

Κεφάλαιο 4

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Όλες οι ακριβείς επιστήμες κυριαρχούνται από την ιδέα της προσέγγισης.

Bertrand Russell

4.1 Προσομοιώσεις

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση της υπολογιστικής προσέγγισης των πειραματικών αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου. Παρουσιάζονται οι τρόποι μοντελοποίησης του αναπτυσσόμενου δυναμικού και της μεταβατικής αντίστασης διαφόρων συστημάτων γείωσης. Τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσέγγισης συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, καθώς και με αποτελέσματα προσομοίωσης και πειραμάτων άλλων ερευνητών.

Η αντίσταση γείωσης και τα άλλα χαρακτηριστικά (της απόκρισης) των συστημάτων γείωσης στη μόνιμη κατάσταση μπορούν να υπολογιστούν απ' ευθείας στο πεδίο του χρόνου με κλειστού τύπου μαθηματικές εκφράσεις. Τούτο, επίσης, είναι δυνατό να γίνει, βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας [145], στην περίπτωση της μεταβατικής απόκρισης του οριζόντιου ηλεκτροδίου γείωσης.

Στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων πραγματοποιήθηκε κυκλωματική και πεδιακή ανάλυση ηλεκτροδίων γείωσης τοποθετημένων σε ομοιογενές αλλά και σε πολυστρωματικό έδαφος. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τρόποι μοντελοποίησης του ηλεκτροδίου γείωσης, οι μέθοδοι για τον υπολογισμό των παραμέτρων των μοντέλων του ηλεκτροδίου γείωσης, αλλά και η μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους.

Για τις υπολογιστικές προσεγγίσεις χρησιμοποιήθηκαν τα πακέτα λογισμικού PC-Opera 2D (version 8.5) [215] και PSCAD/EMTDC (version 3.0) [216]. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κώδικας υλοποιημένος σε Matlab [217] και γλώσσα C++ [218].

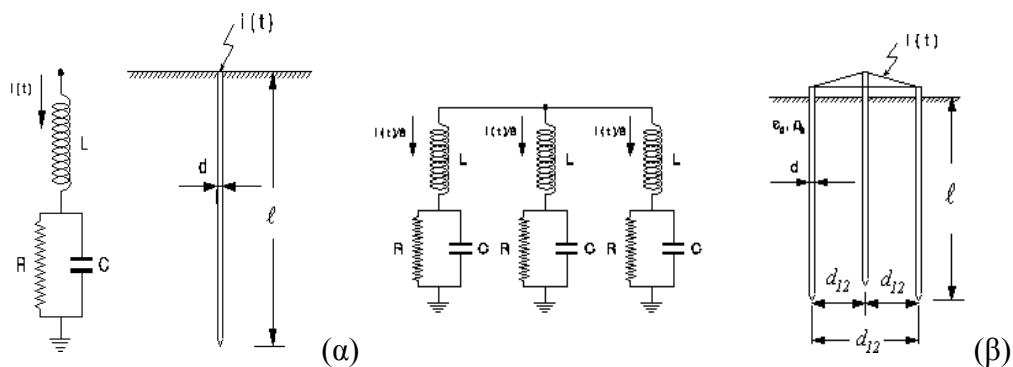
Το PC Opera είναι ένα πακέτο προγραμμάτων ανάλυσης προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Για την ανάλυση ακολουθείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά του πεδίου [215].

Το EMTDC είναι ένας προσομοιωτής μεταβατικής κατάστασης που εξελίσσεται από τα μέσα της δεκαετίας του '70. Η δημιουργία του είναι εμπνευσμένη από το κλασσικό άρθρο του Dommel [219]. Το PSCAD/EMTDC είναι ένα επαγγελματικό εργαλείο προσομοίωσης για την ανάλυση συστημάτων ισχύος, το PSCAD είναι το γραφικό περιβάλλον και το EMTDC είναι η μηχανή προσομοίωσης [216].

4.2 Ανάλυση κατακόρυφων ράβδων γείωσης

4.2.1 Θεωρητική προσέγγιση κατακόρυφων ράβδων γείωσης (κυκλωματική)

Το πιο απλό σύστημα γείωσης αποτελείται από ένα χάλκινο, συνήθως, ηλεκτρόδιο τοποθετημένο κατακόρυφα, όπως φαίνεται μαζί με το ισοδύναμο κύκλωμα του στο Σχήμα 4.1.α.



Σχήμα 4.1: Ισοδύναμο κύκλωμα (α) ενός κατακόρυφου ηλεκτρόδιου (β) ενός τριγώνου γείωσης

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου έγχυσης του κρουστικού ρεύματος και της άπειρης γης είναι:

$$u(t) = R \cdot i_R + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.1)$$

Τα κρουστικά ρεύματα που προσομοιώνουν τα κεραυνικά πλήγματα, συνήθως, προσομοιώνονται με διπλοεκθετικές συναρτήσεις [203-208]:

$$i(t) = I_o \cdot (e^{-a \cdot t} - e^{-b \cdot t}) \quad (4.2)$$

Η εξίσωση του δυναμικού, λαμβάνοντας υπόψη τη μορφή του κρουστικού ρεύματος, εκφράζεται στο πεδίο της συχνότητας ως εξής:

$$u(s) = \left[\frac{I}{C \cdot (s+a) \cdot (s+\tau)} \right] - \left[\frac{I}{C \cdot (s+b) \cdot (s+\tau)} + \left(\frac{L \cdot s}{s+a} - \frac{L \cdot s}{s+b} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$\text{όπου } \tau = \frac{I}{R \cdot C}$$

Εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace, η εξίσωση δυναμικού εκφράζεται στο πεδίο του χρόνου:

$$u(t) = I_o \cdot R \cdot \left[\tau \cdot \frac{e^{-\tau t} \cdot (b-a)}{(\tau-a) \cdot (\tau-b)} + \tau \cdot \frac{e^{-a t} \cdot (\tau-b) - e^{-b t} \cdot (\tau-a)}{(\tau-a) \cdot (\tau-b)} \right] + I_o \cdot L \cdot (b \cdot e^{-b t} - a \cdot e^{-a t}) \quad (4.4)$$

Η κρουστική σύνθετη αντίσταση (σχέση 3.1) ορίζεται ως ο λόγος της κρουστικής τάσης προς το κρουστικό ρεύμα. Η μαθηματική εξίσωση 4.5.α, που περιγράφει τη συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου συστήματος, εξάγεται από την κυκλωματική ανάλυση θεωρώντας τα στοιχεία συγκεντρωμένα και είναι η ακόλουθη:

$$z(t) = R \cdot \left[\tau \cdot \frac{(\tau-b) \cdot e^{-a t} - (\tau-a) \cdot e^{-b t}}{(\tau-a) \cdot (\tau-b) \cdot (e^{-a t} - e^{-b t})} + \frac{(b-a)}{(\tau-a) \cdot (\tau-b)} \cdot \frac{e^{-t \cdot \tau}}{(e^{-a t} - e^{-b t})} \right] + L \cdot \left[\frac{b \cdot e^{-b t} - a \cdot e^{-a t}}{e^{-a t} - e^{-b t}} \right] \quad (4.5.α)$$

Ένα άλλο κοινώς χρησιμοποιούμενο σύστημα γείωσης είναι το τρίγωνο γείωσης, το οποίο αποτελείται από τρεις κατακόρυφες χάλκινες ράβδους, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.β μαζί με το ισοδύναμο κύκλωμά του. Η εξίσωση 4.5.β, που περιγράφει τη συμπεριφορά ενός συστήματος αποτελούμενου από τρεις παράλληλες κατακόρυφες ράβδους και η οποία προκύπτει από την κυκλωματική ανάλυση

θεωρώντας συγκεντρωμένα στοιχεία -όπως στη διάταξη του σχήματος 4.1.β- και ανάλογη μεθοδολογία με αυτή της μίας κατακόρυφης ράβδου, δίνεται παρακάτω:

$$z(t) = \frac{R}{3} \cdot \left[\tau \cdot \frac{(\tau - b) \cdot e^{-at} - (\tau - a) \cdot e^{-bt}}{(\tau - a) \cdot (\tau - b) \cdot (e^{-at} - e^{-bt})} + \frac{(b - a)}{(\tau - a) \cdot (\tau - b)} \cdot \frac{e^{-t\tau}}{(e^{-at} - e^{-bt})} \right] + \frac{L}{3} \cdot \left[\frac{b \cdot e^{-bt} - a \cdot e^{-at}}{e^{-at} - e^{-bt}} \right] \quad (4.5.\beta)$$

Η αντίσταση μόνιμης κατάστασης μίας κατακόρυφης ράβδου υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση, υποθέτοντας ομοιόμορφο ρεύμα κατά μήκος της ράβδου [208]:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \left[\ln \left(\frac{8 \cdot \ell}{d} \right) - 1 \right], \quad (4.6.\alpha)$$

ενώ η αντίσταση μόνιμης κατάστασης κάθε κατακόρυφης ράβδου του τριγώνου γείωσης υπολογίζεται από την σχέση [208]:

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot \ell} \left(\ln \left(\frac{32 \cdot \ell^2}{d \cdot d_{12}} \right) - 2 + \frac{d_{12}}{2 \cdot \ell} - \frac{d_{12}^2}{16 \cdot \ell^2} \right) \quad (4.6.\beta)$$

Η χωρητικότητα μίας κατακόρυφης ράβδου δίνεται από τη σχέση [208]:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \cdot \ell}{\ln \left(\frac{4 \cdot \ell}{d} \right)}, \quad (4.7.\alpha)$$

ενώ η χωρητικότητα κάθε κατακόρυφης ράβδου της διάταξης των τριών ράβδων με τη χρήση των ισοδυνάμων αποστάσεων υπολογίζεται από την σχέση [220, 221]:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_o \cdot \ell}{\ln \left(\frac{d_{12}}{d} \right)} \quad (4.7.\beta)$$

Η επαγωγή μίας κατακόρυφης ράβδου δίνεται από τη σχέση [208]:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ell \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot \ell}{d} \right), \quad (4.8.\alpha)$$

ενώ η επαγωγή κάθε κατακόρυφης ράβδου, συνυπολογίζοντας και την αμοιβαία επαγωγή, δίνεται από την ακόλουθη σχέση [220, 221]:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \ell \cdot \left(\ln\left(\frac{l}{r'}\right) + \ln(d_{12}) \right) \quad (4.8.\beta)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του εδάφους

ℓ το μήκος της ράβδου

d η διάμετρος της ράβδου

ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού

ϵ_r η σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους

r η ακτίνα της ράβδου

d_{12} η απόσταση μεταξύ δύο ράβδων

$r' = 0,7788 \cdot r$ η ισοδύναμη ακτίνα

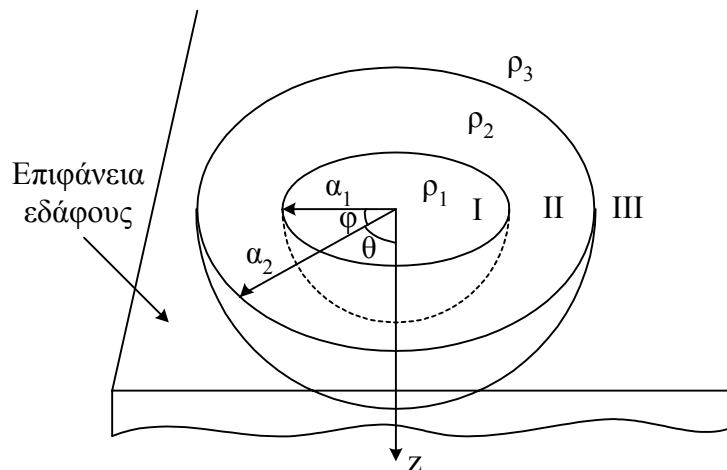
Στην παραπάνω σχέση η ισοδύναμη ακτίνα r' χρησιμοποιείται προκειμένου να αντισταθμίσει τον ιονισμό του εδάφους.

4.2.2 Θεωρητική προσέγγιση κατακόρυφων ράβδων γείωσης (πεδιακή)

Θεωρείται η τριστρωματική δομή του εδάφους του σχήματος 4.2 [181]. Τα δύο ομόκεντρα ημισφαίρια ακτίνων a_1 και a_2 , χωρίζουν το έδαφος σε τρεις περιοχές I, II και III, οι οποίες έχουν ειδική αντίσταση ρ_1 , ρ_2 και ρ_3 αντίστοιχα.

Στην παρούσα ανάλυση το σύστημα γείωσης υποτίθεται ότι είναι τοποθετημένο οπουδήποτε στον χώρο του εδάφους (σχήμα 4.2) και μπορεί, επίσης, να εκτείνεται σε διαφορετικές περιοχές.

Για την επίλυση που ακολουθεί, θεωρείται η περίπτωση μιας σημειακής πηγής ρεύματος ευρισκομένης στο κέντρο μίας σφαιρικής περιοχής, η οποία χωρίζεται από δύο ομόκεντρες σφαίρες σε τρεις τομείς. Η περίπτωση αυτή, λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει, είναι προτιμότερη από το μοντέλο που περιγράφηκε στο σχήμα 4.2, στο οποίο η μισή σφαίρα είναι στο έδαφος και η άλλη μισή στον αέρα.



Σχήμα 4.2: Εδάφη με ημισφαιρική διαστρωμάτωση

Πρόκειται για ένα γενικευμένο πρόβλημα της συνάρτησης Green [181]: ύπαρξη μίας σημειακής πηγής με τη συνθήκη ότι το δυναμικό παραμένει μεταξύ των ορίων $r = 0$ και $r = \infty$ (όπου r είναι η σφαιρική συντεταγμένη του σημείου αναφοράς) και με οριακές συνθήκες και συνθήκες συνέχειας στα όρια των διαφορετικών εδαφών. Ο στόχος είναι να υπολογιστεί το ηλεκτρικό δυναμικό εξαιτίας της σημειακής πηγής ρεύματος, οπουδήποτε στο έδαφος. Για το σκοπό αυτό οριοθετούνται τρεις διαφορετικές περιοχές για την πηγή: $r_0 < \alpha_1$, $\alpha_1 < r_0 < \alpha_2$ και $r_0 > \alpha_2$, όπου r_0 είναι η ακτινική σφαιρική συντεταγμένη της σημειακής πηγής.

Στη συνέχεια, εξάγονται εκφράσεις εξαρτώμενες από τις περιοχές που βρίσκεται τόσο η πηγή, όσο και το σημείο αναφοράς. Ξεκινώντας με την υπόθεση πως η λύση σε γενικευμένη μορφή είναι μια πολλαπλή σειρά σε ένα σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων και λαμβάνοντας υπ' όψιν τις περιοχές της πηγής και του σημείου αναφοράς, τίθενται οι οριακές συνθήκες και οι συνθήκες συνέχειας και εκφράζονται οι ελεύθερες μεταβλητές ως μια διπλή σειρά όρων των σχετιζόμενων συναρτήσεων Legendre, όπου είναι απαραίτητο. Τελικά, η διαδικασία επίλυσης καταλήγει στις εκφράσεις που δίνουν τα ηλεκτρικά δυναμικά εξαιτίας της σημειακής πηγής ρεύματος, για τις διάφορες περιοχές τοποθέτησής της. Για το ημισφαιρικό μοντέλο, που φαίνεται στο σχήμα 4.2, η λύση μπορεί εύκολα να βρεθεί με τη μέθοδο των ειδώλων, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα από την περίπτωση των σφαιρών. Αν η πραγματική πηγή δυναμικού εντοπίζεται στο $(r_0, \theta_0, \varphi_0)$, τότε το είδωλο της πηγής εντοπίζεται στο $(r_0, \pi - \theta_0, \varphi_0)$ και έχει την ίδια ένταση με την πραγματική πηγή. Το

δυναμικό οπουδήποτε στον χώρο οφείλεται τόσο στις πραγματικές, όσο και στις φανταστικές πηγές (στο μοντέλο του εδάφους με τις δυο ομόκεντρες σφαίρες). Η συνεισφορά της φανταστικής πηγής εύκολα υπολογίζεται, αντικαθιστώντας το θ_0 με το $\pi - \theta_0$ στη λύση της περίπτωσης με την πραγματική πηγή.

Όταν η σημειακή πηγή είναι στην περιοχή I, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που ισχύουν για κάθε περιοχή είναι [181]:

$$\nabla^2 V_I = -\rho_1 \cdot I \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_0), \quad \text{για } r < \alpha_1 \quad (4.9.\alpha)$$

$$\nabla^2 V_{II} = 0, \quad \text{για } \alpha_1 < r < \alpha_2 \quad (4.9.\beta)$$

$$\nabla^2 V_{III} = 0, \quad \text{για } r > \alpha_2 \quad (4.9.\gamma)$$

Προκειμένου να λυθεί η πρώτη εξίσωση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων, η οποία είναι Poisson, γίνεται η αντικατάσταση [181]:

$$V_I = V'_I + \frac{\rho_1 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot |\vec{r} - \vec{r}_0|}, \quad (4.10)$$

οπότε μετατρέπεται σε Laplace, και το σύστημα γίνεται:

$$\nabla^2 V'_I = 0, \quad \text{για } r < \alpha_1 \quad (4.11.\alpha)$$

$$\nabla^2 V'_{II} = 0, \quad \text{για } \alpha_1 < r < \alpha_2 \quad (4.11.\beta)$$

$$\nabla^2 V'_{III} = 0, \quad \text{για } r > \alpha_2 \quad (4.11.\gamma)$$

Ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα 4 η λύση που προκύπτει είναι:

$$V_I = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[\rho_1 \cdot I_{mn} \cdot \frac{r_0^n}{r^{n+1}} + A_{mn} \cdot r^n \right] \cdot P_n^m(\cos \theta) \cdot \cos[m \cdot (\phi - \phi_0)] \quad (4.12.\alpha)$$

$$V_{II} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left[B_{mn} \cdot r^n + C_{mn} \cdot \frac{1}{r^{n+1}} \right] \cdot P_n^m(\cos \theta) \cdot \cos[m \cdot (\phi - \phi_0)] \quad (4.12.\beta)$$

$$V_{III} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n D_{mn} \cdot \frac{1}{r^{n+1}} \cdot P_n^m(\cos \theta) \cdot \cos[m \cdot (\phi - \phi_0)] \quad (4.12.\gamma)$$

όπου $P_n^m(\cos \theta_0)$ και $P_n^m(\cos \theta)$ είναι τα πολυώνυμα ή συναρτήσεις Legendre πρώτου είδους. Οι συναρτήσεις Legendre $Q_n^m(\cos \theta)$ δευτέρου είδους (οι οποίες απειρίζονται) δεν εμφανίζονται στη λύση γιατί αναζητούνται φραγμένες λύσεις. Ο υπολογισμός των συντελεστών (A_{mn} , B_{mn} , C_{mn} , D_{mn}) παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα 4.

Οι συντελεστές (A_{mn} , B_{mn} , C_{mn} , D_{mn}) δίνονται από τις σχέσεις (4.13):

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{mn} = -I_{mn} \cdot \rho_1 \cdot \frac{n+1}{n} \cdot \\ \left[\left(1 + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \cdot \left(\frac{r_0}{a_2} \right)^n \cdot \frac{1}{a_2^{n+1}} - \left(1 + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \cdot \left(\frac{r_0}{a_1} \right)^n \cdot \frac{1}{a_1^{n+1}} \right] \\ \cdot \frac{\Delta}{\Delta} \\ B_{mn} = -\frac{2 \cdot n + 1}{n} \cdot \rho_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \cdot \frac{I_{mn}}{\Delta} \cdot \left(\frac{r_0}{a_2} \right)^n \cdot \frac{1}{a_2^{n+1}} \\ C_{mn} = \frac{2 \cdot n + 1}{n} \cdot \rho_1 \cdot \frac{I_{mn}}{\Delta} \cdot \left(1 + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \cdot r_0^n \\ D_{mn} = \frac{(2 \cdot n + 1)^2}{n \cdot (n+1)} \cdot \frac{I_{mn}}{\Delta} \cdot \frac{\rho_1 \cdot \rho_3}{\rho_2} \cdot r_0^n \end{array} \right. \quad (4.13)$$

με τον συντελεστή Δ να δίνεται από τη σχέση (4.14):

$$\Delta = \left[\left(1 + \frac{n+1}{n} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \cdot \left(1 + \frac{n}{n+1} \cdot \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) - \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_2} \right) \cdot \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{2n+1} \right] \quad (4.14)$$

Η λύση που προέκυψε έχει την ίδια μορφή με τη λύση στην εργασία [181], μόνο που διαφέρουν οι όροι στη σχέση (4.13).

Στο Παράρτημα 4 υπολογίζεται το δυναμικό και για την περίπτωση στην οποία θεωρείται ότι η σημειακή πηγή ρεύματος βρίσκεται στην περιοχή II του σχήματος 4.2.

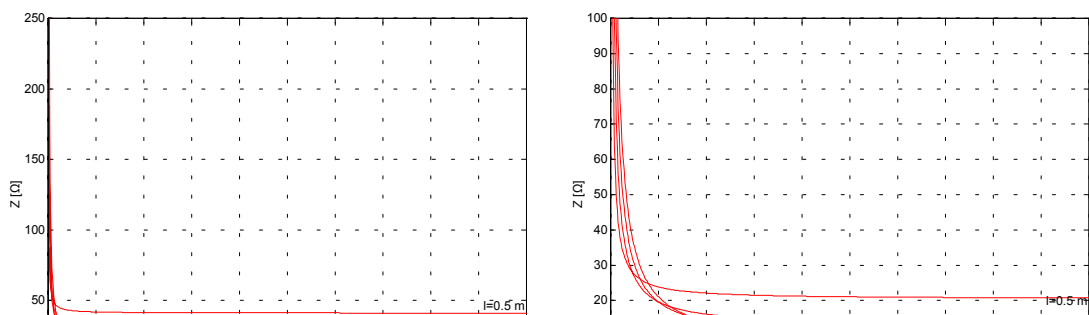
4.2.3 Παραδείγματα της προσέγγισης σε κατακόρυφες ράβδους γείωσης

Εφαρμόζοντας την προσέγγιση της προηγούμενης παραγράφου υπολογίζεται η μεταβατική σύνθετη αντίσταση συνηθισμένων συστημάτων γείωσης που αποτελούνται από μία ή περισσότερες κατακόρυφες ράβδους [222].

Η μελέτη εφαρμόστηκε σε αρκετά συστήματα γείωσης, στα οποία έγινε έγχυση κεραυνικού ρεύματος. Οι συντελεστές a , b της διπλοεκθετικής εξίσωσης (εξίσωση 4.2) παίρνουν τις τιμές $90909s^{-1}$ και $100000s^{-1}$ αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.5.α η μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης μίας κατακόρυφης ράβδου παρουσιάζεται στα σχήματα 4.3α – 4.6α, ενώ με χρήση της εξίσωσης 4.5.β η μεταβολή της κρουστικής σύνθετης αντίστασης ενός τριγώνου (με μήκος πλευράς d_{12}) αποτελούμενο από τρεις κατακόρυφες ράβδους απεικονίζεται στα σχήματα 4.3β – 4.6β.

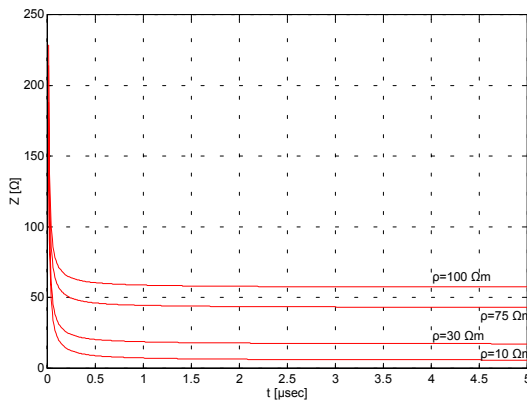
Είναι εμφανές από τα σχήματα 4.3-4.6 ότι και η αντίσταση μονίμου καταστάσεως και η σύνθετη κρουστική αντίσταση παρουσιάζουν μικρότερες τιμές για το τρίγωνο γείωσης σε σχέση με τη μία κατακόρυφη ράβδο. Από το σχήμα 4.5 είναι εμφανές ότι η μεταβολή της διαμέτρου του ηλεκτροδίου δεν επιδρά σημαντικά, ιδιαίτερα στην περίπτωση του τριγώνου, ούτε στην αντίσταση μονίμου καταστάσεως, ούτε στη σύνθετη κρουστική αντίσταση.



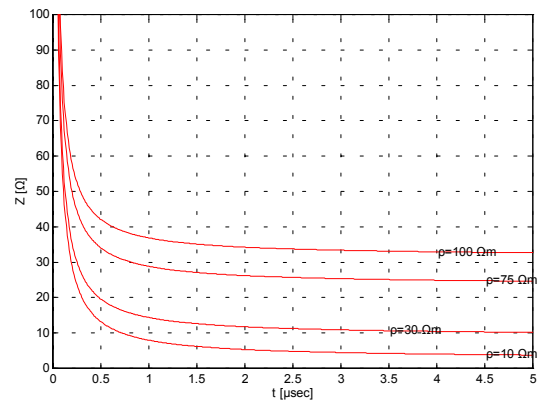
(α) μία κατακόρυφη ράβδο

(β) τρίγωνο

Σχήμα 4.3: Κρουστική σύνθετη αντίσταση συναρτήσει του χρόνου μεταβάλλοντας το μήκος του ηλεκτροδίου ($\rho=30 \Omega\cdot m$, $d=20mm$, $d_{12}=2m$, $\ell =0.5, 1.0, 1.5, 2.0m$)

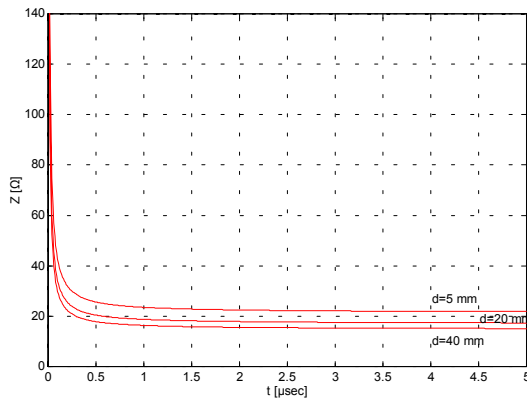


(α) μία κατακόρυφη ράβδος

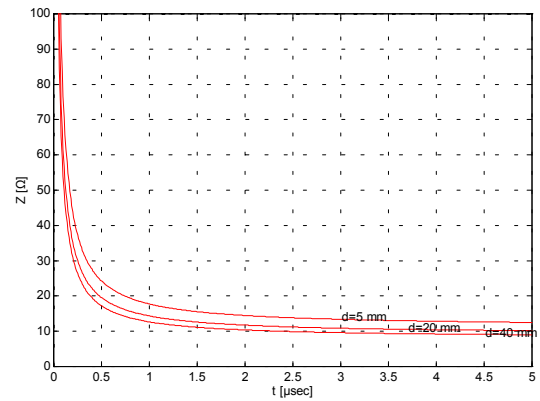


(β) τρίγωνο

Σχήμα 4.4: Κρουστική σύνθετη αντίσταση συναρτήσσει του χρόνου μεταβάλλοντας την ειδική αντίσταση του εδάφους ($\ell = 1.5m$, $d=20mm$, $d_{12}=2m$, $\rho=10, 30, 75, 100\Omega\cdot m$)

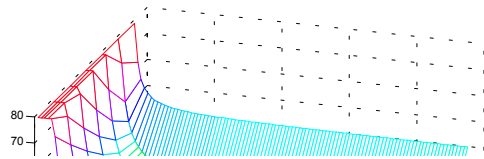


(α) μία κατακόρυφη ράβδος

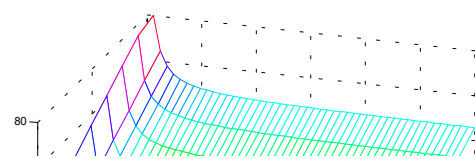


(β) τρίγωνο

Σχήμα 4.5: Κρουστική σύνθετη αντίσταση συναρτήσσει του χρόνου μεταβάλλοντας τη διάμετρο του ηλεκτροδίου ($\ell = 1.5m$, $d_{12}=2m$, $\rho=30\Omega\cdot m$, $d=5, 20, 40mm$)



(α) μία κατακόρυφη ράβδος



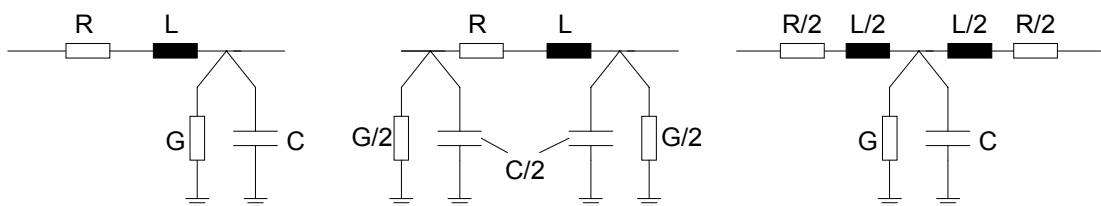
(β) τρίγωνο

Σχήμα 4.6: Κρουστική σύνθετη αντίσταση συναρτήσσει του χρόνου και του μήκους για μία κατακόρυφη ράβδος ($d=20mm$, $\rho=30\Omega\cdot m$, $d_{12}=2m$)

4.3 Κυκλωματική προσέγγιση συστημάτων γείωσης

Ένα ηλεκτρόδιο τοποθετημένο οριζόντια ή κατακόρυφα αποτελεί μια απλή διάταξη γείωσης. Επιπλέον, αποτελεί στοιχειώδες τμήμα ενός συστήματος γείωσης. Η ανάλυση της συμπεριφοράς του, υπό μεταβατικές συνθήκες, θέτει τη βάση για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς μιας γείωσης με σύνθετη γεωμετρία. Στη συνέχεια, επιχειρείται μια προσπάθεια κυκλωματικής προσομοίωσης των συστημάτων γείωσης. Στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται συχνά κυκλωματικές προσεγγίσεις.

Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο των π -ισοδύναμων κυκλωμάτων. Στο μοντέλο αυτό το ηλεκτρόδιο διαμοιράζεται σε ίσα τμήματα, καθένα από τα οποία παριστάνεται με ένα π -κύκλωμα. Προκειμένου να προσομοιωθούν οι επιμέρους αγωγοί των πλεγμάτων με τα αντίστοιχα T , Γ και Π ισοδύναμα κυκλώματα, θα υπολογιστούν τα στοιχεία αυτών. Απώτερος σκοπός της μαθηματικής αυτής προσέγγισης των στοιχείων είναι ο υπολογισμός της συνολικής σύνθετης αντίστασης γείωσης του πλέγματος. Το πλέγμα αποτελείται από οριζόντιους και κάθετους στοιχειώδεις αγωγούς. Κάθε στοιχειώδης αγωγός του πλέγματος μπορεί να αντικατασταθεί με ένα από τα τρία ισοδύναμα κυκλώματα Γ , Π και T [2, 221]. Τα κυκλώματα αυτά αποτελούνται από στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, τα οποία μπορούν να υπολογιστούν με τον ίδιο τρόπο και για τα τρία κυκλώματα. Η διαφορετική ονομασία του καθενός προκύπτει ανάλογα με τη θέση του εγκάρσιου κλάδου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Ισοδύναμα κυκλώματα.

Όλα περιλαμβάνουν στον οριζόντιο κλάδο την ωμική αντίσταση και την αυτεπαγωγή του στοιχείου του συστήματος και στον εγκάρσιο κλάδο την εγκάρσια αγωγιμότητα και τη χωρητικότητα του στοιχείου. Τα στοιχεία σειράς, που είναι η ωμική αντίσταση R και η επαγωγή L , οριοθετούν το ρεύμα. Τα παράλληλα στοιχεία, που

είναι η εγκάρσια αγωγιμότητα G και η χωρητικότητα C , εκφράζουν τις απώλειες ρεύματος προς τη γη. Από τα εν σειρά στοιχεία το πιο σημαντικό από πλευράς μεγέθους είναι η επαγωγή, ενώ η ωμική αντίσταση που εκφράζει τις απώλειες του αγωγού πολλές φορές μπορεί να αμεληθεί χωρίς σημαντικό σφάλμα. Από τα παράλληλα στοιχεία σπουδαιότερο ρόλο παίζει η αγωγιμότητα. Η επίδραση της χωρητικότητας είναι, συνήθως, πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή της εγκάρσιας αγωγιμότητας και, συνεπώς, πολύ συχνά αγνοείται.

