

# Κεφάλαιο 1

## **BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

*Η γνώση είναι δύο ειδών:  
είτε ξέρουμε το αντικείμενο, είτε ξέρουμε που να βρούμε πληροφορίες γι' αυτό.  
Samuel Jonson*

### **1.1 Εισαγωγή**

Τα προηγούμενα χρόνια έχει γίνει μια πλήρης και αναλυτική περιγραφή της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή όταν διαρρέονται από ρεύμα βιομηχανικής συχνότητας [1, 2]. Διεθνείς και εθνικοί οργανισμοί (IEEE, IEC, DIN/VDE κ.λπ.) περιγράφουν κατάλληλες μεθοδολογίες που αποσκοπούν στον υπολογισμό τόσο της αντίστασης γείωσης, όσο και των αναπτυσσόμενων τάσεων στην επιφάνεια του εδάφους [3-11].

Γείωση ονομάζουμε την αγώγιμη σύνδεση με το έδαφος των μη ρευματοφόρων μεταλλικών μερών μιας εγκαταστάσεως ή του ουδέτερου κόμβου μετασχηματιστών και γεννητριών. Σκοπός της γείωσης είναι να εξασφαλίζει την ακεραιότητα του εξοπλισμού και τη συνέχεια της λειτουργίας του, σε περίπτωση εμφανίσεως οποιουδήποτε σφάλματος, παρέχοντας διαδρομή απαγωγής του ρεύματος και εκτόνωσής του στη γη, καθώς και να προστατεύει από ηλεκτροπληξία άτομα που είτε δουλεύουν, είτε κινούνται στον περιβάλλοντα χώρο. Για να είναι αυτό εφικτό πρέπει η σύνθετη αντίσταση του συστήματος να είναι αρκετά χαμηλή (θεωρητικά να είναι ίση με το μηδέν), ώστε το ρεύμα να οδεύει στη γη μέσω της γείωσης, διατηρώντας τις μέγιστες διαφορές δυναμικού (βηματική τάση και τάση επαφής) που δημιουργούνται, κάτω από συγκεκριμένα όρια [3, 12].

Άπειρη γη. Είναι ένα σημείο στην επιφάνειά της σε άπειρη απόσταση από το γειωτή, το οποίο λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς των δυναμικών. Το δυναμικό της άπειρης γης είναι μηδενικό. Για πρακτικούς σκοπούς η «άπειρη απόσταση» είναι 5-10 φορές το μήκος της μεγαλύτερης διάστασης του γειωτή.

Βηματική τάση. Είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του εδάφους σε απόσταση 1m και δηλώνει την καταπόνηση ατόμου, χωρίς να βρίσκεται σε επαφή με μεταλλικά αντικείμενα, λόγω ανοικτού βηματισμού .

Τάση επαφής. Είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ μεταλλικού γειωμένου ικριώματος και σημείου σε απόσταση 1m που στέκεται άνθρωπος και ακουμπά με τα χέρια του το ικριώμα.

Αποτελεσματική γείωση. Ονομάζεται μια γείωση με την οποία δεν είναι δυνατόν να εμφανιστούν, στην περιοχή που καλύπτει αυτή, επικίνδυνες τάσεις επαφής ή επικίνδυνες βηματικές τάσεις .

Ηλεκτρόδιο γείωσης. Πρόκειται για έναν αγωγό τοποθετημένο οριζόντια ή κατακόρυφα μέσα στη γη, ο οποίος συλλέγει και διαχέει το ρεύμα μέσα στη γη .

Πλέγμα γείωσης. Ονομάζεται ένα σύνολο από συνδεδεμένα μεταξύ τους αγωγίματα σώματα, που είναι τοποθετημένα μέσα στο έδαφος και είναι έτσι διαρρυθμισμένα, ώστε να εξασφαλίζεται «αποτελεσματική γείωση» .

Τάση ηλεκτροδίου γείωσης. Είναι η τάση μεταξύ του ηλεκτροδίου γείωσης και της άπειρης γης, όταν ρέει ρεύμα μέσω του ηλεκτροδίου.

Αντίσταση γειώσεως. Για ένα ηλεκτρόδιο ή σύστημα γείωσης είναι η αντίσταση προς την άπειρη γη.

Ισοδυναμικές επιφάνειες. Αποτελούν τρόπο αναπαράστασης του ηλεκτρικού πεδίου. Αν  $\Phi$  είναι η συνάρτηση δυναμικού, τότε ισοδυναμικές επιφάνειες ορίζονται οι επιφάνειες εκείνες που περιγράφονται από την εξίσωση:  $\Phi(x, y, z) = c$  (όπου  $c$  είναι μια σταθερά).

Τάση σφάλματος ή Δυναμικό προς άπειρη γη  $U_f$ . Είναι η τάση που εμφανίζεται μεταξύ των προσιτών αγωγίμων στοιχείων, τα οποία δεν αποτελούν τμήμα του κυκλώματος, αλλά είναι δυνατόν να βρεθούν υπό τάση, λόγω βλάβης της μόνωσης, και κάποιου σημείου της γης επαρκώς απομακρυσμένου.

Η γείωση ανάλογα με το σκοπό ύπαρξής της διακρίνεται στα παρακάτω είδη [12]:

1. Γείωση λειτουργίας. Ονομάζεται η γείωση που γίνεται για λειτουργικούς λόγους ή για την αποφυγή υπερτάσεων. Αυτή διακρίνεται σε:
  - *Άμεση* εφόσον δεν περιλαμβάνει άλλη αντίσταση πλην της αντίστασης γείωσης.
  - *Έμμεση* εφόσον εκτός από την αντίσταση γείωσης περιλαμβάνει και ωμικές, επαγωγικές και χωρητικές αντιστάσεις.
2. Γείωση προστασίας. Καλείται η αγωγή σύνδεση των μεταλλικών μερών μιας εγκατάστασης, που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας, και εξασφαλίζει την προστασία των ανθρώπων που ενδέχεται να έρθουν σε επαφή με αυτή.
3. Γείωση ασφάλειας ή αντικεραυνικής προστασίας. Η γείωση ασφάλειας χρησιμεύει για την ασφάλεια των ευρισκόμενων στο περιβάλλον που έχει κατασκευαστεί. Ενδεικτικά παραδείγματα του είδους αυτού είναι οι γειώσεις των αλεξικέραυνων, οι γειώσεις των αντιστατικών δαπέδων των χώρων επείγουσας ιατρικής και των χώρων με μηχανήματα προηγμένης τεχνολογίας.

## **1.2 Συστήματα γείωσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας**

Οι Sunde, 1968 [2] και Tagg, 1964 [1] παρουσιάζουν συνοπτικά τις μελέτες που έγιναν τις προηγούμενες δεκαετίες στα συστήματα γείωσης. Τα βιβλία τους αποτελούν απαραίτητο εγχειρίδιο για κάθε ερευνητή που θα θελήσει να εμβαθύνει τις γνώσεις του στην περιοχή των συστημάτων γείωσης, καθώς παρουσιάζουν ένα σύνολο τύπων για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης, των αναπτυσσομένων τάσεων στην επιφάνεια του εδάφους σε διάφορα συστήματα γείωσης, αλλά και των τεχνικών μέτρησης της αντίστασης γείωσης και της ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα κλασσικά βιβλία, το πρότυπο IEEE std.80 [3] αποτελεί τον καλύτερο σύμβουλο για την σχεδίαση συστημάτων γείωσης. Ομάδες εργασίας [13, 14], αλλά και ανεξάρτητοι ερευνητές [15-19] επεξήγησαν όλα τα σημεία του προτύπου και στη συνέχεια, πρότειναν βελτιώσεις.

Μέθοδοι για το σχεδιασμό συστημάτων γείωσης έχουν προταθεί από πολλούς ερευνητές. Ενδεικτικά, αναφέρονται τα άρθρα [20-22]. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν

διαθέσιμες και μέθοδοι για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης συνδεδεμένων συστημάτων γείωσης [23, 24 ].

Ο S. J. Schwarz [25], το 1954, ανέπτυξε αναλυτικές μεθόδους και εξισώσεις με σκοπό να αποτελέσουν τη βάση για περαιτέρω διερεύνηση και εύρεση της οικονομικότερης αντίστασης γείωσης κατά μήκος της διαδρομής που οδηγεί το ρεύμα διαρροής προς τη γη. Στο συγκεκριμένο άρθρο υπάρχουν αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης πλεγμάτων, ράβδων ή συνδυασμού αυτών, οι οποίες έχουν προκύψει, είτε από την εφαρμογή της πεδιακής θεωρίας είτε από την μέθοδο του δυναμικού.

Αναλυτικοί τύποι για τον υπολογισμό της αντίστασης σε διστρωματικό έδαφος παρουσιάστηκαν από τον Nahman για τετραγωνικά πλεγμάτα [18, 26-30] και για μη τετραγωνικά πλέγματα [18, 31]. Επίσης, αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες που απαιτούν τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης πλεγμάτων [32-34] και προσφέρουν τη δυνατότητα παραμετρικής ανάλυσης.

Επιπλέον, έχουν δημοσιευτεί αναλυτικοί τύποι που δίνουν την επίδραση του τρόπου και των υλικών κατασκευής σε θεμελιακές γειώσεις [35] και στις γειώσεις υποσταθμών [36].

Οι Dawalibi και Mukhedkar, το 1975, παρουσιάζουν μία σειρά τριών άρθρων [37-39] σχετικά με τον βέλτιστο σχεδιασμό γειώσεων σε διστρωματικό έδαφος. Στα άρθρα αυτά παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο και συγκρίνονται οι αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων [40], καθώς και με πειραματικά αποτελέσματα σε υπό κλίμακα μοντέλα [25].

Το άρθρο [41] δίνει πληροφορίες απαραίτητες για το σχεδιασμό χαλύβδινων συστημάτων γείωσης, καθώς και τεχνικούς, οικονομικούς και πρακτικούς λόγους για τη χρήση χαλύβδινων αντί χάλκινων αγωγών. Οι πληροφορίες που δίνονται στο άρθρο περιλαμβάνουν τη γενική μέθοδο υπολογισμού του μεγέθους των χαλύβδινων, χάλκινων και λοιπών υλικών αγωγών γείωσης, βασικές θεωρήσεις για τον καθορισμό της μέγιστης δυνατής διάβρωσης του υλικού, δηλαδή της μέγιστης επιτρεπτής μείωσης της διατομής του αγωγού, ώστε να διασφαλίζεται η αξιόπιστη

λειτουργία του συστήματος, καθώς κι εκείνες τις λεπτομέρειες που αφορούν στην ηλεκτροχημική διάβρωση στο έδαφος και αποτελούν τη γνώση, η οποία είναι βασική για την εκτίμηση της διάβρωσης των αγωγών που βρίσκονται στο έδαφος. Επίσης, γίνεται μία σύντομη παρουσίαση του προβλήματος της ταυτόχρονης χρησιμοποίησης χαλύβδινων και χάλκινων πλεγμάτων στην ίδια περιοχή.

Μια σειρά μεθόδων δίνονται από τον Tagg [42] για τον υπολογισμό της ολικής αντίστασης κατακόρυφων ράβδων διατεταγμένων σε ένα κοίλο τετράγωνο ή ορθογώνιο. Από αυτές είναι εύκολο να καθορίσουμε τις διάφορες επιδράσεις στην ολική αντίσταση μεταβάλλοντας το μέγεθος και τον αριθμό των ράβδων καθώς και το χώρο που καταλαμβάνουν.

Το 1985, οι R. P. Nagar, R. Velazquez, M. Loeloeian, D. Mukhedkar και V. Gervais [43] συγκέντρωσαν αναλυτικές μεθόδους, που είχαν αναπτυχθεί μέχρι τότε [44-47] για τον υπολογισμό ενός συστήματος γείωσης και επισήμαναν τις διαφορές τους. Συγκρίνουν τις μεθοδολογίες που έχουν προταθεί από άλλους ερευνητές και εξετάζουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια τους. Τελικώς, καταλήγουν στην ανάγκη χρησιμοποίησης του ηλεκτρονικού υπολογιστή στην προσομοίωση των συστημάτων γείωσης.

Ως επέκταση της ανασκόπησης που δημοσίευσαν στο προηγούμενο άρθρο, οι M. Loeloeian, R. Velazquez και D. Mukhedkar [48] συνέκριναν τα αριθμητικά αποτελέσματα των μεθόδων του Herpe [45], του Kouteynikoff [46] και των Dawalibi – Mukhedkar [44], προκειμένου να αποφανθούν για το βαθμό της εφαρμοσιμότητάς τους. Οι τρεις συγκρινόμενες μέθοδοι εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης και της κατανομής του ρεύματος διαρροής σε ένα ευθύγραμμο ηλεκτρόδιο, σε ένα πλέγμα και σε ένα ηλεκτρόδιο σχήματος σταυρού. Από τη σύγκριση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η φύση και το μέγεθος των αποκλίσεων στα αποτελέσματα των τριών μεθόδων είναι μικρή. Αυτό δείχνει ότι καμία μέθοδος δεν πλεονεκτεί έναντι της άλλης. Συνεπώς όλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρακτικούς σκοπούς δίνοντας παρόμοια αποτελέσματα.

Οι Y. L. Chow και M. M. A. Salama [49], το 1994, πρότειναν έναν απλό τύπο για τον υπολογισμό της αντίστασης πλέγματος γείωσης, το οποίο είναι τοποθετημένο σε ομογενές έδαφος. Επίσης, παρουσίασαν μια συγκριτική μελέτη προκειμένου να

ελεγχθεί η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου σε σχέση με έξι μεθόδους της βιβλιογραφίας [3, 14, 25, 50, 51]. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου τους είναι ότι δίνει ακριβή αποτελέσματα με εύρηστους και ταχείς υπολογισμούς. Το 1995, οι M. M. A. Salama, M. M. El Sherbiny και Y. L. Chow [52] επέκτειναν τη μέθοδο που είχαν παρουσιάσει σε προηγούμενο άρθρο τους [49]. Βασισμένοι στο ίδιο θεωρητικό υπόβαθρο δημιούργησαν έναν τύπο υπολογισμού της αντίστασης προσγείωσης πλέγματος, το οποίο είναι τοποθετημένο σε διστρωματικό έδαφος. Ο τύπος αυτός είναι εξίσου εύρηστος και απλός με αυτόν που ισχύει για ομογενές έδαφος. Η έρευνά τους ολοκληρώθηκε το 1996 [53] σε παρουσίαση συγκεντρωτικών τύπων για τις κυριότερες περιπτώσεις των συστημάτων γείωσης. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλης μεθόδου [42, 54] απέδειξαν την εγκυρότητά της.

