



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Ανάπτυξη λογισμικού υπολογισμού
χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε Matlab**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Χαράλαμπου Κ. Αντωνίου

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος
Επιβλέπων: Ιωάννης Ν. Ζτούπης

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

179

**Ανάπτυξη λογισμικού υπολογισμού
χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε Matlab**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Χαράλαμπου Κ. Αντωνίου

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπων: Ιωάννης Ν. Ζτούπης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27η Μαρτίου 2013.

Ιωάννης
Σταθόπουλος
Καθηγητής

Φραγκίσκος
Τοπαλής
Καθηγητής

Γεώργιος
Κορρές
Αναπλ. Καθηγητής

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....

Χαράλαμπος Κ. Αντωνίου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών

Copyright © Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στην οικογένειά μου

Περίληψη

Τα χαμηλόσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία υφίστανται λόγω των πολλαπλών εφαρμογών του ηλεκτρισμού σήμερα και αποτελούν αντικείμενο επιστημονικής μελέτης για τις πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις στον άνθρωπο. Στην παρούσα εργασία προσδιορίζονται αρχικά τα χαμηλόσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, παρουσιάζονται οι διάφορες πηγές εκπομπής τους, η βιολογική τους επίδραση και αναφέρονται τα όρια προστασίας έναντι των πεδίων αυτών. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους υπολογισμού των χαμηλόσυχνων πεδίων, όπως η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, η μέθοδος των ροπών, η μέθοδος οριακών στοιχείων καθώς επίσης και η υβριδική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων/οριακών στοιχείων. Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέθοδοι επίλυσης του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου στις οποίες στηρίχτηκε η υλοποίηση του λογισμικού σε Matlab, το οποίο αποτελεί και τον κύριο στόχο της διπλωματικής εργασίας. Επομένως, στη συνέχεια παρουσιάζεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής και ακολούθως γίνεται ο έλεγχος της ορθότητας του μέσα από συγκρίσεις που έγιναν με εμπορικό λογισμικό (CDEGS). Τέλος, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις διατάξεων στις οποίες πραγματοποιήθηκαν πραγματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται με τις μετρήσεις αυτές, καταλήγοντας σε χρήσιμα συμπεράσματα όσο αφορά τις αποκλίσεις του προγράμματος και τα διάφορα σφάλματα στις υπολογισμένες τιμές των πεδίων.

Λέξεις-Κλειδιά: Χαμηλόσυχνα ΗΜ Πεδία, Γραμμές μεταφοράς, Λογισμικό υπολογισμού πεδίων σε Matlab, Προσομοίωση πεδίων.

Abstract

Extremely-low-frequency (ELF) electromagnetic fields exist today because of the multiple applications of electricity and they are a subject of scientific study on their likely unfavourable repercussions on human health. In the present work, ELF fields are initially determined, their sources of exposure in the environment and their biological effects are presented, and their protection thresholds are specified. Afterwards, there is a detailed reference to the various calculation methods of the ELF fields, such as finite element method, the method of moments, the boundary element method and also the hybrid method of finite element/ boundary element. Therefore the solving methods of magnetic and electric field are analytically described, which led the development of a software in Matlab, which is the main target of this thesis. So then the developed software is outlined and then there is a control of accuracy through comparisons made with commercial software (CDEGS). Finally, some simulations of various provisions of transmission lines are made, and their results are compared with actual measurements, leading to useful conclusions regarding the discrepancies of the program and the various errors in the calculated values of the fields.

Keywords: Extremely low frequency EMF, Power Lines, Calculation software in Matlab, Field simulations.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάπτυξη λογισμικού σε Matlab για τον υπολογισμό χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που προέρχονται από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1. Στο κεφάλαιο αυτό προσδιορίζονται τα χαμηλόσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά τους, οι πηγές εκπομπής τους στο περιβάλλον, η βιολογική τους επίδραση (μακροχρόνια και βραχυχρόνια) καθώς επίσης και τα όρια προστασίας έναντι των πεδίων αυτών.

Κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις διάφορες αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού των χαμηλόσυχνων πεδίων. Μερικές από αυτές είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η μέθοδος των ροπών (MOM), η μέθοδος οριακών στοιχείων (BEM) καθώς επίσης και η υβριδική μέθοδος FEM/BEM. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού περιγράφονται αναλυτικά οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του προγράμματος για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (Νόμος Biot-Savart, CSM μέθοδος) για διαφορετικές διατάξεις και προσεγγίσεις αγωγών, όπως αγωγοί σε διαφορετικά ύψη, γραμμές όπου οι φάσεις τους δεν είναι παράλληλες μεταξύ τους, προσέγγιση ευθύγραμμων αγωγών ή αγωγών με βύθισμα κ.ο.κ.

Κεφάλαιο 3. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια μικρή εισαγωγή στο Matlab και στο γραφικό περιβάλλον GUI, στα οποία στηρίχτηκε η υλοποίηση του προγράμματος. Ακολούθως, γίνεται μια πρώτη γνωριμία με το πρόγραμμα και επεξηγούνται πλήρως οι δυνατότητές του καθώς επίσης και η λειτουργία του, όπου παρουσιάζονται και μερικές εφαρμογές.

Κεφάλαιο 4. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύγκριση του προγράμματος με ένα εμπορικό πρόγραμμα (CDEGS) για έλεγχο της ορθότητας και για την κατάληξη σε χρήσιμα συμπεράσματα όσο αφορά τις διάφορες αστοχίες και σφάλματα του λογισμικού στο Matlab. Έτσι προσομοιώνονται διάφορες διατάξεις γραμμών μεταφοράς και στα 2 προγράμματα και μέσα από γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου όσο και των σχετικών σφαλμάτων που προκύπτουν από τις συγκρίσεις αυτές.