4.3.1 Ωμική αντίσταση ευθύγραμμου τμήματος

Η κατανομή του ρεύματος ενός κυλινδρικού αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα μηδενικής συχνότητας είναι ομοιόμορφη και η ωμική του αντίσταση R δίνεται από τη σχέση [1, 2]:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{\pi \cdot r^2} \quad (4.15)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση του αγωγού

ℓ το μήκος του αγωγού

r η ακτίνα του αγωγού

Η ωμική αντίσταση ενός αγωγού επηρεάζεται όχι μόνο από την ειδική αντίσταση του υλικού και τις διαστάσεις του αγωγού, αλλά και από τη συχνότητα του ρεύματος που τον διαρρέει. Η κατανομή του ρεύματος μέσα στον αγωγό είναι ανομοιόμορφη και η ανομοιομορφία αυτή γίνεται τόσο εντονότερη, όσο αυξάνεται η συχνότητα [1, 2]. Το ρεύμα συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του αγωγού με αποτέλεσμα η πραγματική διατομή του αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα να είναι μικρότερη. Αυτό οδηγεί σε αύξηση της αποτελεσματικής αντίστασης ενός συμπαγούς αγωγού. Σε πολύ υψηλές συχνότητες η αύξηση αυτή είναι έντονη και η αντίσταση του αγωγού μπορεί να γίνει μέχρι και είκοσι φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση που θα είχε αν διαρρεόταν από συνεχές ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «επιδερμικό φαινόμενο».

Το επιδερμικό φαινόμενο μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά με τη βοήθεια ενός παράγοντα δ , ο οποίος ονομάζεται βάθος διείσδυσης και εκφράζει το πάχος του

τοιχώματος ενός σωληνωτού αγωγού (ίσης εξωτερικής διαμέτρου με εκείνη του πραγματικού αγωγού) του οποίου η αντίσταση, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα μηδενικής συχνότητας, θα ήταν περίπου ίση με την αντίσταση του πραγματικού αγωγού, όταν αυτός διαρρέεται από ρεύμα μη μηδενικής συχνότητας f . Το βάθος διείσδυσης δ δίνεται από τη σχέση [1, 2, 220, 221.]:

$$\delta = 2.22 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{R_o}{f}} \quad (4.16)$$

όπου R_o η αντίσταση συνεχούς ρεύματος που δίνεται από τη σχέση (4.15)

r η ακτίνα του αγωγού

f η συχνότητα του ρεύματος

Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται για το βάθος διείσδυσης δ η σχέση [169]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (4.17)$$

όπου $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ η κυκλική συχνότητα του ρεύματος

μ η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού

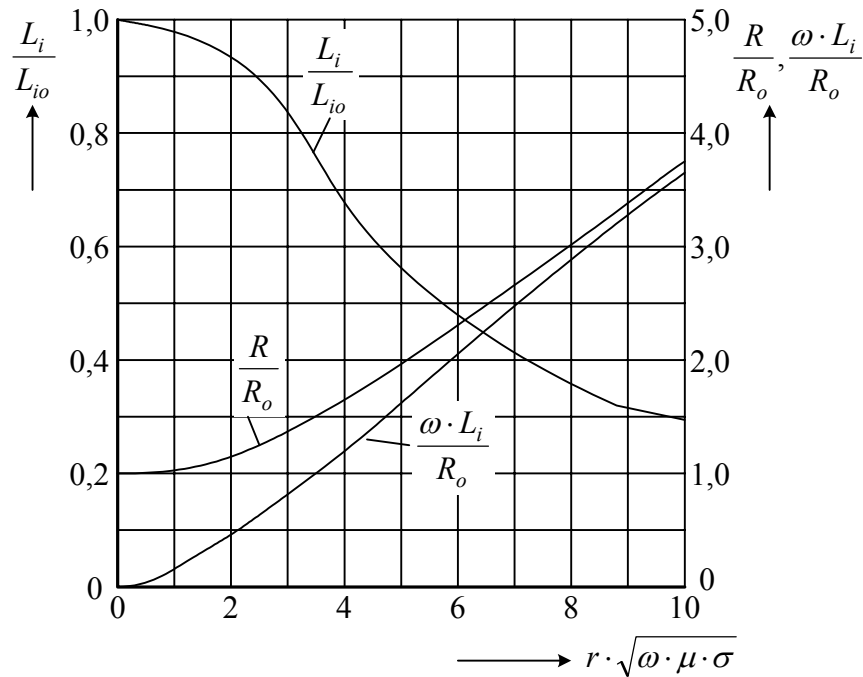
σ η ειδική αγωγιμότητα του αγωγού

Ο λόγος της εξαρτώμενης από τη συχνότητα αντίστασης γείωσης προς την αντίσταση συνεχούς ρεύματος δίνεται από τη σχέση [169]:

$$\frac{R}{R_o} = \begin{cases} 1 + \frac{\left(\frac{r}{\delta}\right)^4}{48} & \text{για } \frac{r}{2 \cdot \delta} < 1 \\ \frac{r}{2 \cdot \delta} + \frac{1}{4} + \frac{3}{32 \cdot \frac{r}{\delta}} & \text{για } \frac{r}{2 \cdot \delta} > 1 \end{cases} \quad (4.18)$$

Επομένως, για $\frac{r}{2 \cdot \delta} \rightarrow \infty$ ο λόγος $\frac{R}{R_o}$ τείνει στο $\frac{r}{2 \cdot \delta}$.

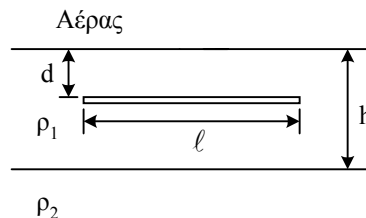
Γραφικά ο λόγος της εξαρτώμενης από τη συχνότητα αντίστασης γείωσης προς την αντίσταση συνεχούς ρεύματος συναρτήσει του παράγοντα $r \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$ αναπαρίσταται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση $\frac{R}{R_o}$ συναρτήσει του παράγοντα $r \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$ [169]

4.3.2 Εγκάρσια αγωγιμότητα ευθυγράμμου τμήματος

Η εγκάρσια αγωγιμότητα οριζοντίου ηλεκτροδίου του σχήματος 4.9 δίνεται στη βιβλιογραφία από πολλές εναλλακτικές σχέσεις.



Σχήμα 4.9: Οριζόντιο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό έδαφος

Ο Sirotinjskij [169, 223] για τον υπολογισμό της εγκάρσιας αγωγιμότητας οριζοντίου ηλεκτροδίου χρησιμοποιεί τη σχέση:

$$G = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{\ell}{r}\right)} \cdot \frac{\ell}{1 + \frac{\ln\left(\frac{\ell}{2 \cdot d}\right)}{\ln\left(\frac{\ell}{r}\right)}} \quad (4.19)$$

όπου ρ_s η ειδική αντίσταση του εδάφους

ℓ το μήκος του αγωγού

r η ακτίνα του αγωγού

d το βάθος τοποθέτησης του αγωγού

Ο Anjenkon [169, 224] για τον υπολογισμό της εγκάρσιας αγωγιμότητας οριζοντίου ηλεκτροδίου προτείνει τη σχέση:

$$G = \frac{2 \cdot \pi \cdot \ell}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{\ell^2}{2 \cdot r \cdot d}\right)} \quad (4.20)$$

Οι Verma και Mukhedkar [160] δημοσίευσαν σε άρθρο τους ότι, ανάλογα με το βάθος τοποθέτησης του οριζοντίου αγωγού, η αγωγιμότητά του δίνεται από τους τύπους:

$$G = \begin{cases} \frac{2 \cdot \pi \cdot \ell}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot \ell}{r}\right)} & \text{(ισχύει για μεγάλο βάθος)} \\ \frac{\pi \cdot \ell}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot \ell}{r}\right)} & \text{(ισχύει για μικρό βάθος)} \end{cases} \quad (4.21)$$

Οι Mazzetti και Veca [162] προτείνουν έναν τύπο για τον υπολογισμό της ανά μονάδα μήκους αντίστασης γείωσης R (που είναι το αντίστροφο της αγωγιμότητας) οριζοντίου ηλεκτροδίου:

$$R = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{2}{r}\right) \quad [\Omega/m] \quad (4.22)$$

Ο Sunde [2] προτείνει τη σχέση (4.23) για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας στην περίπτωση ενός αγωγού τοποθετημένου οριζόντια στην επιφάνεια της γης.

$$G = \frac{\pi \cdot \ell}{\rho_s \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot \ell}{r}\right) - 1 \right]} \quad (\text{ισχύει για } \ell \gg r) \quad (4.23)$$

Στην περίπτωση που ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε βάθος h , τότε στη σχέση (4.23) η ακτίνα r του αγωγού αντικαθίσταται με την ισοδύναμη ακτίνα $\sqrt{2 \cdot r \cdot d}$. Συνεπώς, η αγωγιμότητα στην περίπτωση που ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε βάθος d δίνεται από τη σχέση [2, 76]:

$$G = \frac{\pi \cdot \ell}{\rho_s \cdot \left[\ln\left(\frac{2 \cdot \ell}{\sqrt{2 \cdot r \cdot d}}\right) - 1 \right]} \quad (\text{ισχύει για } h \ll \ell) \quad (4.24)$$

Η εγκάρσια αγωγιμότητα του ηλεκτροδίου του σχήματος 4.9 υπολογίζεται από τη σχέση [146]:

$$G = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_s} \cdot \frac{\Delta L}{\ln\left(\frac{\ell}{r}\right) + \ln\left(\frac{\ell}{2d}\right)} \quad (4.25)$$

όπου ΔL το μήκος των τμημάτων στα οποία έχει χωριστεί το ηλεκτρόδιο

Σύμφωνα με τον Tagg [1] το αντίστροφο της αγωγιμότητας (η μορφή των επόμενων σχέσεων (4.26) έως και (4.28), εξηγεί αφ' εαυτής γιατί ο Tagg προτιμάει να δώσει τύπους για το αντίστροφο της αγωγιμότητας) οριζοντίου ηλεκτροδίου τοποθετημένου σε διστρωματικό έδαφος πλησίον της επιφανείας, όπως στο σχήμα 4.9, δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \frac{1}{G} &= \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \cdot \left[\left(\ln \frac{2 \cdot \ell}{r} - 1 + \ln \frac{\ell + \sqrt{(4 \cdot d^2 + \ell)}}{2 \cdot d} + \frac{2 \cdot d}{\ell} - \frac{\sqrt{(4 \cdot d^2 + \ell)}}{\ell} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \cdot \left(4 \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{\left(\frac{2 \cdot n \cdot h}{\ell}\right)^2 + 1}}{2 \cdot n \cdot \frac{h}{\ell}} + \frac{8 \cdot n \cdot h}{\ell} - 4 \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot n \cdot h}{\ell}\right)^2 + 1} \right) \right] \\ &= R_1 + R_\alpha \end{aligned} \quad (4.26)$$

όπου h το πάχος του πρώτου στρώματος (πλησιέστερο στην επιφάνεια του εδάφους)

ρ_1 η ειδική αντίσταση του πρώτου στρώματος

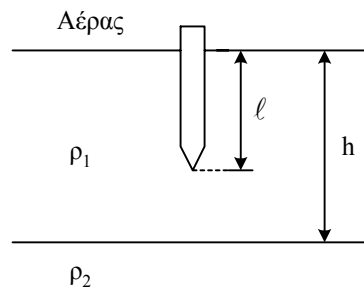
ρ_2 η ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \text{ ο συντελεστής αντικατοπτρισμού}$$

Ο πρώτος όρος R_1 εκφράζει την αντίσταση που θα είχε το ηλεκτρόδιο αν ήταν τοποθετημένο σε ομοιογενές έδαφος, ενώ ο δεύτερος όρος R_a εκφράζει την επιπρόσθετη αντίσταση λόγω της ύπαρξης του δεύτερου στρώματος.

Στην περίπτωση κατακόρυφου ηλεκτροδίου (σχήμα 4.10), ο Tagg [1] προτείνει τη σχέση:

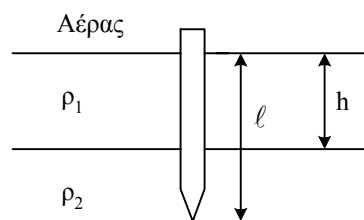
$$\frac{1}{G} = \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \cdot \left[\left(\ln \frac{4 \cdot \ell}{r} - 1 \right) + \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{k^n}{2} \cdot \ln \frac{n \cdot h / \ell + 1}{n \cdot h / \ell - 1} \right] \quad (4.27)$$



Σχήμα 4.10: Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο

Όταν το ηλεκτρόδιο εκτείνεται σε δύο στρώματα του εδάφους, όπως στο σχήμα 4.11, ο Tagg [1] υπολογίζει την αντίσταση του ηλεκτροδίου από τη σχέση:

$$\frac{1}{G} = \frac{\rho_1}{2 \cdot \pi \cdot \ell} \cdot \frac{1+k}{(1-k) + 2 \cdot k \cdot \frac{h}{\ell}} \cdot \left[\ln \frac{2 \cdot \ell}{\alpha} + \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \cdot \ln \frac{2 \cdot n \cdot h + \ell}{(2 \cdot n - 2) \cdot h + \ell} \right] \quad (4.28)$$



Σχήμα 4.11: Κατακόρυφο ηλεκτρόδιο σε διστρωματικό έδαφος

Η εξαρτημένη από τη συχνότητα εγκάρσια αγωγιμότητα οριζοντίου ηλεκτροδίου σύμφωνα με τον Sunde [2] δίνεται από τη σχέση:

$$G = \frac{\pi \cdot \ell}{\rho_s \cdot \ln\left(\frac{1.58}{\gamma \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot d}}\right)} \quad (4.29)$$

όπου γ η σταθερά εξάπλωσης

Η σταθερά εξάπλωσης δίνεται από τη σχέση [2]:

$$\gamma = \sqrt{j \cdot \omega \cdot \mu \cdot (\sigma + j \cdot \omega \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_r)} \quad (4.30)$$

όπου ω η κυκλική συχνότητα του ρεύματος

μ η μαγνητική διαπερατότητα του εδάφους

σ η ειδική αγωγιμότητα του εδάφους

ϵ_o η διηλεκτρική επιτρεπτότητα του κενού

ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους

4.3.3 Επαγωγή ευθυγράμμου τμήματος

Όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, τότε γύρω από τον αγωγό δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Αν η τιμή του ρεύματος αυτού μεταβληθεί, θα μεταβληθεί η μαγνητική του ροή και θα παραχθεί μία τάση εξ επαγωγής. Το φαινόμενο αυτό εκφράζεται μέσω της αυτεπαγωγής.

Η αυτεπαγωγή L ενός ευθύγραμμου αγωγού μήκους ℓ δίνεται από τη σχέση [93, 221]:

$$L = 0.2 \cdot \ell \times \left(\ln \frac{2 \cdot \ell}{r} - 1 \right) \quad [\mu\text{H}] \quad (4.31)$$

όπου r η ακτίνα του αγωγού

Η αυτεπαγωγή ενός αγωγού μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα δύο όρων, όπως στη σχέση [153]:

$$L = L_{int} + L_{ext} \quad (4.32)$$

όπου L_{int} είναι η εσωτερική αυτεπαγωγή και L_{ext} η εξωτερική αυτεπαγωγή.

Ο πρώτος όρος L_{int} οφείλεται στη μαγνητική ροή στο εσωτερικό του αγωγού, ενώ ο δεύτερος στη ροή που αναπτύσσεται στο εξωτερικό του αγωγού. Η εσωτερική αυτεπαγωγή ενός αγωγού, εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου, επηρεάζεται από τη συχνότητα του ρεύματος που τον διαρρέει. Η εξωτερική αυτεπαγωγή καθώς και η αλληλεπαγωγή μεταξύ δύο αγωγών δεν επηρεάζονται από το επιδερμικό φαινόμενο [153].

Η εσωτερική αυτεπαγωγή ενός κυλινδρικού αγωγού μήκους ℓ που διαρρέεται από ρεύμα μηδενικής συχνότητας δίνεται από τη σχέση [220, 221]:

$$L_{int,o} = \frac{\mu \cdot \ell}{4 \cdot \pi} \quad (4.33)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού

Ο λόγος της εσωτερικής αυτεπαγωγής ενός αγωγού, που διαρρέεται από ρεύμα μηδενικής συχνότητας, προς την εσωτερική αυτεπαγωγή αγωγού, που διαρρέεται από ρεύμα μηδενικής συχνότητας, δίνεται από τη σχέση (4.34) και η μεταβολή του συναρτήσει του παράγοντα $r \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}$, απεικονίζεται στο σχήμα 4.8 [169].

$$\frac{L_{int}}{L_{int,o}} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{r}{\delta}\right)^4 & \text{για } \frac{r}{2 \cdot \delta} < 1 \\ \frac{2 \cdot \delta}{r} - \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{\delta}{r}\right)^3 + \frac{3}{8} \cdot \left(\frac{\delta}{r}\right)^4 & \text{για } \frac{r}{2 \cdot \delta} > 1 \end{cases} \quad (4.34)$$

όπου δ το βάθος διείσδυσης. Επομένως, για $\frac{r}{2 \cdot \delta} \rightarrow \infty$ ο λόγος $\frac{R}{R_o}$ τείνει στο $\frac{2 \cdot \delta}{r}$.

Η εξωτερική αυτεπαγωγή ενός αγωγού που είναι τοποθετημένος στην επιφάνεια του εδάφους δίνεται από τη σχέση [2]:

$$L_{ext} = \frac{\mu \cdot \ell}{\pi \cdot \gamma^2 \cdot r^2} \cdot [1 - \gamma \cdot r \cdot K_1(\gamma \cdot r)] \quad (4.35)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του εδάφους

γ η σταθερά εξάπλωσης

r η ακτίνα του αγωγού

K_1 η πρώτης τάξης τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους

Για $\gamma \cdot r < 0.25$, από την επίλυση της (4.35) προκύπτει:

$$L_{ext} = \frac{\mu \cdot l}{2 \cdot \pi} \cdot \left(-\frac{j \cdot \pi}{4} + \ln \frac{1.85}{|\gamma \cdot r|} \right) \quad (4.36)$$

Στην περίπτωση που ο αγωγός μήκους ℓ και ακτίνας r είναι τοποθετημένος σε βάθος h από την επιφάνεια της γης, τότε η προηγούμενη σχέση τροποποιείται ως εξής [2]:

$$L_{ext} = \frac{\mu \cdot \ell}{4 \cdot \pi} \cdot \left[K_0(\gamma \cdot r) - K_0\left(\gamma \cdot \sqrt{r^2 + 4 \cdot h^2}\right) + 2 \cdot \int_0^\infty \frac{e^{-2 \cdot h \cdot \alpha} \cdot \cos(u \cdot r) \cdot du}{\alpha + u} \right] \quad (4.37)$$

όπου $\alpha = \sqrt{u^2 + \gamma^2}$ και K_0 η μηδενικής τάξης συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους.

Όταν ο αγωγός είναι τοποθετημένος σε πολύ μεγάλο βάθος, οι δύο τελευταίοι όροι της παραπάνω σχέσης μπορούν να παραλειφθούν:

$$L_{ext} = \frac{\mu \cdot l}{4 \cdot \pi} \cdot K_0(\gamma \cdot r) \quad \text{για } \gamma \cdot h \gg 1 \quad (4.38)$$

Επιλύοντας την 4.38 για $\gamma \cdot r < 0.25$ έχουμε:

$$L_{ext} = \frac{\mu \cdot l}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \frac{2}{\gamma \cdot r} + \Psi(0) \right] \quad \text{για } \gamma \cdot h \gg 1 \text{ και } \gamma \cdot r < 0.25 \quad (4.39)$$

Ο όρος $\Psi(0)$ προκύπτει από τη συνάρτηση Γάμμα ή συνάρτηση παραγοντικού, η οποία ορίζεται ως το όριο για $n \rightarrow \infty$ της σχέσης [2]:

$$u! = \Gamma(u+1) = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \dots (n-1) \cdot n}{(u+1) \cdot (u+2) \dots (u+n)} \cdot n^u \quad (4.40)$$

Η παράγωγος του λογαρίθμου της συνάρτησης Γάμμα ορίζεται ως:

$$\Psi(u) = \frac{d}{du} \log u! = \frac{(u!)' }{u!} \quad \text{ή} \quad \Psi(u) = \Psi(u-1) + \frac{1}{u} \quad (4.41)$$

Για $u = 0$ προκύπτει η σταθερά του Euler: $-\Psi(0) = 0.5772 = \log \gamma$, όπου $\gamma = 1.7811$

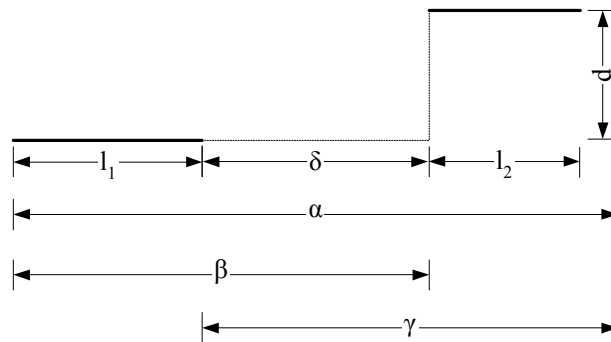
Η εξωτερική αυτεπαγωγή ενός αγωγού τοποθετημένου σε άπειρο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους είναι λιγότερο από 5% μικρότερη από την τιμή που θα είχε αν ο αγωγός βρισκόταν κοντά στην επιφάνεια [2]. Συνεπώς, για αγωγούς σε μικρό βάθος μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τύποι (4.35) και (4.36), που ισχύουν για την επιφάνεια.

Η μαγνητική σύζευξη μεταξύ δύο αγωγών μήκους ℓ_i και ℓ_j εκφράζεται μέσω της αλληλεπαγωγής, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [153]:

$$L_{ij} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{\ell_i} \int_{\ell_j} \frac{d\ell_i \cdot d\ell_j}{d_{ij}} \quad (4.42)$$

όπου d_{ij} η απόσταση μεταξύ των αγωγών i και j

μ η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου



Σχήμα 4.12: Διάταξη δύο παραλλήλων αγωγών οριζόντιας απόστασης δ και κατακόρυφης d .

Η αλληλεπαγωγή μεταξύ δύο παραλλήλων αγωγών με μήκος ℓ_1 και ℓ_2 αντίστοιχα και με διάταξη όπως εικονίζονται στο σχήμα 4.12, δίνεται από τη σχέση [82, 83, 93]:

$$L_{ij} = 0.1 \cdot \left(a \cdot \sinh^{-1} \frac{\alpha}{d} - \beta \cdot \sinh^{-1} \frac{\beta}{d} - \gamma \cdot \sinh^{-1} \frac{\gamma}{d} + \delta \cdot \sinh^{-1} \frac{\delta}{d} - \sqrt{\alpha^2 + d^2} + \sqrt{\beta^2 + d^2} + \sqrt{\gamma^2 + d^2} - \sqrt{\delta^2 + d^2} \right) \quad [\mu\text{H}] \quad (4.43)$$

όπου δ η οριζόντια απόσταση των δύο αγωγών

d η κατακόρυφη απόσταση των δύο αγωγών

$$a = \ell_1 + \ell_2 + \delta$$

$$\beta = \ell_1 + \delta$$

$$\gamma = \ell_2 + \delta$$

Προσεγγιστικά ισχύει:

$$\sinh^{-1} y \cong \ln\left(y + \sqrt{y^2 + 1}\right) \quad (4.44)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4.44) στη σχέση (4.43), προκύπτει:

$$\begin{aligned} L_{ij} = 0.1 \cdot \left\{ a \cdot \ln \left[\frac{\alpha}{d} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{d}\right)^2 + 1} \right] - \beta \cdot \ln \left[\frac{\beta}{d} + \sqrt{\left(\frac{\beta}{d}\right)^2 + 1} \right] \right. \\ \left. - \gamma \cdot \ln \left[\frac{\gamma}{d} + \sqrt{\left(\frac{\gamma}{d}\right)^2 + 1} \right] + \delta \cdot \ln \left[\frac{\delta}{d} + \sqrt{\left(\frac{\delta}{d}\right)^2 + 1} \right] \right. \\ \left. - \sqrt{\alpha^2 + d^2} + \sqrt{\beta^2 + d^2} + \sqrt{\gamma^2 + d^2} - \sqrt{\delta^2 + d^2} \right\} \quad [\mu\text{H}] \quad (4.45) \end{aligned}$$

Εάν οι αγωγοί υπερκαλύπτονται, τότε η οριζόντια απόσταση δ λαμβάνεται με αρνητικό πρόσημο.

Στην περίπτωση που η κατακόρυφη απόσταση των δύο αγωγών είναι μηδέν, ενώ η οριζόντια απόστασή τους είναι διάφορη του μηδενός, μεταξύ τους η αλληλεπαγωγή δίνεται από τη σχέση [93, 169]:

$$L_{ij} = 0.1 \cdot \{ a \cdot \ln[2 \cdot a] - \beta \cdot \ln(2 \cdot \beta) - \gamma \cdot \ln(2 \cdot \gamma) - \delta \cdot \ln(2 \cdot \delta) \} \quad [\mu\text{H}] \quad (4.46)$$

Στην περίπτωση που η οριζόντια και η κατακόρυφη απόσταση των δύο αγωγών είναι μηδέν η μεταξύ τους αλληλεπαγωγή δίνεται από τη σχέση [93, 169]:

$$L_{ij} = 0.1 \cdot \{ (\ell_1 + \ell_2) \cdot \ln(\ell_1 + \ell_2) - \ell_1 \cdot \ln \ell_1 - \ell_2 \cdot \ln \ell_2 \} \quad [\mu\text{H}] \quad (4.47)$$

Αναφέρεται [169] ότι στην περίπτωση που η οριζόντια απόσταση είναι μηδέν, ενώ η κατακόρυφη απόσταση είναι διάφορη του μηδενός η αλληλεπαγωγή μεταξύ των

δύο αγωγών δίνεται από τη γενική σχέση (4.45). Για την περίπτωση μηδενικής οριζόντιας απόστασης και μη μηδενικής κατακόρυφης απόστασης χρησιμοποιήθηκε η σχέση (4.47) γεγονός που οδήγησε στον υπολογισμό συμμετρικών τιμών, οι οποίες έρχονται σε καλύτερη συμφωνία με τα πειράματα υπό κλίμακα που έχουν γίνει στο εργαστήριο.

Η αλληλεπαγωγή μεταξύ δύο αγωγών δεν επηρεάζεται από το επιδερμικό φαινόμενο [153], με αποτέλεσμα να μένει αμετάβλητη όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα μη μηδενικής συχνότητας.

Στο Παράρτημα Π5.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχέσεις για τον υπολογισμό της επαγωγής οριζοντίων αγωγών στην περίπτωση ύπαρξης αγωγού επιστροφής ρεύματος. Στην §Π5.2 αναλύεται η διαδικασία υπολογισμού της σύνθετης αντίστασης αγωγών που διαρρέονται από ρεύμα μη μηδενικής συχνότητας για την ίδια περίπτωση ύπαρξης αγωγού επιστροφής ρεύματος.

4.3.4 Εγκάρσια χωρητικότητα ευθυγράμμου τμήματος

Σε ομοιογενές διηλεκτρικό μέσο η χωρητικότητα C του στοιχείου k ως προς τη γη μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση που συνδέει την αγωγιμότητα G με τη χωρητικότητα [156].

$$C = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \rho_s \cdot G \quad (4.48)$$

όπου ε_o η διηλεκτρική επιτρεπτότητα του κενού

ε_r η διηλεκτρική σταθερά του εδάφους

ρ_s η ειδική αντίσταση του εδάφους

Σε ανομοιογενές διηλεκτρικό μέσο με διηλεκτρικές σταθερές ε_1 και ε_2 και ειδικές αντιστάσεις ρ_{s1} και ρ_{s2} ισχύει ο λόγος [169]:

$$\frac{\rho_{s1}}{\rho_{s2}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (4.49)$$

Η εξαρτημένη από τη συχνότητα εγκάρσια χωρητικότητα αγωγού, τοποθετημένου σε ομοιογενές έδαφος, δίνεται από τη σχέση (4.48). Στη σχέση αυτή η αγωγιμότητα G

πρέπει να αντικατασταθεί από τη σχέση (4.29), η οποία συμπεριλαμβάνει και την εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Εναλλακτικά, σε ένα σύστημα δύο ή περισσοτέρων αλληλοσυνδεδεμένων αγωγών που διαρρέονται από ποσότητα φορτίου είναι αναπόφευκτη η ύπαρξη χωρητικότητας. Ο λόγος της μεταβολής του φορτίου προς τη μεταβολή τάσης που επιβάλλεται σε έναν αγωγό (είναι στην πραγματικότητα συνάρτηση της τοπολογίας του συστήματος και της επιτρεπτότητας του υλικού) ορίζεται ως χωρητικότητα. Το αντίστροφο της χωρητικότητας του αγωγού k εξαρτάται από τις διαστάσεις του αγωγού και δίνεται από τη σχέση [220]:

$$P_k = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \ell} \cdot \ln \frac{1}{r_k} \quad (4.50)$$

όπου r_k η ακτίνα του αγωγού

ℓ το μήκος του αγωγού

ε η επιτρεπτότητα του υλικού

Η αντίστροφη χωρητικότητα που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του αγωγού k με τον αγωγό p εξαρτάται από την απόσταση των δύο αγωγών και εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_{kp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \ell} \cdot \ln \frac{1}{D_{kp}} \quad (4.51)$$

όπου D_{kp} η απόσταση μεταξύ των δύο αγωγών

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.50) και (4.51) μπορούμε να δημιουργήσουμε μία μήτρα P αντιστρόφων χωρητικοτήτων, στην οποία τα διαγώνια στοιχεία P_{ii} εκφράζουν την αντίστροφη χωρητικότητα που οφείλεται στον ίδιο τον αγωγό, ενώ τα μη διαγώνια στοιχεία P_{ij} εκφράζουν την αντίστροφη χωρητικότητα που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του αγωγού i με τον αγωγό j . Για ένα σύστημα με n αγωγούς η μήτρα P έχει τη μορφή:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_2 & P_{23} & \cdots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_3 & \cdots & P_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \cdots & P_n \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Στη συνέχεια, για να υπολογίσουμε τις χωρητικότητες των αγωγών αρκεί να αντιστρέψουμε τη μήτρα P , οπότε θα προκύψει ένας πίνακας C της μορφής:

$$C = P^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_2 & C_{23} & \cdots & C_{2n} \\ C_{31} & C_{32} & C_3 & \cdots & C_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \cdots & C_n \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

4.3.5 Παραδείγματα στην κυκλωματική προσέγγιση

Χρησιμοποιώντας τον τρόπο υπολογισμού των παραμέτρων του π-ισοδύναμου κυκλώματος που παρουσιάζεται στην §4.3 γίνεται προσομοίωση σε ορισμένα κλασσικά συστήματα γείωσης. Το εγχυόμενο ρεύμα είναι διπλοεκθετικής μορφής και εκφράζεται από την εξίσωση (4.2). Οι συντελεστές α , β παίρνουν τιμές από τον πίνακα 4.1, ενώ η μέγιστη τιμή του ρεύματος είναι μονάδα για να είναι εύκολη η σύγκριση με πειραματικά ή θεωρητικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

| α/α | α [s ⁻¹] | β [s ⁻¹] | T_{crest} [μs] | T_{half} [μs] |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1 | 16667 | 100000000 | 0,1 | 43 |
| 2 | 16667 | 25000000 | 0,3 | 43 |
| 3 | 16667 | 10000000 | 0,6 | 43 |
| 4 | 16667 | 2857143 | 1,8 | 43 |
| 5 | 16667 | 2127660 | 2,4 | 43 |
| 6 | 16667 | 1538462 | 3,0 | 43 |
| 7 | 80000 | 3703704 | 1,2 | 10 |
| 8 | 37037 | 4545455 | 1,2 | 20 |
| 9 | 25000 | 5000000 | 1,2 | 29 |
| 10 | 16667 | 5000000 | 1,2 | 43 |
| 11 | 11806 | 6079027 | 1,2 | 60 |
| 12 | 7018 | 6211180 | 1,2 | 100 |

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη εγχυόμενου ρεύματος

Τα συστήματα τα οποία μελετώνται είναι οριζόντια ηλεκτρόδια μία κατακόρυφη ράβδος; καθώς και τετραγωνικά πλέγματα γείωσης.

