε χώμα και πριν από κάθε δοκιμή μετριόταν η ειδική αντίσταση του εδάφους κάθε δοκιμίου. Για τα κυλινδρικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν η σχέση που συνδέει την ειδική αντίσταση του χώματος  $\rho$  και την αντίσταση του κυλίνδρου  $R$  είναι [139]:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot \ell \cdot R}{\ln \frac{r_{out}}{r_{in}}} \quad (3.23)$$

όπου  $\ell$  είναι το μήκος του κυλίνδρου,  $r_{out}$  η ακτίνα του κυλίνδρου και  $r_{in}$  η ακτίνα του μεταλλικού αγωγού που είναι τοποθετημένος στο κέντρο του κυλίνδρου

Με σταθερό διάκενο στον σπινθηριστή αυξανόταν σταδιακά η τάση φόρτισης του πυκνωτή ( $C_I$ ) της κρουστικής γεννήτριας έως να συμβεί η διάσπαση του σπινθηριστή ( $\Sigma II$ ), σχήμα 2.6. Οι γραφικές παραστάσεις του ρεύματος και της τάσης παρατηρούνται ταυτόχρονα στον παλμογράφο. Όταν ελάμβανε χώρα ο ιονισμός οι κυματομορφές αυτές καταγράφονταν σε ψηφιακή μορφή. Αν δεν συνέβαινε ιονισμός του εδάφους για συγκεκριμένο διάκενο, τότε αυτό αυξανόταν, παρέχοντας σταδιακά κρουστική τάση και κρουστικό ρεύμα όλο και μεγαλύτερου πλάτους. Η διαδικασία αυτή συνεχιζόταν μέχρι να εμφανιστεί στα παλμογραφήματα η ύπαρξη του ιονισμού στο έδαφος. Σε αυτό το σημείο γίνονταν μικρές προσεκτικές ρυθμίσεις (αυξομειώσεις) του διακένου του σπινθηριστή ώστε να εντοπιστούν οι ακριβείς τιμές της κρουστικής τάσης και του κρουστικού ρεύματος για τις οποίες συνέβαινε έναρξη του ιονισμού του εδάφους. Η μεθοδολογία αυτή, τελικά, μετά από μία ολόκληρη σειρά μετρήσεων, παρείχε τις τιμές τάσης και ρεύματος, στις οποίες οριακά συνέβαινε ο ιονισμός.

Ύστερα από μια σειρά δοκιμών και μετρήσεων, κι αφού είχε πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της αντίστασης του εδάφους και των τιμών της τάσεως και εντάσεως για τις οποίες συνέβαινε ο ιονισμός του εδάφους για στεγνό χώμα στο δοκίμιο,

γινόταν προσθήκη ορισμένης ποσότητας νερού στο δοκίμιο, η οποία διαχεότανε ομοιόμορφα στο χώμα. Μετά από τρεις ώρες, έτσι ώστε το νερό να εμποτίσει ομοιόμορφα ολόκληρη την ποσότητα χώματος του κυλίνδρου, μετρίονταν και πάλι η ειδική αντίσταση του εδάφους, η οποία τώρα προφανώς, είχε διαφορετική τιμή -συγκεκριμένα χαμηλότερη- λόγω της προσθήκης του νερού. Στη συνέχεια, επαναλαμβανόταν η ίδια διαδικασία δοκιμών με εκείνη που περιγράφηκε για στεγνό δοκίμιο, έτσι ώστε να εντοπιστούν εκείνα τα κρουστικά ρεύματα και τάσεις, στα οποία παρατηρείται η έναρξη του ιονισμού.

### 3.4.2 Αποτελέσματα των πειραμάτων

Σε ένα ανομοιογενές πεδίο, όπως αυτό στο εσωτερικό δύο κυλίνδρων, το διάνυσμα της πεδιακής έντασης  $E$  δεν έχει παντού την ίδια διεύθυνση και την ίδια απόλυτη τιμή. Κάθε ανομοιογενές πεδίο έχει μία μέγιστη πεδιακή ένταση  $E_{max}$ . Σε μία δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων, υπό υψηλή τάση, η  $E_{max}$  έχει ιδιαίτερη πρακτική σημασία, γιατί εκφράζει τη μέγιστη καταπόνηση που ασκείται από το πεδίο. Εμπειρικά, είναι γνωστό, ότι η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης, σε μία δεδομένη διάταξη ηλεκτροδίων, εκδηλώνεται στις θέσεις, όπου οι μεταλλικές επιφάνειες έχουν τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας. Στο ομογενές πεδίο δεν υπάρχει η έννοια της  $E_{max}$ , γιατί η πεδιακή ένταση είναι σε κάθε σημείο η ίδια. Στο ανομοιογενές πεδίο η μέγιστη τιμή της πεδιακής έντασης  $E_{max}$  δίνεται από τη σχέση [205-208]:

$$E_{max} = \frac{U}{(r_{out} - r_{in}) \cdot n} \quad (3.24)$$

όπου  $n$  ο συντελεστής χρησιμοποίησης ανομοιογενών πεδίων ( $0 < n < 1$ ) που υπολογίζεται από τη σχέση [205-208]:

$$n = \frac{r_{in} \cdot \ln\left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)}{r_{out} - r_{in}} \quad (3.25)$$

Η σχέση (3.24) δίνει μία εκτίμηση της μέγιστης πεδιακής έντασης που εμφανίζεται στο χώμα εντός του κυλίνδρου.

Εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους υπάρχει, αλλά απαιτεί τη γνώση της τιμής της πυκνότητας του ρεύματος τη στιγμή που λαμβάνει χώρα ο ιονισμός.

Είναι γνωστό ότι:

$$E = \rho \cdot j \quad (3.26)$$

όπου

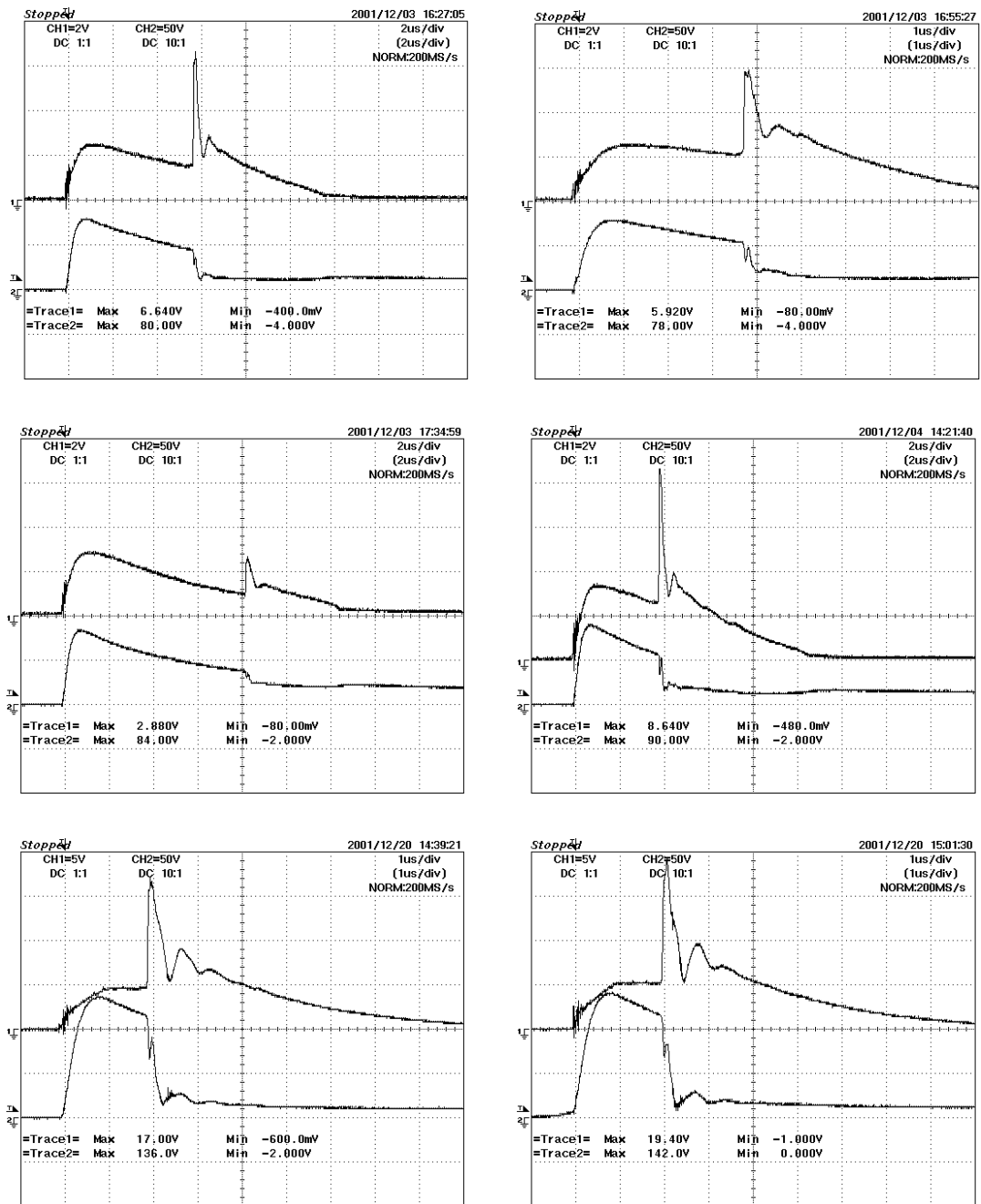
$$j = \frac{i}{S} \Leftrightarrow j = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot r_{out} \cdot \ell} \quad (3.27)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (3.26) την πυκνότητα ρεύματος  $j_c$  η οποία υφίσταται εξαιτίας του ρεύματος που υπάρχει κατά τον ιονισμό  $i_c$ , τη σχέση (3.27) προκύπτει η κρίσιμη πεδιακή ένταση  $E_c$  όταν συμβαίνει ο ιονισμός του εδάφους:

$$E_c = \frac{\rho \cdot i_c}{2 \cdot \pi \cdot r_{out} \cdot \ell} \quad (3.28)$$

Με γνωστή πλέον την μεθοδολογία υπολογισμού της κρίσιμης έντασης ιονισμού πραγματοποιήθηκαν σειρές δοκιμών και μετρήσεων προκειμένου να μελετηθεί το φαινόμενο. Στο σχήμα 3.61 παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά παλμογραφήματα, στα οποία φαίνεται η ύπαρξη ιονισμού στο χώμα. Η επάνω κυματομορφή του κάθε παλμογραφήματος (κανάλι 1) αντιστοιχεί στην κυματομορφή του ρεύματος, ενώ η κάτω κυματομορφή (κανάλι 2) αντιστοιχεί στην κυματομορφή της τάσεως. Η κυματομορφή της τάσης εάν πολλαπλασιαστεί με το λόγο υποβιβασμού του χωριτικού καταμεριστή ( $\kappa = 405$ ) δίνει την τάση που επιβάλλεται στο δοκίμιο. Για την εκτίμηση (από την κυματομορφή του ρεύματος) του ρεύματος που διαρρέει το δοκίμιο πρέπει, ευλόγως να ληφθεί υπ' όψιν η τιμή της αντίστασης μέτρησης  $R_m$ .

Η ύπαρξη του ιονισμού διακρίνεται από την απότομη αύξηση του ρεύματος και την αντίστοιχη μείωση της τάσης. Δηλαδή, ενώ, όταν ξεκινάει η επιβολή της τάσης, το δοκίμιο έχει μία συγκεκριμένη αντίσταση, με την έναρξη του ιονισμού η αντίσταση του δοκιμίου μειώνεται (γιατί υπάρχει αύξηση του ρεύματος και αντίστοιχα μείωση της τάσης). Επομένως, κατά τον ιονισμό μειώνεται η ειδική αντίσταση του χώματος.