Κεφάλαιο 5. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιούνται προσομοιώσεις διατάξεων γραμμών μεταφοράς στις οποίες έγιναν πραγματικές μετρήσεις στα πλαίσια μιας εργασίας και έτσι συγκρίνονται οι υπολογισμένες τιμές με τις πραγματικές τιμές και σχολιάζονται τα διάφορα αποτελέσματα παρουσιάζοντας τα σε διάφορα γραφήματα.

Κεφάλαιο 6. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται διάφορα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την ανάπτυξη του λογισμικού στο Matlab και ιδιαίτερα μέσω της σύγκρισης του με το εμπορικό λογισμικό αλλά και από τις πραγματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν. Τέλος παραθέτονται κάποιες προτάσεις και πιθανές υλοποιήσεις για την περαιτέρω βελτίωση του προγράμματος.

Παράρτημα Α'. Στο παράρτημα αυτό περιγράφονται οι εναέριες γραμμές μεταφοράς του ελληνικού συστήματος. Για τον υπολογισμό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δίνονται τα απαραίτητα στοιχεία όπως τα χαρακτηριστικά και οι θέσεις των αγωγών φάσης και γης, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πυλώνων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για τη συμπαράσταση και την ανεκτίμητη βοήθεια τους όλους όσους βοήθησαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, την υποστήριξη και συμπαράστασή του προς εμένα καθώς επίσης και το άριστο κλίμα συνεργασίας που καλλιέργησε.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, διδάκτορα μηχανικό του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη διάθεση του πολύτιμου χρόνου του προς καθοδήγηση μου και για τις χρήσιμες εισηγήσεις και συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Τον κ. Ιωάννη Ζτούπη, Υ.Δ της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την ανεξάντλητη βοήθεια, καθοδήγηση, στήριξη και συμπαράσταση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου οι οποίοι στάθηκαν στο πλευρό μου και μου συμπαραστάθηκαν σε κάθε δυσκολία κατά τη διάρκεια της διπλωματικής, αλλά και γενικότερα κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

Περιεχόμενα

1 Χαμηλόσυχνα πεδία	1
1.1 Πεδία Εξαιρετικά Χαμηλής Συχνότητας	1
1.2 Πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων	5
1.2.1 Ηλεκτρικές συσκευές	5
1.2.2 Εσωτερικές καλωδιώσεις	7
1.2.3 Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας	7
1.2.3.1 Δίκτυο διανομής μέσης τάσης	7
1.2.3.2 Δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης	7
1.2.3.3 Υποσταθμοί διανομής	7
1.2.4 Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	8
1.2.4.1 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	8
1.2.4.2 Υποσταθμοί υψηλής τάσης	9
1.3 Βιολογική επίδραση χαμηλόσυχνων πεδίων	10
1.3.1 Βραχυχρόνιες επιδράσεις	10
1.3.2 Μακροχρόνιες επιδράσεις	11
1.3.2.1 Καρκίνος	11
1.3.2.2 Παιδική λευχαιμία	11
1.3.2.3 Εγκυμοσύνη	11
1.3.2.4 Καταρράκτης	12
1.3.2.5 Σωματική και ψυχική υγεία	12
1.3.3 Συμπεράσματα	12
1.4 Όρια προστασίας έναντι των χαμηλόσυχνων πεδίων	13
2 Μέθοδοι υπολογισμού χαμηλόσυχνων πεδίων	19
2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	19
2.2 Μέθοδος των ροπών	21
2.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου των ροπών σε ευθύγραμμο αγωγό	22
2.3 Μέθοδος οριακών στοιχείων	25
2.4 Υβριδική μέθοδος FEM-BEM	27
2.5 Μέθοδοι επίλυσης χαμηλόσυχνων πεδίων	28
2.5.1 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου	28
2.5.1.1 Ευθύγραμμος αγωγός άπειρου μήκους - Νόμος Ampere	29

2.5.1.2	Αγωγός με βύθισμα	35
2.5.2	Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου	39
2.5.2.1	Ηλεκτρικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού	41
2.5.2.2	Αγωγός με βύθισμα	43
3	Ανάπτυξη λογισμικού για τον υπολογισμό χαμηλόσυχνων πεδίων κάτω από γραμμές μεταφοράς	51
3.1	Περιβάλλον ανάπτυξης της εφαρμογής	51
3.1.1	Το περιβάλλον του MATLAB	52
3.1.2	Δημιουργία και εκτέλεση m-files	53
3.1.3	Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI)	54
3.2	Λογισμικό υπολογισμού χαμηλόσυχνων πεδίων	57
4	Έλεγχος ορθότητας λογισμικού μέσω σύγκρισης με εμπορικό λογισμικό (CDEGS) και με επιστημονικά άρθρα	75
4.1	Σύγκριση με CDEGS	76
4.2	Σύγκριση με επιστημονικά άρθρα	112
5	Σύγκριση αποτελεσμάτων του λογισμικού με κανονικές μετρήσεις	117
5.1	Μετρήσεις χαμηλόσυχνων ΗΜΠ	117
5.2	Προσομοιώσεις	118
5.2.1	1 ^η Προσομοίωση	118
5.2.2	2 ^η Προσομοίωση	126
5.2.3	3 ^η Προσομοίωση	131
5.2.4	4 ^η Προσομοίωση	135
5.2.5	5 ^η Προσομοίωση	144
6	Συμπεράσματα/Επόμενη ημέρα	153
A'	Στοιχεία εναερίων γραμμών μεταφοράς	157
A'.1	Εναέριες γραμμές μεταφοράς	157
A'.1.1	Γραμμή μεταφοράς 150 kV – Δικτυωτοί πυλώνες	159
A'.1.2	Γραμμή μεταφοράς 150 kV – Συμπαγείς πυλώνες	163
A'.1.3	Γραμμή μεταφοράς 400 kV	164

Κεφάλαιο 1

Χαμηλόσυχνα πεδία

Χαμηλόσυχνα πεδία είναι τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από το δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα οι γραμμές μεταφοράς, οι υποσταθμοί υψηλής τάσης, το δίκτυο μέσης και χαμηλής τάσης αλλά και γενικότερα οι ηλεκτρικές καλωδιώσεις και συσκευές που υπάρχουν στα σπίτια μας.