4.3.5.1 Εφαρμογή σε οριζόντια ηλεκτρόδια

Τα δεδομένα του εδάφους και των ηλεκτροδίων τα οποία μελετούνται δίνονται στον πίνακα 4.2:

| Περίπτωση | A | B | Γ | Δ | E |
|--|-----|-----|------|-----|-----|
| Ειδική αντίσταση εδάφους ρ [Ωm] | 70 | 100 | 1000 | 38 | 38 |
| Σχετική διηλεκτρική σταθερά εδάφους ϵ_r | 15 | 36 | 9 | 40 | 40 |
| Μήκος ηλεκτροδίου ℓ [m] | 15 | 100 | 100 | 2 | 4 |
| Βάθος τοποθέτησης ηλεκτροδίου h [m] | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Ακτίνα ηλεκτροδίου r [mm] | 12 | 2,5 | 2,5 | 9 | 9 |

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά εδάφους και ηλεκτροδίων

Στα σχήματα 4.13 και 4.14 παρουσιάζεται για την περίπτωση A, του πίνακα 4.2, η χρονική μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος (πάνω τμήμα του σχήματος), της διαφοράς δυναμικού ως προς την άπειρη γη (μεσαίο τμήμα του σχήματος) και της σύνθετης μεταβατικής αντίστασης (κάτω τμήμα του σχήματος) του οριζοντίου ηλεκτροδίου. Σε κάθε σχήμα υπάρχουν τρεις γραφικές παραστάσεις, μία για καθένα από τα παραπάνω μεγέθη αντιστοίχως. Η μαύρη καμπύλη αναφέρεται σε σημείο του ηλεκτροδίου που βρίσκεται στην αρχή του (στο σημείο που γίνεται η έγχυση του κεραυνικού ρεύματος), η κόκκινη καμπύλη αναφέρεται σε σημείο που απέχει 3,5m από την αρχή του ηλεκτροδίου, ενώ η πράσινη καμπύλη αναφέρεται σε σημείο που απέχει 7m από την αρχή του ηλεκτροδίου. Το γράμμα που βρίσκεται δεξιά από κάθε σχήμα παραπέμπει, με ελληνικό τρόπο γραφής, στη μορφή του ρεύματος (από τον αύξοντα αριθμό του πίνακα 4.2). Το μήκος του ηλεκτροδίου, το μήκος της διαμέρισής του, ο χρόνος μεγίστου και ο χρόνος ημίσεος εύρους ουράς αναφέρονται στην επικεφαλίδα κάθε σχήματος.

Η επίδραση του χρόνου μετώπου του εγχυόμενου ρεύματος φαίνεται στο σχήμα 4.13. Όπως παρατηρείται από τη μελέτη των γραφικών παραστάσεων του σχήματος 4.13, η μείωση του χρόνου μετώπου του εγχυόμενου ρεύματος για σταθερό χρόνο

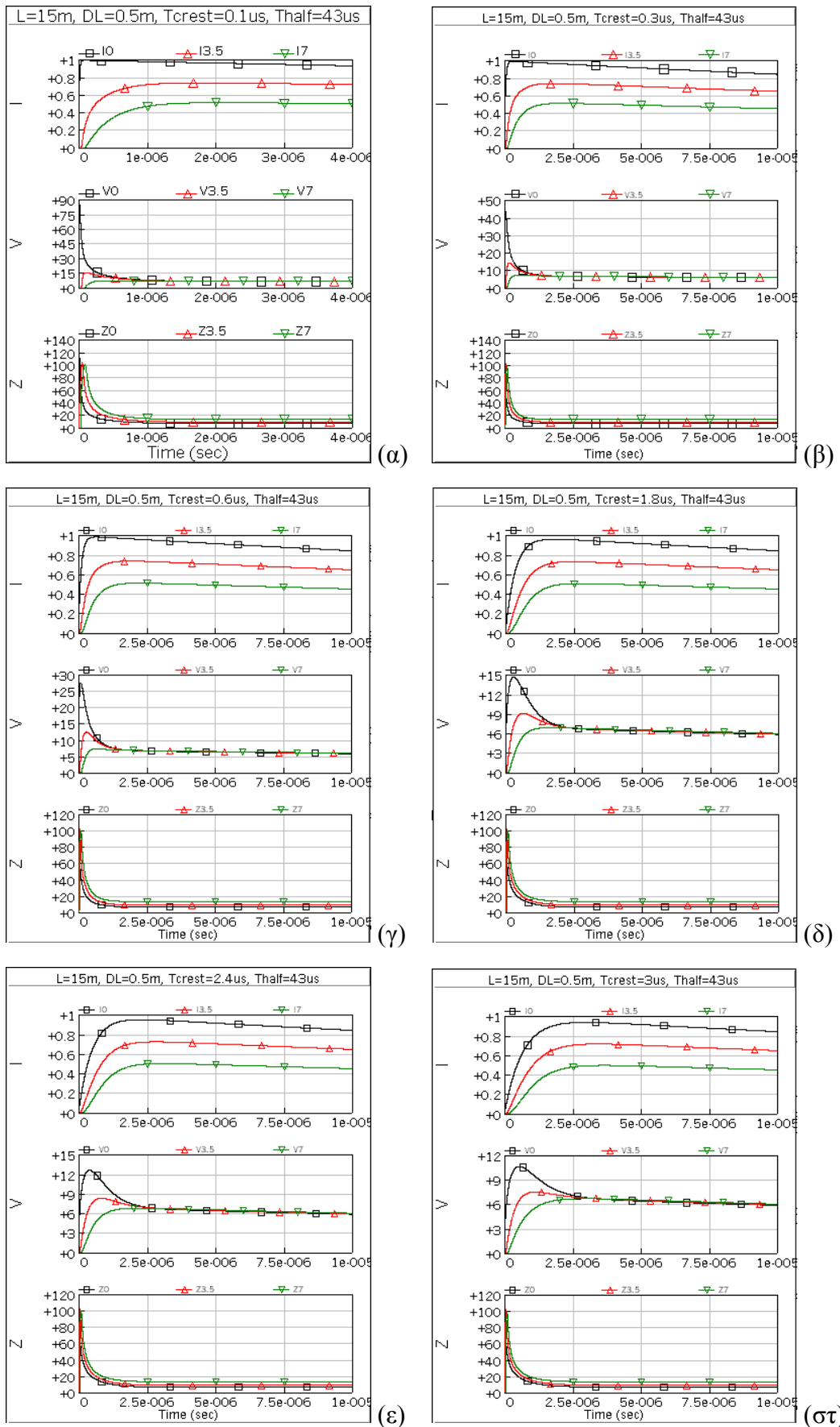
ημίσεος εύρους ουράς προκαλεί αύξηση της μέγιστης τιμής της μεταβατικής τάσεως. Αύξηση υπάρχει και στη μέγιστη τιμή της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης. Η τελική τιμή της τάσεως δεν εξαρτάται από τη μορφή του ρεύματος. Προφανώς, και η τελική τιμή της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης δεν εξαρτάται από τη μορφή του ρεύματος, αλλά τείνει στην τιμή της αντίστασης γείωσης μονίμου καταστάσεως.

Από τη μελέτη της επίδρασης του χρόνου ουράς του εγχυόμενου ρεύματος στη μορφή των αντίστοιχων μεγεθών του σχήματος 4.14 προκύπτει ότι η επίδρασή της είναι αμελητέα συγκρινόμενη με την επίδραση που έχει ο χρόνος μετώπου.

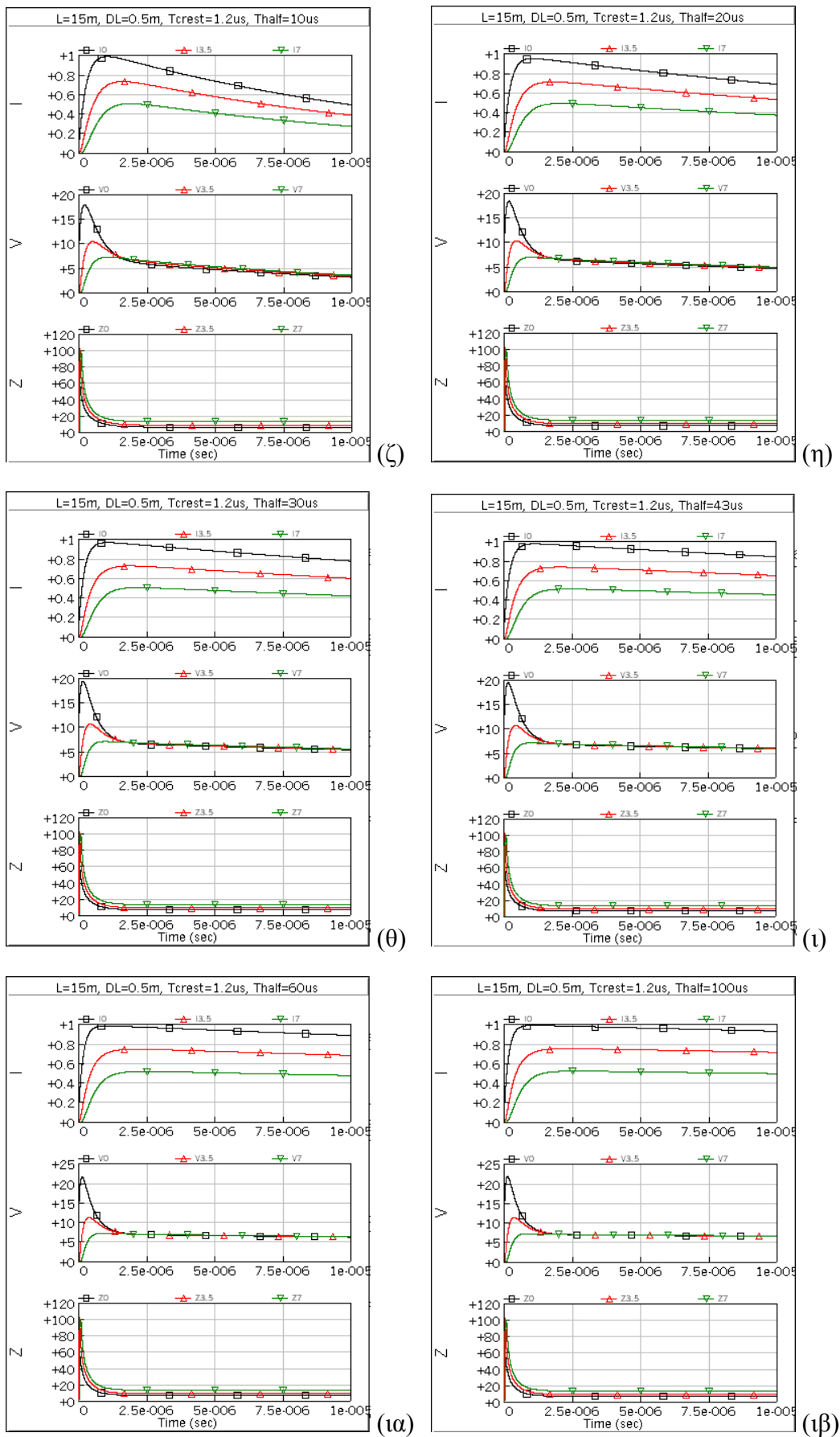
Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται, για τις περιπτώσεις Β και Γ των οριζοντίων ηλεκτροδίων του πίνακα 4.2, η επίδραση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος, για σταθερό (ίσο με $43\mu\text{s}$) χρόνο ημίσεος εύρους στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Παρατηρείται ότι η μείωση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος προκαλεί αύξηση στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν από το σχήμα 4.16, για τις περιπτώσεις Δ και Ε των οριζοντίων ηλεκτροδίων του πίνακα 4.2.

Στις περιπτώσεις Β και Γ των οριζοντίων ηλεκτροδίων του πίνακα 4.2 μεταβάλλεται η τιμή της ειδικής αντίστασης. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή μετά από μερικά μs , η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους προκαλεί ανάλογη ποσοστιαία αύξηση στην τιμή της αντίστασης μονίμου καταστάσεως ή της αναπτυσσόμενης τάσης, ενώ στο μεταβατικό στάδιο παρατηρείται ότι δεκαπλασιασμός της ειδικής αντίστασης (από $100\Omega\text{m}$ σε $1000\Omega\text{m}$) προκαλεί από διπλασιασμό (στην έγχυση πολύ γρήγορου ρεύματος) έως τετραπλασιασμό (στην περίπτωση που ο χρόνος μεγίστου του ρεύματος ισούται με $3\mu\text{s}$) της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης (σχήμα 4.15).

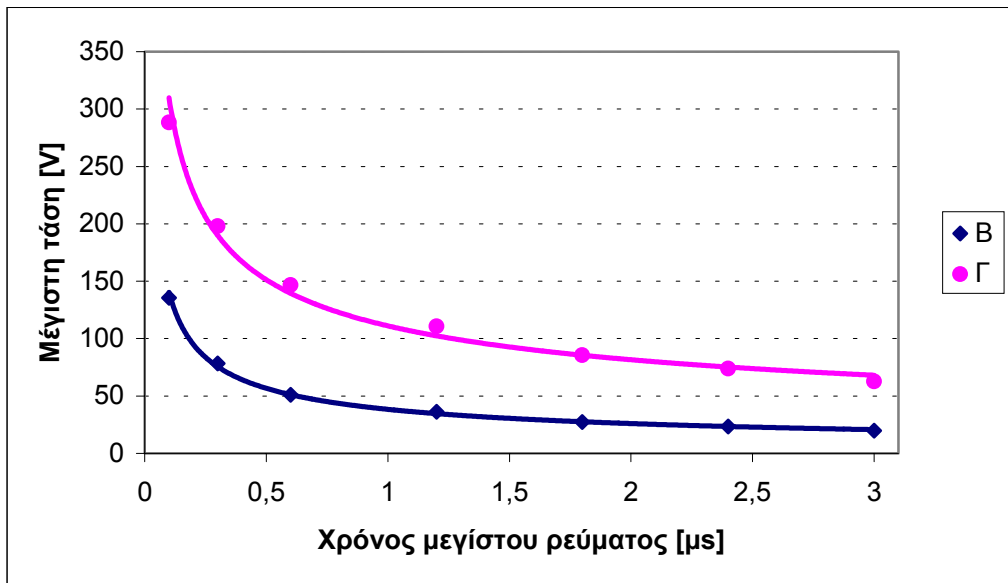
Προφανώς, αν εξεταστεί μία πολύ αργή κυματομορφή τότε αφενός υπάρχει πολύ μικρή αύξηση της τάσης σε σχέση με την τάση μετά από κάποια μs και αφετέρου η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους προκαλεί ανάλογη ποσοστιαία αύξηση στην τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης.



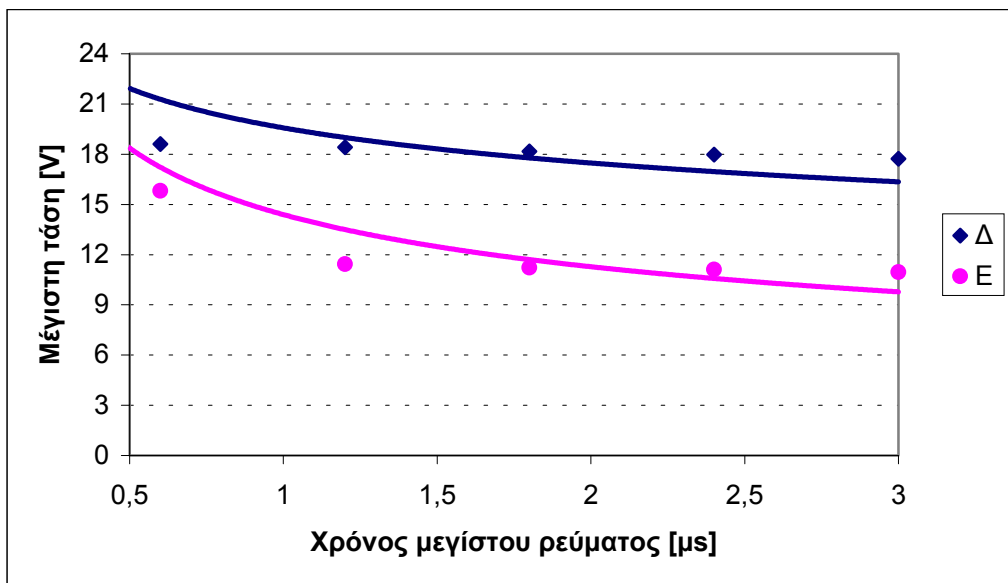
Σχήμα 4.13: Γραφικές παραστάσεις (επίδραση χρόνου μετώπου) ηλεκτροδίου A



Σχήμα 4.14: Γραφικές παραστάσεις (επίδραση χρόνου ουράς) ηλεκτροδίου A



Σχήμα 4.15: Επίδραση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση στην περίπτωση του οριζόντιου ηλεκτροδίου B και Γ



Σχήμα 4.16: Επίδραση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση στην περίπτωση του οριζόντιου ηλεκτροδίου Δ και E

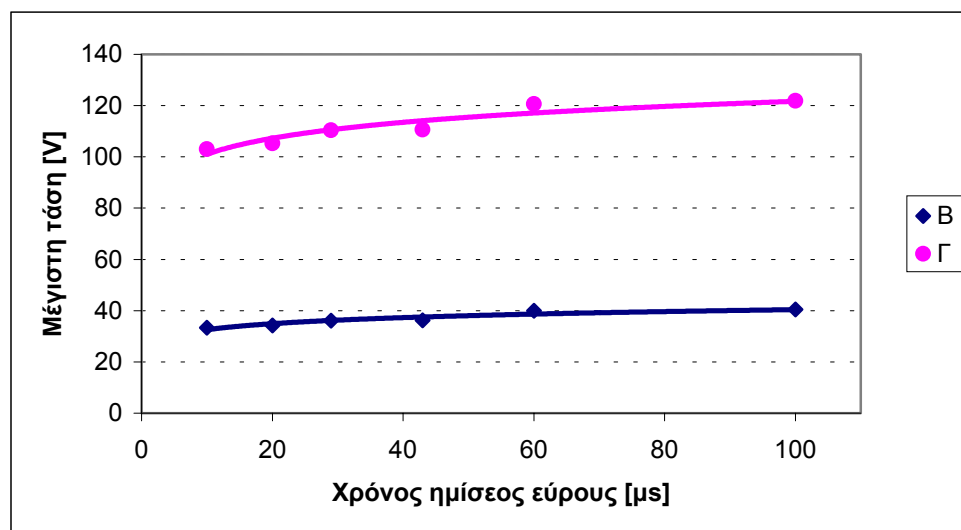
Από το σχήμα 4.16 εξάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση του μήκους του ηλεκτροδίου προκαλεί μείωση της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης τάσης. Για διπλασιασμό του μήκους του ηλεκτροδίου παρατηρείται μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης έως και κατά 35%, ποσοστό μειούμενο όταν μειώνεται ο χρόνος μεγίστου ρεύματος. Αυτό συμβαίνει γιατί το μήκος του ηλεκτροδίου το οποίο

πραγματικά συμμετέχει στο μεταβατικό στάδιο είναι το μικρότερο από το πραγματικό μήκος του ηλεκτροδίου και το ενεργό του μήκος. Το ενεργό μήκος l_e ενός ηλεκτροδίου δίνεται από την σχέση [82, 161]:

$$l_e = K \cdot \sqrt{\rho \cdot T} \quad (4.54)$$

ρ είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους (σε Ωm), T ο χρόνος μετώπου της κυματομορφής (σε μs) και K είναι μία σταθερά που εξαρτάται από το ηλεκτρόδιο ή το πλέγμα και παίρνει τιμές από 1 έως 2 [82, 161].

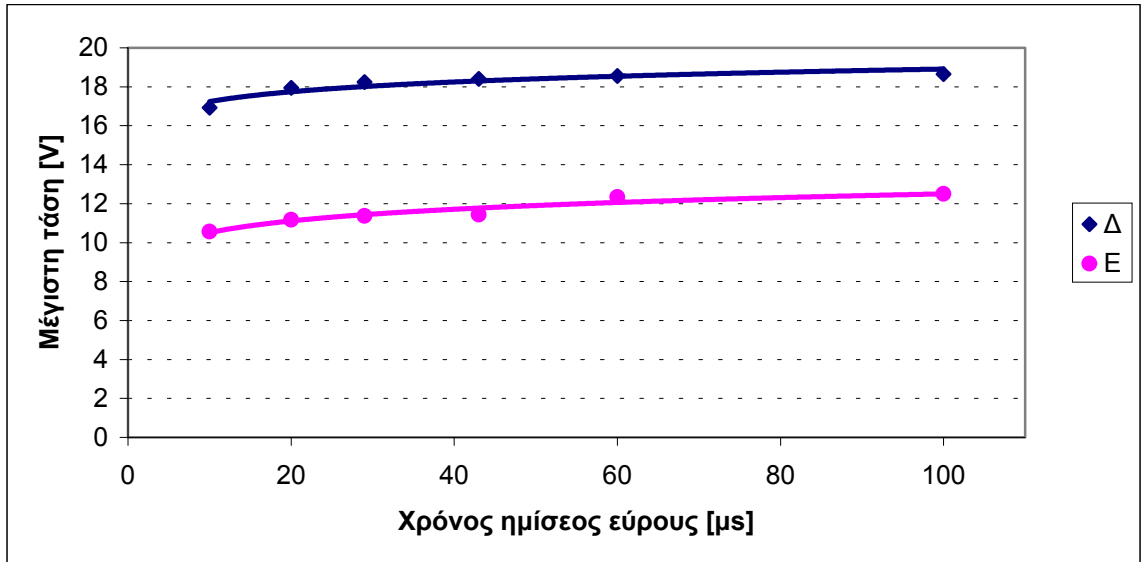
Όταν το μήκος του ηλεκτροδίου γίνει μεγαλύτερο από το ενεργό μήκος τότε ενδεχόμενη αύξηση του μήκους του δεν επιφέρει καμία βελτίωση στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης.



Σχήμα 4.17: Επίδραση του χρόνου ημίσειος εύρους ουσίας του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση στην περίπτωση του οριζόντιου ηλεκτροδίου B και Γ

Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται, για τις περιπτώσεις B και Γ των οριζοντίων ηλεκτροδίων του πίνακα 4.2., η επίδραση του χρόνου ημίσειος εύρους ουσίας του εγχυόμενου ρεύματος, για χρόνο μεγίστου σταθερό (ίσο με $1,2\mu\text{s}$) στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Παρατηρείται ότι η αύξηση του χρόνου ημίσειος εύρους ουσίας του εγχυόμενου ρεύματος προκαλεί αύξηση στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Η αύξηση της ειδικής αντίστασης προκαλεί την ίδια επίδραση για όλους τους χρόνους ημίσειος εύρους (για τη συγκεκριμένη περίπτωση ο

δεκαπλασιασμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους προκαλεί τριπλασιασμό στην τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης).



Σχήμα 4.18: Επίδραση του χρόνου ημίσεος εύρους ουράς του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση στην περίπτωση του οριζόντιου ηλεκτροδίου Δ και Ε.

Από το σχήμα 4.18 παρατηρείται ότι η αύξηση του χρόνου ημίσεος εύρους (για σταθερό χρόνο μεγίστου ίσο με 1,2μs) προκαλεί αύξηση της τιμής της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης. Επιπλέον, ο διπλασιασμός του μήκους του ηλεκτροδίου (περίπτωση Ε έναντι της Δ) προκαλεί μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης περί το 35% (σχήμα 4.18).

4.3.5.2 Εφαρμογή σε κατακόρυφη ράβδο

Τα δεδομένα του εδάφους και των κατακόρυφων ράβδων οι οποίοι μελετώνται παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3:

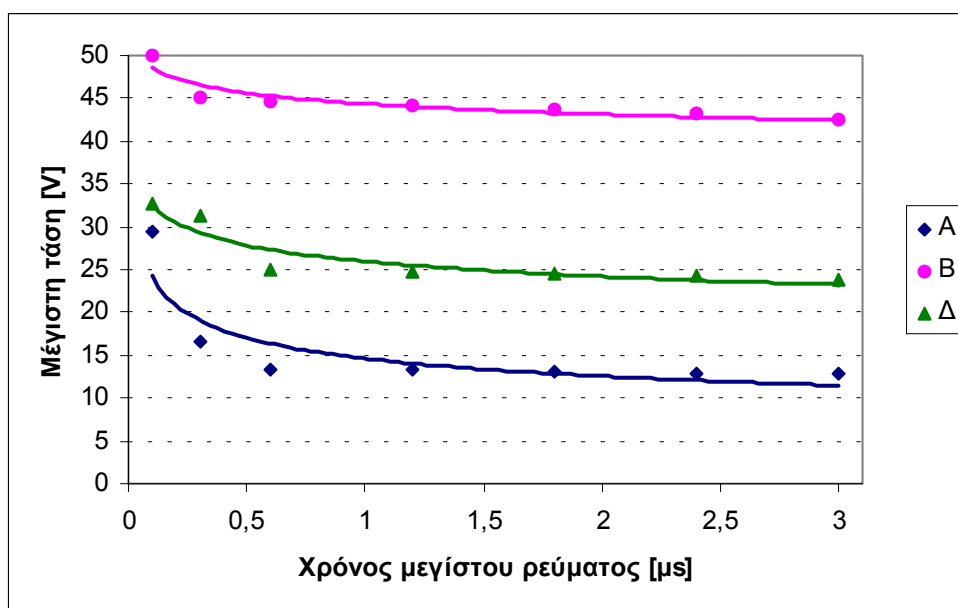
| Περίπτωση | A | B | Γ | Δ | Ε |
|--|----|-----|------|-----|------|
| Ειδική αντίσταση εδάφους ρ [Ωm] | 30 | 100 | 1000 | 100 | 1000 |
| Σχετική διηλεκτρική σταθερά εδάφους ϵ_r | 40 | 36 | 9 | 36 | 9 |
| Μήκος ράβδου ℓ [m] | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 |
| Ακτίνα ηλεκτροδίου r [mm] | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά εδάφους και ράβδων

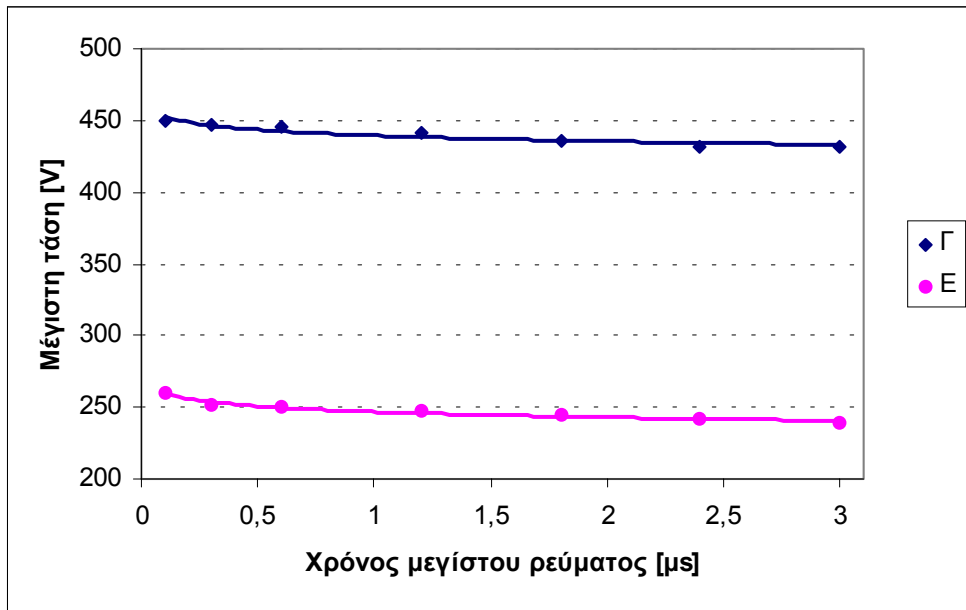
Στο σχήμα 4.19 παρουσιάζεται, για τις περιπτώσεις A, B και Δ των κατακόρυφων ράβδων του πίνακα 4.3, η επίδραση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος, για σταθερό χρόνο ημίσεος εύρους (ίσο με 43μs) στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Παρατηρείται ότι η μείωση του χρόνου ανόδου του εγχυόμενου ρεύματος προκαλεί αύξηση στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν από το σχήμα 4.20, για τις περιπτώσεις Γ και Ε του πίνακα 4.3.

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται, για τις περιπτώσεις A, B και Δ των κατακόρυφων ράβδων η επίδραση του χρόνου ημίσεος εύρους ουράς του εγχυόμενου ρεύματος, για χρόνο μεγίστου σταθερό (ίσο με 1,2μs) στη μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης. Αντίστοιχη μεταβολή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.22 για τις περιπτώσεις Γ και Ε των κατακόρυφων ράβδων. Παρατηρείται ότι η αύξηση του χρόνου ημίσεος εύρους ουράς για σταθερό χρόνο μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος προκαλεί αύξηση στην μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης.

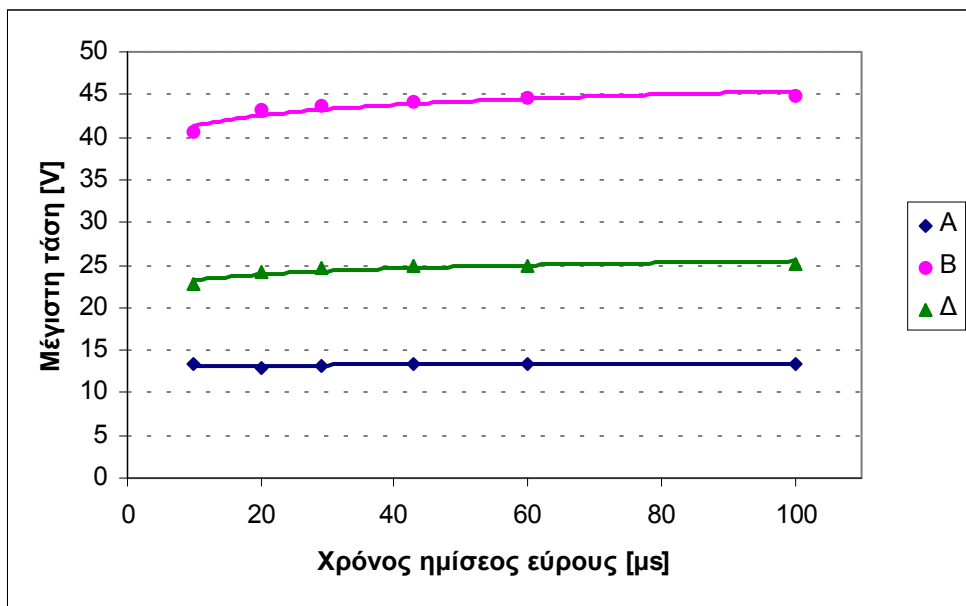
Με σύγκριση των αποτελεσμάτων (σχήματα 4.19-4.22) για τις κατακόρυφες ράβδους των περιπτώσεων B και Γ αφενός και των περιπτώσεων Δ και Ε αφετέρου προκύπτει πως η αύξηση της ειδικής αντίστασης προκαλεί ανάλογη ποσοστιαία αύξηση της μέγιστης τιμής της αναπτυσσόμενης τάσης.