Οι Meng Qingbo, He Jinliang, Dawalibi και Ma, [55] παρουσίασαν μια μέθοδο μείωσης της αντίστασης ενός συστήματος γείωσης, σε περιοχές όπου το έδαφος παρουσίαζε υψηλή αντίσταση. Σκάβονται βαθιές οπές στο έδαφος και δημιουργούνται ρωγμές στο έδαφος μέσω εκρήξεων στις οπές. Έτσι ερχόμαστε σε επαφή με στρώματα χώματος χαμηλότερης αντίστασης, που πιθανόν βρίσκονται αρκετά βαθιά. Τέλος, γεμίζονται οι οπές και οι ρωγμές με υλικό χαμηλής αντίστασης υπό πίεση. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι αντιστάσεις επαφής μεταξύ των αγωγών γείωσης και του εδάφους. Συνεπώς, μορφοποιείται ένα περίπλοκο δίκτυο δενδροειδών ρωγμών, που παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση και συνδέεται με το πλέγμα γείωσης.

Η πιο συνήθης περίπτωση συνδυασμού μιας θεμελιακής γειώσεως με άλλο σύστημα γείωσης είναι μία σύνθετη διάταξη γείωσης, που αποτελείται από τη θεμελιακή γείωση ηλεκτρικά συνδεδεμένη με ένα εξωτερικό σύστημα βρόχων (μερικές φορές με ράβδους). Οι εξωτερικοί βρόχοι (και ράβδοι) τοποθετούνται όχι μόνο για να εξασφαλίσουν χαμηλή αντίσταση γείωσης, αλλά και για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των τεχνικών προδιαγραφών διαφόρων χωρών όσον αφορά στις διατάξεις αντικεραυνικής προστασίας. Από μελέτες που έγιναν σε σύνθετα συστήματα γείωσης σε ομογενές έδαφος, παρατηρήθηκε ότι η εισαγωγή ενός βρόχου με ράβδους σε ένα ήδη υπάρχον σύστημα θεμελιακής γείωσης, δεν μπορεί να μειώσει την αντίσταση της θεμελιακής γειώσεως περισσότερο από 30% [56].

Από παλαιότερες έρευνες και μετρήσεις έχει παρατηρηθεί ότι οι δυσμενέστερες τάσεις (βηματική και τάση επαφής) εμφανίζονται στους ακραίους βρόχους του πλέγματος. [3]. Για την κατανομή δυναμικού σε διάφορες κατευθύνσεις στη γειωμένη επιφάνεια, αποδείχτηκε ότι η μείωσή του από τα κεντρικά σημεία προς τα άκρα του πλέγματος οφείλεται κυρίως στην αύξηση του βάθους του πλέγματος μέσα στο έδαφος [50]. Γι' αυτό το λόγο, το σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη τάση επαφής, είναι το σημείο που βρίσκεται όσον το δυνατόν πιο κοντά σε ένα άκρο πλέγματος μέσα σε ένα κτίριο.

Ο Kostic [57] παρουσιάζει μια μέθοδο υπολογισμού της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης, καθώς και της κατανομής δυναμικού της γειωμένης επιφάνειας μιας θεμελιακής γείωσης σε ανομοιογενές έδαφος. Αυτές οι τάσεις δεν επηρεάζονται μόνο από το γειωμένο πλέγμα και τις γεωμετρικές παραμέτρους της βάσης, αλλά και από τις ειδικές αντιστάσεις των στρωμάτων του εδάφους και του σκυροδέματος, καθώς επίσης και από το βάθος του πλέγματος μέσα στη γη και από το πόσο λεπτό είναι το άνω στρώμα εδάφους.

Ανάλυση σύνθετων θεμελιακών συστημάτων γείωσης, συνδεδεμένων με εξωτερικά πλέγματα [58], παρουσιάζουν την επίδραση της θεμελιακής γείωσης στη μείωση της αντίστασης γείωσης του εξωτερικού πλέγματος.

Οι Nahman και Djordjevic παρουσιάζουν [28] μια πειραματική τεχνική μοντελοποίησης ενός γειωμένου ηλεκτροδίου σε ένα μη ομογενές έδαφος, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα που εξάγονται συγκρίνονται με τους θεωρητικούς υπολογισμούς, που προέκυψαν από γνωστές αναλυτικές μεθόδους [1]. Εξαιρετικά μεγάλης σημασίας στο σχεδιασμό του ηλεκτροδίου γείωσης είναι ο υπολογισμός της αντίστασης γείωσης και των διαφόρων τάσεων ασφαλείας [59].

Η εκτίμηση των μεγίστων βηματικών τάσεων που μπορούν να εμφανιστούν στην περίμετρο ενός υποσταθμού εάν παρουσιαστεί ένα σφάλμα προς γη, είναι ένα σπουδαίο μέλημα για τη σχεδίαση ενός κατάλληλου ηλεκτροδίου γείωσης [3]. Έχουν προταθεί απλές πρακτικές προσεγγίσεις και εκφράσεις για βηματικές τάσεις και τάσεις βρόχων, για γειωμένα πλέγματα διαφόρων σχημάτων, τετραγωνικά και ορθογωνικά, καθώς και συνδυασμένα με κατακόρυφα ηλεκτρόδια, τοποθετημένα σε ομοιογενές έδαφος [18, 60]. Επίσης, έχουν προταθεί [61] διορθωτικοί συντελεστές

της ανομοιομορφίας του εδάφους για βηματικές τάσεις και τάσεις βρόχων των τετραγωνικών γειωμένων πλεγμάτων καθώς και συνδυασμών τετραγωνικών πλεγμάτων και κατακόρυφων ράβδων. Οι προαναφερθείσες προσεγγιστικές εκφράσεις είναι πολύ χρήσιμες, όταν δεν είναι διαθέσιμα κατάλληλα υπολογιστικά προγράμματα, καθώς και για εκτίμηση των επιδράσεων των διαφόρων παραμέτρων στο πρωταρχικό στάδιο σχεδίασης του συστήματος γείωσης. Μια λεπτομερής ανάλυση των αποτελεσμάτων της επίδρασης, που έχει η διαφορετική διαμόρφωση των γειωμένων πλεγμάτων στη λειτουργία του συστήματος γείωσης, για ομοιογενή και πολυστρωματικά εδάφη, δείχνει ότι ο πιο αποτελεσματικός και οικονομικός σχεδιασμός εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη δομή, τον τύπο και τα χαρακτηριστικά του εδάφους [62]. Ακόμη υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις, που έδειξαν ότι υπάρχει μια βέλτιστη θέση του αγωγού μέσα στην περιοχή του συστήματος γείωσης για δεδομένη δομή του εδάφους [37-39, 51, 63].

Διαδικασίες μέτρησης της βηματικής τάσης και της τάσης επαφής έχουν δημοσιευθεί στα άρθρα [64], και στα πρότυπα DIN VDE [8, 9] ενώ στην βιβλιογραφία είναι διαθέσιμα και πιθανοτικά μοντέλα [65] για τον υπολογισμό του κινδύνου που διατρέχει ο άνθρωπος.

Μεθοδολογία που στηρίζεται στη μέθοδο των ροπών [66] υπολογίζει την επιφανειακή τάση, την τάση επαφής, τη βηματική τάση καθώς και την αντίσταση γείωσης. Τα αποτελέσματά της επιβεβαιώνονται μέσω μετρήσεων. Μία άλλη μέθοδος βασισμένη στη μέθοδο των ροπών για τον υπολογισμό της αντίστασης συστημάτων γείωσης που αποτελούνται από κατακόρυφες ράβδους σε μονοστρωματικό [67] ή διστρωματικό έδαφος [68], υποδεικνύει τους τρόπους βέλτιστου σχεδιασμού τέτοιου είδους συστημάτων γείωσης. Με την ίδια μεθοδολογία αναλύονται πλέγματα γείωσης, καθώς και συνδυασμοί πλεγμάτων και κατακόρυφων ράβδων [69].

Οι Dawalibi, Bouchard, Mukhedkar [70] παρουσίασαν μία παγκόσμια έρευνα που αφορά τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για τις εγκαταστάσεις γείωσης από τις μεγάλες εταιρείες ηλεκτρισμού.



### 1.3 Συστήματα γείωσης στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας

Οι σχεδιαστές συστημάτων γείωσης χρειάζονται απλές, ενδεχομένως εμπειρικές, σχέσεις, με μικρό σφάλμα, για τους υπολογισμούς τους. Οι σχέσεις αυτές πάσχουν, συνήθως, γιατί, ως εμπειρικοί τύποι, έχουν προκύψει κατόπιν προσαρμογής (curve fitting) σε πεπερασμένο αριθμό πειραματικών δεδομένων, επομένως ισχύουν μόνο για ανάλογα συστήματα και περιοχές τιμών.

Η πρώτη εκτεταμένη παρουσίαση της μεταβατικής συμπεριφοράς ηλεκτροδίων γείωσης έγινε από τους Bellaschi et al., [71-73]. Η ανάλυση των συστημάτων γείωσης σε διέγερση κρουστικού ρεύματος είναι μία πολύπλοκη διαδικασία. Στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας η αντίσταση των συστημάτων γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερη, από ό,τι κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Η αύξηση της αντίστασης των συστημάτων γείωσης στη μεταβατική κατάσταση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, δεδομένου ότι, μια μεγάλη τιμή της αντίστασης γείωσης κατά το μεταβατικό στάδιο (π.χ. κεραυνικές εκκενώσεις) μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή και καταστροφή της υπό προστασία εγκατάστασης. Δεκάδες εργασίες έχουν παρουσιασθεί πάνω σε αυτό το θέμα. Πολύ λίγες από αυτές τις εργασίες αναφέρονται σε πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειράματα είναι απαραίτητα για την επαλήθευση των διαθέσιμων μοντέλων και την ανάπτυξη, ενδεχομένως, νέων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Τα πειράματα που έχουν υλοποιηθεί μέχρι σήμερα [74-92] αφορούν είτε πραγματικά συστήματα γείωσης (Liew και Darveniza [74]; Rogers [75], Ramamoorthy et al. [76]; Stojkovic et al., [77]; Rochereau [78]; Kostaluk et al. [79]; Gonos et al. [80, 81]), είτε μοντέλα υπό κλίμακα (Kostaluk et al. [79]; Gupta et al. [82, 83], Gonos et al., [84, 85]). Κατά τα πειράματα σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να συνυπάρχει ιονισμός του εδάφους (Liew και Darveniza [74]; Kostaluk et al. [79]) ή όχι (Rogers [75]; Ramamoorthy et al. [76]; Stojkovic et al. [77]; Rochereau [78]; Gonos et al. [80, 81]).

Μετρήσεις της μεταβατικής αντίστασης διεξήχθησαν στην Ιαπωνία σε πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [86], σε οριζόντια ηλεκτρόδια [87] καθώς και σε πλέγματα υποσταθμών [88, 89]. Οι Garbagnati et al. [90] πραγματοποίησαν στην Ιταλία μετρήσεις της μεταβατικής αντίστασης με έγχυση ρεύματος υψηλής τιμής σε οριζόντια ηλεκτρόδια και κατακόρυφες ράβδους.

Οι Takashima et al. παρουσίασαν μία θεωρητική προσέγγιση της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης [91]. Μετρήσεις σε πλέγματα υποσταθμών [92] απέδειξαν την επίδραση του χρόνου μετώπου του κρουστικού ρεύματος στη μεταβατική συμπεριφορά της σύνθετης αντίστασης γείωσης.

Οι B. R. Gupta και B. Thapar σε άρθρο τους το 1980 [82] παρουσίασαν μία μελέτη, η οποία στηρίζεται στον προσδιορισμό της ενεργού περιοχής, δηλαδή της περιοχής πέρα από την οποία η αύξηση της διάστασης του πλέγματος δεν επιφέρει ουσιαστική μείωση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης. Ισοδύναμα, η ενεργός περιοχή εκφράζει εκείνο το τμήμα του πλέγματος, το οποίο είναι επαρκές για να διασκορπίσει το μεγαλύτερο μέρος του κρουστικού ρεύματος στη γη. Στη συνέχεια, ανέπτυξαν μια απλή μέθοδο για τον υπολογισμό της κρουστικής αντίστασης, του κρουστικού συντελεστή και της ενεργού περιοχής τετραγωνικών πλεγμάτων γείωσης όταν υπάρχει έγχυση ρεύματος στη γωνία ή στο κέντρο του πλέγματος. Η μέθοδος αυτή έχει την αδυναμία ότι αναφέρεται μόνο σε τετραγωνικά πλέγματα χωρίς κατακόρυφες ράβδους, ενώ στηρίζεται στην παραδοχή ότι το αρχικό ρεύμα μοιράζεται εξίσου σε όλα τα στοιχεία. Επιπλέον, παρουσίασαν έναν εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της επαγωγής τετραγωνικών πλεγμάτων γείωσης.

Οι B. R. Gupta και V. K. Singh το 1992 [83] επέκτειναν την προηγούμενη μελέτη τους σε ορθογωνικά πλέγματα εισάγοντας στις σχέσεις τον λόγο μήκους προς πλάτος. Η κρουστική σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γίνεται μικρότερη όσο ο λόγος μήκους προς πλάτος πλησιάζει στη μονάδα και όσο το σημείο έγχυσης προσεγγίζει το κέντρο. Τον ίδιο χρόνο δημοσίευσαν ένα άλλο άρθρο [93], στο οποίο παρουσίασαν μία μέθοδο για τον υπολογισμό της επαγωγής ορθογωνικού πλέγματος με ομοιόμορφα τετραγωνικά διάκενα, λαμβάνοντας υπόψη και το σημείο έγχυσης του ρεύματος. Τη μέθοδο αυτή εφάρμοσαν σε πολλά πλέγματα με διαφορετικές διαστάσεις και με βάση τα αποτελέσματα πρότειναν έναν εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της επαγωγής. Με περαιτέρω υπολογισμούς οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι για δεδομένο εμβαδό πλέγματος αυξανόμενου του αριθμού των διακένων η επαγωγή μειώνεται αλλά με μειούμενο ρυθμό και τελικά σταθεροποιείται. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα για τετραγωνικά πλέγματα διαπίστωσαν ότι η επαγωγή ορθογωνικού πλέγματος είναι μεγαλύτερη αυτής τετραγωνικού πλέγματος με ίδιο αριθμό διακένων.

Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης της γείωσης των πυλώνων υψηλής τάσης χρησιμοποιήθηκε από τον Rogers, [75] τετραγωνικό ρεύμα 100μs, πλάτους 1A, το οποίο εγχύθηκε ταυτόχρονα στην κάθε γωνία της βάσης του πυλώνα. Με τη βοήθεια παλμογράφου καταγράφηκαν η τάση και το ρεύμα και στη συνέχεια υπολογίστηκε η τιμή σύνθετης αντίστασης.

Ο Rochereau [78], το 1988, πραγματοποίησε για την EDF σειρά μετρήσεων χρησιμοποιώντας οριζόντιο, αλλά και κατακόρυφο ηλεκτρόδιο γείωσης, στις οποίες κατέγραψε το κρουστικό εγχυόμενο ρεύμα και το δυναμικό σημείων του ηλεκτροδίου ως προς την άπειρη γη.

Οι Ramamoorty, Narayanan, Parameswaran και Mukhedkar το 1989 [76] δημοσίευσαν μία μαθηματική μέθοδο για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς συνθέτων πλεγμάτων γείωσης (διαφόρων διαστάσεων) με κατακόρυφες ράβδους προς τη γη, στα οποία γίνεται έγχυση κρουστικού ρεύματος, όπως είναι το κεραυνικό. Για τη μελέτη αυτή δημιούργησαν ένα πρόγραμμα σε υπολογιστή χρησιμοποιώντας το π-ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο περιλαμβάνει την εγκάρσια αγωγιμότητα και την επαγωγή. Η ωμική αντίσταση και η εγκάρσια χωρητικότητα αμελούνται. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν τα επαλήθευσαν πειραματικά χρησιμοποιώντας ένα ορθογωνικό πλέγμα (διαστάσεων 28x21 μέτρα) με κατακόρυφες ράβδους (μήκους 2 μέτρων) και σημεία σύνδεσης στην περιμέτρό του. Το πλέγμα τοποθετήθηκε σε βάθος 80 cm. Εγχύθηκε κρουστικό ρεύμα σε διάφορα σημεία του πλέγματος. Καταγράφηκαν το ρεύμα και η τάση και υπολογίστηκε η κρουστική σύνθετη αντίσταση. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι όταν η έγχυση γίνεται στα εξωτερικά σημεία, η κρουστική σύνθετη αντίσταση παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την περίπτωση που η έγχυση γίνεται στα ενδιάμεσα σημεία του πλέγματος. Η μέθοδος των Ramamoorty et al. έχει το πλεονέκτημα ότι συμπεριλαμβάνει και κατακόρυφες ράβδους προς τη γη. Επίσης, είναι εφικτός ο υπολογισμός της μέγιστης τάσης που εμφανίζεται σε ένα σύστημα γείωσης. Μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι εφαρμόζεται ικανοποιητικά από μικρές έως και για μεσαίες τιμές ειδικής αντίστασης.

Το πείραμα των Stojkovic et al., [77], περιελάμβανε διστρωματικό έδαφος, τρία διαφορετικά πλέγματα γείωσης και η έγχυση του κρουστικού ρεύματος γινόταν σε

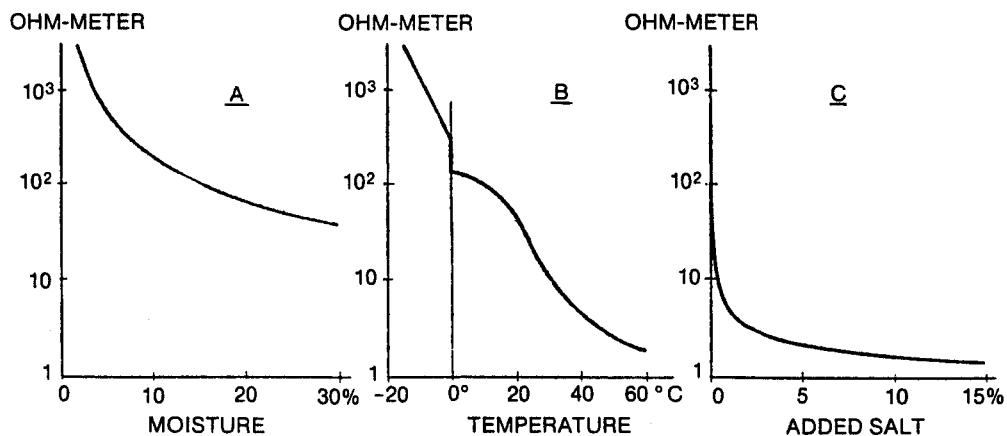
διάφορα σημεία του πλέγματος. Η τιμή του μέγιστου ρεύματος μπορούσε να μεταβληθεί, αλλά οι τιμές ήταν μικρές και δεν προκαλούσαν ιονισμό του εδάφους. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι η αύξηση της κρουστικής σύνθετης αντίστασης συγκρινόμενη με την τιμή της αντίστασης στη μόνιμη κατάσταση για γρήγορες κυματομορφές ρεύματος και για μικρά πλέγματα είναι πρακτικά ανεξάρτητη της διάταξης του συστήματος γείωσης.

Ένα σύστημα μέτρησης της σύνθετης αντίστασης συστημάτων γείωσης, το οποίο είναι εύχρηστο και χρησιμοποιείται και από εταιρείες παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε με πολύ καλά αποτελέσματα από την ομάδα του γνωστού Έλληνα Καθηγητή του Georgia Institute of Technology κ. Αθ. Μελιόπουλου [94, 95].

Μία μέθοδος για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς υπό συνθήκες κεραυνοπληξίας προτάθηκε από ομάδα εργασίας [96]. Στη μελέτη αυτή παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά των κεραυνικών ρευμάτων και των στοιχείων που αποτελούν μία γραμμή μεταφοράς. Χαρακτηριστικά των κεραυνικών παραμέτρων υπάρχουν και στην εργασία [97]. Στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ έχει κατασκευασθεί ένα χαμηλού κόστους σύστημα για την καταγραφή και ανάλυση των κεραυνικών ρευμάτων [98, 99]. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει δοκιμασθεί επιτυχώς σε εργαστηριακές συνθήκες.

#### **1.4 Ειδική αντίσταση εδάφους**

Το είδος, το εμβαδόν της επιφάνειας και το βάθος τοποθέτησης του ηλεκτροδίου γειώσεως εξαρτάται από την ειδική αντίσταση του εδάφους και την επιδιωκόμενη τιμή της αντίστασης γείωσης. Η ειδική αντίσταση εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και την σύστασή του. Υπάρχει ποικιλία εδαφών και ειδικών αντιστάσεων (εδάφη χωματώδη, αμμώδη, βραχώδη, υγρά, ξηρά, ανομοιογενή, κλπ.) με αντίστοιχη ποικιλία τιμών ειδικών αντιστάσεων. Όσο ξηρότερο και περισσότερο πετρώδες είναι το έδαφος, τόσο μεγαλύτερη η ειδική αντίστασή του,  $\rho$ , μετρούμενη συνήθως σε  $\Omega\cdot m$ . Σε ανισότροπα εδάφη η ειδική αντίσταση μεταβάλλεται κατά μήκος του ηλεκτροδίου γειώσεως, και ενδεχομένως με μη γραμμικό τρόπο [1-3, 12].



Σχήμα 1.1: Μεταβολή της ειδικής αντίστασης του εδάφους συναρτήσει Α) της υγρασίας Β) της θερμοκρασίας και C) της προσθήκης άλατος [3]

Η υγρασία του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στην ειδική αντίστασή του. Αναφέρεται ενδεικτικά, ότι σε ένα αργιλώδες έδαφος με 10% περιεχόμενο υγρασίας (κατά βάρος) η ειδική αντίσταση είναι 30 φορές μεγαλύτερη από το ίδιο έδαφος με περιεχόμενο υγρασίας 20% (σχήμα 1.1.A). Παρόλα αυτά, η υγρασία από μόνη της δεν παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην ειδική αντίσταση. Μόνο εάν η υγρασία περιέχει αρκετά φυσικά συστατικά για να αποτελέσει έναν αγωγίμο ηλεκτρολύτη θα συμβάλει σε σημαντική μείωση της αντίστασης του εδάφους. Η τεχνητή προσθήκη διαλυτών ουσιών στο νερό, όπως χλωριούχο νάτριο (αλάτι), χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), θειϊκός χαλκός ( $\text{CuSO}_4$ ), ή θειϊκό μαγνήσιο ( $\text{MgSO}_4$ ) είναι ένας πρακτικός τρόπος μείωσης της ειδικής αντίστασης του εδάφους (σχήμα 1.1.C). Οι εποχιακές μεταβολές της θερμοκρασίας οδηγούν σε κάποια διακύμανση της αντίστασης του εδάφους (σχήμα 1.1.B), ειδικότερα σε περιοχές όπου σημειώνεται παγετός. Οι διακυμάνσεις αυτού του είδους μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με τη χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων γειώσεως σε μεγάλο βάθος [3, 12]. Έχει μετρηθεί ότι η επίδραση της υγρασίας και της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερη σε μικρά βάθη (0,5 – 1m) παρά σε μεγάλα βάθη. Έτσι, ο γειωτής ράβδου που είναι σε μεγάλο βάθος, σε σύγκριση με έναν επιφανειακό γειωτή, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερότητας της αντίστασης κατά τη διάρκεια του έτους.

Η επίδραση του είδους του χώματος μπορεί να μελετηθεί με τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους είναι μια βασική εργασία για την ακριβή ανάλυση των συστημάτων γείωσης [3-11]. Η απόδοση του συστήματος γείωσης υφίσταται

σημαντική επίδραση από την υφή του χώματος στην εγγύς περιοχή του συστήματος γείωσης. Η μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους πρέπει να γίνεται, ιδανικά, με απουσία κάθε μεταλλικού σώματος ή αγωγού στο έδαφος. Μία λεπτομερής μελέτη της επίδρασης των μεταλλικών αντικειμένων, που βρίσκονται μέσα στο έδαφος, στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους έγινε από τους Ma και Dawalibi, [100]. Παρουσιάζονται διάφορες μέθοδοι μέτρησης, διάφοροι τύποι εδάφους και διάφορες μορφές μεταλλικών αντικειμένων εντός του εδάφους. Βρέθηκε ότι η επίδραση των μεταλλικών αντικειμένων μπορεί να είναι σημαντική στη μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους και ότι η επίδραση αυτή μεταβάλλεται σημαντικά, ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο μέτρησης, τον τρόπο υλοποίησής της (θέσεις ηλεκτροδίων) και τα χαρακτηριστικά του εδάφους, προτείνονται δε διάφοροι τρόποι διεξαγωγής μετρήσεων όταν υπάρχουν μεταλλικά αντικείμενα μέσα στο έδαφος.

Οι εξισώσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται σε ακριβείς υπολογισμούς για ηλεκτρόδια γείωσης προϋποθέτουν ότι η αγωγιμότητα του εδάφους δεν μεταβάλλεται με το βάθος. Ακόμη και σχετικά μέτριες κάθετες διαφοροποιήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν εκτεταμένες επιδράσεις στην αποτελεσματικότητα και την αντίσταση γείωσης των πλεγμάτων γείωσης. Αυτές οι διαφοροποιήσεις πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν στον προσδιορισμό των αντιστάσεων γείωσης και τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας πιστεύεται ότι θα δώσουν κάποια βοήθεια σε αυτή την κατεύθυνση. Ο Lattarulo [101] ερευνά την επίδραση του εδάφους στην συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης.

Ο Zaborszky [102] αναφέρει ότι ένα υποκείμενο στρώμα στο έδαφος υψηλότερης ειδικής αντίστασης καθιστά το εσωτερικό τμήμα του πλέγματος γείωσης όλο και πιο αναποτελεσματικό, όσο η ανομοιογένεια των αγωγιμοτήτων του εδάφους αυξάνει. Είναι πιο οικονομικό να χρησιμοποιούμε το αγωγίμο υλικό εκτεινόμενο σε μία όσο το δυνατό μεγαλύτερη περιφέρεια από το να το χρησιμοποιούμε για να σχηματίσουμε ένα πλέγμα μικρότερης περιφέρειας. Κατά κύριο λόγο η περιφέρεια, και όχι η περιοχή του ηλεκτροδίου γείωσης, καθορίζει την αντίσταση γείωσης.

Ο Herpe [103] θεωρεί ότι το έδαφος αποτελείται από δύο οριζόντια επίπεδα διαφορετικών αγωγιμοτήτων. Αυτό μπορεί να προκύψει, για παράδειγμα, εάν ένα

λεπτό επίπεδο επιφάνειας αποτελείται από υγρό χώμα, από τριμμένο χώμα ή από συμπαγές χώμα και κάτω από αυτό υπάρχει ένα παχύ στρώμα παγωμένου χώματος ή πετρώδους ή ξερού εδάφους. Αυτές οι συνθήκες αλλάζουν την βηματική τάση και την αντίσταση επαφής. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται οι εξισώσεις για το δυναμικό και την αντίσταση του ηλεκτροδίου στην περιοχή ενός οριζόντιου ηλεκτροδίου γείωσης τοποθετημένου σε διστρωματικό έδαφος.

Σε επόμενο άρθρο του, επίσης το 1979, ο R. J. Herpe [45] παρουσίασε μία μέθοδο για τον υπολογισμό των ρευμάτων διαρροής στους επιμέρους αγωγούς του πλέγματος. Μέσω των ρευμάτων αυτών είναι δυνατός ο υπολογισμός της τάσης σε οποιοδήποτε σημείο στην επιφάνεια του πλέγματος και στη συνέχεια της αντίστασης γείωσης του πλέγματος. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της είναι ότι συνυπολογίζει τη μεταβολή της πυκνότητας του ρεύματος διαρροής ανάλογα με τη διάταξη των αγωγών – παράλληλα, κάθετα ή υπό γωνία – καθώς και το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη της τα φαινόμενα των άκρων.

Το 1979, οι Dawalibi και Mukhedkar [54] παρουσίασαν τα αποτελέσματα ενός προγράμματος υπολογιστή που προσδιορίζει την ικανότητα γείωσης διστρωματικών εδαφών. Για διάφορα είδη πλεγμάτων γείωσης και διστρωματικών εδαφών υπολογίζονται αντιστάσεις γείωσης, βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής. Τα λαμβανόμενα αποτελέσματα οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Όταν το έδαφος δεν είναι ομοιόμορφο, για δεδομένη μορφή πλέγματος, υπάρχει μία διαμόρφωση εδάφους που οδηγεί σε μέγιστη τάση επαφής.
- Τα πλέγματα που αποτελούνται από παράλληλους αγωγούς είναι πιο αποδοτικά σε σχέση με αυτά που αποτελούνται από βρόχους και τα ορθογωνικά πλέγματα είναι πιο αποδοτικά από τα τετραγωνικά.
- Όταν το έδαφος είναι ομοιόμορφο, υπάρχει ένα ιδανικό βάθος τοποθέτησης του πλέγματος που οδηγεί σε ελάχιστη τάση επαφής.