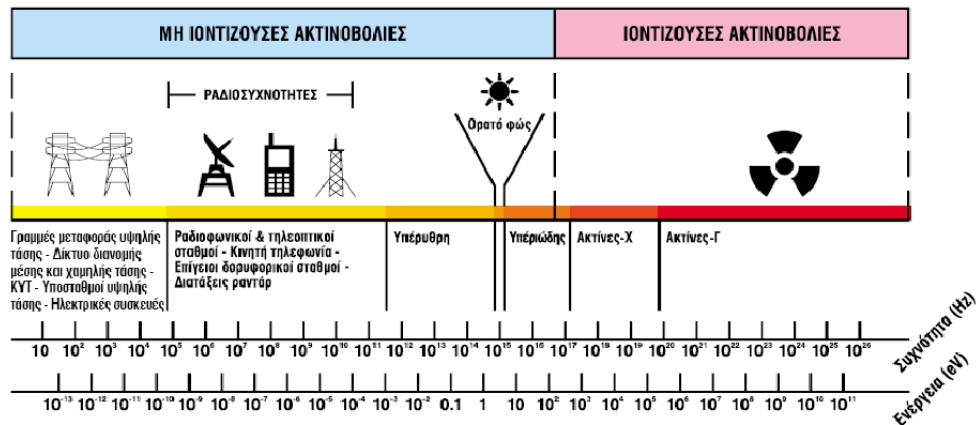
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στα πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας όπου αναφέρονται οι πηγές προέλευσης των πεδίων αυτών καθώς και οι επιπτώσεις τους στον άνθρωπο. Τέλος, παρατίθενται τα όρια προστασίας έναντι των πεδίων αυτών με βάση τα διεθνή, ευρωπαϊκά και ελληνικά θεσπισμένα όρια.

1.1 Πεδία Εξαιρετικά Χαμηλής Συχνότητας

Ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι ένας συνδυασμός ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων. Αυτές αναπαράγονται από φυσικά φαινόμενα, όπως το μαγνητικό πεδίο της γης, αλλά και από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως μέσω της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Κινητά τηλέφωνα, γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος και οθόνες υπολογιστών αποτελούν παραδείγματα εξοπλισμού που παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται από διαφορές της τάσης: όσο μεγαλύτερη είναι η τάση, τόσο ισχυρότερο είναι το πεδίο που δημιουργείται. Από την άλλη τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται όταν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος: όσο υψηλότερη είναι η ροή του ρεύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά που ορίζουν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (ΗΜΠ) είναι η συχνότητά του ή το αντίστοιχο μήκος κύματος.

Επομένως, ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (extremely low frequency electromagnetic fields - ELF) ονομάζονται τα πεδία που ανήκουν στην περιοχή συχνοτήτων από 30 Hz έως και 300 Hz του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Σχήμα 1.1). Τα αντίστοιχα μήκη κύματος τους κυμαίνονται από

1000 έως 100000 km. Τα πεδία ELF και τα ραδιοκύματα μαζί με την υπέρυθρη, την ορατή και την υπεριώδη ακτινοβολία συνθέτουν το φάσμα των μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών, οι οποίες είναι αδύνατο να προκαλέσουν ιοντισμό της ύλης (διάσπαση χημικών δεσμών).



Σχήμα 1.1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Πηγή: [1]).

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς και οι υποσταθμοί υψηλής (ΥΤ) και μέσης τάσης (ΜΤ), που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργούν γύρω τους ένα ΗΜΠ το οποίο εμπίπτει στα πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας. Η συχνότητα του συγκεκριμένου πεδίου είναι 50 Hz για τις χώρες της Ευρώπης και 60 Hz για τις ΗΠΑ. Όπως κάθε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έτσι και αυτά περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\text{rot}\vec{E} = -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (1.1)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \sigma\vec{E} + \epsilon \frac{d\vec{E}}{dt} \quad (1.2)$$

όπου:

\vec{E} : ένταση του ηλεκτρικού πεδίου,

\vec{H} : ένταση του μαγνητικού πεδίου,

μ : μαγνητική διαπερατότητα,

ϵ : διηλεκτρική σταθερά και,

σ : ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Για διάδοση στον ατμοσφαιρικό αέρα ισχύουν τα εξής:

$$\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (1.3)$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (1.4)$$