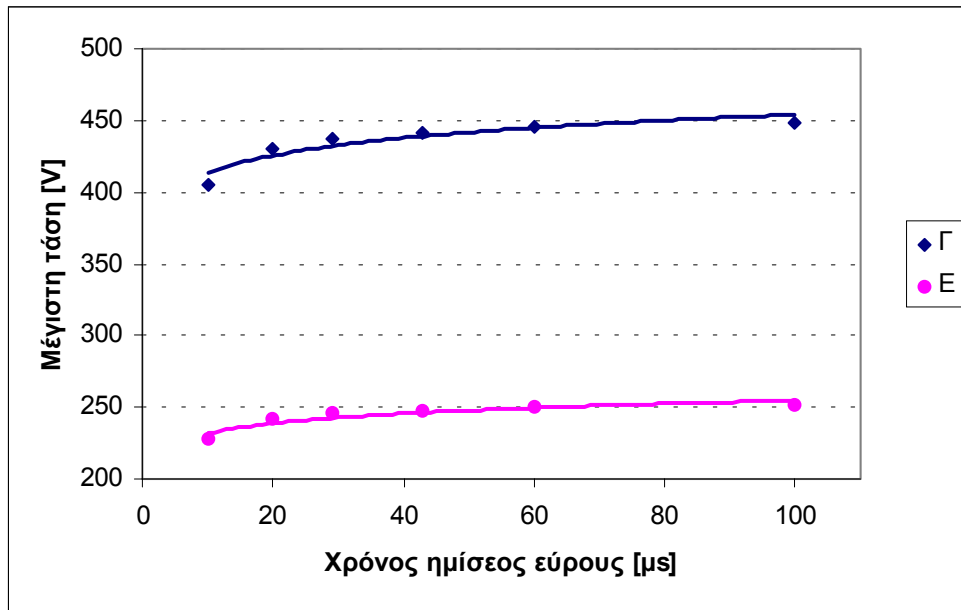
Σχήμα 4.19: Επίδραση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση (περίπτωση των κατακόρυφων ράβδων A, B και Δ)



Σχήμα 4.20: Επίδραση του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση (περίπτωση των κατακόρυφων ράβδων Γ και Ε)



Σχήμα 4.21: Επίδραση του χρόνου ημίσειος εύρους ουράς του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση (περίπτωση των κατακόρυφων ράβδων Α, Β και Δ)



Σχήμα 4.22: Επίδραση του χρόνου ημίσεως εύρους ουράς του εγχυόμενου ρεύματος στη μέγιστη εμφανιζόμενη τάση (περίπτωση των κατακόρυφων ράβδων Γ και Ε)

4.3.5.3 Εφαρμογή σε πλέγματα

Τα δεδομένα του εδάφους και των πλεγμάτων τα οποία εξετάζονται παρουσιάζονται στους πίνακες 4.4 και 4.5. Τα πλέγματα του πίνακα 4.4 είναι όλα τετραγωνικά και αποτελούνται από εννέα τετραγωνικούς βρόχους. Οι τετραγωνικοί βρόχοι του κάθε πλέγματος έχουν ίδιες διαστάσεις. Αυτό που εξετάζεται με την βοήθεια των προσομοιώσεων των πλεγμάτων του πίνακα 4.4 είναι η επίδραση του μήκους της πλευράς του πλέγματος, της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της μορφής του εγχυόμενου ρεύματος στην αναπτυσσόμενη τάση.

| Περίπτωση | A | B | Γ | Δ | E | ΣΤ |
|--|-----|------|-----|------|-----|------|
| Ειδική αντίσταση εδάφους ρ [Ωm] | 100 | 1000 | 100 | 1000 | 100 | 1000 |
| Σχετική διηλεκτρική σταθερά εδάφους ϵ_r | 36 | 9 | 36 | 9 | 36 | 9 |
| Αριθμός τετραγώνων πλέγματος | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Μήκος πλευράς πλέγματος ℓ [m] | 15 | 15 | 30 | 30 | 60 | 60 |
| Βάθος τοποθέτησης πλέγματος h [m] | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Ακτίνα ηλεκτροδίου πλέγματος r [mm] | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |

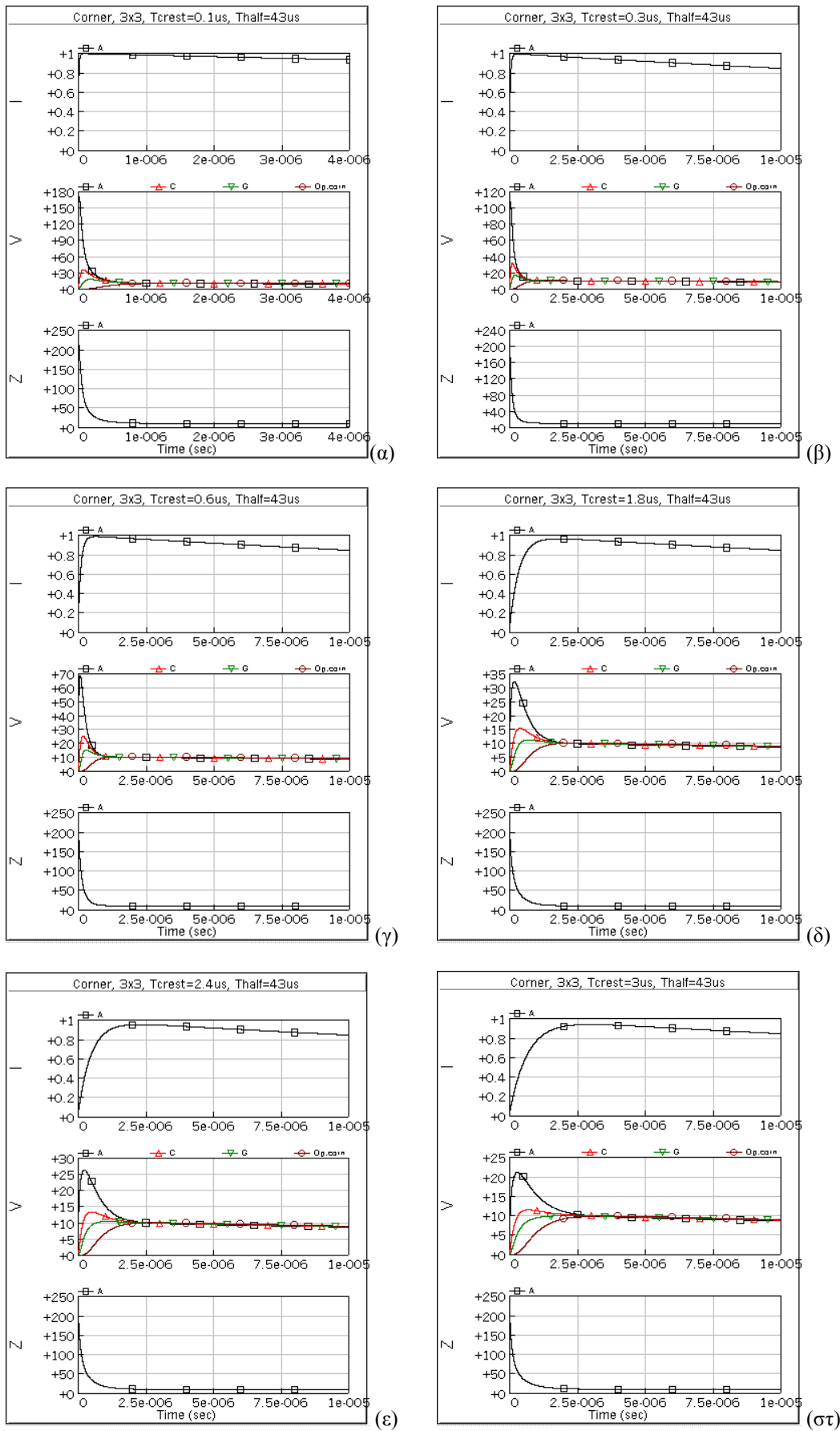
Πίνακας 4.4: Χαρακτηριστικά εδάφους και πλεγμάτων

| Περίπτωση | Z | H | Θ | I |
|--|-----|------|-----|------|
| Ειδική αντίσταση εδάφους ρ [Ωm] | 100 | 1000 | 100 | 1000 |
| Σχετική διηλεκτρική σταθερά εδάφους ϵ_r | 36 | 9 | 40 | 40 |
| Αριθμός τετραγώνων πλέγματος | 4 | 4 | 16 | 16 |
| Μήκος πλευράς πλέγματος ℓ [m] | 20 | 20 | 40 | 40 |
| Βάθος τοποθέτησης πλέγματος h [m] | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Ακτίνα ηλεκτροδίου πλέγματος r [mm] | 7 | 7 | 7 | 7 |

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά εδάφους και πλεγμάτων

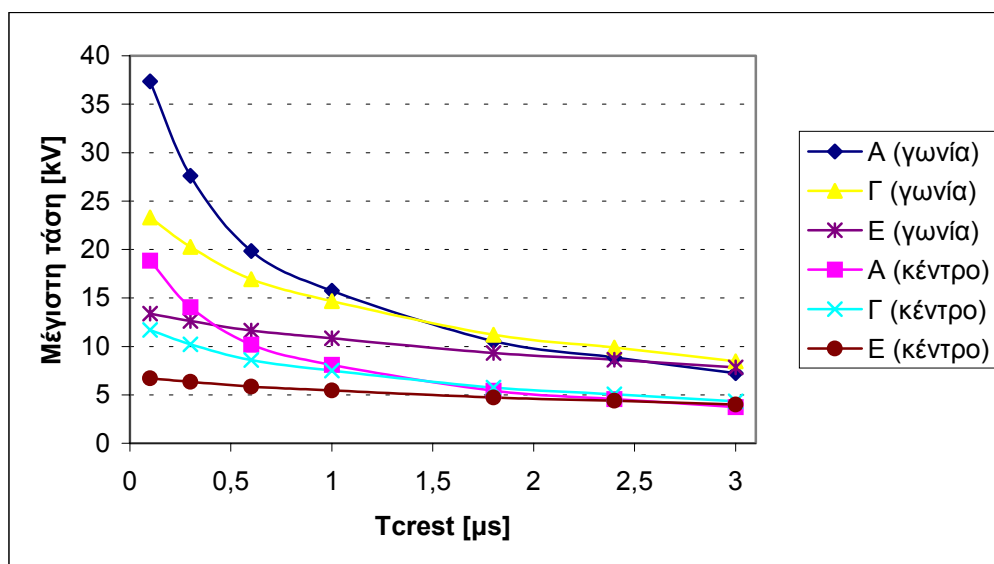
Τα πλέγματα του πίνακα 4.5 είναι και αυτά τετραγωνικά, αλλά αποτελούνται από διαφορετικό αριθμό τετραγωνικών βρόχων. Η κάθε πλευρά οποιουδήποτε βρόχου σε όλα τα πλέγματα του πίνακα 4.5 έχει μήκος 10m. Επομένως, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες προσομοιώσεις για τα τέσσερα πλέγματα του πίνακα 4.5 και τα δύο πλέγματα των περιπτώσεων Γ και Δ του πίνακα 4.4 εξετάζεται η επίδραση του αριθμού των τετραγωνικών βρόχων του πλέγματος, της ειδικής αντίστασης του εδάφους και της μορφής του εγχυόμενου ρεύματος στην αναπτυσσόμενη τάση.

Στο σχήμα 4.23 παρουσιάζονται για το 3x3 πλέγμα της περίπτωσης Δ, του πίνακα 4.4, η χρονική μεταβολή του εγχυόμενου ρεύματος στη γωνία του πλέγματος (πάνω τμήμα του σχήματος), της διαφοράς δυναμικού ως προς την άπειρη γη (μεσαίο τμήμα του σχήματος) και της σύνθετης μεταβατικής αντίστασης (κάτω τμήμα του σχήματος) του οριζοντίου ηλεκτροδίου. Στο σχήμα που παρουσιάζεται η διαφορά δυναμικού ως προς την άπειρη γη υπάρχουν τέσσερις γραφικές παραστάσεις που αναφέρονται στα αντίστοιχα σημεία του σχήματος 3.2.β. Η μαύρη καμπύλη αναφέρεται στη γωνία Α του πλέγματος (η οποία είναι το σημείο που γίνεται η έγχυση του κεραυνικού ρεύματος), η κόκκινη καμπύλη αναφέρεται στο σημείο C, ενώ η πράσινη καμπύλη αναφέρεται στο σημείο G και τέλος η καφέ καμπύλη αναφέρεται στην απέναντι από το σημείο έγχυσης γωνία (αντιδιαγώνιο σημείο). Το γράμμα που βρίσκεται δεξιά από κάθε σχήμα παραπέμπει, με ελληνικό τρόπο γραφής, στη μορφή του ρεύματος (από τον αύξοντα αριθμό του πίνακα 4.2). Το σημείο έγχυσης, το είδος του πλέγματος, ο χρόνος μεγίστου και ο χρόνος ημίσειος εύρους ουράς αναφέρονται στην επικεφαλίδα κάθε σχήματος.



Σχήμα 4.23: Γραφικές παραστάσεις (επίδραση χρόνου μετώπου) στο πλέγμα Δ

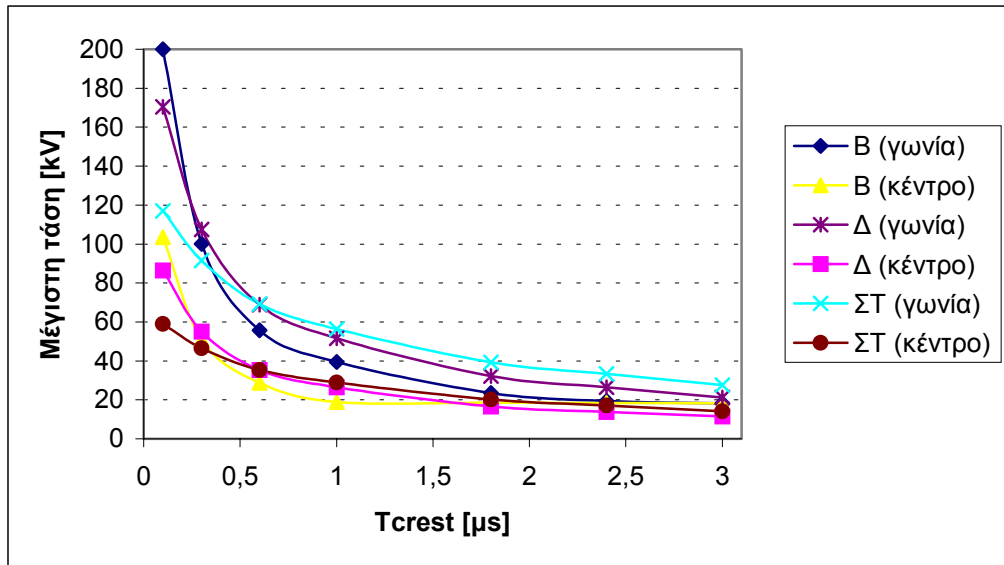
Στο σχήμα 4.23 παρατηρείται ότι όσο ταχύτερα φθάνει στο μέγιστό του το εγχυόμενο ρεύμα (για δεδομένο πάντα χρόνο ημίσεος εύρους ουράς) τόσο μεγαλύτερη είναι η αναπτυσσόμενη τάση σε όλα τα σημεία του πλέγματος. Επίσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι όσο μεγαλύτερη απόσταση απέχει το σημείο που μελετάμε από το σημείο έγχυσης του κρουστικού ρεύματος τόσο μικρότερη είναι η αναπτυσσόμενη τάση στο συγκεκριμένο σημείο. Το δυναμικό σε όλα τα σημεία του πλέγματος για χρόνο μεγαλύτερο των 3μs τείνει να ταυτιστεί. Ο χρόνος στον οποίο επιτυγχάνεται αυτή η σύγκλιση είναι σε άμεση εξάρτηση με τον χρόνο μεγίστου του εγχυομένου ρεύματος. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος μεγίστου τόσο γρηγορότερα επιτυγχάνεται η σύγκλιση των δυναμικών αλλά και η εκ των άνω προσέγγιση της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης στην αντίστοιχη τιμή της μονίμου καταστάσεως.



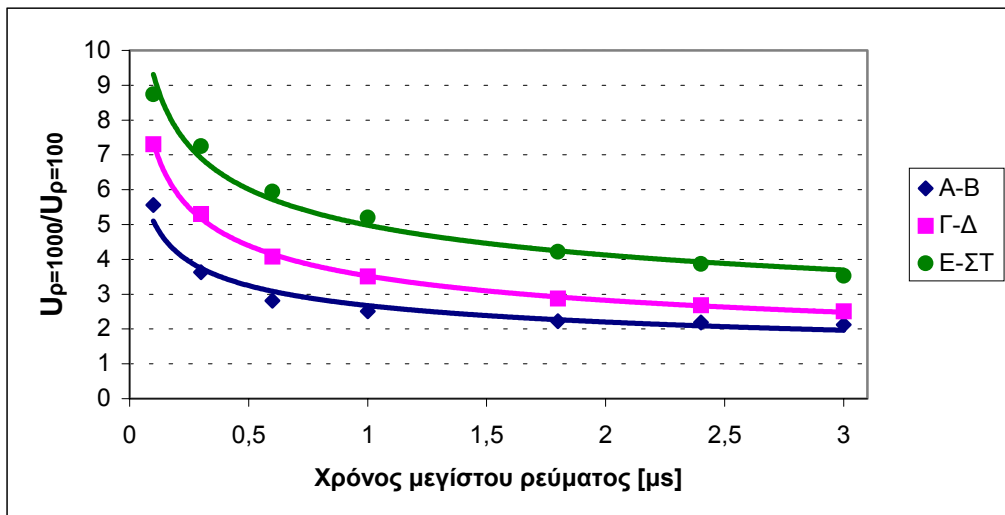
Σχήμα 4.24: Μεταβολή της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται στα πλέγματα των περιπτώσεων A, Γ και E συναρτήσει του χρόνου μεγίστου του εγχυομένου ρεύματος

Στο σχήματα 4.24 και 4.25 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης για τα πλέγματα του πίνακα 4.4 στο σημείο που γίνεται η έγχυση του κρουστικού ρεύματος. Είναι εμφανές ότι όσο ταχύτερο είναι το εγχυόμενο ρεύμα τόσο μεγαλύτερη είναι η αναπτυσσόμενη μέγιστη τάση. Επίσης, παρατηρείται ότι η έγχυση του ρεύματος στο κέντρο δημιουργεί μικρότερη ανύψωση δυναμικού σε σχέση με την έγχυση σε γωνία του πλέγματος. Η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους, για το ίδιο πάντα εγχυόμενο ρεύμα, οδηγεί σε αύξηση της ανύψωσης του δυναμικού. Από την εξίσωση (4.54), όπως αναφέρθηκε, προκύπτει πως η αύξηση της

ειδικής αντίστασης του εδάφους οδηγεί σε αύξηση του ενεργού μήκους των αγωγών. Επομένως, η αύξηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους πρέπει να οδηγεί τους κατασκευαστές συστημάτων γείωσης στην αύξηση των διαστάσεων των κατασκευαζόμενων γειώσεων.



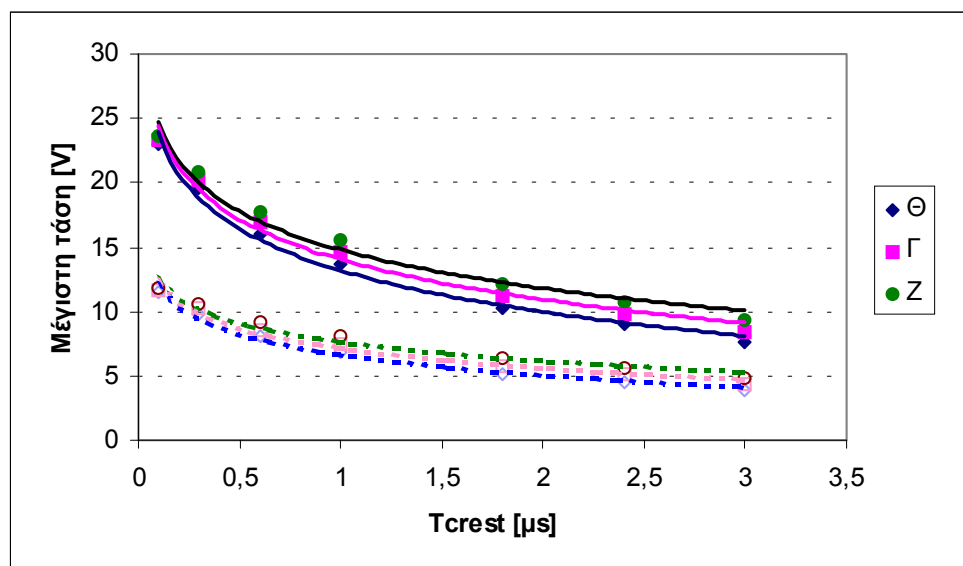
Σχήμα 4.25: Μεταβολή της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται στα πλέγματα των περιπτώσεων B, Δ και ΣΤ συναρτήσει του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος



Σχήμα 4.26: Μεταβολή του λόγου των μέγιστων τάσεων (για $\rho=1000\Omega m$ προς $\rho=100\Omega m$) που αναπτύσσεται στα πλέγματα του πίνακα 4.4 συναρτήσει του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος για έγχυση στη γωνία του πλέγματος

Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου των μέγιστων τάσεων (για πλέγμα τοποθετημένο σε έδαφος ειδικής αντίστασης $1000\Omega m$ και ειδικής αντίστασης $100\Omega m$) που αναπτυσσόταν στα πλέγματα του πίνακα 4.4 συναρτήσει του χρόνου μέγιστου του εγχυόμενου ρεύματος για έγχυση στη γωνία του πλέγματος.

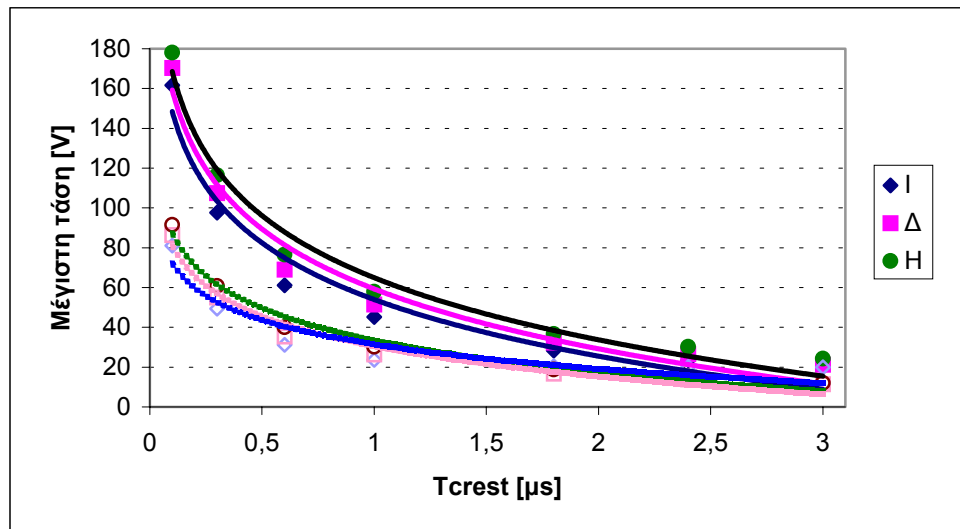
Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται η μεταβολή των μέγιστων τάσεων για τις περιπτώσεις Γ, Ζ και Θ των πλεγμάτων των πινάκων 4.4 και 4.5 συναρτήσει του χρόνου μέγιστου του εγχυόμενου ρεύματος. Στο σχήμα 4.28 παρουσιάζεται η μεταβολή των μέγιστων τάσεων για τις περιπτώσεις Δ, Η και Ι των πλεγμάτων των πινάκων 4.4 και 4.5 συναρτήσει του χρόνου μέγιστου του εγχυόμενου ρεύματος. Οι συνεχείς γραμμές αναφέρονται σε έγχυση του ρεύματος στη γωνία του εξεταζόμενου πλέγματος, ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αφορούν έγχυση στο κέντρο του πλέγματος. Σαφέστατα, φαίνεται ότι η έγχυση στη γωνία προκαλεί σχεδόν διπλάσια ανύψωση δυναμικού σε σχέση με αυτή που θα προκαλούσε έγχυση στο κέντρο. Επίσης, παρουσιάζεται και η επίδραση του μεγέθους του πλέγματος.



Σχήμα 4.27: Μεταβολή των μέγιστων τάσεων για τις περιπτώσεις Γ, Ζ και Θ των πλεγμάτων των πινάκων 4.4 και 4.5 συναρτήσει του χρόνου μέγιστου του εγχυόμενου ρεύματος, για ειδική αντίσταση εδάφους $\rho=100\Omega m$

Συγκρίνοντας τα σχήματα 4.27 και 4.28 μπορεί εύκολα να διακρίνει κανείς την επίδραση της ειδικής αντίστασης στη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση. Στο σχήμα 4.27, όπου η ειδική αντίσταση του εδάφους είναι δέκα φορές μικρότερη από την

αντίστοιχη του σχήματος 4.28, οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι σαφέστατα μικρότερες σε σύγκριση με αυτές του σχήματος 4.28.



Σχήμα 4.28: Μεταβολή των μέγιστων τάσεων για τις περιπτώσεις Δ, Η και Ι των πλεγμάτων των πινάκων 4.4 και 4.5 συναρτήσει του χρόνου μεγίστου του εγχυόμενου ρεύματος, για ειδική αντίσταση εδάφους $\rho=1000\Omega m$

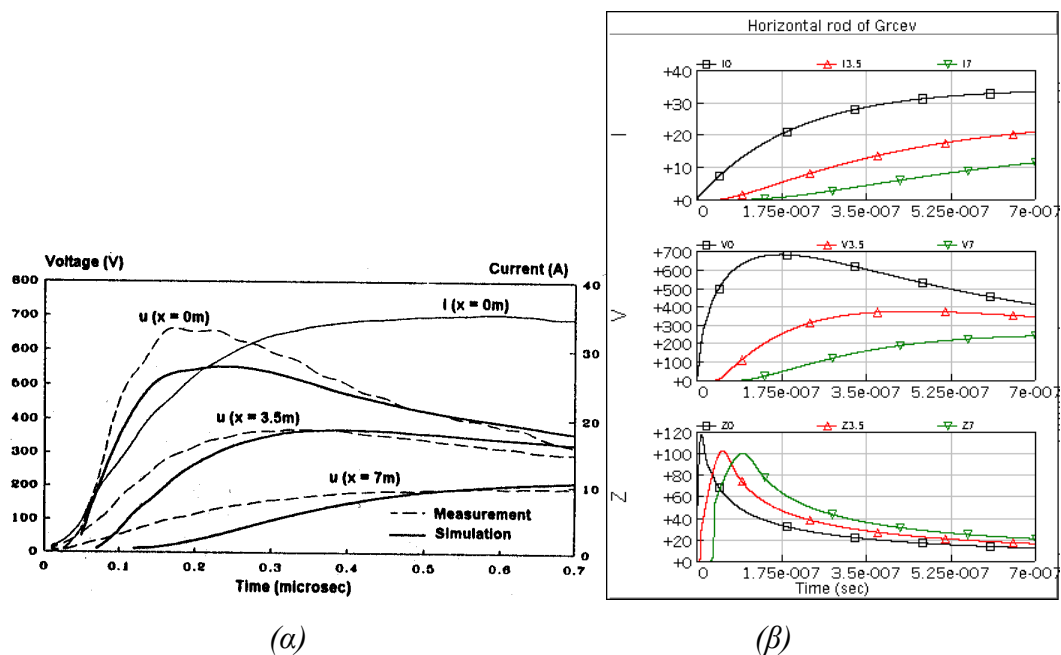
4.3.6 Συμπεράσματα για την κυκλωματική προσέγγιση

Παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων του πισοδύναμου κυκλώματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να πραγματοποιηθεί προσομοίωση σε κάθε σύστημα γείωσης. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της μεταβατικής ανύψωσης δυναμικού και της μεταβατικής σύνθετης αντίστασης σε σειρά από συστήματα γείωσης (με διαφορετικές διαστάσεις, βάθος τοποθέτησης και τρόπο κατασκευής). Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε πληθώρα διαφορετικών κυματομορφών του εγχυόμενου ρεύματος προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων του ρεύματος. Επίσης, μεταβλήθηκε η ειδική αντίσταση του εδάφους για να διερευνηθεί η συμβολή της στα υπό έρευνα φαινόμενα.

Για να δειχθεί η αξία και η καταλληλότητα της μεθοδολογίας στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που έγιναν αφενός μεν με αποτελέσματα πειραμάτων και προσομοιώσεων άλλων ερευνητών, αφετέρου δε με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της παρούσης διατριβής.

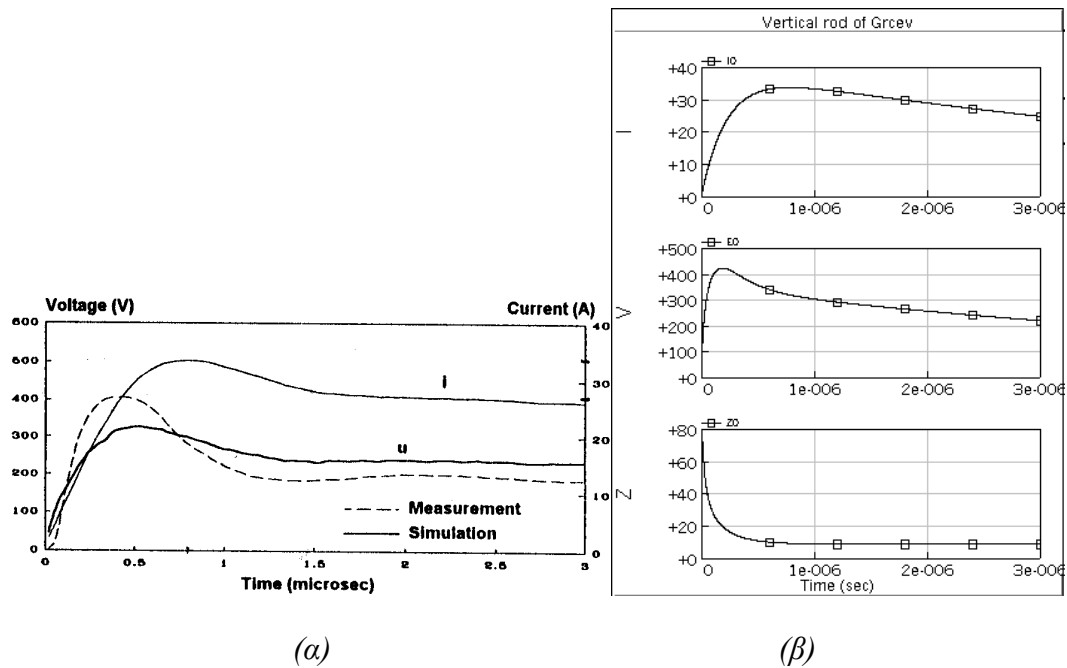
Τα πλέον χρησιμοποιούμενα διεθνώς πειραματικά αποτελέσματα έχουν προκύψει από την EDF [78] και καλύπτουν αρκετά διαφορετικά συστήματα γείωσης. Τα πειραματικά αυτά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί από πλήθος ερευνητών, οι οποίοι προτείνουν διάφορους τρόπους προσομοίωσης. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών μαζί και με τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας.

Στο σχήμα 4.29α παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα για ένα οριζόντιο ηλεκτρόδιο (ακτίνας 12mm, μήκους 15m, τοποθετημένο σε βάθος 0,6m από την επιφάνεια εδάφους ειδικής αντίστασης 70Ωm) [78] μαζί με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Grcev [152], ενώ στο σχήμα 4.29β παρουσιάζονται τα αντίστοιχα δικά μας αποτελέσματα. Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το EMTDC παρουσιάζονται γραφικές παραστάσεις με τρία χρώματα. Το μαύρο χρώμα αντιστοιχεί στην αρχή του ηλεκτροδίου, το κόκκινο σε απόσταση 3,5m από την αρχή του ηλεκτροδίου και το πράσινο σε απόσταση 7m από την αρχή του ηλεκτροδίου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα [78]. Από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης, που φαίνονται στα σχήματα 4.29.α και 4.29.β, διαπιστώνεται ότι η σύγκλιση της προσομοίωσης που προτείνεται είναι καλύτερη από την αντίστοιχη του Grcev [152].



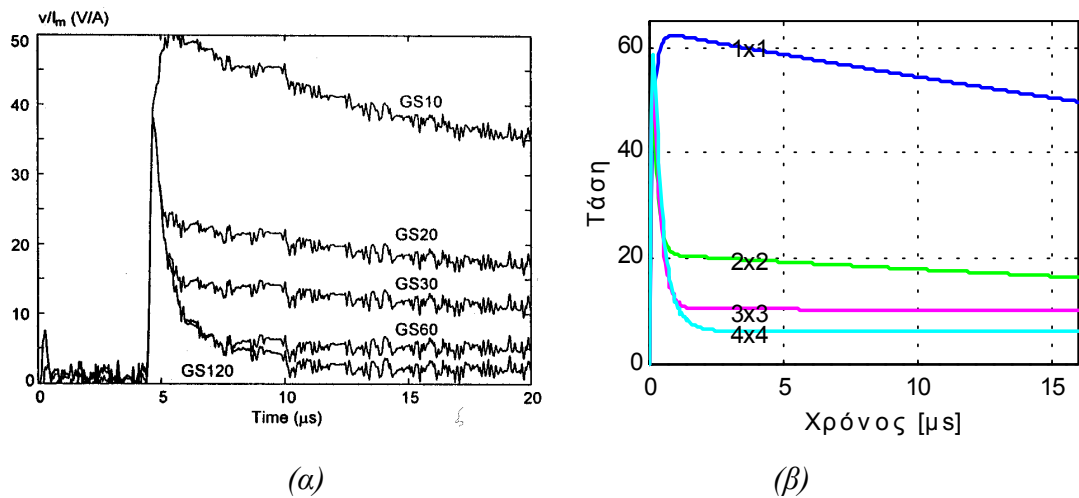
Σχήμα 4.29: (α) Παρουσίαση αποτελεσμάτων Grcev [152] (β) Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το PSCAD/EMTDC για οριζόντιο ηλεκτρόδιο.