Με επόμενη εργασία τους [104] παρουσίασαν μία ανάλυση της επίδρασης της προσθήκης ράβδων γείωσης σε σύστημα που αποτελείται από οριζόντιους αγωγούς γείωσης, όπως αυτοί που συνιστούν ένα πλέγμα, θεωρώντας διστρωματική διαμόρφωση εδάφους. Αρχικά, αποδεικνύουν ότι οποιαδήποτε διαμόρφωση εδάφους

μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία διστρωματική διαμόρφωση. Στη συνέχεια, αναλύεται μία τυπική ράβδος γείωσης και συσχετίζεται σταδιακά με άλλες ράβδους γείωσης καθώς και με οριζόντιους αγωγούς. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται σε κάθε περίπτωση οι πυκνότητες ρεύματος, η αντίσταση και οι τάσεις επαφής για διάφορα είδη εδάφους και χαρακτηριστικά ράβδων. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για ένα οριζόντιο αγωγό, με κατάληξη στη μελέτη πολλών ράβδων ενωμένων μεταξύ τους με πλέγμα γείωσης. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από ένα πρόγραμμα υπολογιστή βασισμένο στις αναλυτικές μεθόδους που περιέγραψαν στο [44].

Ο Blattner [105] συνέκρινε την ειδική αντίσταση του εδάφους που προκύπτει με τη μέθοδο των τεσσάρων σημείων του Wenner και με την μέθοδο του υπολογισμού της ειδικής αντίστασης του εδάφους με την μέτρηση της αντίστασης μίας κατακόρυφης ράβδου. Αντιμετωπίστηκαν τόσο ομοιογενή, όσο και ανομοιογενή δείγματα εδάφους. Διεξήχθησαν αρκετές μετρήσεις και με τις δυο μεθόδους σε τρεις τοποθεσίες υποσταθμών. Για ομοιογενή εδάφη οι δυο μέθοδοι έχουν ταυτόσημα αποτελέσματα, ενώ για ανομοιογενή εδάφη έχουν διαφορετικά σε μεγάλο βαθμό αποτελέσματα. Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου της κατακόρυφης ράβδου επηρεάζονται σημαντικά από το στρώμα του εδάφους με τη μικρότερη ειδική αντίσταση.

Οι Dawalibi και Blattner [106] ανέπτυξαν τεχνικές ερμηνείας μετρήσεων ειδικής αντίστασης του εδάφους. Για τις περισσότερες περιπτώσεις γείωσης, η γη προσεγγίζεται ως μια διστρωματική δομή εδάφους. Το ανώτερο στρώμα έχει πάχος  $h$  και το κατώτερο θεωρείται άπειρο. Το πάχος του ανωτέρου στρώματος και οι ειδικές αντιστάσεις των δυο στρωμάτων καθορίζονται από τις τιμές της ειδικής αντίστασης που μετρούνται με τη μέθοδο Wenner. Λόγω των πολλών δυνατών δομών και ιδιοτήτων των συστατικών της γης, υπάρχουν πολυάριθμες μέθοδοι και τεχνικές μοντελοποίησης. Ένας τρόπος μοντελοποίησης της γης βασίζεται στην απ' ευθείας σύγκριση της καμπύλης του πεδίου με ένα σύνολο θεωρητικών καμπυλών. Αν βρεθεί ικανοποιητική ομοιότητα μεταξύ της πεδιακής και μιας θεωρητικής καμπύλης, τότε είναι δυνατός ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της γης, όπου διεξήχθησαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις. Ένας άλλος τρόπος ερμηνείας των μετρήσεων ειδικής αντίστασης, είναι με χρήση κατάλληλου λογισμικού.



Οι Takahashi και Kawase [107-108] παρουσίασαν την θεωρητική ανάλυση μέσω της οποίας κατέληξαν σε χρήσιμους τύπους για τον υπολογισμό της επιφανειακής τάσης για πολυστρωματική δομή του εδάφους.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους έγινε σημαντική έρευνα από τον del Alamo, ο οποίος συνέκρινε οχτώ διαφορετικές μεθοδολογίες [109]. Επίσης, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι [110-114] διαθέσιμες στην διεθνή βιβλιογραφία. Έχει, επίσης, πραγματοποιηθεί εκτίμηση των παραμέτρων του τριστρωματικού εδάφους [115, 116].

Σε εργασία των Dawalibi και Barbeito το 1991 [117] υπολογίστηκαν και μετρήθηκαν οι αντιστάσεις και τα δυναμικά στην επιφάνεια του εδάφους των συστημάτων γείωσης δύο υποσταθμών, σε διάφορες φάσεις της εγκατάστασης. Τα συστήματα γείωσης των υποσταθμών είναι τοποθετημένα σε πολυστρωματικά εδάφη. Η ειδική αντίσταση του εδάφους κάθε σημείου μετράται και υπολογίζονται οι ισοδύναμες διστρωματικές και πολυστρωματικές δομές εδάφους. Αποδεικνύεται ότι υπάρχει καλή συμφωνία των μετρήσεων με τις υπολογιζόμενες τιμές όταν χρησιμοποιείται πολυστρωματική θεώρηση σε σχέση με την θεώρηση ομογενούς εδάφους.

Μετρήσεις διεξήχθησαν από τους Ma και Dawalibi [118] με την εφαρμογή δύο ευρύτατα διαδεδομένων μεθόδων: τη μέθοδο Wenner και τη μέθοδο Schlumberger [4, 5]. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων για διαφορετικές τιμές της συχνότητας λειτουργίας, διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των ακροδεκτών ρεύματος και δυναμικού, καθώς και για περιπτώσεις πολυστρωματικών εδαφών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μέθοδος Wenner υστερεί σε περιπτώσεις επαγωγικής σύζευξης μεταξύ των αγωγών έναντι της μεθόδου Schlumberger, αλλά επηρεάζεται λιγότερο από φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (π.χ. θόρυβος) [118].

Οι Wang, Takasima, Sakuta και Tsubota [119] ανέπτυξαν μια μεθοδολογία μέτρησης της αντίστασης γείωσης, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της πώσης δυναμικού, με τον ακροδέκτη δυναμικού (probe) να βρίσκεται σε αντίθετη κατεύθυνση από τον ακροδέκτη του ρεύματος. Από διάφορες προσομοιώσεις προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι μετρούμενες αντιστάσεις είναι πάντα μικρότερες από τις πραγματικές τιμές.

## 1.5 Ιονισμός εδάφους

Είναι γνωστό εδώ και πολλά χρόνια ότι η ειδική αντίσταση του εδάφους μειώνεται όταν σε αυτό πραγματοποιείται εκφόρτιση ρεύματος υψηλής τιμής [120]. Αυτό έχει σαν συνέπεια την αναμενόμενη μείωση της αντίστασης γείωσης του ηλεκτροδίου που είναι τοποθετημένο σε αυτό [71-73]. Επομένως, το φαινόμενο αυτό βοηθά στη μείωση του αυξημένου δυναμικού της γείωσης κατά το μεταβατικό στάδιο. Στα σημεία όπου η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβαίνει την τιμή της κρίσιμης έντασης ιονισμού  $E_c$  θα συμβεί διάσπαση, δηλαδή θα μετατραπεί το επηρεασμένο τμήμα του εδάφους από μονωτικό σε αγωγίμο. Η διάσπαση θα ξεκινήσει στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, όπου η πυκνότητα του ρεύματος είναι η μεγαλύτερη και θα συνεχίσει προς τα έξω μέχρι τα σημεία που η πυκνότητα ρεύματος μειώνεται κάτω από την κρίσιμη τιμή. Η έναρξη του φαινομένου του ιονισμού που συνεισφέρει στη μείωση της αντίστασης εξαρτάται από το μέγεθος της ηλεκτρικής έντασης του εδάφους. Η διάσπαση του εδάφους που περιγράφηκε παραπάνω ισοδυναμεί βασικά με μια αύξηση των διαστάσεων του ηλεκτροδίου ή με μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ως εκ τούτου, η αντίσταση γείωσης  $R_i$  (και η ειδική αντίσταση του εδάφους  $\rho_i$ ) που συναντάται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, θα είναι μικρότερη από τη «μετρούμενη με όργανο» τιμή  $R_0$  ( $\rho_0$ ). Αυτό το γεγονός είναι γνωστό εδώ και πολλές δεκαετίες και οι πρώτες σημαντικές δοκιμές για τον καθορισμό του λόγου ( $R_i/R_0$ ) έγιναν από τον Towne [121].

Η βάση του πιο απλού μαθηματικού μοντέλου για τον ιονισμό του εδάφους στηρίζεται στην ανάλυση που έκαναν οι Bellashi, Armington και Snowden [72] στην οποία περιγράφεται η αντίσταση ενός ηλεκτροδίου σε ομοιόμορφα ιονισμένη ζώνη που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο. Πιστεύεται ότι ο ιονισμός του εδάφους αρχίζει από τη στιγμή που η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβεί την κρίσιμη ένταση ιονισμού του εδάφους  $E_c$ . Μερικοί ερευνητές [72, 74, 120] έχουν υπολογίσει πειραματικά την κρίσιμη ένταση ιονισμού του εδάφους  $E_c$ .

Στο παρελθόν έχει διεξαχθεί ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων αντίστασης κάτω από συνθήκες εκκενώσεων υψηλών ρευμάτων, συνήθως χρησιμοποιώντας κρουστικά ρεύματα. Πειράματα διεξήγαγε το 1929 ο H.M. Towne [121] σε ασυμπύεστο χαλικώδες έδαφος, που η περιεκτικότητά του σε νερό ήταν γενικά άγνωστη και

πιθανώς μεταβαλλόταν ανάλογα με το βάθος κατά μήκος των ράβδων γείωσης. Το 1941 και το 1942 ο Bellaschi [71, 72] το 1948 ο Πετρόπουλος [120] το 1953 ο Armstrong [122], το 1974 ο Liew et al. [74], το 1978 ο Dick et al. [123] πραγματοποίησαν πειράματα για τον ιονισμό τα οποία ελήφθησαν υπόψη από τον Mousa [124] για τον υπολογισμό της κρίσιμης έντασης ιονισμού του εδάφους. Πειράματα έχουν γίνει, επίσης, και από τους Kawai [125], Fagan [126] και Rogers [75], ωστόσο, αυτά τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας είτε σύνθετες διατάξεις ηλεκτροδίων, είτε ράβδους τοποθετημένες σε τσιμέντο. Ως εκ τούτου δε μπορούν να χρησιμεύσουν για τον προσδιορισμό της κρίσιμης έντασης έναρξης του ιονισμού  $E_c$ .

Αρκετοί ερευνητές διεξήγαγαν παρόμοια πειράματα και κάποιοι από αυτούς χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματά τους για να προσδιορίσουν την κρίσιμη ένταση έναρξης  $E_c$ . Γνωρίζοντας την τιμή του  $E_c$ , είναι δυνατό να υπολογίσουμε την αντίσταση  $R_i$  για άλλες περιπτώσεις, χωρίς να απαιτούνται παραπέρα πειράματα (σχήμα 1.2.β). Ο Liew et al. [74] προήγαγε περαιτέρω τη θεωρία υπολογίζοντας την παραμένουσα ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους που υπέθεσαν ότι η ζώνη ιονισμού είναι ένας τέλειος αγωγός. Αυτό τους επέτρεπε να καθορίζουν τη μεταβολή της αντίστασης σε σχέση με το χρόνο για μια δεδομένη κρουστική κυματομορφή.

Οι Liew και Darveniza, [74] πραγματοποίησαν μια σειρά από πειραματικές δοκιμές σε τρεις διαφορετικούς τύπους εδαφών χρησιμοποιώντας κρουστικά ρεύματα (με μορφές που ποικίλουν: μέγιστο ρεύμα 1-20kA, χρόνος μετώπου 6-16μs, χρόνος ημίσειος εύρους ουράς 18-54μs) με στόχο την επαλήθευση του αναλυτικού μοντέλου που πρότειναν (και φέρει το όνομά τους) για τον ιονισμό του εδάφους και όχι την πλήρη μελέτη των μεταβατικών χαρακτηριστικών των γειώσεων. Τα συστήματα γείωσης που εξέτασαν ήταν ράβδοι γείωσης (διαφόρων διατομών και μηκών) και ημισφαιρικά ηλεκτρόδια.

<p style="text-align: center;"><i>Σχήμα 1.2.α</i> <i>Ημισφαιρικό ηλεκτρόδιο</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Σχήμα 1.2.β</i> <i>Ράβδος (Liew) [74]</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Σχήμα 1.2.γ</i> <i>Ράβδος (Bellaschi) [72]</i></p>

Ο υπολογισμός της  $R_i$  συνήθως βασίζεται στην υπόθεση ότι το έδαφος είναι ένα ομογενές μέσο και ως εκ τούτου η ζώνη ιονισμού παίρνει απλές μορφές, οι οποίες είναι εύκολο να αναλυθούν. Στην περίπτωση ενός ημισφαιρικού ηλεκτροδίου, η ζώνη ιονισμού θα είναι ημισφαιρική, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.α. Στην περίπτωση μιας ράβδου γείωσης, οι Liew et al. [74] θεώρησαν ότι η ζώνη ιονισμού είναι της μορφής που φαίνεται στο σχήμα 1.2.β, ενώ οι Bellaschi et al. [72, 73] υιοθέτησαν την εναλλακτική μορφή του σχήματος 1.2.γ.