$$\sigma = \sigma_{\alpha\epsilon\rho\alpha} = 0 \text{ S/m} \quad (1.5)$$

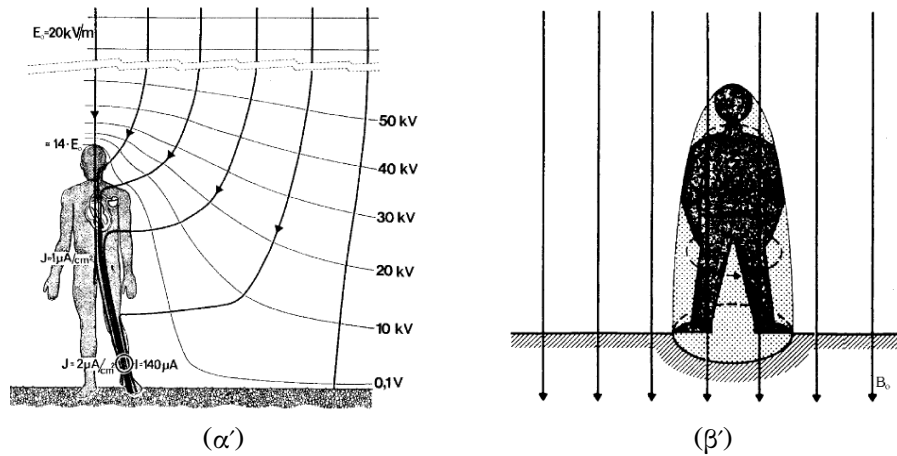
Στη συχνότητα των 50 Hz οι χρονικές μεταβολές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι αμελητέες και μπορούν να αγνοηθούν. Επομένως, οι εξισώσεις του Maxwell απλοποιούνται και προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{rot}\vec{E} \cong 0 \quad (1.6)$$

$$\text{rot}\vec{H} \cong 0 \quad (1.7)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι ουσιαστικά έχουμε ανεξαρτησία μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου. Δεν υπάρχει δηλαδή ζεύξη μεταξύ των πεδίων εντάσεων \vec{E} και \vec{H} αλλά δύο ασύνδετα πεδία, το ηλεκτρικό το οποίο εξαρτάται από τις τάσεις των αγωγών και το μαγνητικό το οποίο εξαρτάται από τις εντάσεις ρεύματος των αγωγών. Σαν επακόλουθο τα πεδία αυτά μπορούν να μελετηθούν ανεξάρτητα στο χώρο, γεγονός που καθιστά την ανάλυση ευκολότερη.

Τα ηλεκτρικά πεδία παραμορφώνονται όταν σε αυτά εισέλθουν αγωγιμες διατάξεις. Επομένως επενδύοντας ένα χώρο με αγωγίμο υλικό επιτυγχάνεται η θωράκιση του έναντι των ηλεκτρικών πεδίων. Από την άλλη τα χαμηλόσυχνα μαγνητικά πεδία διαπερνούν χωρίς παραμόρφωση τα μη μαγνητικά υλικά. Αυτό διευκολύνει πολύ στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου αλλά δυσχεραίνει πολύ την θωράκιση του, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση ειδικών μαγνητικών υλικών σε κατάλληλη διάταξη. Στα ακόλουθα σχήματα είναι εμφανές η παραμόρφωση του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου και η μη παραμόρφωση του μαγνητικού λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ανθρώπινου σώματος. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 1.2α είναι εμφανή η παραμόρφωση του ηλεκτρικού πεδίου το οποίο εμφανίζει την μέγιστη ένταση του στην κεφαλή του ανθρώπου $E_{max} = 14E_0$, όπου E_0 η ένταση του ομογενούς πεδίου. Παραμόρφωση εμφανίζεται επίσης και στις ισοδυναμικές γραμμές, έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού μεταξύ κεφαλής και των ποδιών να είναι περίπου 0.1V. Σε αντίθεση προς το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο (Σχήμα 1.2β) παραμένει αμετάβλητο διαπερνώντας τον ανθρώπινο οργανισμό χωρίς παραμόρφωση [2].



Σχήμα 1.2: Άνθρωπος σε α) ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, β) ομογενές μαγνητικό πεδίο (Πηγή: [2]).

Τόσο τα ηλεκτρικά όσο και τα μαγνητικά πεδία εμφανίζουν υψηλότερη ένταση κοντά στην πηγή τους. Καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή τα πεδία μειώνονται σημαντικά. Η απόσβεση αυτή είναι συνήθως αντιστρόφως ανάλογη, είτε της απόστασης, είτε της δύναμης της απόστασης από την πηγή με ταχύτερες μειώσεις πλησίον της πηγής και πιο αργές μειώσεις μακριά της. Συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

Ηλεκτρικά πεδία	Μαγνητικά πεδία
<ol style="list-style-type: none"> 1. Τα ηλεκτρικά πεδία προκύπτουν από την τάση. 2. Η έντασή τους μετράται σε Volt ανά μέτρο (V/m). 3. Σε μια συσκευή υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, ακόμα κι αν είναι σβηστή (αλλά συνδεδεμένη στην πρίζα). 4. Η ένταση του πεδίου μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. 5. Τα περισσότερα υλικά των κτιρίων θωρακίζουν σε κάποιο βαθμό τα ηλεκτρικά πεδία. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Τα μαγνητικά πεδία προκύπτουν από τη ροή του ρεύματος. 2. Η έντασή τους μετράται σε αμπέρ ανά μέτρο (A/m). Συνήθως, οι ερευνητές στον τομέα των ΗΜΠ χρησιμοποιούν μια αντίστοιχη μονάδα, την πυκνότητα ροής, που εκφράζεται σε μικροτέσλα (μT) ή मिलीτεσλα (mT). 3. Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται μόλις ενεργοποιηθεί μια συσκευή και αρχίσει η ροή ρεύματος. 4. Η ένταση του πεδίου μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή. 5. Τα περισσότερα υλικά δεν είναι σε θέση να προκαλέσουν εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Πίνακας 1.1: Βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων (Πηγή: [4]).