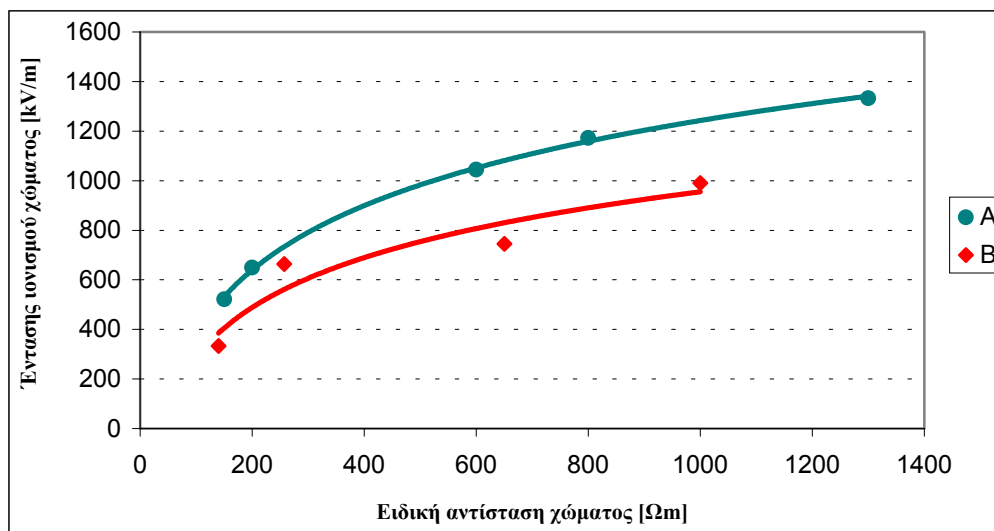


Σχήμα 3.61: Χαρακτηριστικά παλμογραφήματα τάσεως και ρεύματος για τον κύλινδρο

### 3.4.3 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Η ειδική αντίσταση του χώματος που χρησιμοποιήθηκε μεταβαλλόταν από 1000Ωm έως 1300Ωm. Η προσθήκη νερού στο χώμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ειδικής αντίστασης του χώματος. Η σχέση υγρασίας και ειδικής αντίστασης του χώματος απεικονίζεται στο σχήμα 1.1.A [3]. Με την προσθήκη ποσότητας νερού στους κυλίνδρους πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο διαφορετικές περιοχές

όσον αφορά στην ειδική αντίσταση του εδάφους. Στην πρώτη περίπτωση το εύρος τιμών της μεταβολής της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταβαλλόταν από 600Ωm έως 800Ωm, ενώ στη δεύτερη από 150Ωm έως 200Ωm.

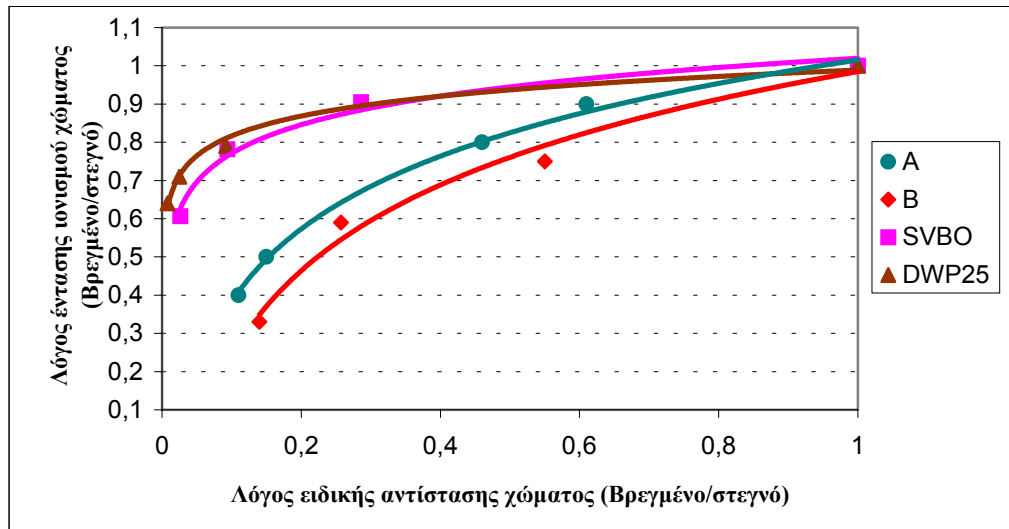


Σχήμα 3.62: Μεταβολή της έντασης έναρξης ιονισμού συναρτήσει ειδικής αντίστασης του χώματος

Στο σχήμα 3.62 παρουσιάζεται η μεταβολή της έντασης ιονισμού για δύο διαφορετικά είδη χώματος (A και B αντιστοίχως) συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του χώματος. Η ειδική αντίσταση του κάθε διαφορετικού τύπου χώματος μεταβαλλόταν με την προσθήκη κατάλληλης ποσότητας νερού. Σύμφωνα με τις δοκιμές που έγιναν αποδεικνύεται ότι σε βρεγμένο έδαφος υπάρχει ουσιαστική μείωση της κρίσιμης πεδιακής έντασης με την προσθήκη ποσότητας νερού στο δοκίμιο.