Στην πράξη, το έδαφος δεν είναι ένα ομογενές μέσο. Η ανομοιογένεια αυτή οφείλεται: α) στη μεταβολή της περιεκτικότητάς του σε νερό β) στην ύπαρξη κόκκων χώματος διαφορετικών μεγεθών και γ) στην ύπαρξη οργανικών και ανόργανων συστατικών. Τέτοια έλλειψη ομογένειας υπάρχει επίσης, αν και σε πολύ μικρότερο βαθμό, σε συνθήκες εργαστηρίου, όπου τα δείγματα κατασκευάζονται από κοσκινισμένο υλικό και το νερό στο δείγμα είναι εύλογα ομοιόμορφα κατανεμημένο. Ως αποτέλεσμα, το ρεύμα γίνεται συγκεντρωμένο δια μέσω ορισμένων διακριτών καναλιών και το υποτιθέμενο ομοιόμορφο σχήμα της ζώνης ιονισμού δεν πραγματοποιείται. Αυτό παρατηρήθηκε στο εργαστήριο από τον Πετρόπουλο [120]. Οι ερευνητές, συμπεριλαμβανομένου και του Πετρόπουλου έκαναν υπολογισμούς βασισμένοι στην υπόθεση ότι η ζώνη ιονισμού θα πάρει ομοιόμορφο σχήμα. Ωστόσο, δεν είχε αναγνωριστεί μέχρι τώρα ότι η τιμή του  $E_c$  που θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς είναι δυνατό να είναι σημαντικά διαφορετική από την τιμή που προέκυψε από πειράματα ιονισμού [124]. Οι Erler et

al. [127] επιβεβαίωσαν τις επιδράσεις της έλλειψης ομογένειας του εδάφους με πειράματα σε ένα δείγμα εδάφους, τοποθετημένο σε κύλινδρο. Διαπίστωσαν ότι, τα ρεύματα που κυκλοφορούν στα διάφορα τμήματα του δοκιμίου διέφεραν μεταξύ τους κατά το λόγο έως και 3:1. Η Oettle [128], παρόμοια, βρήκε ευρείες διαφορές μεταξύ των ρευμάτων που κυκλοφορούν στα διάφορα μέρη ενός διαιρεμένου σε τμήματα οριζοντίου ηλεκτροδίου με σχήμα δακτυλιδιού. Στη φύση, η μορφή των δενδριτών που δημιουργούνται όταν ένας κεραυνός πλήξει άμμο, είναι μια ακόμα απόδειξη των επιδράσεων της έλλειψης ομογένειας του εδάφους [124].

Ο ιονισμός του εδάφους θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον καθορισμό της αντίστασης ενός συγκεντρωμένου ηλεκτροδίου γείωσης για τους παρακάτω λόγους:

α) Το τμήμα του εδάφους στην πλησιέστερη στο ηλεκτρόδιο περιοχή δημιουργεί ένα μεγάλο μέρος της συνολικής αντίστασης, γιατί η διατομή που διασχίζει το ρεύμα σε αυτή τη ζώνη είναι μικρή. β) Τα ρεύματα που απαιτούνται για να οδηγήσουν σε ιονισμό είναι αρκετά μικρά (της τάξεως του 1kA [124]). Είναι άξιο αναφοράς ότι η μέθοδος του IEEE για ρεύματα, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρυθμού των κεραυνικών πληγμάτων των γραμμών ισχύος [129] δε συνυπολογίζει και τον ιονισμό του εδάφους. Άλλη ομάδα εργασίας του IEEE [130] δε φαίνεται να αποδέχεται μία μόνο τιμή για την κρίσιμη ένταση ιονισμού του εδάφους. Παρόλα αυτά παραθέτει την τιμή 1000 kV/m που πρότεινε η Oettle [131]. Αντίστοιχη ομάδα εργασίας της CIGRE [132] χρησιμοποιεί  $E_c=400$  kV/m σε μερικούς υπολογισμούς, χωρίς να εξηγείται η επιλογή της παραπάνω τιμής.

Στα πειράματα που διεξήγαγε ο Πετρόπουλος [120] χρησιμοποιώντας ομοκεντρικά ημισφαιρικά ηλεκτρόδια, το έδαφος τοποθετήθηκε στο δοχείο σε διαδοχικά στρώματα και πιέστηκε με το χέρι ώστε να αποκτήσει ομογενή υφή. Ο Πετρόπουλος σημείωσε ότι η ειδική αντίσταση εξαρτιόταν σημαντικά από τη συμπίεση του εδάφους. Όταν μια ράβδος ή ένας αγωγός καρφώνεται στο έδαφος, το ηλεκτρόδιο δημιουργεί χώρο για την εισχώρηση συμπιέζοντας το έδαφος στην άμεση περιοχή του. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ειδική αντίσταση όσο και τη βαθμωτή συνάρτηση διάσπασης στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Αυτή η αλλαγή αναμένεται να περιοριστεί σε ένα μικρό τμήμα του εδάφους γύρω από το ηλεκτρόδιο, για παράδειγμα ένα στρώμα τόσο λεπτό όσο περίπου η ακτίνα του ηλεκτροδίου. Στις σημαντικές πρακτικές περιπτώσεις, όπου και το  $\rho_0$ , το  $I$  ή και τα δυο έχουν υψηλές

τιμές, το μέτωπο της ζώνης ιονισμού θα είναι πολύ πιο πέρα από τη «συμπιεσμένη» ζώνη του εδάφους. Κατ' επέκταση δε θα επηρεαστεί το  $E_c$ , ωστόσο, η ενεργός τιμή του  $\rho_0$  που υπολογίζεται από το  $R_0$  (η αντίσταση κάτω από συνθήκες χαμηλού ρεύματος), θα είναι κάπως μικρότερη από τη «φυσική» τιμή, που εμφανίζεται στο μέτωπο της ιονισμένης ζώνης.

Βασισμένος στα δεδομένα της εποχής του, ο Sunde [2] διετύπωσε την άποψη ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων κρουστικής αντίστασης είναι δυνατό να ελεγχθούν σε μεγάλο βαθμό από τον επιφανειακό ιονισμό παρά από ιονισμό διαμέσου του εδάφους. Ο Sunde υποστήριξε τον ισχυρισμό του με τα πειράματα που διεξήγαγε ο Eaton [133]. Μια προσεκτική εξέταση των δεδομένων του Eaton από τον Mousa [124] αποκάλυψε ότι το συμπέρασμα του Sunde δεν ήταν δικαιολογημένο.

Οι Flanagan et al. [134] έκαναν ένα αξιοσημείωτο πείραμα, το οποίο αποδεικνύει ότι η εκκένωση «προτιμά» να εκδηλωθεί κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, παρά κατά μήκος της επιφάνειάς του.

Στα κρουστικά πειράματα που διεξήγαγε η Oettle [131] σε μικρά ομοιόμορφα κενά χώματος, η αντοχή του εδάφους βρέθηκε ότι κυμαίνεται μεταξύ 600 και 1850 kV/m. Αυτά τα πειράματα κάλυψαν εδάφη αρκετών τύπων. Βάσει του σχολιασμού για το μηχανισμό διάσπασης του χώματος, το χαμηλότερο τμήμα των παραπάνω τιμών αφορά εδάφη υψηλής περιεκτικότητας σε νερό. Κάτω από κεραυνικές συνθήκες, θα συνυπήρχε πιθανότατα βροχή και η περιεχόμενη στο χώμα υγρασία γενικά θα είναι μάλλον υψηλή. Συμπερασματικά, οι χαμηλότερες από τις τιμές αντοχής της του εδάφους του πειράματος της Oettle (600-800 kV/m) θα χρησιμοποιούνται σε κεραυνικούς υπολογισμούς. Σε μη εργαστηριακές συνθήκες (κάτω από συνθήκες εξωτερικού χώρου), ο βαθμός της ανομοιογένειας του εδάφους θα είναι υψηλότερος από ό,τι σε εργαστηριακές συνθήκες. Άρα είναι λογικό να αναμένει κανείς ότι κάποια σημεία του εδάφους θα έχουν εντάσεις έναρξης ιονισμού ίσες περίπου με το μισό του εύρους των 600-800 kV/m που αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι, η ελάχιστη τιμή του  $E_c$  θα κυμαίνεται μεταξύ 300 και 400 kV/m. Στα πειράματα που διεξήγαγαν οι Liew et al. [74], κατάφεραν να προσομοιώσουν την παρατηρούμενη δυναμική συμπεριφορά αρκετών ηλεκτροδίων χρησιμοποιώντας  $E_c=300$  kV/m. Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε και από τον Eriksson [135] αλλά και από τον Mousa [136] σε μια

ανάλυση για την ασφάλεια των πυροσβεστών έναντι υπερπηδήσεων κατά τη διάρκεια κατάσβεσης φωτιάς κοντά σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διάσπαση του εδάφους ξεκινά με τον ιονισμό του παγιδευμένου στα κενά του χώματος αέρα. Η ένταση έναρξης του ιονισμού του εδάφους  $E_c$  είναι πάντα μικρότερη από αυτή του αέρα και μειώνεται δραστικά όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι υψηλή. Αυξάνοντας την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό έχουμε μείωση και του  $E_c$  και της ειδικής αντίστασης του εδάφους  $\rho_0$ . Ωστόσο, δεν υπάρχει άμεση αλληλεξάρτηση μεταξύ του  $E_c$  και του  $\rho_0$ , επειδή το  $\rho_0$  εξαρτάται επίσης από την ποσότητα του άλατος στο χώμα.

Ο επιφανειακός ιονισμός δεν ελέγχει την τιμή της κρουστικής αντίστασης  $R_i$  και δε λαμβάνει χώρα σε ένα σημαντικό βαθμό, εκτός από σπάνιες περιπτώσεις. Η τιμή του  $R_i$  καθορίζεται κυρίως από τη χαμηλότερη τιμή του  $E_c$ , που παρατηρείται οπουδήποτε κατά μήκος του ηλεκτροδίου και της περιοχής του. Συνεπώς, η τιμή του  $E_c$  που θα χρησιμοποιηθεί οφείλει να είναι σημαντικά μικρότερη από την τιμή που προέκυψε από πειράματα με προσθήκη νερού στα δείγματα. Επίσης, η παραμένουσα ειδική αντίσταση της ζώνης ιονισμού δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα στους υπολογισμούς του  $R_i$ .

Τυπικά επίπεδα σφάλματος στην μέτρηση της τάσης του ηλεκτροδίου, του κρουστικού ρεύματος που εκφορτίζεται δια μέσω αυτού και της ειδικής αντίστασης του εδάφους μπορούν να οδηγήσουν σε σφάλματα στην εκτίμηση του  $E_c$  μέχρι περίπου 65% για την περίπτωση ράβδων γείωσης.

Ένας μεγάλος αριθμός [124] αξιόπιστων μετρήσεων κρουστικής αντίστασης από διάφορες πηγές μαζί με την παραπάνω ανάλυση υποδηλώνουν ότι η τιμή του  $E_c$  θα πρέπει να είναι της τάξεως των 300 kV/m. Η τιμή των 400 kV/m που προτάθηκε από το CIGRE είναι επίσης χρησιμοποιήσιμη, λαμβάνοντας υπόψη ότι το  $R_i$  δεν είναι πολύ ευαίσθητο στις μεταβολές του  $E_c$  ( $R_i \propto \sqrt{E_c}$  για την περίπτωση ημισφαιρίων).

Η προσέγγιση της Oettle [131] για τον υπολογισμό της κρουστικής αντίστασης των συγκεντρωμένων ηλεκτροδίων γείωσης είναι μία μέθοδος που μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε μορφή ηλεκτροδίων. Η κρίσιμη ένταση ιονισμού του εδάφους  $E_c$  μπορεί να προσεγγισθεί γύρω στο 1MV/m, η οποία όμως είναι σίγουρα πολύ υψηλή.

Διάφορες μορφές έχουν δοθεί στην κρουστική αντίσταση και στις παραμέτρους της από τις οποίες οι επικρατέστερες είναι αυτές των Bellashi [72], Korsuntcev [137], Liew and Darveniza [74] και της Oettle [131].

Οι Kosztaluk, Loboda και Mukhedkar [79] πραγματοποίησαν μία πειραματική μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς της σύνθετης αντίστασης των συστημάτων γείωσης. Τα αποτελέσματα της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν για να παράγουν ισοδύναμα κυκλώματα των συστημάτων γείωσης. Επιλέχθηκε το σύστημα γείωσης των πύργων (πυλώνων) των γραμμών μεταφοράς, το οποίο συνδέθηκε σε μία κρουστική γεννήτρια ρεύματος, με μέγιστο ρεύμα 26kA, (3-12μs/15-40μs, 75kJ) και καταγράφηκε η χρονική μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος και της τάσης. Οι δοκιμές έδειξαν ότι όταν υπάρχει ιονισμός η αντίσταση μειώνεται δύο με τρεις φορές. Η μη γραμμικότητα της σύνθετης αντίστασης μπορεί να μοντελοποιηθεί με χρήση μη γραμμικών αντιστάσεων. Για το σκοπό της δοκιμής των μοντέλων τα κυκλώματα αυτά υλοποιήθηκαν με κατάλληλο συνδυασμό στοιχείων (αντιστάσεις, πηνία, χωρητικότητες) και καταπονήθηκαν με ρεύμα υπό κλίμακα (1:20 έως 1:200). Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε κατά την προσομοίωση ήταν υψηλή.

Οι Loboda και Pochanke [138] παρουσίασαν μια πειραματική μελέτη των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους, κατά την έγχυση κρουστικού ρεύματος. Με τη μελέτη αυτή έγιναν γνωστά τα μεταβατικά χαρακτηριστικά των συστημάτων γείωσης. Δηλαδή, οι χαρακτηριστικές τάσης και ρεύματος είναι πάντα μη γραμμικές, η τάση δε, λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της πριν από το ρεύμα. Οι κρίσιμες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μπορούν να συσχετισθούν με τη συννοριακή επιφάνεια του χώρου όπου λαμβάνουν χώρα οι σπινθηρισμοί.

Οι Loboda και Scuka [139] μελέτησαν τα μεταβατικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών εκκενώσεων και των διαδικασιών ιονισμού στο έδαφος. Για τη μελέτη του φαινομένου διεξήχθησαν πειράματα επιβολής κρουστικού ρεύματος σε τρία είδη χώματος: άργιλο, άμμο και χώμα πλούσιο σε οργανικές ύλες. Τα πειράματα αυτά αποσκοπούσαν στην κατανόηση των φυσικών διαδικασιών κάτω από συνθήκες υψηλής και χαμηλής πυκνότητας ρεύματος.

Η μείωση της μεταβατικής αντίστασης γείωσης που προκαλεί ο ιονισμός παρουσιάζεται και από τους Chisholm και Janischewskyj [140]. Οι Almeida et al.



[141] προσομοίωσαν τη διαδικασία του ιονισμού μεταβάλλοντας την ειδική αντίστασης του εδάφους.

Η συμπεριφορά συστημάτων γείωσης υπό υψηλό κρουστικό ρεύμα εξετάζεται από τον Geri [142], ο οποίος λαμβάνοντας υπόψη τον τον ιονισμό που συμβαίνει στο έδαφος, προσομοίωσε με κυκλωματική προσέγγιση διάφορα συστήματα γείωσης για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις από την βιβλιογραφία [78, 90, 143].