1.2 Πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων

Οι σημαντικότερες πηγές παραγωγής ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων ELF μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες:

- Ηλεκτρικές συσκευές
- Εσωτερικές καλωδιώσεις
- Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
- Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

1.2.1 Ηλεκτρικές συσκευές

Όλες οι ηλεκτρικές συσκευές όταν λειτουργούν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Επομένως, εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο παράγουν και μαγνητικό πεδίο στο περιβάλλον τους. Λόγω του ότι τα πεδία αυτά εξασθενούν πολύ γρήγορα καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή (συσκευή), έχουν σημαντική τιμή μόνο σε πολύ μικρές αποστάσεις μικρότερες από ένα μέτρο. Σε αποστάσεις πολύ κοντά με την συσκευή είναι δυνατόν να αναπτυχθεί μαγνητικό πεδίο εκατοντάδων μT , όπως για παράδειγμα ξυριστικές μηχανές και τα σεσουάρ των μαλλιών, όπου η χρήση τους προϋποθέτει επαφή των συσκευών με το ανθρώπινο σώμα. Λόγω της φύσης των ηλεκτρικών συσκευών, η έκθεση τους εστιάζεται τοπικά σε μια μικρή περιοχή του σώματος. Αυτό σε συνδυασμό με την περιορισμένη τους χρήση (περιορισμένο χρονικό διάστημα), καθιστά τη σύζευξη του μαγνητικού πεδίου με το σώμα εξαιρετικά ασθενή. Στη συντριπτική πλειοψηφία των ηλεκτρικών συσκευών δεν παρατηρείται υπέρβαση των επιπέδων αναφοράς των $100\mu\text{T}$ που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελληνική νομοθεσία για την συχνότητα των 50 Hz (Σχήμα 1.3 και Σχήμα 1.4). Παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο οι ηλεκτρικές συσκευές, εφόσον βρίσκονται υπό τάση παράγουν και ηλεκτρικό πεδίο του οποίου οι τιμές είναι εξαιρετικά χαμηλές και πολύ πιο κάτω από τα επιτρεπτά όρια έκθεσης.



Σχήμα 1.3: Επίπεδα μαγνητικού πεδίου από οικιακές συσκευές (Πηγή: [1]).

Οικιακή Συσκευή	ΕΝΤΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ (μΤ)		
	3 cm	30 cm	1 m
Επιρροϊκή μηχανή	10-900	0,05-9	0,01-0,2
Στεγνωτήρας μαλλιών	8-800	0,01-7	0,01-0,03
Λαμπτήρας φθορισμού	40-400	0,5-2	0,02-0,25
Ηλεκτρική κουζίνα	1-50	0,15-0,5	0,01-0,04
Φούρνος μικροκυμάτων	5-100	0,4-8	0,15-0,5
Ψυγείο	0,5-1,7	0,01-0,3	0,01-0,05
Πλυντήριο ρούχων	0,8-40	0,15-3	0,01-0,15
Πλυντήριο πιάτων	1-15	0,2-2	0,07-0,3
Ηλεκτρικό σίδερο	3-30	0,14-0,3	0,01-0,03
Ηλεκτρική σκούπα	60-500	0,8-12	0,08-0,8
Φορητό ραδιόφωνο	1-15	0,4-1,5	0,01-0,1
Τηλέφωνο	2-80	0,04-8	0,01-0,9
Βιντεοκάμερα	0,6-20	0,7-2,5	0,01-0,03
Φωτοτυπικό	0,6-40	0,1-2,7	0,01-0,3
Συσκευή FAX	0,4-1,5	0,01-0,2	0,01-0,02
Οθόνη υπολογιστή	1-60	0,02-5	0,01-0,6
Ηλεκτρικά προϊόντα	4-200	0,2-3,3	0,01-0,8

Πίνακας 1.2: Επίπεδα μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικές συσκευές (Πηγή: [1]).

1.2.2 Εσωτερικές καλωδιώσεις

Οι καλωδιώσεις που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία των συσκευών δημιουργούν και αυτές με τη σειρά τους μαγνητικά κυρίως πεδία, τα οποία οφείλονται στο ηλεκτρικό ρεύμα που τις διαρρέει. Στις κτιριακές εγκαταστάσεις τα μαγνητικά πεδία αλληλοαναιρούνται αφού λειτουργούν σύμφωνα με τους κανονισμούς ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Μόνο σε περιπτώσεις λανθασμένης συνδεσμολογίας ή ύπαρξης διαρροών, κατά τις οποίες δεν πληρούνται οι κανονισμοί, είναι δυνατόν να εμφανιστούν μεγάλα επίπεδα μαγνητικών πεδίων στο περιβάλλον των καλωδιώσεων.

1.2.3 Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από το δίκτυο χαμηλής και μέσης τάσης καθώς επίσης και από τους υποσταθμούς διανομής. Τα τμήματα αυτά αποτελούν σημαντικές πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, τα οποία εξετάζονται ξεχωριστά παρακάτω.

1.2.3.1 Δίκτυο διανομής μέσης τάσης

Οι γραμμές μέσης τάσης (20KV), οι οποίες είναι εναέριες ή υπόγεια καλώδια αποτελούν βασικές πηγές των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας. Οι εναέριες γραμμές δημιουργούν τόσο ηλεκτρικά όσο και μαγνητικά πεδία σε αντίθεση με τις υπόγειες οι οποίες δημιουργούν μόνο μαγνητικά πεδία αφού το ηλεκτρικό θωρακίζεται από τις μεταλλικές γειώσεις. Λόγω της ηλεκτρικής συνδεσμολογίας τους, οι γραμμές αυτές δεν εμφανίζουν ασυμμετρίες στα ρεύματα οι οποίες είναι εμφανείς στις γραμμές χαμηλής τάσης.