Στο σχήμα 4.30.α παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα για μία κατακόρυφη ράβδο (ακτίνας 16mm, μήκους 6m, τοποθετημένης σε έδαφος ειδικής αντίστασης 50Ωm) [78] μαζί με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Grcev [152], ενώ στο σχήμα 4.30.β τα αντίστοιχα αποτελέσματα από το PSCAD/EMTDC. Παρατηρείται ότι η προσομοίωση που έγινε στα πλαίσια της παρούσης εργασίας βρίσκεται πλησιέστερα στα πειραματικά αποτελέσματα [78]



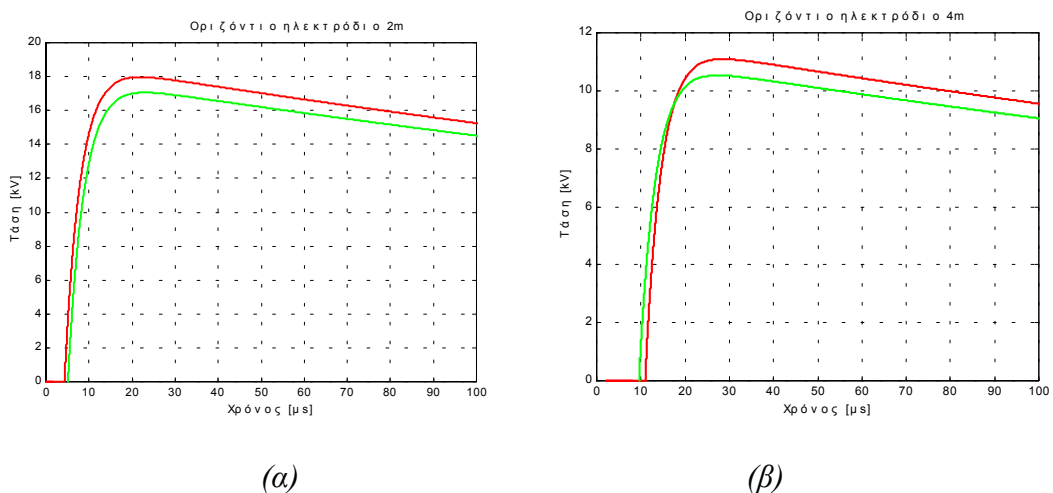
Σχήμα 4.30: (α) Παρουσίαση αποτελεσμάτων Grcev [152] (β) Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το PSCAD/EMTDC για κατακόρυφη ράβδο.

Για την περίπτωση των πλεγμάτων Γ, Ζ και Θ των πινάκων 4.4 και 4.5 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του άρθρου των Grcev και Heimbach [154]. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 4.31.α, ενώ στο σχήμα 4.31.β παρουσιάζονται τα αντίστοιχα δικά μας. Παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση ανάμεσα στα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων, ενώ, επιπλέον, η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση με το PSCAD/EMTDC είναι σαφέστατα απλούστερη από τη μεθοδολογία των άλλων [154].



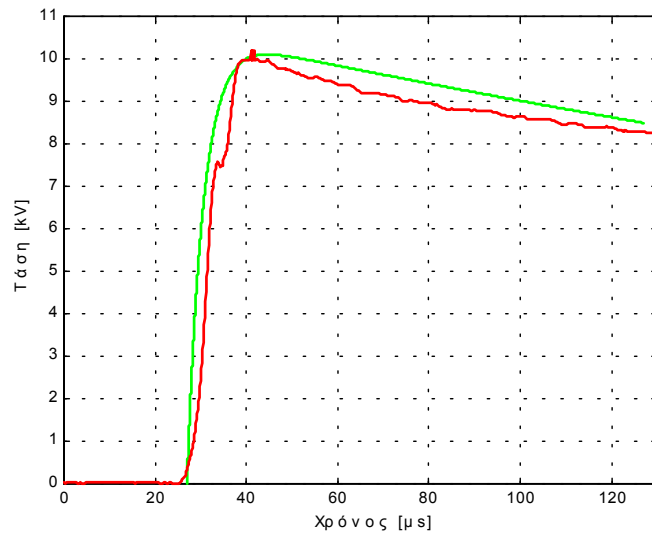
Σχήμα 4.31: (α) Παρουσίαση αποτελεσμάτων Grceen [154] (β) Παρουσίαση αποτελεσμάτων από το PSCAD/EMTDC για πλέγματα γείωσης.

Στο σχήμα 4.32 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη καμπύλη) που παρουσιάστηκαν στην §3.3.4 για οριζόντια ηλεκτρόδια με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) της §4.3.5.1 με πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ τους.



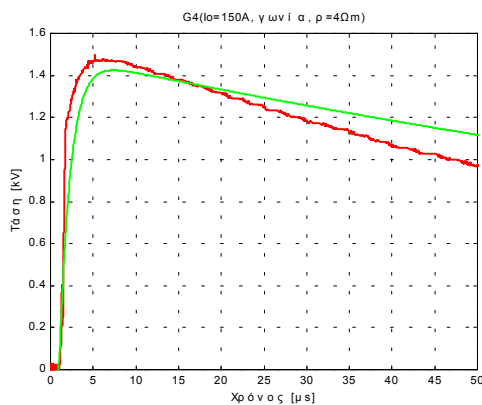
Σχήμα 4.32: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων (κόκκινη καμπύλη) και αποτελεσμάτων προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) για την τάση που αναπτύσσεται σε οριζόντιο ηλεκτρόδιο (α) μήκους 2m (β) μήκους 4m

Αντίστοιχα στο σχήμα 4.33 για την περίπτωση της κατακόρυφης ράβδου τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη καμπύλη) που παρουσιάστηκαν στην §3.3.2 συγκρίνονται με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) της §4.3.5.2 με πολύ καλή σύγκλιση ανάμεσα σε πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης.

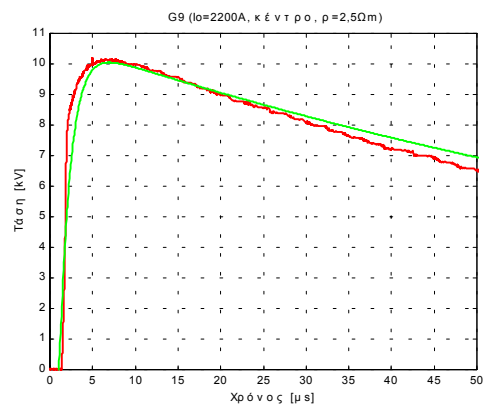


Σχήμα 4.33: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων (κόκκινη καμπύλη) και αποτελεσμάτων προσομοίωσης για την τάση που αναπτύσσεται σε μία κατακόρυφη ράβδο

Τέλος, στο σχήμα 4.34 συγκρίνονται, για την περίπτωση των πλεγμάτων, τα πειραματικά αποτελέσματα (κόκκινη καμπύλη) που παρουσιάστηκαν στην §3.2 με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) της §4.3.5.3 διαπιστώνοντας ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων.



(α)



(β)

Σχήμα 4.34: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων (κόκκινη καμπύλη) και αποτελεσμάτων προσομοίωσης (πράσινη καμπύλη) για την τάση που αναπτύσσεται στα πλέγματα (α) G4 (β) G9

4.4 Πεδιακή προσέγγιση συστημάτων γείωσης

4.4.1 Εισαγωγή στο PC Opera

Το PC Opera είναι ένα πακέτο προγραμμάτων ανάλυσης προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Μια πλήρης λύση ενός προβλήματος με το PC Opera [215] διενεργείται σε τρεις φάσεις: α) τη φάση της προ-επεξεργασίας, κατά την οποία γίνεται η προετοιμασία και η εισαγωγή των δεδομένων που περιγράφουν το πρόβλημα, όπως η γεωμετρία του προβλήματος, οι ιδιότητες των υλικών, η πλεγματοποίηση και οι οριακές συνθήκες, β) τη φάση της ανάλυσης, κατά την οποία επιλέγεται ο επιλύτης που θα χρησιμοποιηθεί, η ανοχή σύγκλισης και ο επαναληπτικός τύπος και γ) τη φάση της μετ-επεξεργασίας, κατά την οποία εμφανίζονται τα υπολογισθέντα αποτελέσματα και εκτελείται ο υπολογισμός των απαραίτητων παραγώγων μεγεθών.

Τα προγράμματα ανάλυσης του PC Opera [215] υπολογίζουν τα πεδιακά μεγέθη με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η φιλοσοφία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συνοπτικά είναι η ακόλουθη: Το στοιχείο κατασκευής, μέσα στο οποίο πρέπει να βρεθεί η κατανομή ενός πεδιακού μεγέθους, αντικαθίσταται με πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων, στα οποία αντιστοιχίζονται ιδιότητες ίδιες με τις αντίστοιχες του κατασκευαστικού στοιχείου (πχ. η ίδια διηλεκτρική σταθερά). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να εφαρμοσθεί γενικά σε οποιοδήποτε πρόβλημα με οποιοδήποτε είδος μη γραμμικότητας. Βασίζεται στην διαίρεση του χώρου, στον οποίο ικανοποιείται η εξίσωση, σε στοιχειώδη στοιχεία όγκου (τα πεπερασμένα στοιχεία). Μέσα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρησιμοποιείται ένα απλό πολυώνυμο που προσεγγίζει την λύση. Η γενική ιδέα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων του χώρου.

Αφετηρία της ανάλυσης αποτελεί η εξίσωση Poisson που περιγράφει το δυναμικό σε μια διάσταση [215]:

$$\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi = \rho \quad (4.55)$$

Η συνάρτηση δυναμικού μπορεί να είναι ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό. Σε αυτή την περίπτωση, το ρ θα είναι γραμμική πυκνότητα φορτίου. Για να οριστεί το δυναμικό

χρειάζονται οριακές συνθήκες που μπορεί να είναι είτε τιμές του δυναμικού, είτε της παραγώγου του, για παράδειγμα:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (4.56)$$

Για τη λύση της εξίσωσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ο χώρος διαιρείται σε στοιχεία όγκου. Μέσα σε κάθε τέτοιο στοιχείο το δυναμικό προσεγγίζεται από το γραμμικό πολυώνυμο:

$$\phi(x) = \alpha + \beta \cdot x \quad (4.57)$$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό είναι συνεχές στο χώρο, παρ' όλο που η παράγωγος του μπορεί να είναι ασυνεχής αν η επιτρεπτότητα ϵ είναι ασυνεχής.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να προσομοιώσει αυτή την συμπεριφορά, έτσι είναι βολικό η εξίσωση (4.57) να χαρακτηρίζεται από τις τιμές του δυναμικού στους κόμβους του στοιχείου και να χρησιμοποιεί τις ίδιες τιμές για τα υπόλοιπα πολυώνυμα που έχουν κοινό κόμβο. Μία περαιτέρω απλοποίηση μπορεί να γίνει τροποποιώντας την εξίσωση (4.57) με όρους κομβικών συναρτήσεων N_i , που καθορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} N_i(x) &= 1 & x = x_i & x = x_i \\ N_i(x) &= 0 & x = x_j & j \neq i \end{aligned} \quad (4.58)$$

όπου x_i είναι η x συντεταγμένη του κόμβου i . Η εξίσωση (4.57) παίρνει τη μορφή:

$$\phi(x) = N_1(x) \cdot \phi_1 + N_2(x) \cdot \phi_2 \quad (4.59)$$

Οι συναρτήσεις N_i εκφράζονται σε όρους τοπικών συντεταγμένων μέσα στο στοιχείο. Χρησιμοποιώντας το σύστημα τοπικών συντεταγμένων ξ οι συναρτήσεις N_i γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2} \cdot (1 - \xi) \\ N_2 &= \frac{1}{2} \cdot (1 + \xi) \\ -1 &\leq \xi \leq 1 \end{aligned} \quad (4.60)$$

Οι συναρτήσεις N_i κάθε κόμβου ορίζονται μόνο εντός των στοιχείων που περιλαμβάνουν αυτόν τον κόμβο και είναι μηδενικές εκτός των στοιχείων αυτών.

Η μέθοδος υπολογισμού του δυναμικού ϕ με χρήση χαρακτηριστικών τιμών δυναμικού των κόμβων και συναρτήσεων N_i αποτελεί τη βάση, στην οποία πολλές εναλλακτικές διαδικασίες μπορούν να στηριχθούν για την επίλυση της εξίσωσης (4.56). Οι μέθοδοι διακύμανσης (variational methods), ελαχίστων τετραγώνων και συντελεστών βαρύτητας (weighted residual) είναι τρεις από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μεθόδους. Οι συντελεστές βαρύτητας έχουν διαδεδομένη εφαρμογή σε προγράμματα λογισμικού προκειμένου να υλοποιηθεί μία αριθμητική επίλυση. Μία προσεγγιστική επίλυση ως προς ϕ καθορίζεται από την απαίτηση να ικανοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

$$\int W(\nabla \cdot \varepsilon \nabla \phi - \rho) \cdot dx = 0 \quad (4.61)$$

όπου W είναι η συνάρτηση βάρους, από την οποία παίρνει το όνομά της και η μέθοδος.

Ολοκληρώνοντας την (4.61) κατά τμήματα, προκειμένου να μειωθεί η τάξη της διαφορίσης που εφαρμόζεται στο ϕ , προκύπτει μια προσεγγιστική λύση για το δυναμικό ϕ :

$$\int_a^b (\nabla W \cdot \varepsilon \nabla \phi + W\rho) dx - [W\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x}]_a^b = 0 \quad (4.62)$$

όπου a, b τα όρια ολοκλήρωσης της εξίσωσης.

Η εξίσωση (4.62) οδηγεί κατευθείαν σε αριθμητικό υπολογισμό της λύσης χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία και τις συναρτήσεις N_i που περιγράφηκαν πιο πάνω. Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης πλεονεκτεί έναντι των άλλων, αφού οι συναρτήσεις W και ϕ δεν χρειάζονται συνεχή παραγωγή και επιπλέον καθορίζονται εύκολα οι φυσικές οριακές συνθήκες στην επιφάνεια της περιοχής $\frac{\partial \phi}{\partial x}$.

Ο τομέας από a έως b διαιρείται σε γραμμικά στοιχεία και οι αντίστοιχοι κόμβοι δίνουν ένα συνδυασμό ανεξάρτητων συναρτήσεων βάρους. Από αυτές τις συναρτήσεις βάρους μπορούν να αναπτυχθούν εξισώσεις με την απαίτηση η εξίσωση (4.62) να ικανοποιείται για κάθε συνάρτηση βάρους.

Η εξίσωση για την συνάρτηση βάρους W_i εξάγεται από την:

$$\sum_j \left(\int_a^b (\nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j \phi_j + N_i \rho) dx \right) - \left[N_i \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right]_a^b = 0 \quad (4.63)$$

για όλα τα στοιχεία που περιέχουν τον κόμβο i .

Παίρνοντας όλες τις εξισώσεις για τις διαφορετικές συναρτήσεις βάρους προκύπτει ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, που σε μητρική μορφή γράφεται ως:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{\Phi} = \mathbf{S} \quad (4.64)$$

όπου \mathbf{K} ο πίνακας των συντελεστών, $\mathbf{\Phi}$ το διάνυσμα των άγνωστων τάσεων στους κόμβους και \mathbf{S} το διάνυσμα των οριακών συνθηκών ή των πυκνοτήτων φορτίου.

Οι συντελεστές στον πίνακα \mathbf{K} έχουν τη μορφή:

$$K_{ij} = \int_a^b \nabla N_i \cdot \varepsilon \nabla N_j dx \quad (4.65)$$

Αξίζει να σημειωθεί, ότι, παρ' όλο που η ολοκλήρωση στην εξίσωση (4.65) γίνεται για όρια από a έως b , μόνο τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και τους δύο κόμβους i και j συνεισφέρουν.

Οι εξισώσεις της σχέσης (4.64) συχνά δεν είναι γραμμικές επειδή η επιτρεπτότητα ε εξαρτάται από την ένταση του πεδίου, που προφανώς δεν είναι γραμμική.

Για την επίλυση αυτών των μη γραμμικών εξισώσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος Newton-Raphson. Δίνεται μια αρχική τιμή στα δυναμικά $\mathbf{\Phi}_n$ και υπολογίζεται μια νέα λύση $\mathbf{\Phi}_{n+1}$ επιλύοντας το γραμμικοποιημένο Ιακωβιανό σύστημα:

$$\mathbf{\Phi}_{n+1} = \mathbf{\Phi}_n - \mathbf{J}_n^{-1} \cdot \mathbf{R}_n \quad (4.66)$$

όπου το υπόλοιπο \mathbf{R}_n δίνεται από την:

$$\mathbf{R}_n = \mathbf{K}_n \cdot \Phi_n - \mathbf{S}_n \quad (4.67)$$

και η Ιακωβιανή \mathbf{J}_n από την:

$$\mathbf{J}_n = \frac{\partial}{\partial \Phi_n} (\mathbf{K}_n \cdot \Phi_n - \mathbf{S}_n) \quad (4.68)$$

Με διαδοχικές επαναλήψεις της μεθόδου Newton-Raphson προσεγγίζεται η ζητούμενη τιμή του δυναμικού.

Στην εργασία αυτή το πρόγραμμα καλείται να εφαρμόσει ηλεκτροστατική ανάλυση. Η διαδικασία εξισώσεων που ακολουθείται είναι η εξής:

Η διηλεκτρική μετατόπιση (\mathbf{D}) και η πυκνότητα φορτίου συνδέονται με τη σχέση:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4.69)$$

και η ένταση ηλεκτρικού πεδίου και η επιτρεπτότητα συνδέονται με τη διηλεκτρική μετατόπιση μέσω της:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (4.70)$$

Το ηλεκτρικό δυναμικό (V) ορίζεται από την γνωστή σχέση:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (4.71)$$

Η απόκλιση της πυκνότητας ρεύματος (\mathbf{J}) ισούται με μηδέν:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4.72)$$

Η στατική ανάλυση των πεδίων του PC-Opera επιλύει μη χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο. Το μοντέλο μπορεί να περιέχει υλικά με μη γραμμική διαπερατότητα μ ή επιτρεπτότητα ε σε σύστημα καρτεσιανών ή κυλινδρικών συντεταγμένων. Μπορούν, επίσης, να επιλυθούν και άλλοι τύποι πεδίων, όπως για παράδειγμα πεδία που περιγράφονται από μη-γραμμικές εξισώσεις Poisson ή από ροή ηλεκτρικών ρευμάτων.

Το Opera-2d/St υπολογίζει το βαθμωτό ή διανυσματικό δυναμικό που καθορίζεται από μια μη γραμμική εξίσωση Poisson. Το διανυσματικό δυναμικό συνήθως χρησιμοποιείται για ανάλυση μαγνητικών πεδίων, επειδή τα αποτελέσματα του βαθμωτού δυναμικού δεν μπορούν να περιέχουν ρεύμα σαν πηγή των πεδίων, ωστόσο, αν ένα μοντέλο έχει ως διέγερση μόνο οριακές συνθήκες ή μόνιμους μαγνήτες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο μορφές δυναμικού. Η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί στην περίπτωση υπολογισμού βαθμωτού δυναμικού είναι:

$$\nabla\mu(\nabla\phi - \mathbf{H}_c) = \rho \quad (4.73)$$

όπου το ϕ είναι βαθμωτό ηλεκτρικό δυναμικό και το ρ είναι πυκνότητα φορτίου. Ο όρος \mathbf{H}_c παριστάνει μόνιμους μαγνήτες για ανάλυση μαγνητικών πεδίων και ηλεκτρίτες για ανάλυση ηλεκτρικών πεδίων.

4.4.2 Κατανομή δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους

Το δυναμικό V_o σε κάθε σημείο x στην επιφάνεια ομοιογενούς εδάφους (με ειδική αντίσταση χώματος ρ_o) και για ρεύμα τιμής I , που εισέρχεται σε ράβδο κατακόρυφα τοποθετημένη στο έδαφος, δίνεται από τη λύση της γενικής εξίσωσης [1]:

$$V_o(x) = \frac{\rho_o \cdot I}{2 \cdot \pi} \int_0^{\infty} e^{-\lambda|z|} \cdot J_o(\lambda \cdot x) \cdot \partial\lambda \quad (4.74)$$

όπου J_o είναι η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους, μηδενικής τάξης.

Αναλυτική λύση της κατανομής του δυναμικού V υπάρχει και στην περίπτωση που η κατακόρυφη ράβδος είναι τοποθετημένη σε διστρωματικό έδαφος με χρήση της διστρωματικής μεθόδου του Tagg [1].

$$V(x) = \frac{\rho_1 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot [1 + F_2(x)] \quad (4.75)$$

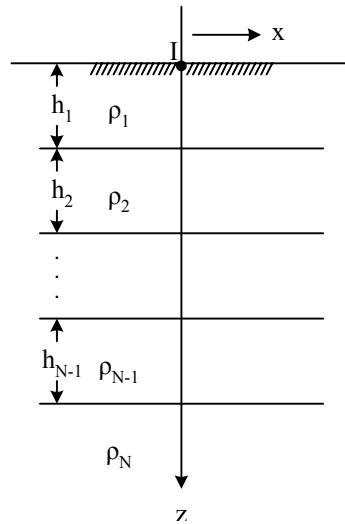
όπου

$$F_2(x) = 2 \cdot x \cdot \int_0^{\infty} \frac{k_1 \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h}}{1 - k_1 \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h}} J_o(\lambda \cdot x) \cdot \partial\lambda \quad (4.76)$$

και k_1 είναι ο συντελεστής ανάκλασης μεταξύ του πρώτου στρώματος του εδάφους (με ειδική αντίσταση εδάφους ρ_1) και του δεύτερου στρώματος του εδάφους (με ειδική αντίσταση εδάφους ρ_2).

$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.77)$$

Για πολυστρωματικά εδάφη έχει αναπτυχθεί μία θεωρητική μέθοδος που προτάθηκε από τους Takahashi και Kawase [107, 108] και υπολογίζει το δυναμικό της επιφάνειας του εδάφους. Το θεωρητικό μοντέλο για δομή εδάφους N οριζόντιων στρωμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.35.



Σχήμα 4.35: Πολυστρωματική δομή

Το δυναμικό σε κάθε σημείο x στην επιφάνεια της γης για ρεύμα I που διεισδύει σε επιφανειακό σημειακό ηλεκτρόδιο μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση (4.78) [107, 108]:

$$V_N(x) = \frac{\rho_1 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot x} \cdot [1 + F_N(x)] \quad (4.78)$$

όπου

$$F_N(x) = 2 \cdot x \cdot \int_0^{\infty} \frac{K_{N1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_1}}{1 - K_{N1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_1}} J_0(\lambda \cdot x) \cdot \partial \lambda \quad (4.79)$$

και

$$K_{N1} = \frac{k_1 + K_{N2} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_2}}{1 + k_1 \cdot K_{N2} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_2}}$$

$$K_{N2} = \frac{k_1 + K_{N3} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_3}}{1 + k_1 \cdot K_{N3} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_3}}$$

$$\dots K_{NS} = \frac{k_S + K_{NS+1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{S+1}}}{1 + k_S \cdot K_{NS+1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{S+1}}} \quad (4.80)$$

$$K_{NN-2} = \frac{k_{N-2} + K_{NN-1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{N-1}}}{1 + k_{N-2} \cdot K_{NN-1} \cdot e^{-2 \cdot \lambda \cdot h_{N-1}}}$$

$$K_{NN-1} = k_{N-1}$$

Επιπρόσθετα, για $1 < i < N-1$ οι συντελεστές ανάκλασης μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων του εδάφους δίνονται από τη σχέση:

$$k_i = \frac{\rho_{i+1} - \rho_i}{\rho_{i+1} + \rho_i} \quad (4.81)$$

όπου ρ_i η ειδική αντίσταση του i -οστού στρώματος του εδάφους.

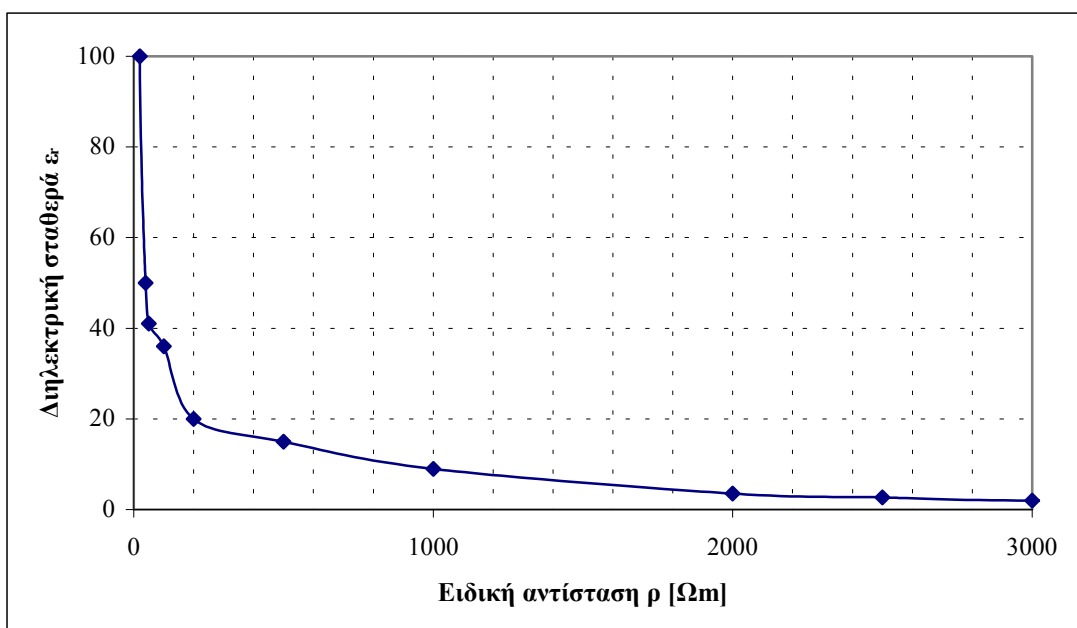
4.4.3 Επίλυση προβλημάτων κατανομής δυναμικού με χρήση του PC Opera

Με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου PC Opera της VectorField προσομοιώθηκαν διάφορες διατάξεις εδάφους πολυστρωματικής δομής και μελετήθηκε η κατανομή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Έγινε σειρά προσομοιώσεων στο πρόγραμμα PC Opera και συγκρίθηκαν με τις θεωρητικές καμπύλες των Takahashi και Kawase [107, 108] που προκύπτουν από την εξίσωση (4.77).

Το πρόγραμμα δέχεται σαν παράμετρο τη διηλεκτρική σταθερά ϵ_r και όχι την ειδική αντίσταση ρ . Τα στρώματα που εξετάστηκαν είχαν ειδικές αντιστάσεις των 100Ωm και 1000Ωm, γιατί υπάρχει στη βιβλιογραφία [154, 156, 184] αντιστοιχία με τη διηλεκτρική σταθερά ϵ_r , (για $\rho=100\Omega\text{m}$ αντιστοιχεί $\epsilon_r=36$ και για $\rho=1000\Omega\text{m}$ αντιστοιχεί $\epsilon_r=9$ [154, 156, 184]). Βάσει αυτών των συγκρίσεων βρέθηκε η βέλτιστη

πλεγματοποίηση, σύμφωνα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή τέτοια ώστε να σημειώνεται η μικρότερη δυνατή απόκλιση προσομοίωσης-θεωρίας.

Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν διάφορα αποτελέσματα προσομοιώσεων και θεωρητικές καμπύλες διαφόρων δομών πολυστρωματικού εδάφους, οι ειδικές αντιστάσεις των στρωμάτων, του οποίου έπαιρναν ποικίλες τιμές, όχι μόνο 100Ωm και 1000Ωm. Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στη γραφική παράσταση του σχήματος 4.36. Έχοντας τώρα την επιθυμητή αντιστοιχία τιμών, είναι εφικτή η προσομοίωση των προβλημάτων με το PC Opera.



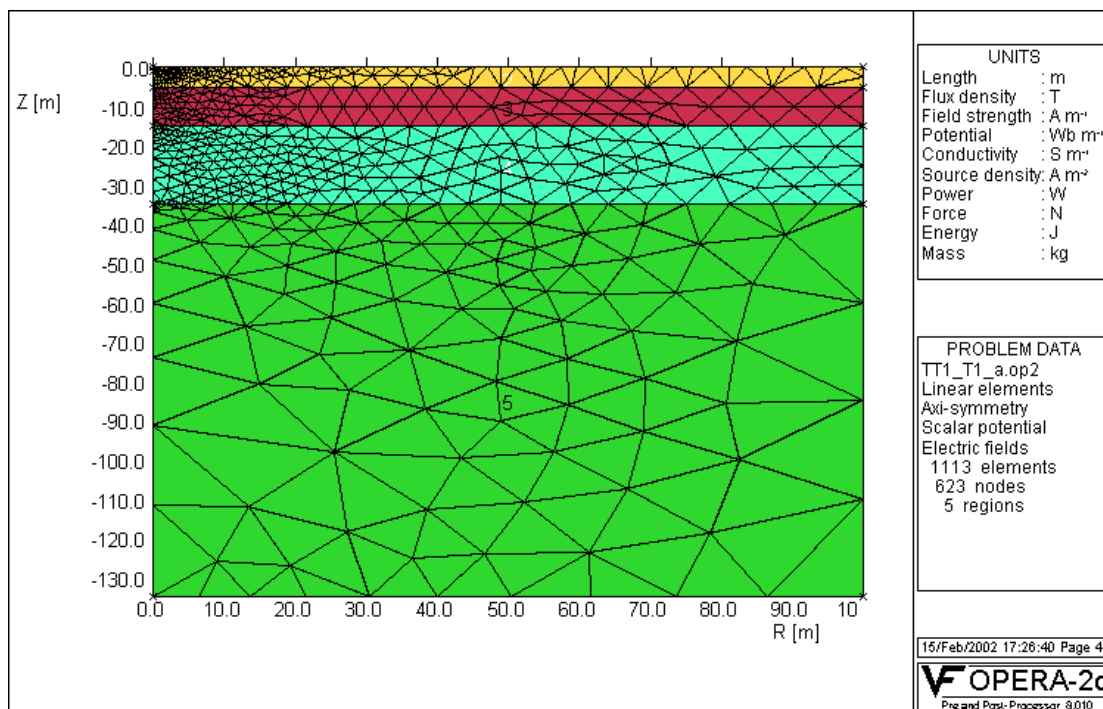
Σχήμα 4.36: Μεταβολή της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r συναρτήσει της ειδικής αντίστασης του εδάφους ρ

4.4.3.1 Τετραστρωματικό έδαφος (Πρόβλημα 1)

Το σύστημα γείωσης αποτελείται από μια ράβδο, η οποία βρίσκεται τοποθετημένη κατακόρυφα μέσα σε τετραστρωματικό έδαφος. Το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα, οπότε αρκεί η σχεδίαση του μοντέλου στο ένα ημιεπίπεδο (σχήμα 4.37). Η εξεταζόμενη δομή εδάφους αποτελείται από 4 στρώματα με ειδικές αντιστάσεις ρ_1 ως ρ_4 και τα πάχη των στρωμάτων είναι αντίστοιχα 5m, 10m, 20m και άπειρο (σχήμα 4.35). Εναλλάσσοντας τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές διατάξεις (από Α έως Δ), όπως καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

| Διάταξη | ρ_1 [Ωm] | P_2 [Ωm] | ρ_3 [Ωm] | ρ_4 [Ωm] |
|---------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| A | 10 | 500 | 10 | 100 |
| B | 10 | 50 | 100 | 500 |
| Γ | 500 | 100 | 50 | 10 |
| Δ | 500 | 50 | 100 | 10 |

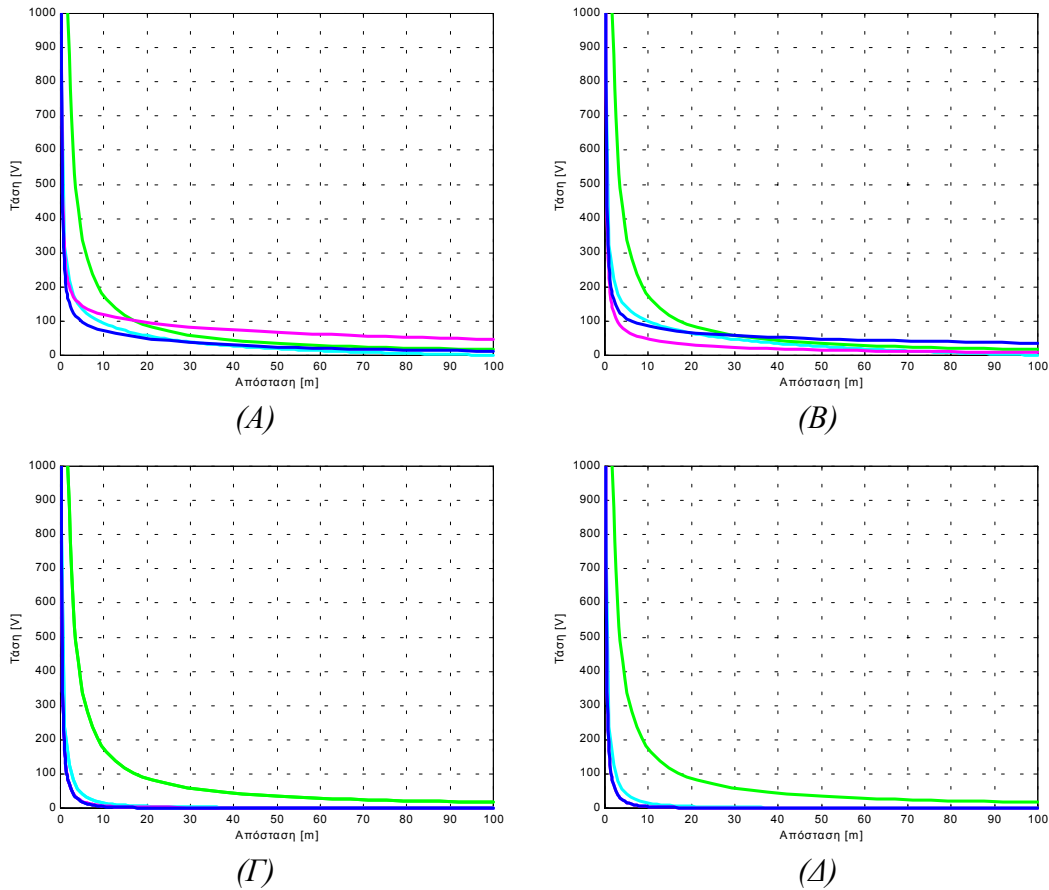
Πίνακας 4.6: Διατάξεις προβλήματος 1



Σχήμα 4.37: Η γεωμετρία του προβλήματος 1

Στο σχήμα 4.37 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος και του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε κατά την επίλυση. Στο σχήμα 4.38 παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο για κάθε μία από τις περιπτώσεις του πίνακα 4.6. Η πράσινη καμπύλη αντιστοιχεί στον υπολογισμό του δυναμικού με χρήση της εξίσωσης (4.74), θεωρώντας ότι το έδαφος είναι ομοιόμορφο με ειδική αντίσταση ίση με την ειδική αντίσταση ρ_1 του επάνω στρώματος. Η μωβ καμπύλη αντιστοιχεί στον υπολογισμό του δυναμικού με χρήση της εξίσωσης (4.75), θεωρώντας ότι το έδαφος είναι διστρωματικό με επάνω στρώμα ίδιο με το επάνω στρώμα του υπό μελέτη εδάφους, ενώ το κάτω στρώμα θεωρείται απείρου βάθους και ειδικής αντίστασης εδάφους ίσης με την ειδική αντίσταση του δευτέρου στρώματος της διάταξής μας ρ_2 . Η μπλε

καμπύλη αντιστοιχεί στον υπολογισμό του δυναμικού με χρήση της εξίσωσης (4.78) και της θεώρησης τετραστρωματικού εδάφους. Τέλος, η γαλάζια καμπύλη αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης με τη χρήση του PC Opera.