Η μείωση της αντίστασης μικρών κυρίως συστημάτων γείωσης εξαιτίας του ιονισμού όταν τροφοδοτούνται με ρεύμα υψηλής τιμής παρουσιάζεται [144] με χρήση ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Στο άρθρο [144] παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος λαμβάνει υπόψη τον ιονισμό του εδάφους καθώς και αποτελέσματα για διάφορα συστήματα γείωσης για διάφορες τιμές της κρίσιμης έντασης έναρξης ιονισμού.

## **1.6 Προσομοίωση συστημάτων γείωσης**

### **1.6.1 Κυκλωματική προσομοίωση συστημάτων γείωσης**

Η αντίσταση γείωσης και τα άλλα χαρακτηριστικά (της απόκρισης) ενός συστήματος γείωσης στην μόνιμη κατάσταση μπορούν να υπολογιστούν απευθείας στο πεδίο του χρόνου με κλειστού τύπου μαθηματικές εκφράσεις [1-3, 20-30, 42-54]. Στην περίπτωση της μελέτης της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης δεν χρησιμοποιούνται κλειστού τύπου εκφράσεις για την απόκριση του συστήματος [71-95]. Γι' αυτό τον λόγο προκύπτει η αναγκαιότητα των διαδικασιών ανάλυσης, με την βοήθεια των οποίων είναι εφικτή η πρόβλεψη της μεταβατικής απόκρισης των συστημάτων γείωσης. Η ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς μπορεί να εφαρμοστεί, αν υιοθετηθεί ένα κυκλωματικό μοντέλο [24, 87, 143-170, 217]. Παρακάτω παρουσιάζονται κατηγοριοποιημένοι οι ερευνητές ανάλογα με τα κυκλωματικά μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιούν:

1. Με χρήση π-ισοδυνάμων κυκλωμάτων [24, 87, 145-151]. Σε αυτή την περίπτωση, το ηλεκτρόδιο χωρίζεται σε τμήματα καθένα από τα οποία αντικαθίσταται με ένα π-ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων.

2. Με χρήση του μοντέλου γραμμής μεταφοράς κατανεμημένων στοιχείων [87, 143, 145, 150-155]. Σε αυτή την περίπτωση τα τμήματα που χωρίζεται το ηλεκτρόδιο αντικαθίστανται από κατανεμημένα στοιχεία εξαρτώμενα από τη συχνότητα.
3. Με χρήση τροποποιημένων π-ισοδυνάμων κυκλωμάτων [66, 217, 156, 157]. Τα τροποποιημένα π-ισοδύναμα κυκλώματα αποτελούνται από συγκεντρωμένα στοιχεία (ωμικές απώλειες και εγκάρσια αγωγιμότητα) τοποθετημένα στα άκρα, ενώ το μέσο αντικαθίσταται από τμήμα γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες.

Η εργασία των Devgan και Whitehead [158] ασχολείται με τη μεταβατική συμπεριφορά ηλεκτροδίων γείωσης μήκους από 50m έως 100m. Συγκεκριμένα αναφέρεται σε σύστημα γείωσης που συνδέεται στη βάση ενός υποσταθμού. Το πιο απλό μοντέλο χρησιμοποιεί 2 χρονικές σταθερές: μία για μικρά σχετικά χρονικά διαστήματα και μία για μεγάλα. Στον υπολογισμό αυτών των σταθερών λαμβάνεται υπ' όψιν η αγωγιμότητα και η διαπερατότητα του εδάφους σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες. Τα πειραματικά αποτελέσματα του Kawai [125] έχουν χρησιμεύσει για να χαραχθούν καμπύλες εκτίμησης των χρονικών αυτών σταθερών. Στην εργασία παρουσιάζονται συγκριτικά πρακτικές εφαρμογές των κυκλωματικών μοντέλων για ενδεικτικές τιμές σύνθετης αγωγιμότητας διαφόρων διατάξεων εδάφους, από άποψη διαστρωμάτωσης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι για υψηλές τιμές αντίστασης εδάφους, ο συνδυασμός μιας συγκεντρωμένης, μεγάλης χωρητικότητας γείωσης στο σταθμό με μια κατανεμημένη, μεγάλης αγωγιμότητας γείωσης κατάλληλου μήκους είναι προτιμότερος από την καθεμία μόνη της ή από μια συνεχή αντιστάθμιση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα του Kawai [125].

Η εργασία των Semlyen και Dabuleanu [159] αφορά τις γραμμές μεταφοράς, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα αποτελέσματα και για τα συστήματα γειώσεων. Παρουσιάζει μια καινούρια προσέγγιση στον υπολογισμό των μεταβατικών καταστάσεων στις γραμμές μεταφοράς με παραμέτρους εξαρτώμενες από τη συχνότητα. Ο σκοπός της είναι να εξοικονομήσει χρόνο αποφεύγοντας τις συνελίξεις. Η μέθοδος στηρίζεται στη δημιουργία μίας ισοδύναμης γραμμής κατά Norton. Οι υπολογισμοί κρουστικών ρευμάτων βασίζονται σε μεθόδους οδοντών κυμάτων παρά το γεγονός ότι οι παράμετροι της γραμμής καθορίζονται στο πεδίο

της συχνότητας. Η μέθοδος βασίζεται στην παρατήρηση ότι η βηματική απόκριση της γραμμής μπορεί να προσεγγιστεί με εκθετικές συναρτήσεις.

Οι Dawalibi και Mukhedkar [44] παρουσίασαν μεθόδους υπολογισμού της κατανομής του ρεύματος σε απομονωμένο σύστημα γείωσης (πλέγμα ή ηλεκτρόδια), σε διασυνδεδεμένα συστήματα γείωσης, καθώς και στην περίπτωση ύπαρξης αγωγού επιστροφής. Οι τρεις προαναφερθείσες μέθοδοι εφαρμόζονται στην περίπτωση μεμονωμένου ηλεκτροδίου, καθώς και στην περίπτωση διασυνδεδεμένων ηλεκτροδίων και τροποποιούνται κατάλληλα στην περίπτωση ύπαρξης αγωγού επιστροφής. Στην περίπτωση ύπαρξης αγωγού επιστροφής θεωρούνται δύο συστήματα ηλεκτροδίων. Το πρώτο σύστημα εγχύει θετικό ρεύμα προς τη γη (κυρίως ηλεκτρόδιο ή εκπομπός) και το δεύτερο σύστημα εγχύει αρνητικό ρεύμα προς τη γη (ηλεκτρόδιο επιστροφής ή συλλέκτης). Η τροποποίηση που πρέπει να γίνει στις παραπάνω μεθόδους, είναι ότι για το κυρίως ηλεκτρόδιο οι τιμές του συντελεστή διανομής του ρεύματος, η τάση και το ρεύμα πρέπει να ληφθούν με θετικό πρόσημο, ενώ αντίθετα οι αντίστοιχες τιμές για το ηλεκτρόδιο επιστροφής πρέπει να ληφθούν αρνητικές. Η εφαρμογή των τριών μεθόδων σε απλά συστήματα γείωσης οδηγούν σε παρόμοια μεταξύ τους αποτελέσματα. Για ορισμένα συστήματα πραγματοποιείται σύγκριση και με τα αποτελέσματα των Tagg [1] και Sunde [2].

Η εργασία των Dick και Holliday [123] περιγράφει ηλεκτρικές δοκιμές σε γειωμένα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στη γη. Οι δοκιμές γίνονται με εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τιμής και μικρής διάρκειας, χαμηλής τιμής και μεγάλης διάρκειας και επίσης με κρουστικό ρεύμα. Κατά τη διάρκεια δοκιμών με ρεύμα μικρού πλάτους και μεγάλης διάρκειας παρατηρήθηκε ότι στα χαμηλά επίπεδα τάσης και ρεύματος η αντίσταση γείωσης μιας ράβδου γίνεται μικρότερη από την αντίσταση στην μόνιμη κατάσταση. Επίσης, κατά τη διάρκεια δοκιμών με ρεύμα μεγάλου πλάτους και μικρής διάρκειας παρατηρήθηκε ότι η αντίσταση γείωσης μιας ράβδου μειώνεται μεταξύ 20% και 40% της τιμής στη μόνιμη κατάσταση. Το τόξο που δημιουργείται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου προκαλεί ζημιές και στο ηλεκτρόδιο και στο έδαφος γύρω του, παραγωγή αερίων και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται προκαλούν σημαντική μετακίνηση του ηλεκτροδίου και του εδάφους.

Οι Garrett και Holley [47], το 1980, ανέπτυξαν μία μεθοδολογία απ' ευθείας υπολογισμού της συνολικής αντίστασης πλέγματος από τις επιμέρους αντιστάσεις,

που οφείλονται στο ίδιο το στοιχείο και στην αλληλεπίδρασή του με τα άλλα στοιχεία, χωρίς να πρέπει προηγουμένως να υπολογιστούν τα επιμέρους ρεύματα. Η συγκεκριμένη τεχνική στηρίζεται στην υπόθεση ότι όλα τα στοιχεία ενός συστήματος γείωσης βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό, αφού είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους και η αγωγιμότητα της γης είναι αρκετά μικρότερη από την αγωγιμότητα των στοιχείων του συστήματος γείωσης.

Η εργασία των Verma και Mukhedkar [160] ασχολείται με τη συμπεριφορά οριζοντίων ηλεκτροδίων γείωσης όταν υποβάλλονται σε κρουστικό ρεύμα, αλλά χρησιμοποιούνται μόνο τιμές ρεύματος που δεν προκαλούν διάσπαση του εδάφους. Το ενδιαφέρον των συγγραφέων εστιάζεται κυρίως στην τιμή της σύνθετης αντίστασης στο απότομο μέρος του μετώπου του κρουστικού ρεύματος, υπολογίζουν δε τη σύνθετη αντίσταση λαμβάνοντας υπ' όψιν την αντίσταση του μετάλλου του ηλεκτροδίου, την επαγωγή του, καθώς και τις απώλειες στο έδαφος. Χρησιμοποιώντας τις τηλεγραφικές εξισώσεις υπολόγισαν τη σύνθετη αντίσταση στη μεταβατική κατάσταση. Στη συνέχεια, υπολόγισαν τη σύνθετη αντίσταση στη μόνιμη κατάσταση, η οποία έχει σαφώς μικρότερη τιμή απ' ό,τι στη μεταβατική. Στην προσπάθειά τους να υπολογίσουν τη σύνθετη αντίσταση με δεύτερο τρόπο χρησιμοποίησαν μία εμπειρική μέθοδο [161] σύμφωνα με την οποία το σπουδαιότερο ρόλο στη μεταβατική κατάσταση παίζει το ενεργό μήκος του αγωγού, το οποίο συμμεταβάλλεται κατά την τετραγωνική ρίζα του γινομένου της ειδικής αντίστασης του εδάφους επί τον χρόνο μετώπου της κυματομορφής του εγχυόμενου ρεύματος. Όταν το ενεργό μήκος, που προκύπτει είναι μικρότερο από τα πραγματικό μήκος του αγωγού, τότε η μεταβατική σύνθετη αντίσταση είναι ίση με τη σύνθετη αντίσταση στη μόνιμη κατάσταση ενός αγωγού που έχει μήκος ίσο με το ενεργό. Συμπερασματικά, για τη χρονική μεταβολή της σύνθετης αντίστασης μπορεί να λεχθεί ότι έχει μεγαλύτερη τιμή στην αρχή του μετώπου του κύματος και τελικά καταλήγει στην αντίσταση γείωσης στη μόνιμη κατάσταση.

Μία ενδιαφέρουσα μελέτη για τον υπολογισμό του δυναμικού ενός συστήματος γείωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση παρουσίασαν οι Α. Π. Μελιόπουλος και Μ. G. Moharam το 1983 [156]. Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται ο αλγόριθμος υπολογισμού της μεταβατικής απόκρισης ενός συστήματος γείωσης.

Η εργασία των Mazzetti και Veca [162] χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο για την ανάλυση της μεταβατικής συμπεριφοράς ενός οριζόντια τοποθετημένου στη γη ηλεκτροδίου, στη μια άκρη του οποίου έχουμε έγχυση κρουστικού ρεύματος. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει την κατάστρωση αναλυτικών εκφράσεων για τη σύνθετη αντίσταση του ηλεκτροδίου, τον καταμερισμό της τάσης και του ρεύματος κατά μήκος του ηλεκτροδίου. Η εργασία επισημαίνει ότι το μήκος του ηλεκτροδίου, η αντίσταση εδάφους, η ένταση και η μορφή του κρουστικού ρεύματος επηρεάζουν καθοριστικά τη μεταβατική συμπεριφορά. Η μη-γραμμική συμπεριφορά του ηλεκτροδίου κάτω από ισχυρά ρεύματα προσομοιώνεται με μια μείωση της αντίστασης εδάφους και της επαγωγής του ηλεκτροδίου, ώστε να λαμβάνεται υπ' όψιν το φαινόμενο εκφόρτισης που συμβαίνει στο έδαφος γύρω από το ηλεκτρόδιο όταν η πυκνότητα ρεύματος ξεπερνάει την κρίσιμη τιμή. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα των άλλων ερευνών ακόμα και για ρεύματα που προκαλούν διάσπαση του εδάφους.

Στην εργασία τους, οι Alvarado, Lassester και Sanchez [163] ασχολούνται με την εφαρμογή μιας παραλλαγής του τραπεζοειδούς κανόνα ολοκλήρωσης στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος. Η παραλλαγή αυτή είναι το λεγόμενο τραπεζοειδές ολοκλήρωμα με απόσβεση και υπερτερεί σε πολλά σημεία του απλού τραπεζοειδούς ολοκληρώματος. Γίνεται σύγκριση της μεθόδου με τη μέθοδο του απλού τραπεζοειδούς ολοκληρώματος, με την αντίστροφη μέθοδο Euler και με τη μέθοδο Gear 2<sup>ης</sup> τάξης. Το τραπεζοειδές ολοκλήρωμα φαίνεται να έχει επικρατήσει στην προσομοίωση συστημάτων ισχύος. Χαρακτηρίζεται από απλότητα και αριθμητική σταθερότητα. Η εργασία αυτή καταλήγει στο ότι, το τραπεζοειδές ολοκλήρωμα με απόσβεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συμβατό υποκατάστατο του απλού για την προσομοίωση όλων των συστημάτων ισχύος στο πεδίο του χρόνου.