1.2.3.2 Δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης

Όλες οι γραμμές (εναέριες, συνεστραμμένα καλώδια, υπόγεια και επιτοίχια καλώδια) χαμηλής τάσης (220/380V) δημιουργούν στο περιβάλλον τους μαγνητικά κυρίως πεδία μερικών μT , ενώ λόγω χαμηλής τάσης τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται είναι αμελητέα. Όπως προαναφέρθηκε, η ύπαρξη ασυμμετριών στα ρεύματα των αγωγών χαμηλής τάσης δημιουργεί τα ρεύματα επιστροφής, τα οποία είναι υπεύθυνα στην πρόκληση μαγνητικών πεδίων που εξασθενούν σχετικά αργά με την απόσταση από τη γραμμή.

1.2.3.3 Υποσταθμοί διανομής

Οι υποσταθμοί διανομής τοποθετούνται συνήθως εναερίως πάνω σε κατασκευές που αποτελούνται από δύο κολώνες ή σε εσωτερικούς χώρους στα υπόγεια μεγάλων κτιρίων. Πρακτικά στο περιβάλλον των υποσταθμών διανομής τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από τις γραμμές μέσης

και χαμηλής τάσης που συνδέονται σε αυτούς και όχι από τον μετασχηματιστή. Επειδή οι γραμμές χαμηλής τάσης τροφοδοτούνται από τους υποσταθμούς αυτών, είναι λογικό το ρεύμα τους να είναι μεγαλύτερο κοντά στον υποσταθμό από ότι μακριά από αυτόν, όπου θα έχουν υπάρξει αρκετές παροχτετεύσεις. Επομένως αναπτύσσονται μαγνητικά πεδία της τάξης μερικών μT κοντά στους αγωγούς (λιγότερο από ένα ή δύο μέτρα) και εξασθενούν σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα μερικά μέτρα πιο μακριά.

1.2.4 Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται από τις γραμμές μεταφοράς (εναέριες και υπόγειες) και από τους υποσταθμούς υψηλής τάσης και αποτελεί και αυτό με τη σειρά του μια από τις κυριότερες πηγές παραγωγής πεδίων.

1.2.4.1 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Με τον όρο γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε τις εναέριες γραμμές υψηλής τάσης (150KV και 66KV) και υπερυψηλής τάσης (400KV) καθώς και τις υπόγειες γραμμές υψηλής τάσης. Οι ρευματοφόροι αγωγοί δημιουργούν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία έχουν τις μέγιστες τους τιμές ακριβώς κάτω από αυτούς και καθώς η απόσταση αυξάνεται τα πεδία μειώνονται σημαντικά. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται είναι πρακτικά σταθερό σε όσο διάστημα η γραμμή βρίσκεται υπό τάση. Σε σπάνιες περιπτώσεις οι γραμμές βγαίνουν εκτός λειτουργίας, για λόγους συντήρησης ή επισκευής βλαβών. Σε αντίθεση το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογο της μεταφοράς ενέργειας η οποία ως γνωστό δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την ώρα και την ημέρα. Έτσι για παράδειγμα το μέγιστο μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται συνήθως τις μεσημβρινές ώρες κατά τους θερινούς μήνες και τις μεσημβρινές ή τις πρώτες βραδινές ώρες κατά τους χειμερινούς μήνες. Επιπρόσθετα, τα μεγέθη των παραγόμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων εξαρτώνται και από τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά της γραμμής τα οποία εξετάζονται περιληπτικά παρακάτω.

- Απόσταση αγωγών από την γη.

Όσο μικρότερη είναι η απόσταση αυτή τόσο μεγαλύτερα είναι τα δημιουργούμενα πεδία στο έδαφος κάτω από τους αγωγούς. Επομένως, μέγιστη ένταση των πεδίων εμφανίζεται στο κέντρο μεταξύ των δύο πυλώνων, όπου λόγω βυθίσματος της γραμμής η απόσταση του από το έδαφος είναι η μικρότερη στο σημείο αυτό. Από την άλλη, κοντά στους πυλώνες η απόσταση είναι η μέγιστη δυνατή και επομένως τα πεδία εμφανίζουν τις χαμηλότερες τιμές. Λόγω της τάσεως των γραμμών υπάρχει μια ελάχιστη τηρούμενη απόσταση των αγωγών από τις οροφές κτιρίων.

Αυτή είναι 7m για τις γραμμές των 400KV και 5m για τις γραμμές των 150KV.

- η διάταξη των φάσεων των αγωγών.

Ανάλογα με τη διάταξη των φάσεων μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση των πεδίων γι' αυτό οι γραμμές υπερυψηλής τάσης συνήθως κατασκευάζονται με την βέλτιστη διάταξη φάσεων.

- η απόσταση μεταξύ των ρευματοφόρων αγωγών της γραμμής.

Στις γραμμές υψηλής τάσης οι αποστάσεις των ρευματοφόρων αγωγών είναι αρκετά μικρότερες σε σχέση με αυτές των συνήθων γραμμών. Οι γραμμές μειωμένων διαστάσεων δημιουργούν πολύ μικρότερα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, κυρίως λόγω της αλληλοεξουδετέρωσης που προκαλούν οι εναλλαγές στην ένταση και την κατεύθυνση του ρεύματος και της τάσης του κάθε αγωγού της γραμμής.

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται ενδεικτικές τιμές των πεδίων για τις διάφορες κατηγορίες εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας.

		ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ (μΤ)	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ (V/m)
Γραμμές 400 kV (μεταλλικοί πυλώνες)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	25	5000
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	1 - 4	2000 - 4000
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0,5 - 2	200 - 500
Γραμμές 150 kV (μεταλλικοί πυλώνες)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	15	2000
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	0,5 - 2	1000 - 2000
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0,1 - 0,2	100 - 300
Γραμμές 150 kV (μεταλλικοί ιστοί)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	10	1200
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	0,3 - 1,5	500 - 1000
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	00,5 - 0,2	50 - 100
Γραμμές 20 kV (ξύλινες κολώνες)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	5	700
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	0,2 - 0,5	200
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0,01 - 0,05	10 - 20

Πίνακας 1.3: Επίπεδα μαγνητικού πεδίου από ηλεκτρικές συσκευές (Πηγή: [1]).