Σχήμα 4.38: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο

- : θεωρητική ανάλυση Takahashi – Kawase [107,108], •: διστρωματική μέθοδος [1],
- : προσομοίωση με PC Opera, •: μονοστρωματικό έδαφος [1]

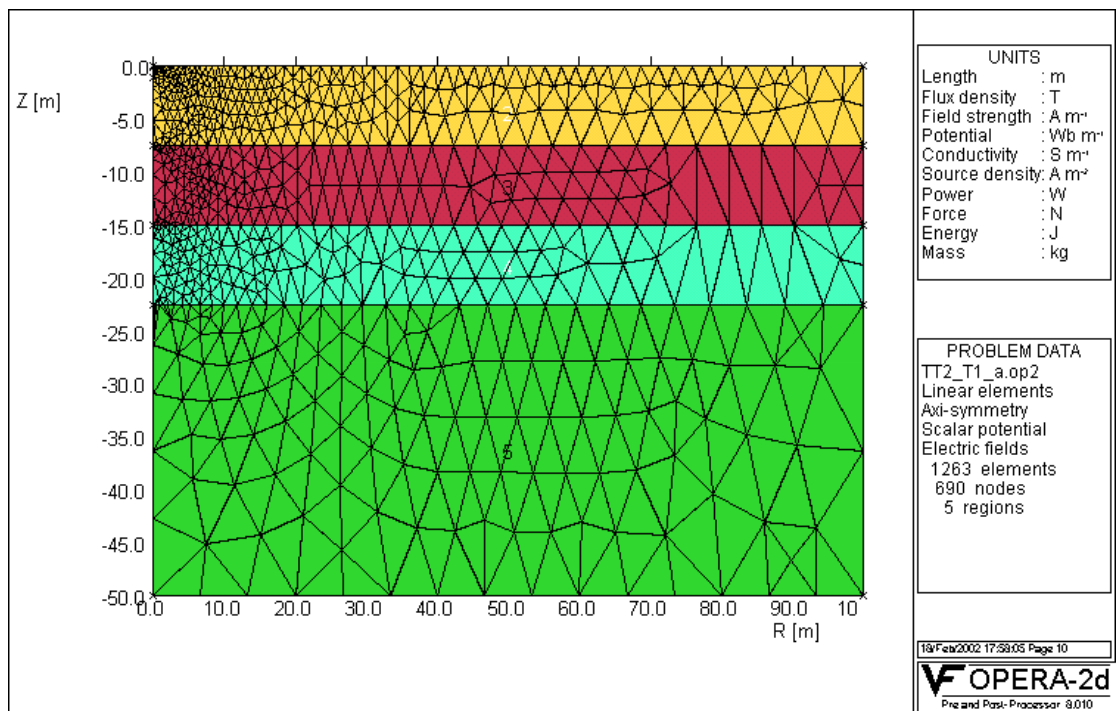
4.4.3.2 Τετραστρωματικό έδαφος (Πρόβλημα 2)

Το σύστημα γείωσης και σε αυτό το πρόβλημα αποτελείται από μια κατακόρυφη ράβδο τοποθετημένη σε τετραστρωματικό έδαφος. Το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα, οπότε αρκεί η σχεδίαση του μοντέλου στο ένα ημιεπίπεδο (σχήμα 4.39). Στο πρόβλημα αυτό εξετάζονται δύο διαφορετικές διατάξεις εδάφους A και B, των οποίων οι ειδικές αντιστάσεις ρ_1 ως και ρ_4 των στρωμάτων τους παρουσιάζονται στον πίνακα 4.7. Τα πάχη των τριών πρώτων στρωμάτων είναι 7,5m, ενώ του τετάρτου και τελευταίου στρώματος είναι άπειρο.

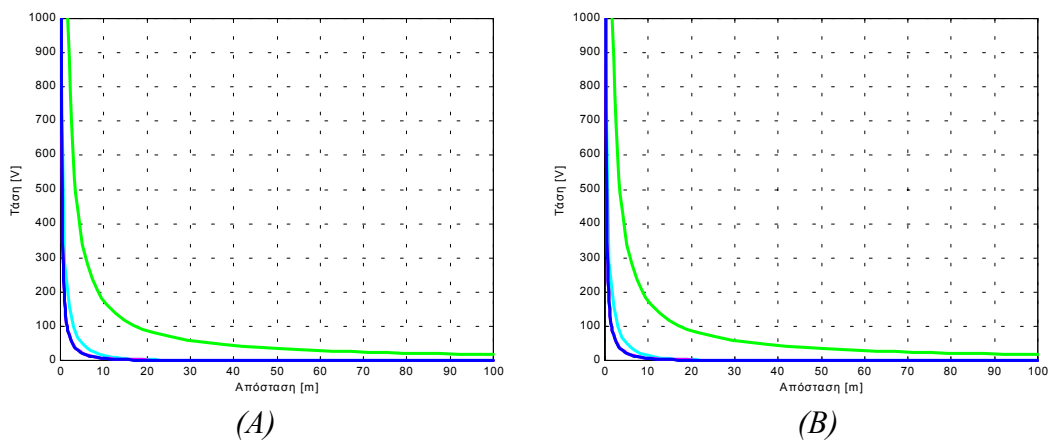
Στο σχήμα 4.40 παρουσιάζεται η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο για κάθε μία από τις περιπτώσεις του πίνακα 4.7.

| Διάταξη | ρ_1 [Ωm] | ρ_2 [Ωm] | ρ_3 [Ωm] | ρ_4 [Ωm] |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| A | 10000 | 1000 | 100 | 100 |
| B | 10000 | 1000 | 100 | 10 |

Πίνακας 4.7: Διατάξεις προβλήματος 2



Σχήμα 4.39: Η γεωμετρία του προβλήματος 2



Σχήμα 4.40: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο

- : θεωρητική ανάλυση Takahashi – Kawase [107,108], •: διστρωματική μέθοδος [1],
- : προσομοίωση με PC Opera, •: μονοστοματικό έδαφος [1]

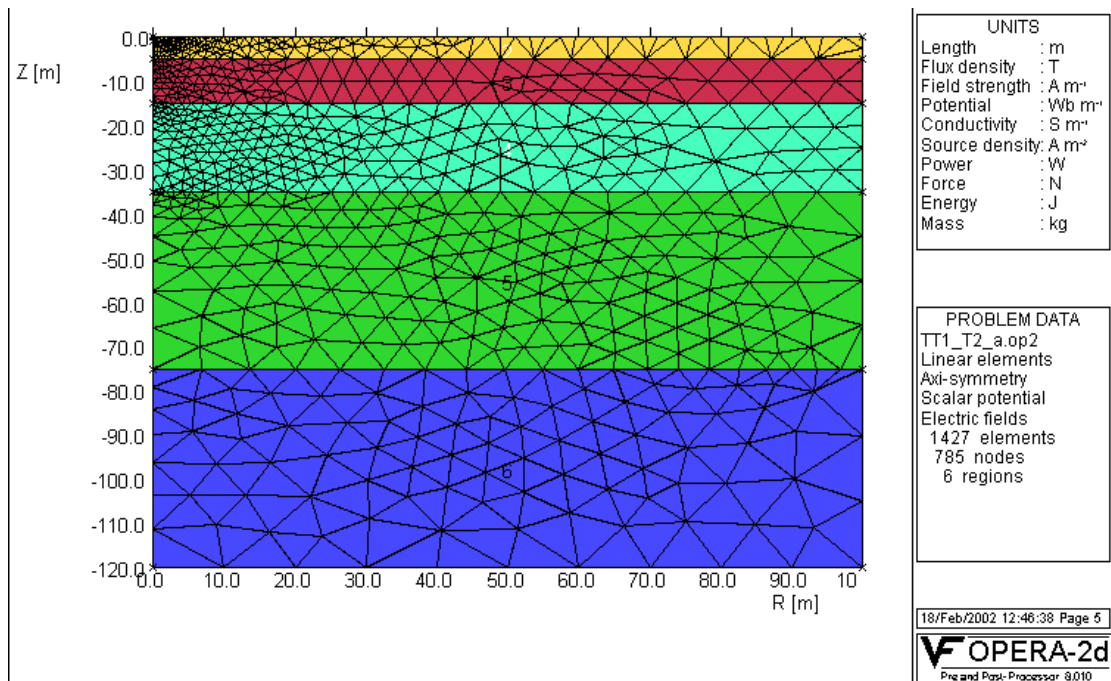
4.4.3.3 Πενταστρωματικό έδαφος (Πρόβλημα 1)

Μία κατακόρυφη ράβδος τοποθετημένη σε πενταστρωματικό έδαφος εξετάζεται σε αυτό το πρόβλημα. Τα πάχη των στρωμάτων είναι αντίστοιχα 5m, 10m, 20m, 40m και άπειρο. Το πρόβλημα είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα, οπότε αρκεί η σχεδίαση του μοντέλου στο ένα ημιεπίπεδο. Εναλλάσσοντας τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές διατάξεις (από Α έως Δ), οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

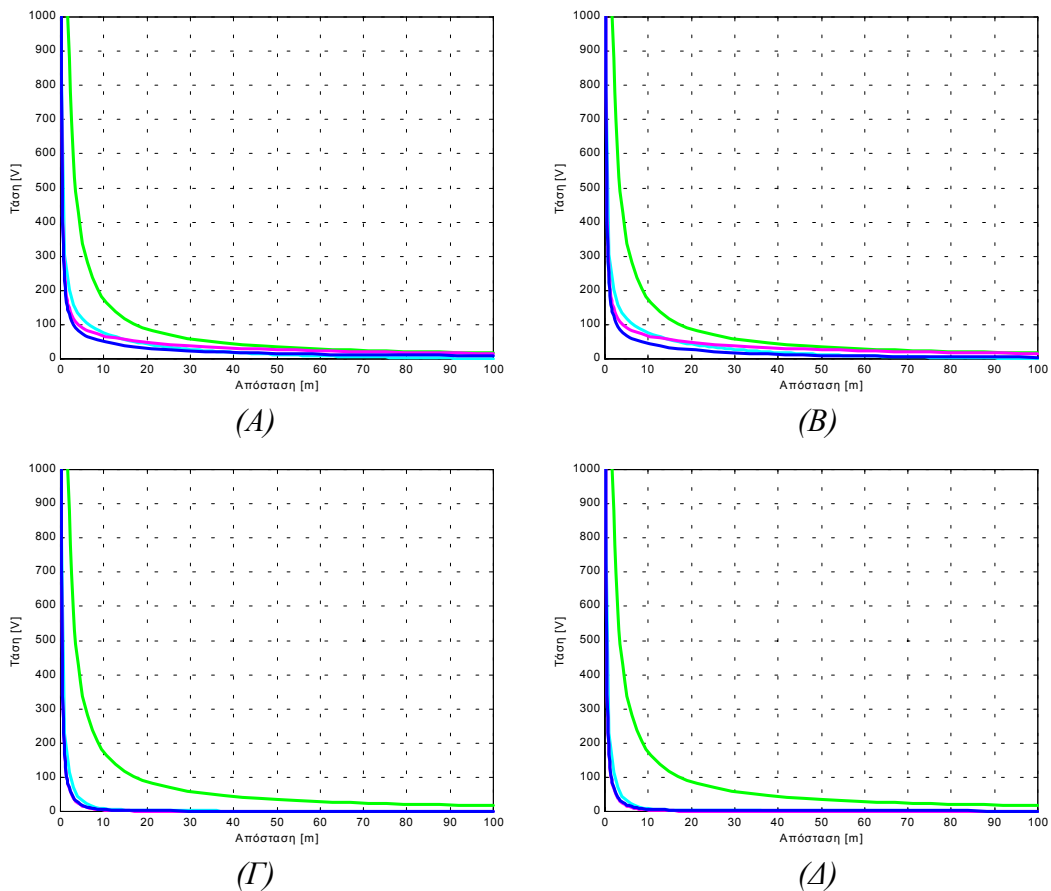
| Διάταξη | ρ_1 [Ωm] | ρ_2 [Ωm] | ρ_3 [Ωm] | ρ_4 [Ωm] | ρ_5 [Ωm] |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| A | 10 | 100 | 10 | 100 | 100 |
| B | 10 | 100 | 10 | 100 | 10 |
| Γ | 100 | 10 | 100 | 10 | 10 |
| Δ | 100 | 10 | 100 | 10 | 100 |

Πίνακας 4.8: Διατάξεις προβλήματος 1

Η γεωμετρία του προβλήματος και το χρησιμοποιούμενο κατά την επίλυση πλέγμα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.41. Τα αποτελέσματα για την κατανομή δυναμικού που εξάγονται από την στατική ανάλυση, δίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 4.41: Το πλέγμα της γεωμετρίας του προβλήματος



Σχήμα 4.42: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο

- : θεωρητική ανάλυση Takahashi – Kawase [107,108], •: διστρωματική μέθοδος [1],
- : προσομοίωση με PC Opera, •: μονοστρωματικό έδαφος [1]

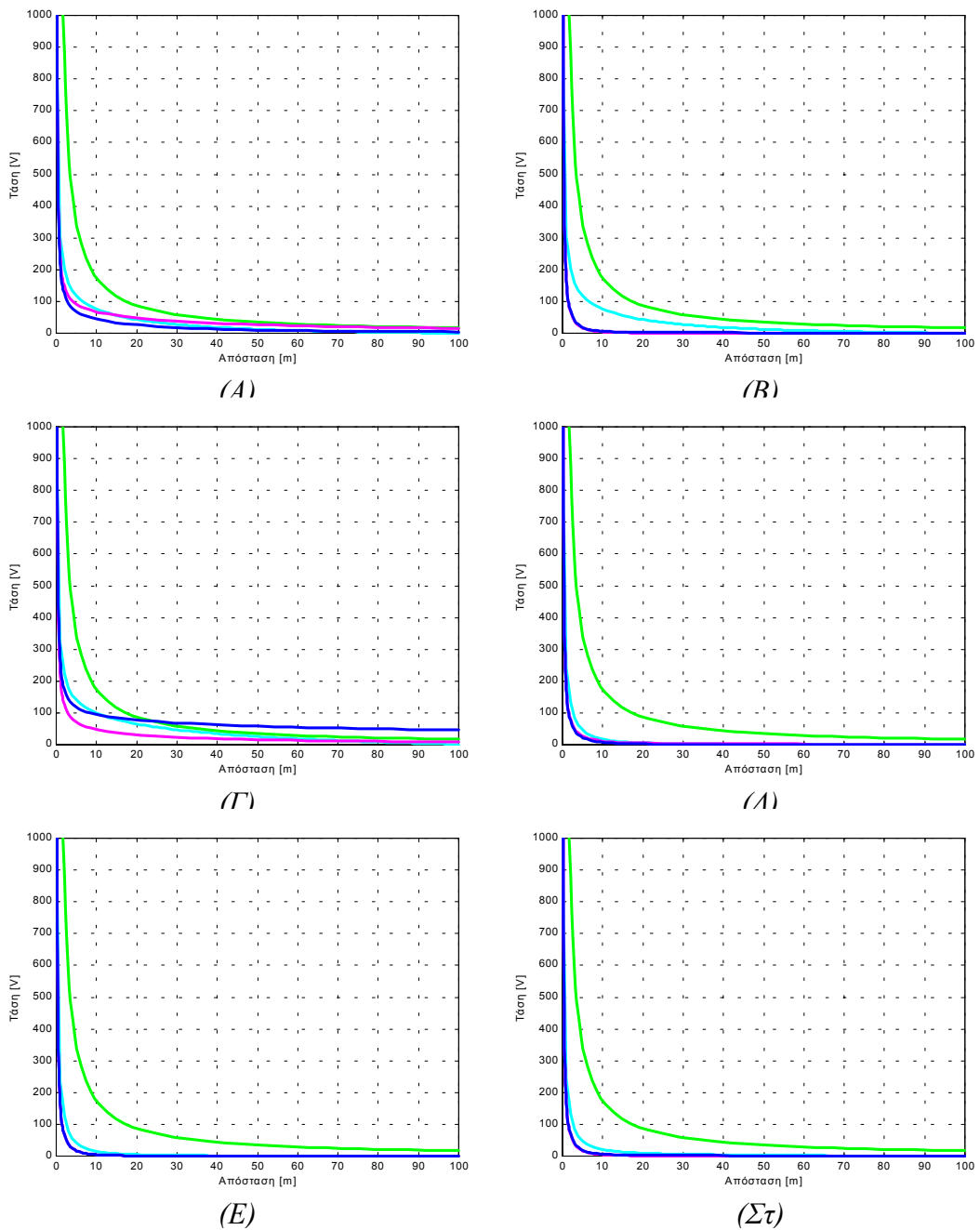
4.4.3.4 Πενταστρωματικό έδαφος (Πρόβλημα 2)

Το πρόβλημα 2 είναι ίδιας δομής, ως προς το πλήθος και πάχος των στρωμάτων, με το πρόβλημα 1 της §4.4.3.3. Εναλλάσσοντας τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων των στρωμάτων μελετώνται έξι διαφορετικές διατάξεις από Α έως ΣΤ, όπως καταγράφονται και στον παρακάτω πίνακα:

| Διάταξη | ρ_1 [Ωm] | ρ_2 [Ωm] | ρ_3 [Ωm] | ρ_4 [Ωm] | ρ_5 [Ωm] |
|---------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| A | 10 | 100 | 10 | 100 | 10 |
| B | 100 | 10 | 100 | 10 | 100 |
| Γ | 10 | 50 | 100 | 500 | 1000 |
| Δ | 1000 | 500 | 100 | 50 | 10 |
| E | 500 | 50 | 100 | 10 | 100 |
| ΣΤ | 500 | 50 | 1000 | 100 | 10 |

Πίνακας 4.9: Διατάξεις προβλήματος 2

Τα αποτελέσματα για την κατανομή δυναμικού που εξάγονται από την στατική ανάλυση δίνονται στα σχήματα 4.43 (περιπτώσεις Α, Β, Γ, Δ, Ε και ΣΤ).



Σχήμα 4.43: Η μεταβολή του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους ως προς την οριζόντια απόσταση από το ηλεκτρόδιο

- θεωρητική ανάλυση Takahashi – Kawase [107,108], • διστρωματική μέθοδος [1],
- προσομοίωση με PC Opera, • μονοστρωματικό έδαφος [1]

4.4.4 Συμπεράσματα από την πεδιακή προσέγγιση συστημάτων γείωσης

Αναλύοντας τις γραφικές παραστάσεις των τεσσάρων προβλημάτων, που μελετήθηκαν, παρατηρείται ότι οι κυματομορφές του δυναμικού που προκύπτουν με

τη χρήση του PC Opera προσεγγίζουν τις γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την πολυστρωματική ανάλυση [107,108] χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.78). Το πλεονέκτημα που έχει η χρήση του προγράμματος είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε περίπτωση συστήματος γείωσης, ενώ η χρήση της εξίσωσης (4.78) περιορίζεται είτε σε σημειακά ηλεκτρόδια, είτε σε κατακόρυφα ηλεκτρόδια [107,108].

Η χρήση της εξίσωσης (4.73) που αντιστοιχεί στον υπολογισμό του δυναμικού στην επιφάνεια εδάφους μονοστρωματικής διαμόρφωσης προκαλεί, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο, μεγάλη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, αφού εξετάζονται πολυστρωματικές δομές εδάφους.

Σημαντική απόκλιση παρατηρείται και από τα αποτελέσματα του δυναμικού που προκύπτουν με χρήση της εξίσωσης διστρωματικής διαμόρφωσης του εδάφους (εξ. 4.75) στις περιπτώσεις στις οποίες η ειδική αντίσταση του επιφανειακού στρώματος είναι μικρότερη από την ειδική αντίσταση του δεύτερου στρώματος. Στις περιπτώσεις που το επάνω στρώμα έχει ειδική αντίσταση σημαντικά μεγαλύτερη από το αμέσως επόμενο στρώμα, τα χαμηλότερα στρώματα πρακτικά δεν συμμετέχουν στη διαμόρφωση της κατανομής του επιφανειακού δυναμικού. Αυτό προκύπτει από την ταύτιση της μπλε καμπύλης (πολυστρωματική δομή) και της μωβ καμπύλης (διστρωματική δομή) στις περιπτώσεις των σχημάτα 4.38.γ, 4.38.δ, 4.40.α, 4.40.β, 4.42.γ, 4.42.δ, 4.43.β, 4.43.δ, 4.43.ε, 4.43.στ. Αυτό συμβαίνει, γιατί, λόγω των τιμών των ειδικών αντιστάσεων του εδάφους, τα δύο ανώτερα στρώματα έχουν σημαντικότερη επίδραση. Με άλλα λόγια, το δυναμικό του εδάφους στον κατακόρυφο άξονα πρακτικά μηδενίζεται πριν φθάσει στα χαμηλότερα στρώματα του εδάφους. Επομένως, σε αυτή τη περίπτωση μας αρκούν μόνο τα δύο ανώτερα στρώματα και είναι δυνατόν να αγνοηθούν τα υπόλοιπα χωρίς σημαντικό σφάλμα.

Στις υπόλοιπες περιπτώσεις που εξετάζονται παρατηρείται μία εντυπωσιακή σύγκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που γίνεται με το PC Opera και της πολύπλοκης, μη εύχρηστης και με πολλούς περιορισμούς σχέσης (4.78) [107, 108] που είναι διαθέσιμη στη βιβλιογραφία. Άρα το PC Opera μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο αρωγό στην προσομοίωση του αναπτυσσόμενου δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους, που είναι τοποθετημένο το σύστημα γείωσης.

4.5 Ειδική αντίσταση του εδάφους

Κατόπιν πληθώρας μετρήσεων [3] προέκυψε ότι το έδαφος έχει συνήθως πολυστρωματική δομή. Επομένως, είναι απαραίτητη μία μεθοδολογία για τον υπολογισμό των παραμέτρων της δομής του εδάφους (ειδική αντίσταση και βάθος του κάθε στρώματος του εδάφους). Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διαθέσιμες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό αυτών των παραμέτρων για διστρωματική [109-114] και τριστρωματική δομή [115, 116] του εδάφους χρησιμοποιώντας μετρήσεις της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τριών παραμέτρων (των ειδικών αντιστάσεων των δυο στρωμάτων του εδάφους και του βάθους του πάνω στρώματος, ενώ το κάτω στρώμα θεωρείται ότι έχει άπειρο βάθος). Ο υπολογισμός των παραμέτρων του τριστρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πέντε παραμέτρων (των ειδικών αντιστάσεων των τριών στρωμάτων του εδάφους και του βάθους των δύο επάνω στρωμάτων, το τρίτο και τελευταίο στρώμα θεωρείται ότι έχει άπειρο βάθος). Άρα με την ίδια λογική ο υπολογισμός των παραμέτρων του N-στρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης $(2 \cdot N - 1)$ παραμέτρων. Η μεθοδολογία βελτιστοποίησης πρέπει να είναι η αποδοτικότερη δυνατή, ώστε αφενός να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τις ήδη υφιστάμενες για διστρωματικό και τριστρωματικό έδαφος [3-5, 109-116] και αφετέρου να μπορεί εύκολα και αποδοτικά να χρησιμοποιηθεί και για πολυστρωματικά εδάφη. Στα πλαίσια της παρούσης διατριβής αναπτύχθηκε σε Matlab και C++ ένας γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος παρέχει άριστα αποτελέσματα σε όλα τα προβλήματα ελαχιστοποίησης που εφαρμόστηκε [209-212].

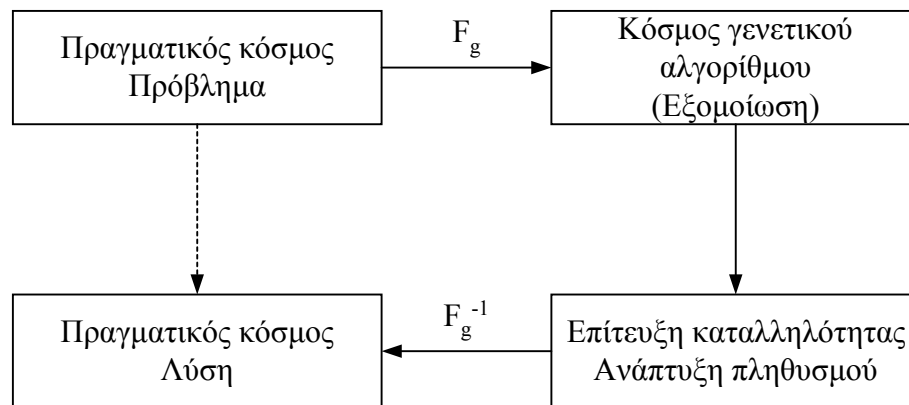
4.5.1 Εισαγωγή στους γενετικούς αλγόριθμους

Οι γενετικοί αλγόριθμοι εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στο μέσα της δεκαετίας του '70, όταν ο J. Holland [226] δημιούργησε ένα υπολογιστικό μοντέλο το οποίο μπορούσε να λύνει προβλήματα βελτιστοποίησης. Σκοπός της έρευνας του Holland ήταν η ερμηνεία των προσαρμοστικών διαδικασιών των φυσικών συστημάτων και ο σχεδιασμός συστημάτων τα οποία να έχουν ίδια χαρακτηριστικά με τα φυσικά συστήματα. Επομένως, οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι τεχνικές αναζήτησης της βέλτιστης λύσης εμπνευσμένες από τις αρχές της φυσικής επιλογής και της

γενετικής. Οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν έναν πληθυσμό υποψήφιων λύσεων (αρχικές τιμές), ο οποίος με την πάροδο του χρόνου εξελίσσεται χρησιμοποιώντας τους νόμους της φυσικής επιλογής και του ανασυνδυασμού του γενετικού υλικού μέσα στον πληθυσμό. Σκοπός των γενετικών αλγορίθμων είναι η βελτίωση της ποιότητας των λύσεων (καθώς ο πληθυσμός αναπτύσσεται, γενιά με γενιά) και τελικά μετά από έναν αριθμό γενεών να καταλήξουν σε βέλτιστες λύσεις [226, 227].

4.5.2 Περιγραφή ενός γενετικού αλγόριθμου

Ο μετασχηματισμός ενός προβλήματος από την περιοχή του πραγματικού κόσμου σε αυτή του γενετικού αλγορίθμου δίνει τη δυνατότητα απλοποίησης της διαδικασίας εύρεσης της λύσης, με τον ίδιο τρόπο που λειτουργεί και ο μετασχηματισμός Fourier (σχήμα. 4.44).



Σχήμα 4.44: Μετασχηματισμός του γενετικού αλγόριθμου

Οι λόγοι, όμως, που καθιστούν συμφέρουσα τη χρήση γενετικών αλγορίθμων είναι ότι είναι υπολογιστικά απλοί και ισχυροί στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης (ελάχιστο ή μέγιστο). Επιπλέον, δεν περιορίζονται ουσιαστικά από υποθέσεις για το χώρο αναζήτησης (υποθέσεις σχετικά με τη συνέχεια, την ύπαρξη παραγώγων και την ύπαρξη ενός μόνο μεγίστου). Επίσης, λόγω της διαδικασίας της εξέλιξης δεν παγιδεύονται σε τοπικά ακρότατα, όπως συμβαίνει με άλλες τεχνικές ελαχιστοποίησης [226, 227].

Οι γενετικοί αλγόριθμοι διαφέρουν αρκετά σε σχέση με τις υπόλοιπες υπολογιστικές μεθόδους. Κωδικοποιούν το φυσικό σύνολο των παραμέτρων του προβλήματος υπό

τη μορφή συμβολοσειράς, όπως στη βιολογία γίνεται αναπαράσταση των μεταβλητών με τη μορφή γονιδίων σε ένα χρωμόσωμα.

Οι άλλες μέθοδοι βελτιστοποίησης (π.χ. μέθοδος σημείου-σημείου, στην οποία γίνεται μετακίνηση από ένα σημείο στο χώρο απόφασης σε ένα άλλο χρησιμοποιώντας κάποιον κανόνα μετάβασης), οδηγούνται πολύ συχνά σε λανθασμένο υπολογισμό του μεγίστου στις περιπτώσεις περιοχών με περισσότερα από ένα μέγιστα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, όμως, χρησιμοποιούν ταυτόχρονα μία ευρεία βάση δεδομένων σημείων ψάχνοντας πολλά μέγιστα ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος.

Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους, που χρησιμοποιούν αιτιοκρατικούς κανόνες μετάβασης, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης για την καθοδήγηση της αναζήτησης. Συνήθεις τεχνικές αναζήτησης, όπως είναι η τεχνική της κλίσης, απαιτούν τη γνώση των παραγώγων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι πλεονεκτούν στο ότι δεν χρειάζονται βοηθητική πληροφορία. Δηλαδή μπορούν να επιτύχουν αποδοτική αναζήτηση με μοναδική απαίτηση τον υπολογισμό της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που σχετίζεται με τις ατομικές συμβολοσειρές. Η διαδικασία επίλυσης με χρήση γενετικού αλγορίθμου χωρίζεται στα εξής βήματα:

Στο πρώτο βήμα δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός με τυχαίο τρόπο (από μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών).

Στο δεύτερο βήμα διενεργείται η αξιολόγηση (evaluation), δηλαδή ο υπολογισμός της καταλληλότητας κάθε χρωμοσώματος, μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης. Η επιλογή της συνάρτησης καταλληλότητας είναι το πιο κρίσιμο βήμα κατά την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε ένα πρακτικό πρόβλημα.

Το τρίτο βήμα είναι αυτό της επιλογής (selection). Στο βήμα αυτό τα χρωμοσώματα-γονείς με τον μεγαλύτερο βαθμό καταλληλότητας τοποθετούνται μία ή περισσότερες φορές σε έναν ενδιάμεσο πληθυσμό. Έτσι, η πιθανότητα με την οποία οι λύσεις του τρέχοντα πληθυσμού αντιγράφονται και τοποθετούνται στον ενδιάμεσο πληθυσμό είναι ανάλογη του βαθμού καταλληλότητας τους.