Το 1984, οι Velazquez και Mukhedkar [164] χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς και τις εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρουσίασαν μία ανάλυση σχετικά με τη μεταβατική απόκριση ενός ηλεκτροδίου γείωσης τοποθετημένου οριζόντια κάτω από την επιφάνεια της γης. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα (φαινόμενο τόξου) και υπολογίζει τη σύνθετη αντίσταση του ηλεκτροδίου τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική κατάσταση. Εφαρμόζοντας το μοντέλο, κατέληξαν

στο συμπέρασμα ότι η μεταβατική συμπεριφορά εξαρτάται από το είδος του εδάφους, τα χαρακτηριστικά του αγωγού και τη μορφή του κύματος της τάσης και παρουσίασαν τον τρόπο επίδρασης της κάθε παραμέτρου χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το 1989, οι E. J. Rogers και J. F. White [165] πρότειναν μία μέθοδο εκτίμησης της σύνθετης αντίστασης και της τάσης γείωσης. Ο σκοπός ανάπτυξης της μεθόδου τους ήταν να διορθώσουν το σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, το οποίο προέρχεται από το ρεύμα επιστροφής μέσω της γης. Συγκρίνουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη δική τους μέθοδο με αντίστοιχα αποτελέσματα παλαιότερης μεθόδου (Carson) [166] και καταλήγουν σε συμπεράσματα για την ακρίβεια της μεθόδου τους μεταβάλλοντας το μήκος των αγωγών, την ειδική αντίσταση του εδάφους και τη συχνότητα.

Σε εργασίες τους οι Menter και Grcev [143, 167], εκτείνουν την ισχύ των γνωστών μοντέλων συστημάτων γείωσης σε μεγάλες συχνότητες της τάξης των MHz. Αναπτύσσουν μια μεθοδολογία η οποία βασίζεται σε προσέγγιση γραμμικών αγωγών γης με γραμμές μεταφοράς. Η προσέγγιση μπορεί να βασιστεί σε τρεις βασικές έννοιες: δικτυακή προσέγγιση, προσέγγιση γραμμών μεταφοράς, προσέγγιση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Υποστηρίζουν ότι αν η χαρακτηριστική αντίσταση και η συνάρτηση μεταφοράς του γραμμικού αγωγού γης είναι γνωστά, τότε κάθε σύστημα γείωσης μπορεί να παρουσιαστεί σαν ένα δίκτυο τμημάτων γραμμής μεταφοράς, αγνοώντας την αλληλεπαγωγή και την αλληλοχωρητικότητα μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων της γραμμής. Η προσαρμοστικότητα και η ευκαμψία του μοντέλου αυτού αντισταθμίζει τη μείωση της ακρίβειας.

Οι Grcev και Heimbach [154] δημοσίευσαν το 1997 ένα άρθρο, στο οποίο γίνεται λεπτομερής ανάλυση της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων στη μεταβατική συμπεριφορά μεγάλων πλεγμάτων γείωσης ( $10 \times 10 \text{m}^2$  έως  $120 \times 120 \text{m}^2$ , με 4 έως 124 διάκενα) υποβαλλόμενων σε κρουστικό κεραυνικό ρεύμα. Συγκεκριμένα, αναλύεται η επίδραση της αγωγιμότητας του εδάφους, της θέσης του σημείου έγχυσης ρεύματος, του μεγέθους του πλέγματος, του βάθους τοποθέτησής του, του αριθμού των οριζοντίων και καθέτων αγωγών για καθορισμένη διάσταση πλέγματος και της μορφής του κρουστικού ρεύματος. Για τον σκοπό αυτό, για διαφορετικές τιμές των

παραπάνω παραμέτρων, προσδιορίζονται, με τη βοήθεια υπολογιστή, η τάση του πλέγματος συναρτήσει του χρόνου και η σύνθετη αντίσταση συναρτήσει της συχνότητας, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο βασισμένο στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία.

Οι ίδιοι ερευνητές [155, 168] σε άλλα άρθρα τους το 1997 προτείνουν μεθόδους για την εισαγωγή σύνθετων συστημάτων γείωσης σε προγράμματα προσομοίωσης μεταβατικής κατάστασης, όπως το EMTP. Η μοντελοποίηση του συστήματος γείωσης έγινε με βάση την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, ορίζοντας τις σύνθετες αντιστάσεις, οι οποίες θεωρούνται ως συναρτήσεις μεταφοράς. Η ορθότητα της παραπάνω διαδικασίας επαληθεύτηκε με χρήση του αντίστροφου ταχύος μετασχηματισμού Fourier και με σύγκριση με μοντέλα της βιβλιογραφίας (μοντέλο γραμμής μεταφοράς), ενώ παρατίθεται και μία μελέτη κεραυνικής προστασίας ενός υποσταθμού 420 kV. Για μία απλή ράβδο γείωσης οι προσεγγίσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και γραμμής μεταφοράς δεν παρουσιάζουν αποκλίσεις, ενώ για μεγάλα πλέγματα γείωσης εμφανίζουν αποκλίσεις ως προς τη συχνότητα και την τάση κατά τη μεταβατική κατάσταση.

Η εργασία των Yamaguchi, Inoue, Sekioka, Sonoda, Kato, Nagaoka και Ametani [87] αναπτύσσει ένα μοντέλο εξαρτώμενο από τη συχνότητα για ανάλυση μεταβατικής κατάστασης, το οποίο θεωρείται βασικό μέρος ενός συστήματος γείωσης. Το μοντέλο αντιπροσωπεύεται από μια γραμμή κατανομημένων παραμέτρων που εξαρτώνται από τη συχνότητα για μια ακριβή προσομοίωση ή από ένα π-ισοδύναμο κύκλωμα για μια απλοποιημένη προσομοίωση. Το τελευταίο δίνει ικανοποιητική ακρίβεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανάλυση κρουστικών ρευμάτων. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών με χρήση του μοντέλου αυτού συμφωνούν σημαντικά με πειραματικά αποτελέσματα των ιδίων [88].

Το 1999, οι Otero, Cidras και del Alamo [153] παρουσίασαν μία νέα μέθοδο ανάλυσης των συστημάτων γείωσης βασισμένη στη θεωρία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Η μέθοδος αυτή θεωρεί το σύστημα γείωσης ως ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αγωγών και μελετά όλες τις επαγωγικές, χωρητικές και αγωγίμες συζεύξεις μεταξύ των αγωγών αυτών. Τα αποτελέσματα που δίνει η προτεινόμενη μέθοδος συγκρίνονται ενδεικτικά με τις τιμές που δίνουν άλλα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Στο τέλος εξετάζεται μία πρακτική εφαρμογή της μεθόδου, με

έγχυση ημιτονοειδών ρευμάτων με διαφορετικές συχνότητες σε διάφορα σημεία ενός πλέγματος γείωσης, μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Από τα αποτελέσματα οι συγγραφείς συμπεραίνουν, ότι στις χαμηλές συχνότητες η αντίσταση του εδάφους είναι ανάλογη της σύνθετης αντίστασης του πλέγματος, ενώ στις υψηλές συχνότητες η σύνθετη αντίσταση του πλέγματος γείωσης καθορίζεται από το σημείο έγχυσης του ρεύματος και την επιτρεπτότητα του εδάφους. Η ανάλυση καταδεικνύει επίσης ότι το δυναμικό στην επιφάνεια του εδάφους αυξάνει κοντά στο σημείο έγχυσης και ελαττώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από αυτό, ενώ το φαινόμενο εξασθενεί αυξανόμενης της συχνότητας.

Στην διδακτορική του διατριβή ο Z. M. Stojkovic [169] ασχολήθηκε με την μεταβατική συμπεριφορά πλεγμάτων γείωσης, τοποθετημένων σε ομοιογενές και σε πολυστρωματικό έδαφος. Παρουσίασε μοντέλα για την προσομοίωση των πλεγμάτων. Τα μοντέλα αυτά υλοποιήθηκαν σε ένα λογισμικό πακέτο που ο ίδιος ανέπτυξε. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις του ίδιου [77]. Υπήρξε πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ των υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

Απαραίτητη εργασία για όσους ασχολούνται με τη μεταβατική συμπεριφορά πλεγμάτων γείωσης αποτελεί άρθρο των Verma και Mukhedkar [170] όπου μπορεί να βρει κανείς μία πλήρη θεωρητική ανάλυση της κυκλωματικής προσέγγισης. Παρουσιάζει επίσης την επίδραση της γείωσης των πυλώνων στην υπερπήδηση των μονωτήρων.

### **1.6.2 Πεδιακή προσομοίωση συστημάτων γείωσης**

Έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες βασισμένες σε πεδιακές αναλύσεις, από τις οποίες προκύπτουν συμπεράσματα για τη λειτουργία των συστημάτων γείωσης κάτω από διάφορες συνθήκες, καθώς, επίσης, και για αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

Ο υπολογισμός του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενός οριζοντίου ηλεκτροδίου παρουσιάζεται στα άρθρα [91, 171,172], στα οποία συγκρίνονται μοντέλα διάφορων ερευνητών.



Υπάρχουν στη βιβλιογραφία μετρήσεις και προσομοιώσεις της αντίστασης γείωσης και της επιφανειακής τάσης για όλα τα στάδια κατασκευής σε υποσταθμούς υψηλής τάσης [117] καθώς και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το ρεύμα που ρέει στο σύστημα γείωσης [173].

Οι Giao και Sarma [40] παρουσιάζουν μια μέθοδο ανάλυσης του ηλεκτρικού πεδίου κοντά σε ηλεκτρόδια υψηλής συνεχούς τάσης, που είναι τοποθετημένα στο άνω στρώμα διστρωματικού εδάφους. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διάφορους πρακτικούς σχεδιασμούς ηλεκτροδίων για να καθορίσει την κατανομή του ρεύματος κατά μήκος του ορίου ηλεκτροδίου – εδάφους, καθώς και το δυναμικό και την πεδιακή κατανομή στη γύρω περιοχή.

Οι F. Dawalibi και D. Mukhedkar (το 1978) [174] περιγράφουν μία αναλυτική μέθοδο που δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστεί η επίδραση των υπόγειων μεταλλικών αντικειμένων στη λειτουργία των γειώσεων των συστημάτων ισχύος. Λαμβάνονται υπόψη μόνο εμπειρικές μέθοδοι που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία [23, 37-39, 44]. Οι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος είναι δύο: είτε να διεξαχθεί ποσοτική αξιολόγηση του προβλήματος, να καθορισθούν οι ζώνες κινδύνου και να πραγματοποιηθούν οι αναγκαίες διορθωτικές μετρήσεις, είτε να τροποποιηθεί το πρότυπο πρόβλημα στο πιο απλό της "απομονωμένης" γείωσης (όταν δεν υπάρχουν πλησίον της γειώσεως μη γειωμένες μεταλλικές κατασκευές). Λαμβάνουν χώρα συγκρίσεις μεταξύ των υπολογισμένων αποτελεσμάτων με τη χρήση αυτής της μεθόδου και των πειραματικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από μοντέλο υπό κλίμακα [175].

Οι Seedher et al. [176] εκτίμησαν το ποσοστό του ρεύματος σφάλματος, που ρέει από το σύστημα γείωσης, μέσω ενός απλού και εύχρηστου αλγορίθμου που μπορεί εύκολα να προγραμματιστεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Παρουσίασαν, μάλιστα, και ικανοποιητική σύγκλιση με πειραματικά δεδομένα.

Με προσομοιώσεις στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χρόνου πλεγμάτων υποσταθμών ασχολήθηκαν οι Dawalibi et al. [177].

Σε άρθρα του Dawalibi [178, 179], για ηλεκτρομαγνητικά πεδία προκαλούμενα είτε από υπέργειους, είτε από υπόγειους αγωγούς, μελετάται το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο

χαμηλών συχνοτήτων που προκαλείται από ένα ρευματοφόρο αγωγό βυθισμένο σε μέσο άπειρης έκτασης και σε αγωγή ημίχωρο. Αποτελέσματα μετρήσεων δείχνουν ότι τα συμπεράσματα της αναλυτικής μεθόδου εφαρμόζονται και σε εδάφη σημαντικά μη ομογενή.

Οι E. J. Joy και R. E. Wilson [180], το 1986, δημοσίευσαν μία μελέτη, στην οποία υπολόγισαν την αντίσταση και την επιφανειακή τάση πλεγμάτων γείωσης βελτιώνοντας έναν αλγόριθμο που στηρίζεται στη μέθοδο των ροπών, που είχε αναπτυχθεί στο Georgia Institute of Technology. Εξετάζοντας οριζόντιους και κάθετους αγωγούς καθώς και διατάξεις σχήματος T κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αντίσταση δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τη διαδικασία της διαμέρισης, σε αντίθεση με την επιφανειακή τάση που επηρεάζεται περισσότερο από τη διαμέριση.

Οι Ma, Dawalibi και Daily (1993) [181] πραγματοποιούν ανάλυση συστημάτων γείωσης που βρίσκονται μέσα ή κοντά σε ετερογένειες ημισφαιρικού εδάφους. Καταστρώνονται ακριβείς, αναλυτικές εκφράσεις κλειστής μορφής για υπολογισμό του δυναμικού που προκαλείται από πηγές ρεύματος σε διαφορετικές περιοχές της δομής του εδάφους. Επίσης, παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα για διαφορετικά συστήματα γείωσης καθώς και για διάφορους τύπους εδαφών ημισφαιρικών όγκων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα ότι αυτές οι εδαφικές ετερογένειες έχουν σημαντική επιρροή στην επίδοση των συστημάτων γείωσης. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μια πρώτη προσέγγιση για υπόστρωμα ορθογώνιου τύπου και να επικυρώσουν τις αριθμητικές μεθόδους που εφαρμόζονται σε εδάφη πιο γενικού τύπου ετερογένειας.

Σε εργασία των Dawalibi και Selby το 1993, [171] μελετάται το ηλεκτρικό πεδίο, που οφείλεται στην κατανομή ρεύματος, σε ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο, το οποίο τόσο κατά μήκος του, όσο και στα άκρα του παρουσιάζει διαρροή ρεύματος. Το πεδίο υπολογίζεται στα σημεία της επιφάνειας του εδάφους για χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Παρατηρείται καλή σύμπτωση με αποτελέσματα άλλων ερευνητών [91, 172].