1.2.4.2 Υποσταθμοί υψηλής τάσης

Εντός των υποσταθμών υψηλής τάσης και των ΚΥΤ (κέντρα υπερυψηλής τάσης) οι πεδριακές εντάσεις είναι πολύ χαμηλές εμφανίζοντας αξιόλογες τιμές μόνο σε περιοχές κοντά στον εξοπλισμό. Εκτός των υποσταθμών υψηλής τάσης και των ΚΥΤ, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται οφείλονται αποκλειστικά από τις γραμμές μεταφοράς που συνδέονται σε αυτούς και όχι από τον εξοπλισμό τους.

1.3 Βιολογική επίδραση χαμηλόσυχνων πεδίων

Το θέμα των ενδεχόμενων επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τη διεθνή κοινότητα εδώ και αρκετά χρόνια. Οι πηγές των ΗΜΠ έχουν πολλαπλασιαστεί στη ζωή μας. Συνεχώς εμφανίζονται νέες εφαρμογές και δικαιολογημένα δημιουργούνται πολλά ερωτηματικά αναφορικά με τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό. Έχουν γίνει αρκετές μελέτες και δημοσιεύσεις για την επίδραση των ΗΜΠ στον άνθρωπο χωρίς να υπάρχουν σαφείς και βέβαιες ενδείξεις. Οι κίνδυνοι από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εκφράζονται σε βιολογικές επιδράσεις στον άνθρωπο, οι οποίες σχετίζονται με τις επιδράσεις των ακτινοβολιών στους πιο ευαίσθητους και επιρρεπείς σε βλάβες ιστούς, όπως στον εγκέφαλο, στα μάτια και στις γεννητικές περιοχές. Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπερβαίνουν κάποια όρια μπορούν να έχουν βιολογικές επιδράσεις. Πειράματα με υγιείς εθελοντές κατέδειξαν ότι η βραχυχρόνια έκθεση στα επίπεδα που υπάρχουν στο περιβάλλον ή στο σπίτι δεν προκαλούν προφανείς βλαβερές επιδράσεις. Η έκθεση σε υψηλότερα επίπεδα που μπορεί να είναι επιβλαβή, περιορίζεται από εθνικές και διεθνείς οδηγίες. Στις μέρες μας, ο προβληματισμός έχει επικεντρωθεί στις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλά επίπεδα.

1.3.1 Βραχυχρόνιες επιδράσεις

Όπως είναι γνωστό, λόγω της αγωγιμότητας του ανθρώπινου σώματος επάγονται σε αυτό ηλεκτρικά ρεύματα από τα ΗΜΠ. Οι επιδράσεις αυτές είναι γνωστές ως άμεσες επιδράσεις και εξαρτώνται αποκλειστικά από το μέγεθος των επαγόμενων ρευμάτων στο εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος. Από την άλλη υπάρχουν και οι έμμεσες επιδράσεις, όπως οι σπινθηρισμοί που μπορεί να δημιουργηθούν κατά την επαφή ενός ηλεκτρικά μονωμένου ως προς γη ανθρώπου με ένα γειωμένο αντικείμενο εντός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Οι σπινθηρισμοί αυτοί μπορεί να είναι αρκετά ενοχλητικοί αν το ηλεκτρικό πεδίο υπερβαίνει τα 5KV/m. Επιπρόσθετα μια ιδιαίτερα σημαντική επίδραση μπορεί να είναι η αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων με τη λειτουργία εμφυτευμένων καρδιακών βηματοδοτών ή με άλλα εμφυτεύματα στο ανθρώπινο σώμα. Οι σύγχρονοι όμως βηματοδότες είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να αποφεύγεται η όποια βλάβη η οποία προκύπτει από αυτές τις παρεμβολές και να διασφαλίζεται έτσι η λειτουργία τους παρουσία ισχυρών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

1.3.2 Μακροχρόνιες επιδράσεις

Για το ζήτημα των βιολογικών επιδράσεων και των ιατρικών προεκτάσεων της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας, η οποία ανήκει στο φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής ενέργειας, έχουν δημοσιευτεί πολλά άρθρα και έχουν διεξαχθεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη πολλές επιδημιολογικές, κλινικές και εργαστηριακές μελέτες. Πιο κάτω περιγράφονται περιληπτικά μερικοί τομείς της ανθρώπινης υγείας στους οποίους έχουν εμπλακεί τα ΗΜΠ χαμηλής συχνότητας.

1.3.2.1 Καρκίνος

Έγιναν πολλές έρευνες που εξέτασαν κατά πόσο τα ΗΜΠ προκαλούν ή όχι κάποιας μορφής καρκίνο. Δεν υπήρξαν μέχρι σήμερα αποδεικτικά στοιχεία που να τεκμηριώνουν ότι η έκθεση στα ΗΜΠ προκαλεί κάποιας μορφής καρκίνο.

Είναι γεγονός ότι υπήρξαν έρευνες με αντιφατικά αποτελέσματα. Όμως δεν παρατηρήθηκαν ποτέ μεγάλες αυξήσεις στον κίνδυνο για πρόκληση οποιασδήποτε μορφής κακοήθους νόσου σε παιδιά ή σε ενήλικες.