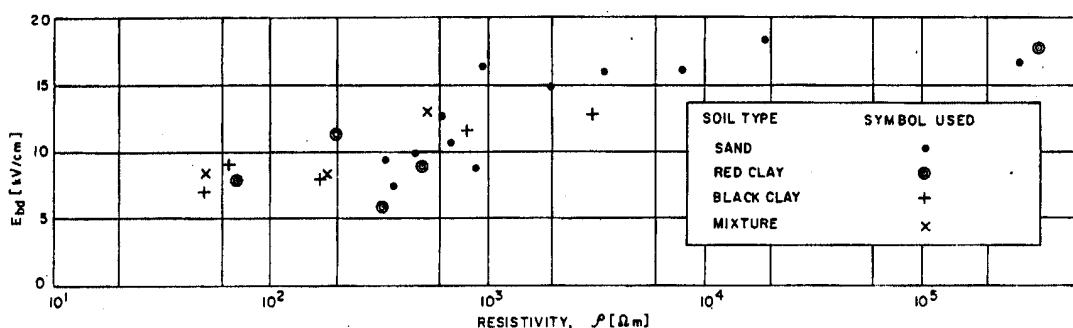
Στο σχήμα 3.63 γίνεται προσπάθεια να μελετηθεί η επίδραση, σε διάφορα είδη χώματος, του λόγου των κρίσιμων εντάσεων έναρξης ιονισμού (του βρεγμένου προς το στεγνό έδαφος) συναρτήσει του λόγου των ειδικών αντιστάσεων χώματος (του βρεγμένου προς το στεγνό έδαφος). Γίνεται, επίσης, σύγκριση με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα του Flanagan et al. για άλλους τύπου εδάφους (SVBO και DWP25) [126, 124]. Παρατηρείται ότι ο ρυθμός μείωσης του λόγου των ειδικών αντιστάσεων του χώματος είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό μείωσης του λόγου των αντίστοιχων κρίσιμων εντάσεων. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο παρουσιάζουν μικρότερο λόγο εντάσεων για αντίστοιχο λόγο ειδικής

αντίστασης χώματος, σε σχέση με τα πειράματα του Flanagan [124, 126] Αυτό πιθανότατα οφείλεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά του χώματος που εξετάστηκε από τους ερευνητές (το χώμα που χρησιμοποιήθηκε από το Flanagan έχει υψηλότερη ειδική αντίσταση, το DWP25 έχει 4000Ωm και το SVBO έχει 1250Ωm, όταν είναι στεγνό, σε σχέση με το χώμα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που έγιναν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής).



Σχήμα 3.63: Μεταβολή του λόγου της έντασης έναρξης ιονισμού (βρεγμένου προς στεγνό χώμα) συναρτήσει του αντίστοιχου λόγου της ειδικής αντίστασης του χώματος

Πάντως, πρέπει να αναφερθεί ότι στα πειράματα του Flanagan η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού βρεγμένου εδάφους μειώνεται έως και στο 60% της αντίστοιχης τιμής του στεγνού εδάφους, ενώ στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο η αντίστοιχη μείωση φθάνει έως στο 35%.



Σχήμα 3.64: Ένταση έναρξης ιονισμού συναρτήσει της ειδικής αντίστασης για διάφορους τύπους εδάφους [131]

Στο σχήμα 3.64, που έχει δημοσιευθεί από την Oettle [131] παρουσιάζεται η μεταβολή της έντασης ιονισμού για διαφορετικά είδη χώματος συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του χώματος. Τα πειράματα, κατά τα οποία έγιναν οι μετρήσεις, ανήκουν σε διάφορους ερευνητές [71-74, 120]. Παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη διασπορά στις τιμές που έχουν μετρηθεί. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τη διαφορετική ποσότητα υγρασίας και τη διαφορετική υφή και σύσταση που μπορεί να έχουν διαφορετικά είδη χώματος που έχουν, όμως, την ίδια ειδική αντίσταση. Η πλειοψηφία των τιμών βρίσκονται στο διάστημα από 600kV/m έως 1000kV/m. Αυτό το εύρος τιμών χρησιμοποιήθηκε από τον Mousa [124] μαζί με την υπόθεση ότι στο βρεγμένο έδαφος η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού μειώνεται στο μισό της αντίστοιχης τιμής του στεγνού εδάφους εκτιμώντας πως η κρίσιμη ένταση ιονισμού είναι της τάξεως των 300kV/m [124]. Στα σχήματα 3.62 και 3.63 παρατηρείται ότι η ένταση έναρξης ιονισμού μειώνεται έως και στο ένα τρίτο της τιμής που έχει το ίδιο χώμα όταν είναι στεγνό. Αυτή η διαπίστωση μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο στοιχείο για την εκτίμηση της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους, η οποία, κατά το σκεπτικό αυτό, μπορεί να φθάσει έως την τάξη των 200kV/m.