Οι Selby και Dawalibi, το 1994, [182] υπολογίζουν με δύο διαφορετικές μεθόδους τις κατανομές ρεύματος σε δίκτυα εναέριων ή υπόγειων αγωγών που ενεργοποιούνται από εγχύσεις ρεύματος. Η πρώτη μέθοδος επιλύει εξισώσεις

ηλεκτρικού πεδίου με σημειακή σύγκλιση με την διαδικασία των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας γραμμικούς περιορισμούς στα ρεύματα. Η δεύτερη προσέγγιση, που ειδικεύεται στο εύρος χαμηλών συχνοτήτων και στα μέσα απωλειών, εφαρμόζει αλγόριθμο ελαχιστοποίησης ισχύος. Σε χαμηλές συχνότητες, τα επαγόμενα ρεύματα βρόχων προσδιορίζονται εφαρμόζοντας ρητά το νόμο του Faraday ως γραμμικό περιορισμό. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής διαδικασίας συγκρίνονται με μετρήσεις και αποτελέσματα άλλων αλγορίθμων. Σε υψηλές συχνότητες, τα υπολογιστικά αποτελέσματα ταιριάζουν με αυτά που έχουν δημοσιευθεί στη βιβλιογραφία σχετικά με κεραίες. Στις χαμηλές συχνότητες, τα αποτελέσματα είναι ουσιαστικά ταυτόσημα με τις δημοσιευμένες μετρήσεις και τους υπολογισμούς που βασίζονται σε τεχνικές γειώσεων ημιστατικής (quasi static) κατάστασης [183].

Σε εργασία των Xiong και Dawalibi, 1994, [184], μελετάται η απόκριση στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας ενός συστήματος γείωσης τυπικού υποσταθμού που καταπονείται από κεραυνό. Τα υπολογιζόμενα: δυναμικά, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο παρουσιάζονται γραφικά ως συνάρτηση του χώρου (χωρικές συντεταγμένες), του χρόνου ή και των δύο.

Οι Olsen και Willis, το 1996, [185] εξετάζουν την εγκυρότητα των μεθόδων παρότι έχει θεωρηθεί ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι της ημιστατικής κατάστασης για τον υπολογισμό συστημάτων γείωσης δεν είναι έγκυρες για υψηλές συχνότητες. Ωστόσο, οι συνθήκες, υπό τις οποίες η ακριβής θεωρία πλήρους κύματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί, δεν έχουν θεμελιωθεί. Σ' αυτό το άρθρο, οι μέθοδοι ακριβούς πλήρους κύματος και ημιστατικής κατάστασης εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της τάσης επαφής και της βηματικής τάσης της απλής γείωσης του πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος. Αποδεικνύεται ότι μια επαρκής συνθήκη, για να είναι έγκυρη η θεωρία της ημιστατικής κατάστασης, ικανοποιείται όταν το μέγεθος του εντός του εδάφους ευρισκόμενου ηλεκτροδίου είναι λιγότερο από το ένα δέκατο ενός μήκους κύματος μέσα στη γη.

Οι Angeli, Cardelli, Esposito και Tellini [186] μελετούν την αλληλεπίδραση μεταξύ συστημάτων γείωσης και φαινομένων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης και προτείνουν αριθμητική μέθοδο βασισμένη στον αλγόριθμο του Yee [187] στο πεδίο του χώρου

και χρόνου. Οι συνιστώσες των διανυσμάτων E και H που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την ανάλυση τοποθετούνται σε διαφορετικούς κόμβους του πλέγματος σε απόσταση μισού χωρικού βήματος και οι στροβιλισμοί των εξισώσεων Maxwell προσεγγίζονται αριθμητικά μέσω διακριτής διαφόρισης. Σε μεγάλα συστήματα γείωσης η εφαρμογή αυτής της τεχνικής είναι αδύνατη. Προς απλοποίηση του προβλήματος γίνονται κάποιες υποθέσεις και τίθενται σαφείς οριακές συνθήκες, ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή αυτής της ανάλυσης.

Σε άρθρο των M. I. Λορέντζου, A. Γ. Κλαδά και N. Δ. Χατζηαργυρίου [188] πραγματοποιείται μοντελοποίηση συστημάτων γείωσης με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου. Εξετάζεται η επίδοση ηλεκτροδίων γείωσης ευρισκομένων με μικρή απόσταση μεταξύ τους σε ανομοιογενές έδαφος, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο μοντελοποίησης δισδιάστατων και τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.

Οι Andolfato, Bernardi και Fellin [189] παρουσιάζουν μια καινούρια υπολογιστική μέθοδο ανάλυσης για συστήματα αγωγών γείωσης και κεραιών. Η μέθοδος βασίζεται σε υβριδική αντιμετώπιση και επιτρέπει την ενσωμάτωση συγκεντρωμένων και κατανεμημένων κυκλωματικών παραμέτρων, όπως αποτιμώνται από ακριβή ανάλυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Το σύστημα του αγωγού αντικαθίσταται από κατάλληλο πλήθος στοιχειωδών πηγών ρεύματος που μπορούν να είναι πηγές ευθείς ή κοίλες, μονωμένες ή ακάλυπτες, ελεύθερα προσανατολισμένες και διασυνδεδεμένες στις 3 διαστάσεις του χώρου, ο οποίος θεωρείται ότι αποτελείται από δύο μισούς χώρους, με τον καθένα ομογενή, γραμμικό και ισοτροπικό. Συνεπώς, η μέθοδος δεν θέτει γεωμετρικούς και τοπολογικούς περιορισμούς, ενώ επιτρέπει τον υπολογισμό τάσεων και εντάσεων στα στοιχεία πηγών (σύνορα), των διανυσματικών δυναμικών και των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων παντού στο περιβάλλον μέσο. Το μαθηματικό μοντέλο της ανάλυσης βασίζεται σε εξισώσεις του Maxwell που εφαρμόζονται σε στοιχειώδη τμήματα του αγωγού και στα ολοκληρώματα του Sommerfeld. Επεκτείνοντας το μαθηματικό μοντέλο και διαιρώντας τον χώρο σε δύο ημιχώρους με διαφορετικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιείται η μέθοδος των ειδώλων: Χωρίζεται το πρόβλημα σε στιγμιότυπα – εικόνες που η τάξη μεγέθους τους μεγαλώνει με την απόσταση από το σημείο παρατήρησης και πάνω σε αυτά εφαρμόζονται σε διακριτή μορφή τα

ολοκληρώματα του Sommerfeld. Όσο μεγαλύτερη η τάξη της εικόνας τόσο μικρότερη η συμβολή της, λόγω της μείωσης του διαμήκους ρεύματος όπως απομακρύνεται από την πηγή. Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται με το υπολογιστικό πρόγραμμα AGSA (Aerial and Grounding System Analysis) και καλύπτει συχνότητες μέχρι και 1 MHz (όπου συμπεριλαμβάνεται και το φάσμα συχνοτήτων ενός τυπικού κεραυνού). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν πρώτα στο πεδίο της συχνότητας μπορούν να μεταφερθούν στο πεδίο του χρόνου, με τη βοήθεια του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier. Έτσι, είναι εφικτή η ανάλυση μεταβατικών σημάτων σε συστήματα γειώσεων και κεραιών με σύνθετη γεωμετρία .

Οι Chabi – Sika και Barral [190] παρουσιάζουν μία μέθοδο μοντελοποίησης της μεταβατικής ανάλυσης συστημάτων γείωσης σε διστρωματικό έδαφος. Η μέθοδος αποτελείται από το συνδυασμό της μοντελοποίησης γραμμής μεταφοράς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η επίδραση του ιονισμού του εδάφους λαμβάνεται υπόψη εισάγοντας τη μοντελοποίηση τροποποιημένης, φανταστικής ακτίνας. Τελικά, η αναπτυσσόμενη μέθοδος προσομοίωσης χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί η κατανομή της μεταβατικής αύξησης δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους και η ελάχιστη απόσταση γειτνίασης μεταξύ ηλεκτρικής γραμμής ισχύος και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για χαμηλές συχνότητες αρχικά [191] και για συχνότητες που φθάνουν έως και το φάσμα του κεραυνού [192] έχει γίνει από τον Nekhoul et al. Στη μέθοδο που έχει αναπτυχθεί λαμβάνεται υπόψη ο ιονισμός του εδάφους αλλά και τα αλλητεύοντα ρεύματα (eddy currents) που υπάρχουν στην περιοχή της γείωσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα της EDF [124] και άλλων ερευνητών [37] με καλή σύγκλιση.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται και για την ανάλυση συνηθισμένων συστημάτων γείωσης (πλεγμάτων) [193] τοποθετημένα σε οποιοδήποτε είδος εδάφους. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή της γείωσης υποσταθμών υψηλής τάσης στην Σλοβενία. Η μεθοδολογία δίνει αποτελέσματα με καλή συμφωνία (ακρίβεια) σε σχέση με αυτά άλλων ερευνητών [38].

### 1.6.3 Πειράματα υπό κλίμακα

Η χρήση δεξαμενής πλήρους ηλεκτρολύτου (electrolytic tank) είναι μία ευρέως γνωστή πρακτική για τη μελέτη της συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας [175, 194-197]. Στα πειράματα αυτά χρησιμοποιείται μία δεξαμενή και μοντέλα γειώσεων υπό κλίμακα. Στα υπό κλίμακα πλέγματα επιβάλλεται τάση. Η δεξαμενή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της κατανομής της ηλεκτρικής έντασης, με τη μέτρηση του δυναμικού στα διάφορα σημεία της επιφάνειας της δεξαμενής (ισοδυναμικές γραμμές) για ομοιογενή [194, 195] ή διστρωματικό ηλεκτρολύτη [175, 196], για τη μέτρηση της μόνιμης αντίστασης του συστήματος γείωσης [197] καθώς και για τη μέτρηση της ειδικής αντίστασης [175, 196].

Πειράματα υπό κλίμακα σε μια ηλεκτρολυτική δεξαμενή είναι πολύ χρήσιμα για τον υπολογισμό της αντίστασης γείωσης και της κατανομής του δυναμικού στην επιφάνεια της γης κατά την διάρκεια βραχυκυκλωμάτων ως προς γη, σε πολύπλοκες διατάξεις γείωσης, όπου ακριβείς αναλυτικοί υπολογισμοί είναι δύσκολοι [3, 194, 195]. Εάν μετρηθεί η τάση που αναπτύσσεται στο μοντέλο και το ρεύμα που διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη ανάμεσα στο μοντέλο πλέγματος και το ηλεκτρόδιο επιστροφής, είναι δυνατή η εκτίμηση και ο υπολογισμός της πραγματικής αντίστασης του αληθινού πλέγματος. Χρησιμοποιώντας λοιπόν ένα τέτοιο μοντέλο, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η επίδραση που θα έχει μια τυχούσα αλλαγή των παραμέτρων του πλέγματος γείωσης, όπως η αύξηση ή η μείωση του βαθμού κατάτμησης του πλέγματος σε περισσότερα ή λιγότερα επιμέρους τετράγωνα, ή και η προσθήκη ράβδων γείωσης σε διάφορες θέσεις και βάθη.

Πειράματα υπό κλίμακα σε ηλεκτρολυτική δεξαμενή [198] αποσκοπούσαν στον υπολογισμό της αντίστασης του πλέγματος και της αντίστασης του ανθρώπου ως προς την άπειρη γη.

Πειράματα που έγιναν από τους Gonos et al, [80, 81] σε συστήματα γείωσης, που αποτελούνται από μία ή τρεις κατακόρυφους ράβδους διαφόρων μηκών, έδειξαν τις σχέσεις που συνδέουν την αντίσταση στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με τις τιμές των παραμέτρων της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης.

Οι Gupta και Thappar, [82] πραγματοποίησαν μία σειρά πειραμάτων υπό κλίμακα χρησιμοποιώντας μία ημισφαιρική δεξαμενή διαμέτρου 6 μέτρων και για δοκίμια τετραγωνικά πλέγματα με διαστάσεις (1x1 μέτρα και 2x2 μέτρα). Παρατηρήθηκε ότι, όταν η έγχυση γίνεται στα εξωτερικά σημεία η κρουστική σύνθετη αντίσταση παίρνει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την περίπτωση που η έγχυση γίνεται στα ενδιάμεσα σημεία του πλέγματος. Στη συνέχεια οι Gupta και Singh, [83] δημιούργησαν ένα μοντέλο που προσομοιώνει τη συμπεριφορά των ανωτέρων συστημάτων γείωσης.

Ο Kouteynikoff [46], το 1980, παρουσίασε μία μέθοδο υπολογισμού της αντίστασης προσγείωσης και της κατανομής του δυναμικού, η οποία στηρίζεται στην εξίσωση Green και στη διαδοχική κατάτμηση του υπό εξέταση ηλεκτροδίου σε πολλά γραμμικά τμήματα. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι αφ' ενός μεν ότι δεν γίνεται καμία παραδοχή σχετικά με τον καταμερισμό του ρεύματος, αφ' ετέρου δε ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε σύνθετες διατάξεις, οι οποίες αποτελούνται από αρκετά αλληλεπιδρώντα ηλεκτρόδια. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εφαρμόζεται μόνο σε ομοιογενές έδαφος. Ο συγγραφέας, προκειμένου να επαληθεύσει θεωρητικά τα αποτελέσματα της μεθόδου του, τα σύγκρινε με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων [2, 44]. Στη συνέχεια, επαλήθευσε και πειραματικά τη μέθοδο, διεξάγοντας πειράματα σε ηλεκτρόδια γείωσης υπό κλίμακα χρησιμοποιώντας μία ημισφαιρική δεξαμενή, μέσα στην οποία τοποθέτησε ένα μοντέλο συμμετρικού πλέγματος και ένα μοντέλο γείωσης πυλώνα και έκανε μετρήσεις. Ως ηλεκτρολυτικό μέσο χρησιμοποίησε νερό, στο οποίο είχε διαλύσει αλάτι. Τα αποτελέσματα των μετρήσεών του είναι πολύ κοντά στα θεωρητικά αποτελέσματα, τόσο για σημεία πλησίον του ηλεκτροδίου, όσο και για απομακρυσμένα σημεία.

Η εμπειριστατωμένη μελέτη της προγενέστερης γνώσης παρέχει τη δυνατότητα επικοδομητικής έρευνας και προαγωγής του συγκεκριμένου τομέα της επιστήμης. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η συνοπτική αναφορά στην ήδη διεξαχθείσα έρευνα καθώς και στα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή. Η συγκεκριμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και η επισήμανση των σημαντικότερων βημάτων εξέλιξης αποτελεί μία αναγκαία εισαγωγή προκειμένου να γίνει εμφανής η συμβολή της παρούσης διδακτορικής διατριβής στον τομέα των συστημάτων γείωσης.