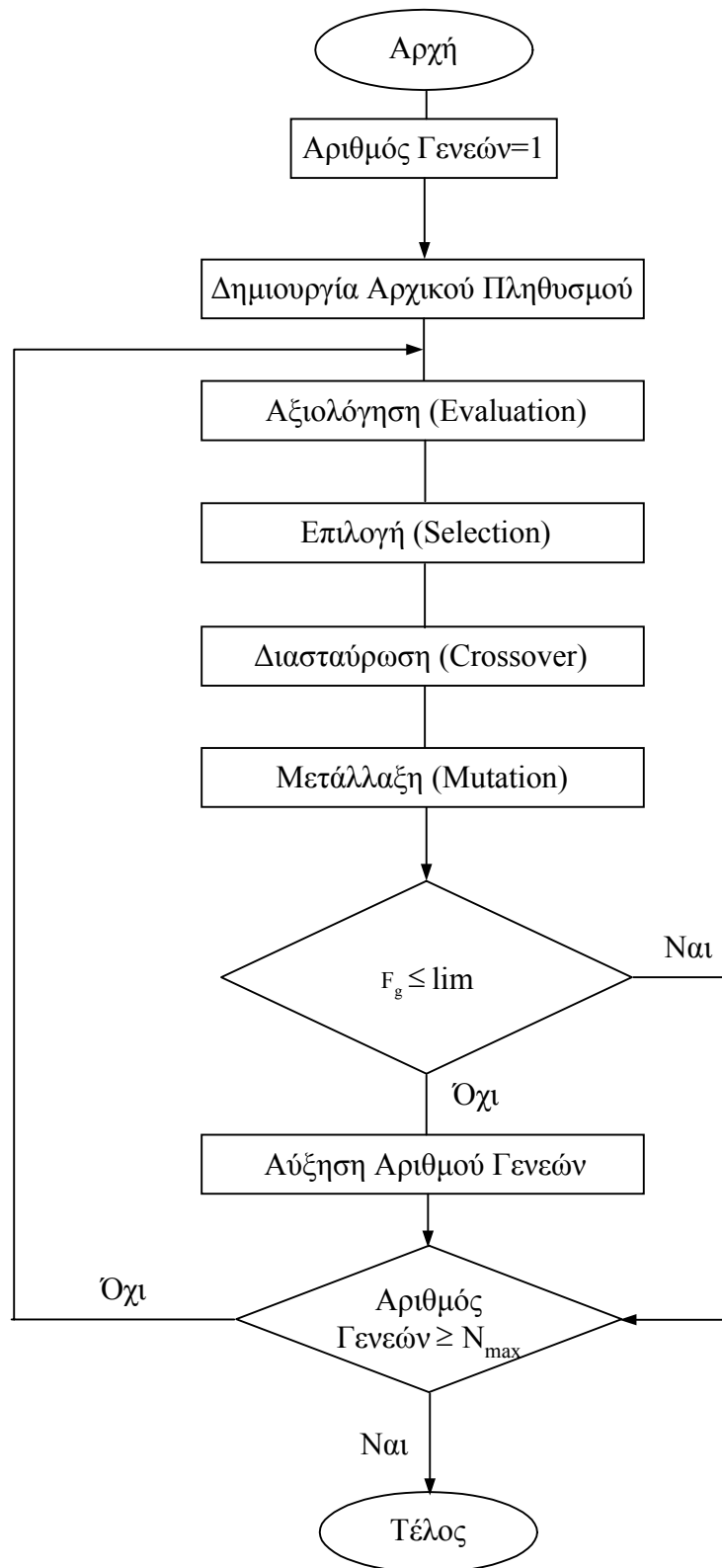
Το τέταρτο βήμα είναι η διασταύρωση (ανασυνδυασμός - crossover). Στο βήμα αυτό οι λύσεις του ενδιάμεσου πληθυσμού ανασυνδυάζονται για την παραγωγή του επόμενου πληθυσμού με χρήση τελεστών που προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Συγκεκριμένα, από τον ενδιάμεσο πληθυσμό γίνεται τυχαία επιλογή των λύσεων ανά δύο, και έτσι δημιουργούνται οι λύσεις-γονείς. Έπειτα εφαρμόζεται στους γονείς ο τελεστής διασταύρωσης με μια πιθανότητα P_c . Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές (γενετικό υλικό) των γονέων δημιουργώντας δύο απογόνους που κληρονομούν χαρακτηριστικά και των δύο γονέων.

Το πέμπτο βήμα είναι η μετάλλαξη (mutation). Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων των απογόνων. Η διασταύρωση, αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων, δεν είναι ωστόσο σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Ο τελεστής της μετάλλαξης καλύπτει αυτή την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στους απογόνους.

Μετά τα βήματα εξερεύνησης ο πληθυσμός είναι πλήρης από νέες λύσεις (απογόνους) και επαναλαμβάνονται τα βήματα 2 έως 5. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσο δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια τερματισμού, δηλαδή είτε για ένα προκαθορισμένο αριθμό γενεών, είτε μέχρι ο βαθμός καταλληλότητας της καλύτερης λύσης να είναι μεγαλύτερος από κάποιο συγκεκριμένο όριο [226, 227].

4.5.3 Περιγραφή του γενετικού αλγόριθμου που αναπτύχθηκε

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας αναπτύχθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος [209-212], ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση πλήθους προβλημάτων ελαχιστοποίησης, όπως προβλήματα που αφορούσαν πολυδιάστατα συστήματα [210-212], ρύπανση μονωτήρων [209] αλλά και τον υπολογισμό των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Η λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου που αναπτύχθηκε σε Matlab και C++, περιγράφεται με το λογικό διάγραμμα του σχήματος 4.45).



Σχήμα 4.45: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Για να αρχίσει την αναζήτηση, ο γενετικός αλγόριθμος χρειάζεται ένα αρχικό σύνολο σημείων. Το σύνολο αυτό καλείται πληθυσμός, κατ' αναλογία προς ένα

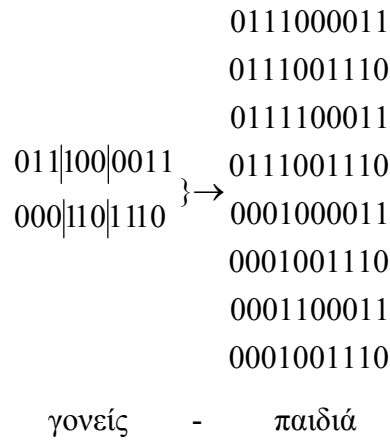
βιολογικό σύστημα. Το μέγεθος του πληθυσμού είναι P_s . Μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιουργεί τον αρχικό πληθυσμό. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση δεν είναι κρίσιμος, καθώς ο αρχικός πληθυσμός εξελίσσεται και εκτείνεται σε μεγάλο εύρος τιμών των υπό βελτιστοποίηση μεταβλητών. Όμως, αν υπάρχει γνώση για το σύστημα, η πληροφορία αυτή μπορεί να συμπεριληφθεί στον αρχικό πληθυσμό. Το αρχικό αυτό σύνολο μετατρέπεται σε ένα ψηφιακό σύστημα και θεωρείται ως χρωμόσωμα, που εκφράζεται με ακολουθίες 0 και 1. Δηλαδή κάθε ένα από τα P_s μέλη του αρχικού πληθυσμού μετατρέπεται σε ένα χρωμόσωμα με m συμβολοσειρές t θέσεων (μονοδιάστατος πίνακας t θέσεων). Ο αριθμός m δηλώνει το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών του προβλήματος, ενώ ο αριθμός t δηλώνει τα δυαδικά ψηφία που σχηματίζουν τον αριθμό. Είναι προφανές πως η ακρίβεια του προβλήματος θα είναι ανάλογη της ποσότητας $\frac{E}{2^t}$, όπου E είναι το εύρος στο οποίο κυμαίνεται η μεταβλητή του προβλήματος. Στο σχήμα 4.46 παρουσιάζεται ένα χρωμόσωμα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση ενός προβλήματος με τρεις μεταβλητές ($m=3$) και 256 στάθμες ($2^t=2^8=256$).

$$\begin{array}{ccc} w_1 & w_2 & w_m \\ 10011010 & | & 00100111 & | & 11001010 \end{array}$$

Σχήμα 4.46: Παράδειγμα χρωμοσώματος για μέλος του πληθυσμού ($m=3$, $t=8$).

Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός $P_s/2$ ζευγαριών από αυτά τα μέλη του πληθυσμού, που θεωρούνται γονείς για την αναπαραγωγή, στην οποία ανταλλάσσουν N_p τμήματα του γενετικού τους υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με διασταύρωση (σχήμα 4.47). Η διασταύρωση χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δύο νέων παιδιών από δύο υπάρχοντες γονείς που λαμβάνονται από τον τρέχοντα πληθυσμό. Μετά τη διασταύρωση υπάρχει μία μικρή πιθανότητα P_m μετάλλαξης. Η μετάλλαξη είναι το φαινόμενο κατά το οποίο επιλέγεται με τυχαίο τρόπο κάποια ή κάποιες από τις t θέσεις του χρωμοσώματος και το περιεχόμενο του μεταλλάσσεται (δηλαδή αν περιέχει 0 γίνεται 1 ή το 1 γίνεται 0). Η μετάλλαξη είναι απαραίτητη, καθώς, αν και η αναπαραγωγή και η διασταύρωση αναζητούν και αναμειγνύουν αποδοτικά τους υπάρχοντες απογόνους, υπάρχει περίπτωση να εγκλωβιστεί η λύση σε κάποιο τοπικό ακρότατο της συνάρτησης. Η μετάλλαξη περιστασιακά μπορεί να προκαλέσει απώλεια μερικού εν δυνάμει χρήσιμου γενετικού υλικού, συνολικά όμως

βοηθάει στην καλύτερη και ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση [226, 227].



Σχήμα 4.47: Οι δυνατοί συνδυασμοί παιδιών που προκύπτουν από τη διασταύρωση δύο γονιών ($m=1, t=10, N_p=3$)

Θεωρείται ότι κάθε ζεύγος γονέων δίνει N_c παιδιά. Με την αναπαραγωγή, ο πληθυσμός των γονέων εμπλουτίζεται με τα παιδιά, αυξάνοντας τον αρχικό πληθυσμό, καθώς προστίθενται νέα μέλη. Οι γονείς πάντοτε ανήκουν στον θεωρούμενο πληθυσμό (ευγονισμός) για να μην χάνεται η προηγούμενη πληροφορία. Ο νέος πληθυσμός τώρα έχει $P_s + N_c P_s / 2$ μέλη. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η διαδικασία της φυσικής επιλογής. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, μόνο P_s μέλη από τα $P_s + N_c P_s / 2$ επιβιώνουν. Αυτά τα P_s μέλη επιλέγονται ως τα μέλη με τις υψηλότερες τιμές F_g , αν προσπαθούμε να επιτύχουμε μεγιστοποίηση του F_g , ή με τις χαμηλότερες τιμές F_g , αν προσπαθούμε να επιτύχουμε ελαχιστοποίηση του F_g . Με τις παραπάνω λειτουργίες δημιουργείται η επόμενη γενιά με έναν νέο πληθυσμό.

Συνεχίζοντας τις επαναλήψεις της αναπαραγωγής υπό τη διαδικασία της διασταύρωσης, της μετάλλαξης και της φυσικής επιλογής, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει το ελάχιστο (ή το μέγιστο) του F_g . Οι καλύτερες τιμές αυτού του πληθυσμού συγκλίνουν σε αυτό το σημείο. Το κριτήριο τερματισμού πληρείται, εάν είτε η μέση τιμή του F_g στον πληθυσμό P_s μελών δεν βελτιώνεται περαιτέρω (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση), είτε ο αριθμός των επαναλήψεων είναι μεγαλύτερος από τον μεγαλύτερο αριθμό των επαναλήψεων N_{max} .

4.5.4 Παραδείγματα χρήσης του γενετικού αλγόριθμου

4.5.4.1 Υπολογισμός των σταθερών τόξου μονωτήρα

Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των σταθερών του τόξου (A, n) των μονωτήρων. Σειρές από πειράματα που έγιναν έδωσαν τα απαραίτητα πειραματικά αποτελέσματα (τάση υπερπήδησης U_c και αγωγιμότητα ρυπασμένης επιφάνειας σ_p του μονωτήρα) [228-230] για την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g :

$$F_g = \sum_{i=1}^{284} |U_{c_i} - U_i(A, n)| \quad (4.82)$$

Από τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα [228-230] επιλέγεται το κατάλληλο ζεύγος (A, n), ώστε να ελαχιστοποιηθεί η εξίσωση (4.82), όταν το $U_i(A, n)$ υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$U(A, n) = \frac{A}{n+1} \cdot (L + \pi \cdot D_r \cdot F_i \cdot K \cdot n) \cdot (\pi \cdot D_r \cdot \sigma_p \cdot A)^{-n/(n+1)} \quad (4.83)$$

όπου

$$K = 1 + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot F_i \cdot \frac{n}{n+1}} \cdot \ln \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot F_i \cdot \sqrt{\frac{(\pi \cdot D_r \cdot \sigma_p \cdot A)^{1/(n+1)}}{1,45 \cdot \pi}}} \quad (4.84)$$

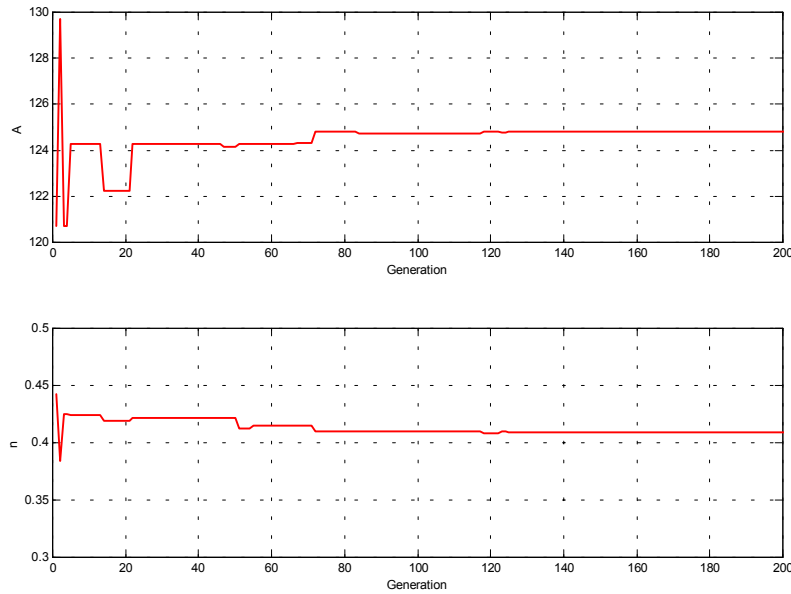
L το μήκος ερπυσμού

D_r η ισοδύναμη ακτίνα

K ο συντελεστής τύπου

F_i ο συντελεστής μορφής του μονωτήρα

Χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο προκύπτει το ζεύγος βέλτιστων λύσεων $A=124,8$ και $n=0,409$. Η σύγκλιση των λύσεων για τις δύο παραμέτρους του προβλήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.48 [209].



Σχήμα 4.48: Σύγκλιση των παραμέτρων.

4.5.4.2 Εφαρμογή στα πολυδιάστατα συστήματα

Ο γενετικός αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε στην κατά προσέγγιση παραγοντοποίηση πολυδιάστατων πολυωνύμων [210-212]. Ένα αριθμητικό παράδειγμα δίνεται με την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης $\|A - \tilde{A}\|_2^2$ [212]:

$$\|A - \tilde{A}\|_2^2 = (-1.2 - ru)^2 + (1.1 - r - u)^2 + (1.5 - rs - pu)^2 + (2.8 - p - s)^2 + (8 - ps - rt - qu)^2 + (1 - q - t)^2 + (1.7 - qs - pt)^2 + (-4 - qt)^2 \quad (4.85)$$

όπου A είναι πολυδιάστατο πολυώνυμο:

$$A(z_1, z_2) = -1,2 + 1,1z_1 + z_1^2 + 1,5z_2 + 8z_2^2 + 2,8z_1z_2 + z_1z_2^2 + 1,7z_2^3 - 4z_2^4 \quad (4.86)$$

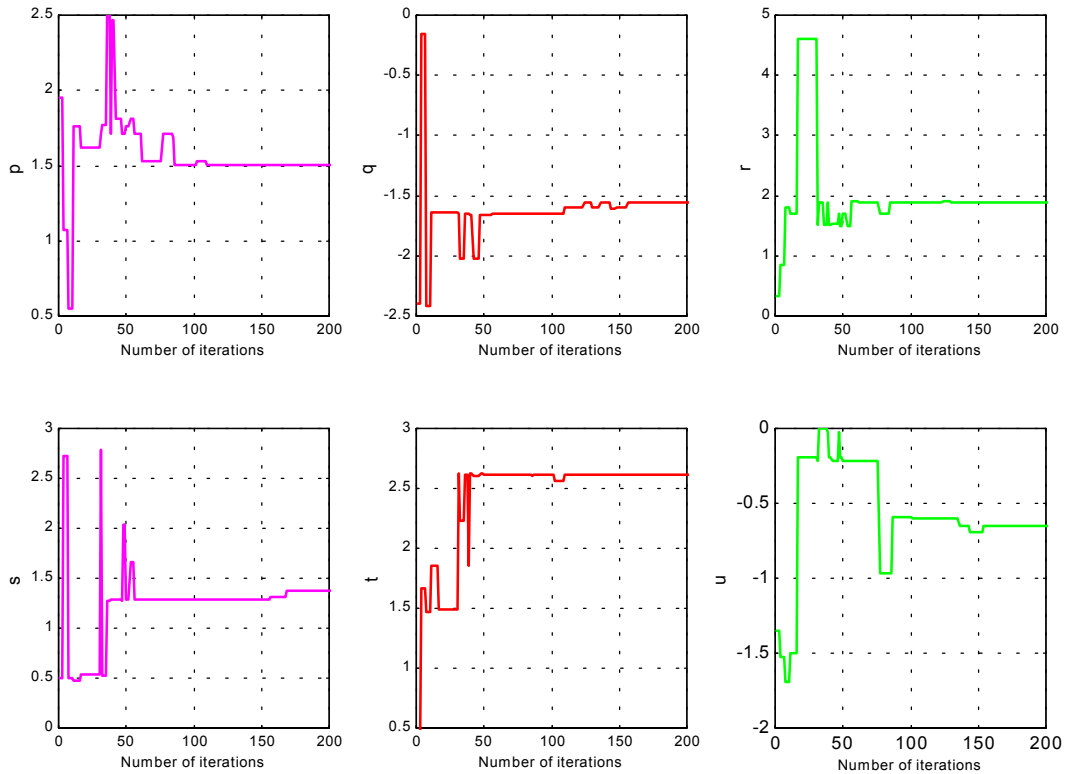
και \tilde{A} είναι το πολυώνυμο που το προσεγγίζει:

$$\tilde{A}(z_1, z_2) = (z_1 + pz_2 + qz_2^2 + r) \cdot (z_1 + sz_2 + tz_2^2 + u) \quad (4.87)$$

Η υπάρχουσα καλύτερη λύση για τη συγκεκριμένη παραγοντοποίηση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Levenberg-Marquardt ήταν: $p=1.57274$, $q=-1.55809$, $r=1.71299$, $s=1.48338$, $t=2.75002$, $u=-0.190665$ με $\|A - \tilde{A}\|_2^2 = 3,774775$ [212].

Χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο, η βέλτιστη λύση που προκύπτει είναι: $p=1,50293$, $q=-1,55273$, $r=1,88965$, $s=1,35352$, $t=2,56348$, $u=-0,69434$, με σαφέστατα μικρότερο σφάλμα $\|A - \tilde{A}\|_2^2 = 0,03003$ [212].

Η σύγκλιση των λύσεων για τις έξι παραμέτρους του προβλήματος παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα (4.49) [212].



Σχήμα 4.49: Σύγκλιση των παραμέτρων

4.5.4.3 Υπολογισμός παραμέτρων διστρωματικού εδάφους

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε και στην §4.5. Για τον υπολογισμό των τριών παραμέτρων (ρ_1 η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους, ρ_2 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους και h_1 το βάθος του πάνω στρώματος) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g :

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (4.88)$$

όπου ρ_{ai}^m είναι η i -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a , ενώ ρ_{ai}^c είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a που αντιστοιχεί στο i -οστό ζεύγος μετρήσεων. Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.89-4.91) [106, 109, 110, 112]:

$$\rho_a^c = \rho_1 \cdot \left(1 + 4 \cdot \sum_n K^n \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{A}} - \frac{1}{\sqrt{B}} \right) \right) \quad (4.89)$$

όπου

$n = 1 \dots \infty$ και K ο συντελεστής ανάκλασης (από εξίσωση 4.77)

$$A = 1 + \left(\frac{2 \cdot n \cdot h_1}{a} \right)^2 \quad (4.90)$$

$$B = A + 3 \quad (4.91)$$

Για να αποδειχθεί η ποιότητα των λύσεων που παρέχει ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκαν πειράματα άλλων ερευνητών [109, 110, 114] και στη συνέχεια αποδείχθηκε ότι οι λύσεις που προτείνονται σε αυτή την εργασία είναι καλύτερες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των Seedher και Arora [110] φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

| | | | | | | | | |
|------------------|---|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Περίπτωση | 1 | a_i [m] | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | |
| | | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 693,74 | 251,62 | 84,56 | 37,64 | 25,32 | |
| | 2 | a_i [m] | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | |
| | | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 123,33 | 189,99 | 258,93 | 320,27 | 374,13 | |
| | 3 | a_i [m] | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | |
| | | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 102,26 | 113,07 | 129,77 | 147,52 | 163,95 | |
| | 4 | a_i [m] | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 |
| | | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 320 | 245 | 182 | 162 | 168 | 152 |

Πίνακας 4.10: Πειραματικά αποτελέσματα των Seedher και Arora [110]

Χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο που αναπτύχθηκε για πλήθος γονιών $P_s = 20$, πλήθος θέσεων χρωματοσώματος $t = 16$, αριθμό μεταβλητών $m = 3$, αριθμό παιδιών $N_c = 4$, μέγιστο αριθμό επαναλήψεων $N_{max} = 30$ και πιθανότητα μετάλλαξης $P_m = 5\%$ προκύπτουν οι λύσεις του πίνακα 4.11. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι λύσεις που προκύπτουν με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου είναι καλύτερες από τις λύσεις που προκύπτουν με οποιαδήποτε από τις άλλες υπάρχουσες μεθόδους [106, 110].

| Περίπτωση | ρ_1 [$\Omega \cdot m$] | ρ_2 [$\Omega \cdot m$] | h_1 [m] | Σφάλμα F_g | Μέθοδος λύσης |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|----------------------|
| 1 | 1003,35 | 21,14 | 0,99 | 1,2913 | [110] |
| | 1000,003 | 20,526 | 1,00 | 1.2750 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 2 | 98,38 | 1018,80 | 2,44 | 0,0354 | [110] |
| | 98,194 | 973,609 | 2,424 | 0,0139 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 3 | 99,99 | 302,64 | 5,04 | 0,0054 | [110] |
| | 100,762 | 327,962 | 5,323 | 0,0150 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 4 | 383,498 | 147,657 | 2,563 | 0,2084 | [106], [110] |
| | 389,493 | 152,996 | 2,403 | 0,2417 | [110] |
| | 367,739 | 143,569 | 2,708 | 0,1651 | Γενετικός Αλγόριθμος |

Πίνακας 4.11: Σύγκριση με τη μέθοδο των *Seedher* και *Arora* [110]

Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δίνονται και στον πίνακα 4.12 [109, 114]:

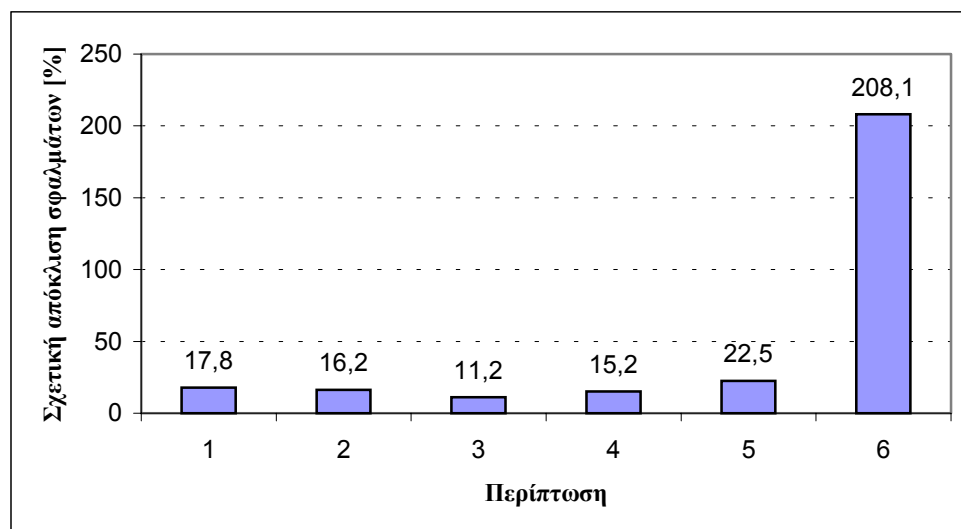
| Περίπτωση | | a_i [m] | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | | |
|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | 1 | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 320 | 245 | 182 | 162 | 168 | 152 | |
| 2 | a_i [m] | 1,0 | 1,5 | 2,5 | 3,0 | 5,0 | 10,0 | | | |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 255 | 290 | 315 | 376 | 528 | 690 | | | |
| 3 | a_i [m] | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 4,0 | 5,0 | |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 58,71 | 61,79 | 58,10 | 61,00 | 73,79 | 78,00 | 79,13 | 78,19 | |
| 4 | a_i [m] | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 20,0 | 25,0 | |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 451,6 | 366,7 | 250,2 | 180,0 | 144,2 | 120,2 | 115,5 | 96,5 | |
| 5 | a_i [m] | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 4,0 | | | | | |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 156,4 | 113,1 | 95,2 | 65,3 | | | | | |
| 6 | a_i [m] | 1,0 | 2,0 | 4,0 | 10,0 | 20,0 | 40,0 | | | |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 136 | 140 | 214 | 446 | 685 | 800 | | | |

Πίνακας 4.12: Πειραματικά αποτελέσματα του *Del Alamo* [109, 114]

Χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο με τα ίδια ακριβώς στοιχεία με αυτά του προηγούμενου παραδείγματος προκύπτουν οι λύσεις του πίνακα 4.13. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι λύσεις που προκύπτουν με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου είναι καλύτερες και από την καλύτερη λύση που προκύπτει από οποιαδήποτε από τις οχτώ μεθόδους του Del Alamo [109].

| Περίπτωση | ρ_1 [$\Omega \cdot m$] | ρ_2 [$\Omega \cdot m$] | h_1 [m] | Σφάλμα F_g | Μέθοδος λύσης |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|----------------------|
| 1 | 372,729 | 145,259 | 2,690 | 0,1884 | 8 ^η [109] |
| | 374,921 | 144,518 | 2,559 | 0,1600 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 2 | 246,836 | 1058,62 | 2,139 | 0,2126 | 7 ^η [109] |
| | 243,419 | 986,960 | 2,000 | 0,1829 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 3 | 57,343 | 96,712 | 1,651 | 0,4043 | 5 ^η [109] |
| | 58,229 | 91,039 | 1,310 | 0,3635 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 4 | 494,883 | 93,663 | 4,370 | 0,2338 | 7 ^η [109] |
| | 499,827 | 89,847 | 4,409 | 0,2029 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 5 | 160,776 | 34,074 | 1,848 | 0,1852 | 8 ^η [109] |
| | 168,694 | 39,463 | 1,625 | 0,1512 | Γενετικός Αλγόριθμος |
| 6 | 125,526 | 1093,08 | 2,713 | 0,8538 | 8 ^η [109] |
| | 128,645 | 1060,965 | 2,896 | 0,2771 | Γενετικός Αλγόριθμος |

Πίνακας 4.13: Σύγκριση με την καλύτερη από τις μεθόδους του Del Alamo [109]



Σχήμα 4.50: Σύγκριση της καλύτερης από τις μεθόδους του Del Alamo [109] με την λύση που μας δίνει ο γενετικός αλγόριθμος

Στο σχήμα 4.50 πραγματοποιείται η σύγκριση του σφάλματος της καλύτερης από τις μεθόδου του Del Alamo [109] με το σφάλμα που δίνει η λύση με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου. Παρατηρείται ότι παρόλο που ο Del Alamo [109] έχει συγκεντρώσει τις καλύτερες από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους το σφάλμα του είναι, συγκρινόμενο με αυτό της μεθοδολογίας που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσης διατριβής, σημαντικά μεγαλύτερο (από 11%-22% σε μία περίπτωση μάλιστα φθάνει το 208%). Επομένως, είναι πλέον σαφέστατο ότι η χρήση του γενετικού αλγορίθμου αυξάνει την ακρίβεια στον υπολογισμό των παραμέτρων του διστρωματικού εδάφους.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι παράμετροι των εδαφών στα οποία μετρήθηκε η ειδική αντίσταση στα πλαίσια της παρούσης διατριβής (τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάστηκαν στην §3.3.1).

| Περίπτωση | ρ_1 [$\Omega \cdot m$] | ρ_2 [$\Omega \cdot m$] | h_1 [m] | Σφάλμα F_g |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|
| Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων | 184,375 | 151,562 | 5,063 | 0,367 |
| Γήπεδο | 125,519 | 160,252 | 1,342 | 0,732 |
| Άσος Ζωγράφου | 12,891 | 121,750 | 6,874 | 1,276 |
| Βιβλιοθήκη | 54,807 | 290,625 | 0,268 | 0,4446 |
| Τοσίτσα (Ιανουάριος 1999) | 20,476 | 71,547 | 2,229 | 0,0996 |
| Τοσίτσα (Μάιος 1999) | 29,688 | 96,820 | 2,969 | 0,0438 |
| Τοσίτσα (Ιούλιος 1999) | 35,549 | 101,564 | 3.399 | 0,0862 |

Πίνακας 4.14: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου

4.5.4.4 Υπολογισμός παραμέτρων τριστρωματικού εδάφους

Ο υπολογισμός των παραμέτρων του τριστρωματικού εδάφους είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε και στην §4.5. Για τον υπολογισμό των πέντε παραμέτρων (ρ_1 η ειδική αντίσταση του επάνω στρώματος του εδάφους, ρ_2 η ειδική αντίσταση του μεσαίου στρώματος του εδάφους, ρ_3 η ειδική αντίσταση του κάτω στρώματος του εδάφους, h_1 το βάθος του πάνω στρώματος και h_2 το βάθος του μεσαίου στρώματος) είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης F_g έχοντας

διαθέσιμη μία ομάδα από N μετρήσεις ειδικής αντίστασης του εδάφους (με τη μέθοδο Wenner) συναρτήσει της απόστασης των βοηθητικών ηλεκτροδίων:

$$F_g = \sum_{i=1}^N \frac{|\rho_{ai}^m - \rho_{ai}^c|}{\rho_{ai}^m} \quad (4.92)$$

όπου ρ_{ai}^m είναι η i -οστή μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a , ενώ ρ_{ai}^c είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a που αντιστοιχεί στο i -οστό ζεύγος μετρήσεων. Ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους γίνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.93-4.96) [107]:

$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \cdot \left\{ 1 + 4 \cdot \alpha \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot [J_0(\alpha \cdot \lambda) - J_0(2 \cdot \alpha \cdot \lambda)] \cdot d\lambda \right\} \quad (4.93)$$

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους, μηδενικής τάξης. Το $f(\lambda)$ υπολογίζεται από την επόμενη εξίσωση:

$$f(\lambda) = \frac{k_1 \cdot e^{-2 \cdot h_1 \cdot \lambda} + k_2 \cdot e^{-2 \cdot (h_1 + h_2) \cdot \lambda}}{1 + k_1 \cdot k_2 \cdot e^{-2 \cdot h_1 \cdot \lambda} - k_1 \cdot e^{-2 \cdot h_1 \cdot \lambda} - k_2 \cdot e^{-2 \cdot (h_1 + h_2) \cdot \lambda}} \quad (4.94)$$

Ενώ οι συντελεστές ανάκλασης του εδάφους k_1 και k_2 υπολογίζονται από τις σχέσεις:

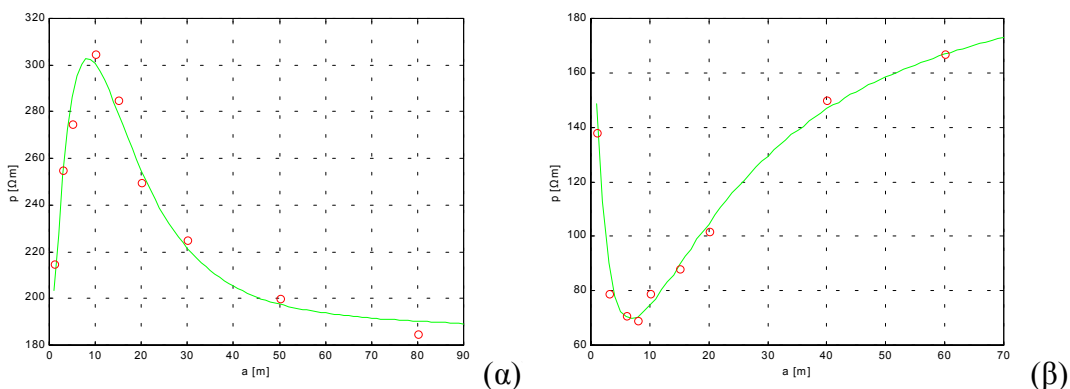
$$k_1 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.95)$$

$$k_2 = \frac{\rho_3 - \rho_2}{\rho_3 + \rho_2} \quad (4.96)$$

Χρησιμοποιώντας τον γενετικό αλγόριθμο για τις μετρήσεις του πίνακα 4.15, η λύση που προκύπτει παρουσιάζεται στον πίνακα 4.16. Η γραφική παράσταση της εξίσωσης (4.93) παρουσιάζεται με την πράσινη καμπύλη στο σχήμα 4.51 αξιοποιώντας τα στοιχεία των λύσεων που προέκυψαν (πίνακας 4.16), οι κόκκινοι κύκλοι αντιστοιχούν στα μετρηθέντα σημεία (Πίνακας 4.51). Για την περίπτωση A του πίνακα 4.15 η σύγκλιση των λύσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.52.

| | | | | | | | | | | |
|----------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A | a_i [m] | 1 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 50 | 80 |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 214 | 256 | 273 | 307 | 284 | 250 | 225 | 210 | 186 |
| B | a_i [m] | 1 | 3 | 6 | 8 | 10 | 15 | 20 | 40 | 60 |
| | ρ_i [$\Omega \cdot m$] | 138 | 79 | 71 | 67 | 80 | 88 | 99 | 151 | 170 |

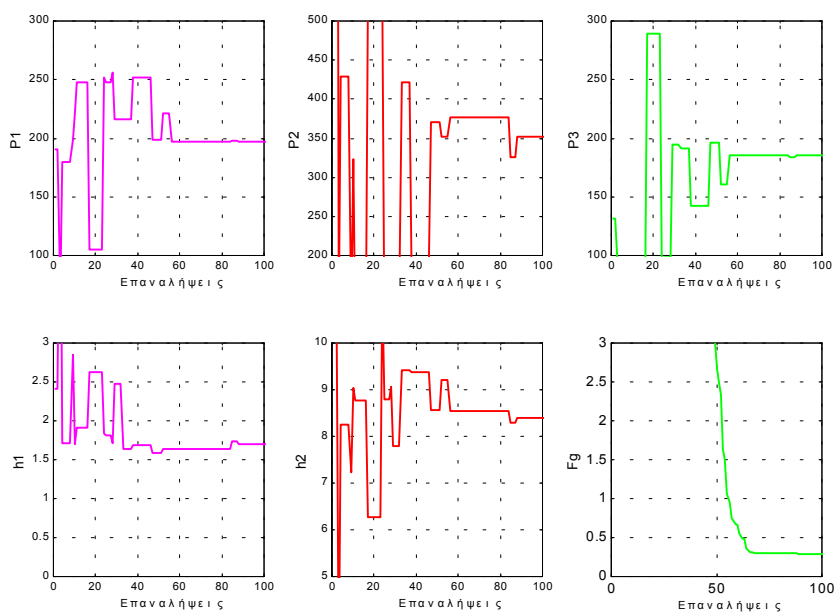
Πίνακας 4.15: Πειραματικά αποτελέσματα



Σχήμα 4.51: Μετρήσεις τριστηρωματικού εδάφους πίνακα 4.15.

| Περίπτωση | ρ_1 [$\Omega \cdot m$] | ρ_2 [$\Omega \cdot m$] | ρ_3 [$\Omega \cdot m$] | h_1 [m] | h_2 [m] | Σφάλμα F_g |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|--------------|
| A | 196,9 | 351,7 | 185,2 | 1,7 | 8,4 | 0,2662 |
| B | 164,5 | 71,6 | 203,7 | 1,2 | 10,6 | 0,3652 |

Πίνακας 4.16: Αποτελέσματα γενετικού αλγορίθμου



Σχήμα 4.52: Σύγκλιση των παραμέτρων

4.5.4.5 Υπολογισμός παραμέτρων πολυστρωματικού εδάφους

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων του οποιουδήποτε πολυστρωματικού εδάφους. Άρα ο υπολογισμός των παραμέτρων του N-στρωματικού εδάφους με την ίδια λογική ανάγεται σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης $(2 \cdot N - 1)$ παραμέτρων. Πάλι πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση (4.92) μόνο που τώρα έχει $(2 \cdot N - 1)$ παραμέτρους, ενώ το ρ_{ai}^c που είναι ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης του εδάφους για απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων ίση με a και αντιστοιχεί στο i -οστό ζεύγος μετρήσεων, δίνεται από τη σχέση [107, 108]:

$$\rho_{\alpha}^c = \rho_1 \cdot [1 + 2 \cdot F_N(a) - F_N(2 \cdot a)] \quad (4.97)$$

όπου η συνάρτηση $F_N(x)$ υπολογίζεται με τη χρήση της εξίσωσης (4.79) [107, 108].

4.5.5 Συμπεράσματα για την πολυστρωματική δομή του εδάφους

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάστηκε μία μεθοδολογία, που επιτρέπει την βελτιστοποίηση πολυμεταβλητών συναρτήσεων, με τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσης διατριβής. Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας έδωσαν πολύ καλύτερα αποτελέσματα συγκρινόμενα με τις μέχρι τώρα υφιστάμενες μεθόδους. Επίσης, καταδείχθη ότι ο υπολογισμός των παραμέτρων της δομής του πολυστρωματικού εδάφους μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Επομένως, με την προτεινόμενη μεθοδολογία είναι δυνατόν να υπολογισθούν με μεγάλη ακρίβεια οι παράμετροι του πολυστρωματικού εδάφους, οι οποίες στη συνέχεια, θα αποτελέσουν τα απαραίτητα στοιχεία εισόδου στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης που θα τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο έδαφος. Η προσομοίωση αυτή μπορεί να γίνει ακόμα πιο αποτελεσματική, αν χρησιμοποιηθεί το λογισμικό πακέτο PC Opera (ή παρόμοιο) και η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.

4.6 Επιδράσεις κεραυνών σε συστήματα γείωσης

4.6.1 Ανάστροφη διάσπαση

Είναι γνωστό ότι, είναι άσκοπο να διαστασιοποιηθεί η μόνωση μίας γραμμής μεταφοράς, χωρίς αγωγούς προστασίας, με βάση τις αναμενόμενες κεραυνικές υπερτάσεις, γιατί, εάν ο κεραυνός προσβάλει αγωγό φάσεως, προκαλεί σε αυτόν ανύψωση δυναμικού που μπορεί να πάρει πολύ υψηλές τιμές (π.χ. πάνω από το 60% των κεραυνών προκαλούν ανύψωση δυναμικού πάνω από 2000kV, ενώ το 20% αυτών δίνουν υπέρταση πάνω από 6000kV), ενώ, εάν ο κεραυνός προσβάλει τον πυλώνα, αυτός εμφανίζει κατά το πάνω μέρος του ανύψωση δυναμικού, η οποία, πάντως, είναι μικρότερη από την ανύψωση που δημιουργείται στην προηγούμενη περίπτωση [231].

Επομένως, είναι απαραίτητη η χρήση αγωγών προστασίας. Εάν οι αγωγοί προστασίας έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα, κάθε ατμοσφαιρική εκκένωση με τιμή ρεύματος πάνω από συγκεκριμένο όριο προσβάλλει τους αγωγούς προστασίας. Κεραυνοί μικρότερης έντασης προσβάλλουν τις φάσεις, πλην όμως η προκύπτουσα υπέρταση δεν είναι σε θέση να δημιουργήσει σφάλμα στη γραμμή.

Βασικές παράμετροι της σχεδίασης μίας γραμμής μεταφοράς, όσον αφορά τη μόνωσή της, είναι το διάκενο αέρα ανάμεσα στις φάσεις και τους πύργους, το μήκος ερπυσμού των μονωτήρων, το διάκενο αέρα μεταξύ φάσεων και αγωγών προστασίας και, τέλος, το διάκενο αέρα μεταξύ διαφορετικών φάσεων και η ποιότητα της γείωσης.

Όπως είναι γνωστό, υπάρχουν δύο ενδεχόμενα δημιουργίας ανάστροφης διάσπασης [231]:

- είτε εάν προβληθεί απ' ευθείας ένας πυλώνας ή ένας αγωγός προστασίας από κεραυνό, οπότε ανυψώνεται το δυναμικό του πυλώνα.
- είτε εάν, αφού προσβληθεί μία φάση από κεραυνό και διασπαστεί η μόνωση της, ανυψωθεί το δυναμικό του πυλώνα, οπότε, ενδεχομένως, σημειώνεται ανάστροφη διάσπαση μεταξύ πυλώνα και μίας υγιούς μέχρι τότε φάσεως.

Υπάρχουν, όμως, μέθοδοι που επιτρέπουν την εκτίμηση των κατ' έτος σφαλμάτων της γραμμής των οφειλόμενων σε ανάστροφη διάσπαση, δίνοντας αποτελέσματα που βρίσκονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα δεδομένα της πράξης. Μία τέτοια, απλή σχετικά, μέθοδος παρατίθεται στη συνέχεια, αφού πρώτα αναφερθούν οι παραδοχές της μεθόδου [231-233]:

1. Όταν ένας κεραυνός προσβάλει μια γραμμή, το ρεύμα του διαμοιράζεται εξ ίσου προς τις δύο κατευθύνσεις.
2. Ο πυλώνας διαρρεόμενος από κρουστικό ρεύμα συμπεριφέρεται σαν μία αυτεπαγωγή (τιμής κατ' εκτίμηση 0,4μH· θεωρητικές εκτιμήσεις οδηγούν σε τιμές αυτεπαγωγής 0,5 έως 0,7μH, ενώ οι μετρήσεις δίνουν τιμές κάτω από 0,3μH) [96].
3. Η γείωση του πύργου αποτελείται από μία ωμική αντίσταση, η οποία μετριέται σε βιομηχανική συχνότητα σε σειρά με μία αυτεπαγωγή τιμής περίπου 5μH.
4. Ανάστροφη διάσπαση εμφανίζεται σε περισσότερες από μία φάσεις, όταν η ανύψωση δυναμικού του πυλώνα ξεπερνάει το $1,15U_a$, αντίθετα όταν αυτή είναι μεταξύ $0,85U_a$ και $1,15U_a$ δημιουργείται μονοφασική διάσπαση.
5. Δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης τιμής και της κλίσης μετώπου του κεραυνικού ρεύματος.
6. Για κάθε περιοχή υπολογίζονται οι τάσεις U_1 , U_2 και U_3 :

$$U_1 = 0,85 \cdot U_a - L \frac{di}{dt} \quad (4.98)$$

$$U_2 = U_a - L \frac{di}{dt} \quad (4.99)$$

$$U_3 = 1,5 \cdot U_a - L \frac{di}{dt} \quad (4.100)$$

όπου $L = 5 + 0,4 = 5,4\mu\text{H}$.

Σε γραμμή με αγωγό προστασίας εμφανίζεται μονοφασικό σφάλμα για κάθε κεραυνό ρεύματος I , εάν ισχύει:

$$U_3 > R \cdot \frac{I}{2} \geq U_1 \quad (4.101)$$

και πολυφασικό εάν:

$$R \cdot \frac{I}{2} \geq U_3 \quad (4.102)$$

Όταν η γραμμή μεταφοράς δεν διαθέτει αγωγό προστασίας, διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

α) Προσβολή του πύργου: Τότε εμφανίζεται μονοφασικό σφάλμα εάν

$$U_3 > R \cdot I \geq U_1 \quad (4.103)$$

και πολυφασικό εάν

$$R \cdot I \geq U_3 \quad (4.104)$$

β) Προσβολή φάσεως: Σε αυτή την περίπτωση, μετά το αρχικό μονοφασικό σφάλμα, εμφανίζεται, σε μία από τις λοιπές υγιείς φάσεις, ανάστροφη διάσπαση εάν

$$R \cdot I \geq U_2 \quad (4.105)$$

Ο αριθμός των κεραυνοπληξιών N_L σε μία γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανά 100 km και έτος δίνεται από την σχέση [96]:

$$N_L = 0.004 \cdot T^{1.35} \cdot (b + 4 \cdot h^{1.09}) \quad (4.106)$$

όπου T είναι το κεραυνικό επίπεδο στην περιοχή της γραμμής (μέρες καταιγίδας / έτος), h είναι το μέσο ύψος του αγωγού προστασίας και b είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ των αγωγών προστασίας

Ο μέσος ετήσιος ρυθμός σφαλμάτων $A.F.N.$ ανά 100km γραμμής μεταφοράς δίνεται από την εξίσωση [96]:

$$A.F.N. = N_L \cdot F.P. \quad (4.107)$$

όπου $F.P.$ είναι η ετήσια πιθανότητα σφάλματος.

4.6.2 Μέθοδος προσομοίωσης

Η ανάλυση της αξιοπιστίας των τεχνολογικών συστημάτων αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς. Όλο και περισσότεροι (σχεδιαστές και χειριστές) ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη πιο εκλεπτυσμένων μεθόδων μοντελοποίησης και προσέγγισης. Το βασικό πρόβλημα είναι η επίτευξη ισορροπίας ανάμεσα σ' ένα ρεαλιστικό μοντέλο και στον όγκο των αναγκαίων υπολογισμών που χρειάζονται για να επιλυθεί το εκάστοτε αντιμετωπιζόμενο πρόβλημα σε λογικά χρονικά όρια.

Έχουν αναπτυχθεί δύο κύριες μεθοδολογίες για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας [234, 235] σύνθετων τεχνολογικών συστημάτων:

1. Η αναλυτική μεθοδολογία που βασίζεται στην απαρίθμηση και ανάλυση των καταστάσεων που μπορεί να οδηγήσουν σε κατάσταση βλάβης. Θεωρείται σαν μία τυπική μέθοδος για τον προσδιορισμό συγκεκριμένων βλαβών στο σύστημα. Πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η μεγάλη ευκολία στο να ανιχνεύει σπάνια, αλλά σημαντικά, ενδεχόμενα βλαβών [234].
2. Η προσομοίωση με τη μέθοδο Monte-Carlo των διαδικασιών που συμβαίνουν στο σύστημα. Η μέθοδος αυτή χειρίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια τις βλάβες που συμβαίνουν πιο συχνά στα στοιχεία του συστήματος ανεξάρτητα αν προκαλούν βλάβη στο σύστημα ή παρακάμπτονται με χρήση άλλων στοιχείων. Η μέθοδος της προσομοίωσης χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις που χρειάζεται να αναλυθεί η χρονολογική σειρά των ενδεχομένων. Ο χρόνος υπολογισμών εξαρτάται πολύ λίγο από το μέγεθος του συστήματος (σε σχέση με την εξάρτηση της αναλυτικής μεθόδου) [234-238].

Κάθε προσέγγιση με τη χρήση της μεθόδου Monte-Carlo προϋποθέτει τη δημιουργία των κατάλληλων τιμών των τυχαίων μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν σε συμφωνία με την αντίστοιχη συνάρτηση κατανομής που προτείνεται για το μοντέλο. Για να επιτευχθεί αυτό, παράγονται, αρχικά, ομοιόμορφα κατανεμημένοι τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα 0 έως 1 και, στη συνέχεια, μέσω κατάλληλων μετασχηματισμών παράγεται το αντίστοιχο σύνολο τυχαίων αριθμών με τη δεδομένη συνάρτηση κατανομής.

Η παραγωγή τυχαίων αριθμών στηρίζεται σε υπολογισμούς με τη βοήθεια αναδρομικών σχέσεων υπολογισμού υπολοίπων (modulo m) που προκύπτουν από ένα γραμμικό μετασχηματισμό.

Η εσωτερική παραγωγή αριθμών που χρησιμοποιείται είναι η πολλαπλασιαστική μέθοδος σύγκλισης (στην οποία τα υπόλοιπα διαδοχικών δυνάμεων ενός αριθμού X αποτελούν τους διαδοχικούς αριθμούς σε μία σειρά τυχαίων αριθμών) δηλαδή [232, 233]:

$$X_i = (p \cdot X_{i-1} + b) \bmod m \quad (4.108)$$

Οι ζητούμενοι αριθμοί λαμβάνονται από τη σχέση:

$$u_i = \frac{X_i}{m} \quad (4.109)$$

Όταν χρησιμοποιείται μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών πρέπει να προσδιοριστεί η παράμετρος p (πολλαπλασιαστής), η αρχική τιμή X_0 και ο διαιρέτης m . Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν: $m=714025$, $p=1366$, $b=150889$, $X_0=8999$ για την παραγωγή του μέγιστου κεραυνικού ρεύματος, $X_0=6777$ για την παραγωγή της κλίσης του κεραυνικού ρεύματος, $X_0=7888$ για την παραγωγή του είδους του κεραυνού [232, 233].

Προφανώς, οι τυχαίοι αριθμοί, που παράγονται με τις παραπάνω διαδικασίες, μπορούν να αναπαραχθούν ακριβώς οι ίδιοι και για το λόγο αυτό αποτελούν ένα αιτιοκρατικό σύνολο. Άρα οι αριθμοί αυτοί δεν είναι ακριβώς τυχαίοι, γι' αυτό ονομάζονται ψευδο-τυχαίοι. Για μεγάλες τιμές του m παρουσιάζονται ομοιόμορφα κατανεμημένοι και στατιστικά ανεξάρτητοι.

Στην προσομοίωση Monte-Carlo δεν αρκεί να παραχθούν τυχαίοι αριθμοί που να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι, αλλά πρέπει να μετασχηματισθούν στη συγκεκριμένη συνάρτηση κατανομής που μας ενδιαφέρει.

Επειδή τα μεγέθη που προσομοιώνονται ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ και διασπορά σ χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός [232-234]:

$$X_1 = \mu + \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln u_1} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot u_2) \quad (4.110)$$

$$X_2 = \mu + \sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln u_1} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot u_2) \quad (4.111)$$

Επομένως, X_1, X_2 είναι ένα ζεύγος τυχαίων αριθμών που ακολουθούν την κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma)$.

4.6.3 Εφαρμογή μεθόδου προσομοίωσης

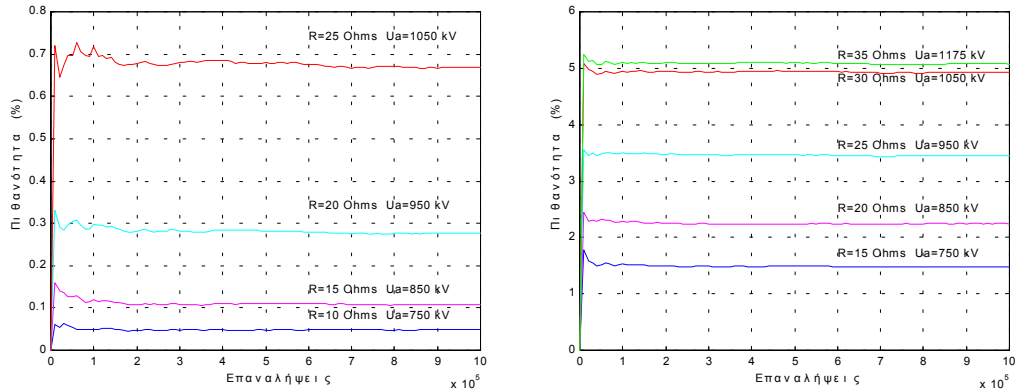
Στη συγκεκριμένη εφαρμογή μελετάται η πιθανότητα ύπαρξης ανάστροφης διάσπασης σε γραμμές υψηλής τάσης με αγωγούς προστασίας εξαιτίας κεραυνοπληξίας. Επομένως για την ανάστροφη διάσπαση ισχύουν οι τύποι (4.98-4.102). Για την παραγωγή τυχαίων αριθμών ομοιόμορφα κατανεμημένων στο διάστημα $[0,1]$ ισχύουν οι τύποι (4.108-4.111) αντικαθιστώντας τις τιμές που αναφέρονται στην αντίστοιχη παράγραφο. Για την προσομοίωση της κεραυνοπληξίας έχει γίνει παραδοχή α) ότι το 80% των κεραυνών είναι αρνητικοί και το 20% είναι θετικοί και β) ότι η μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος και η κλίση του κεραυνικού ρεύματος ακολουθούν την κανονική κατανομή και επιπλέον δεν υπάρχει αλληλοσυσχέτιση μεταξύ τους. Η μέση τιμή και η διασπορά τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα [239].

| Είδος κεραυνού | Παράμετρος | Μέση τιμή μ | Διασπορά σ |
|----------------|------------|-----------------|-------------------|
| Θετικός | I_{max} | 35 kA | 15 kA |
| Θετικός | di/dt | 2,4 kA/μs | 1,1 kA/μs |
| Αρνητικός | I_{max} | 30 kA | 7,5 kA |
| Αρνητικός | di/dt | 40 kA/μs | 14 kA/μs |

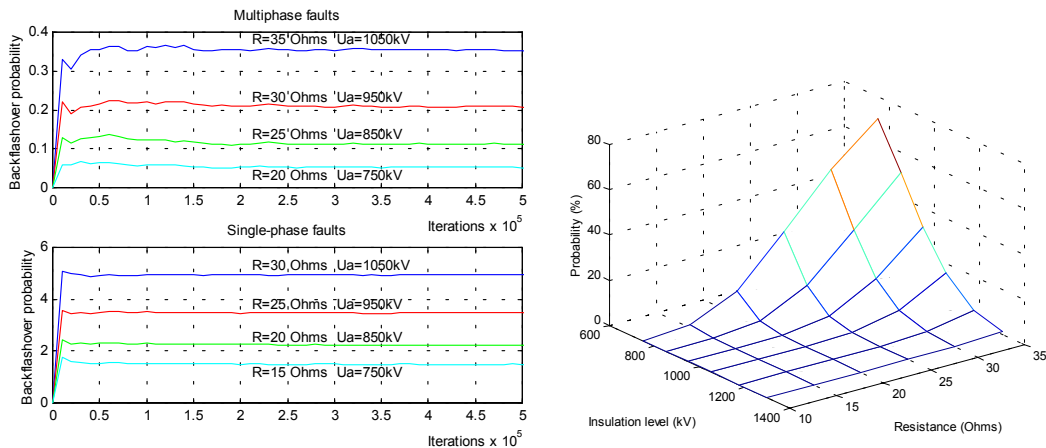
Πίνακας 4.17: Χαρακτηριστικά μεγέθη κεραυνων [239]

Πραγματοποιήθηκαν σειρές προσομοιώσεων μεταβάλλοντας την αντίσταση γείωσης από 10 έως 35Ω και τη στάθμη μόνωσης προστασίας από 750 έως 1300kV. Έχουν θεωρηθεί συστήματα με μέτρια έως πολύ καλή γείωση και μόνωση προστασίας που είναι ανάλογη με το πόσο καλή είναι η στάθμη μόνωσης της γραμμής μεταφοράς. Οι γραφικές παραστάσεις της πιθανότητας σφάλματος συναρτήσει του αριθμού των επαναλήψεων της μεθόδου παρουσιάζονται στα σχήματα 4.53 και 4.54

Παρατηρείται ότι μετά από εκατό χιλιάδες επαναλήψεις έχει επέλθει σύγκλιση για όλες τις περιπτώσεις του παραδείγματος.



Σχήμα 4.53: Πιθανότητα σφάλματος σε γραμμές με αγωγούς προστασίας



Σχήμα 4.54: Πιθανότητα σφάλματος σε γραμμές με αγωγούς προστασίας

Προκειμένου επαληθευθεί η προτεινόμενη μέθοδος εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές γραμμές μεταφοράς των 150kV από την ελληνική επικράτεια με στάθμη μόνωσης (BIL Basic Insulation Level) 750kV. Τα χαρακτηριστικά των γραμμών αυτών, καθώς και το μέσο επίπεδο κεραυνών κοντά στη γραμμή για αυτή την περιοχή και ο αριθμός σφαλμάτων που συνέβησαν στη γραμμή από το 1995 έως το 1999 παρουσιάζονται στον πίνακα 4.18.

Η γραμμή Ταυρωπός – Λαμία, εκτείνεται διαμέσου ορεινής περιοχής και περιλαμβάνει ένα διπλό κύκλωμα τριών φάσεων, 219 πυλώνες με μέση μεταξύ τους απόσταση 350m, μέσο ύψος αγωγών γείωσης 19m και οριζόντια απόσταση μεταξύ αγωγών γείωσης 9m. Η γραμμή Κιλκίς – Σέρρες, εκτείνεται διαμέσου πεδινής

περιοχής και περιλαμβάνει ένα απλό κύκλωμα τριών φάσεων, 162 πυλώνες με μέση μεταξύ τους απόσταση 360m, μέσο ύψος αγωγών γείωσης 19m και οριζόντια απόσταση μεταξύ αγωγών γείωσης 6,5m. Η γραμμή Ηγουμενίτσα – Σαγιάδα, εκτείνεται σε κατά μήκος ακτογραμμής και περιλαμβάνει ένα απλό κύκλωμα τριών φάσεων, 41 πυλώνες με μέση μεταξύ τους απόσταση 220m, μέσο ύψος αγωγών γείωσης 19m και οριζόντια απόσταση μεταξύ αγωγών γείωσης 6,5m.

| Όνομασία γραμμής | Μήκος [km] | Πυλώνες | Μέσο επίπεδο κεραυνών ανά έτος | Αριθμός σφαλμάτων ανά έτος |
|-----------------------|------------|---------|--------------------------------|----------------------------|
| Ταυρωπός – Λαμία | 75,384 | 219 | 22,2 | 6 |
| Κιλκίς – Σέρρες | 58,068 | 162 | 27,2 | 3 |
| Ηγουμενίτσα – Σαγιάδα | 75,384 | 41 | 41,6 | 3 |

Πίνακας 4.18: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς

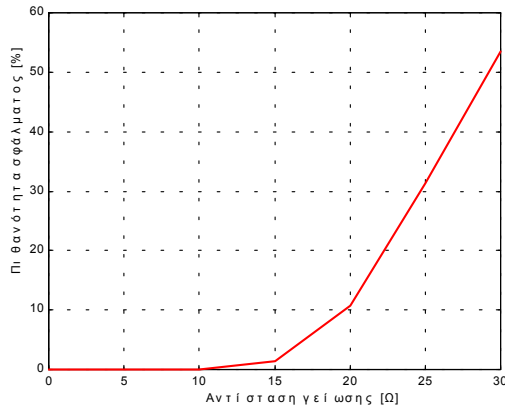
Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.106) για τα δεδομένα των τριών υπό εξέταση γραμμών μεταφοράς προκύπτει ο πίνακας 4.19 που περιέχει τον μέσο αριθμό κεραυνοπληξιών ανά γραμμή και έτος.

| Όνομασία γραμμής | b [m] | h [m] | T [μέρες καταγίδας/έτος] | N_L [αριθμός κεραυνοπληξιών /100km/έτος] | Μέσος αριθμός κεραυνοπληξιών γραμμής ανά έτος |
|-----------------------|---------|---------|----------------------------|--|---|
| Ταυρωπός – Λαμία | 9 | 19 | 22,2 | 28,4 | 21,4 |
| Κιλκίς – Σέρρες | 6,5 | 19 | 27,2 | 36,5 | 21,2 |
| Ηγουμενίτσα – Σαγιάδα | 6,5 | 19 | 41,6 | 64,8 | 48,8 |

Πίνακας 4.19: Μέσος αριθμός κεραυνοπληξιών ανά γραμμή και έτος

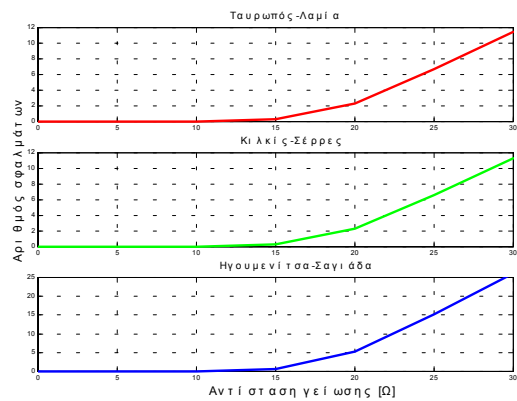
Στο σχήμα 4.56.α παρουσιάζεται η πιθανότητα ύπαρξης σφάλματος σε μία γραμμή μεταφοράς με αγωγούς προστασίας και στάθμη μόνωσης 750kV συναρτήσει της αντίστασης γείωσης των πυλώνων, ενώ στο σχήμα 4.56.β παρουσιάζεται ο ετήσιος αριθμός σφαλμάτων στις υπό εξέταση γραμμές. Παρατηρείται ότι για τη γραμμή Ταυρωπού-Λαμίας προκύπτει μία μέση αντίσταση γείωσης 24,2Ω, για τη γραμμή Κιλκίς-Σέρρες προκύπτει 20,8Ω, ενώ, τέλος, για τη γραμμή Ηγουμενίτσας-Σαγιάδας προκύπτει αντίσταση γείωσης 17,5Ω. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης των τιμών

της αντίστασης γείωσης είναι απολύτως λογικά και αναμενόμενα για τις τρεις γραμμές, γιατί η πρώτη γραμμή διέρχεται από ορεινό όγκο, η δεύτερη από πεδιάδα, ενώ η τρίτη οδεύει κατά μήκος της ακτογραμμής.



(α)

Σχήμα 4.56.α: Πιθανότητα σφάλματος γραμμής μεταφοράς στάθμης μόνωσης 750kV συναρτήσει της αντίστασης γείωσης των πυλώνων.



(β)

Σχήμα 4.56.β: Αριθμός σφαλμάτων συναρτήσει της αντίστασης γείωσης των πυλώνων.

4.7 Συμπεράσματα της υπολογιστικής προσέγγισης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τρόποι προσομοίωσης (κυκλωματικής και πεδιακής) της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης, καθώς και συγκρίσεις των προκυψάντων αποτελεσμάτων με αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και αποτελέσματα προσομοίωσης άλλων ερευνητών. Επίσης, παρουσιάστηκε η διαδικασία και ο υπολογισμός των παραμέτρων της πολυστρωματικής δομής του εδάφους με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Καθώς και μία μέθοδος προσομοίωσης Monte-Carlo που επιτρέπει την εκτίμηση της αντίστασης γείωσης των πυλώνων μίας γραμμής μεταφοράς.

Σε κάθε περίπτωση που πρέπει να τοποθετηθεί ένα σύστημα γείωσης ο χώρος τοποθέτησής του είναι δεδομένος (αφού καθορίζεται από την εγκατάσταση που αυτό προστατεύει). Στα πλαίσια της διατριβής αυτής προτάθηκε μεθοδολογία κατά την οποία με χρήση των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης του εδάφους (με τις ήδη υπάρχουσες μεθοδολογίες) υπολογίζονται, με μεγαλύτερη ακρίβεια από τις

υπάρχουσες μεθόδους, οι παράμετροι της πολυστρωματικής δομής του εδάφους. Στην παράγραφο 4.5 ανεδείχθη η αποτελεσματικότητα του γενετικού αλγορίθμου που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής αυτής, συγκρίνοντας τα αποτελέσματά του με αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Τα αποτελέσματα αυτά από τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου αποτελούν τα απαραίτητα δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλωματικές ή πεδιακές προσομοιώσεις των συστημάτων γείωσης.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο PC Opera επιτρέπει, με δεδομένη τη διαμόρφωση του εδάφους, να προχωρήσουμε στην αποδοτικότερη προσομοίωση και στον υπολογισμό του δυναμικού στην επιφάνεια του εδάφους. Στην παράγραφο 4.4 παρουσιάστηκε η σύγκριση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης, που προέκυψαν από τη χρήση του PC Opera, με αποτελέσματα άλλων μεθοδολογιών.

Τα αποτελέσματα της κυκλωματικής προσομοίωσης με χρήση του EMTDC, που προέκυψαν ακολουθώντας τη νέα μεθοδολογία υπολογισμού των παραμέτρων των π-ισοδυνάμων κυκλωμάτων, παρουσιάζονται και συγκρίνονται στην παράγραφο 4.3 α) με πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα διατριβή, β) με πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών και γ) με αποτελέσματα προσομοίωσης άλλων ερευνητών.

Τέλος, χρησιμοποιώντας την προσομοίωση Monte-Carlo, στην παράγραφο §4.6, υπολογίζονται οι αντιστάσεις γείωσης γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας κατασκευαστικά στοιχεία των γραμμών, τον αριθμό σφαλμάτων που συμβαίνουν στις γραμμές και μετεωρολογικά δεδομένα.