Παρά τα προβλήματα που υπήρξαν με διάφορες έρευνες, οι ειδικοί συγκλίνουν στο να αποδεχτούν ότι ο κίνδυνος έστω και εάν υποθετικά υπάρχει, τότε πρέπει να είναι πολύ μικρός.

1.3.2.2 Παιδική λευχαιμία

Ο κίνδυνος λευχαιμίας στα παιδιά συσχετίστηκε σε έρευνες με την έκθεση των παιδιών σε πολύ χαμηλής έντασης ΗΜΠ, στο σπίτι τους. Μερικές επιδημιολογικές έρευνες, έδειξαν ότι υπήρχε συσχετισμός έκθεσης σε ΗΜΠ πολύ χαμηλής έντασης και λευχαιμίας στα παιδιά. Όμως οι ειδικοί τονίζουν ότι εκείνο που φάνηκε ήταν μια αδύνατη σχέση συσχετισμού. Ουδέποτε αποδείχθηκε ότι τα χαμηλής έντασης ΗΜΠ είναι αιτία λευχαιμίας στα παιδιά ή στους ενήλικες

1.3.2.3 Εγκυμοσύνη

Γενικά, οι αποδείξεις καταδεικνύουν ότι η έκθεση σε πεδία τυπικών επιπέδων περιβάλλοντος δεν αυξάνει το ρίσκο για ανεπιθύμητες επιπτώσεις, όπως αποβολή, δυσμορφία, ελλιποβαρή νεογνά και συγγενείς παθήσεις. Έχουν υπάρξει περιστασιακά αναφορές για συσχετισμούς μεταξύ προβλημάτων υγείας και υποτιθέμενης έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, όπως π.χ. αναφορές για πρόωρους τοκετούς και ελλιποβαρή νεογνά από εργαζόμενους στον κλάδο των ηλεκτρονικών, χωρίς όμως η επιστημονική κοινότητα να θεωρήσει ότι οφείλονται απαραίτητα στην έκθεση σε πεδία. Είναι πιθανό ότι στις περιπτώσεις αυτές να υπήρξε έκθεση σε πεδία ασυνήθιστα ψηλά που δεν υπάρχουν στο σύνηθες καθημερινό περιβάλλον, έτσι δεν υπάρχουν στοιχεία που να μας επιτρέπουν να δηλώσουμε ότι αυτά είναι επιβλαβή στην ανθρώπινη υγεία.

1.3.2.4 Καταρράκτης

Σε εργαζόμενους που εκτίθενται σε ψηλά επίπεδα ραδιοσυχνοτήτων και σε ακτινοβολία μικροκυμάτων, έχουν περιγραφεί περιπτώσεις ερεθισμού των ματιών και καταρράκτη. Στα επίπεδα στα οποία εκτίθεται το πλατύ κοινό δεν προκαλούνται θερμικές αλλοιώσεις λόγω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Δεν υπάρχουν στοιχεία που να τεκμηριώνουν ότι παθήσεις του τύπου αυτού μπορούν να συμβαίνουν στα επίπεδα ΗΜΠ στα οποία συνήθως υποβάλλεται το πλατύ κοινό

1.3.2.5 Σωματική και ψυχική υγεία

Διάφορες διαταραχές σωματικής και ψυχικής υγείας θεωρήθηκαν ότι είναι αποτέλεσμα της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Σειρά από έρευνες εξέτασαν την επίδραση της έκθεσης στα ΗΜΠ χαμηλών συχνοτήτων σε διάφορες σωματικές διαταραχές όπως πονοκέφαλος, κούραση, ναυτία ή ψυχολογικές διαταραχές όπως κατάθλιψη και τάσεις αυτοκτονίας. Τα δεδομένα που υπάρχουν μέχρι σήμερα, δεν επιτρέπουν την αποδοχή αυτών των συσχετισμών. Αντίθετα φαίνεται ότι οι εν λόγω διαταραχές μπορεί να είναι αποτέλεσμα άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων και του τρόπου ζωής μας που συνοδεύεται από τη σύγχρονη συνεχή τεχνολογική αναβάθμιση.

1.3.3 Συμπεράσματα

Όπως προκύπτει από τις παραπάνω αναφορές τόσο στις βραχυπρόθεσμες επιδράσεις όσο και στην μακροχρόνια έκθεση στα ΗΜΠ, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων δε θεωρούνται ως αποδεδειγμένος κίνδυνος για την υγεία του ανθρώπου. Μέσω των εργαστηριακών και κλινικών ερευνών δεν οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι τα ELF πεδία έχουν κάποια βλαβερή επίδραση στον άνθρωπο. Επιπρόσθετα οι επιδημιολογικές μελέτες έδειξαν ότι δεν υπάρχει σύνδεση της έκθεσης σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία ELF και την πρόκληση βιολογικών επιδράσεων πέραν της παιδικής λευχαιμίας στην οποία εμφανίστηκε μια ασθενής στατιστική συσχέτιση για το μαγνητικό πεδίο. Βέβαια, για την στατιστική συσχέτιση δεν υπάρχουν προς το παρόν βάσιμες επιστημονικές εξηγήσεις, καθώς μπορεί να οφείλεται σε άλλους λόγους, όπως συστηματικά σφάλματα στην επιλογή των παιδιών ή την ύπαρξη κάποιου άγνωστου καρκινογόνου παράγοντα που αλλοίωσε τα αποτελέσματα όταν υπεισήλθε στις μελέτες. Για αυτό τον λόγο αμφισβητείται η υπόθεση ότι η σχέση αυτή είναι αιτιατή.

Τέλος η Διεθνής Επιτροπή Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC), του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας έχει ορίσει ένα σύστημα ταξινόμησης των χημικών και φυσικών παραγόντων ως προς την καρκινογεννητικότητα τους κατατάσσοντας τα ELF μαγνητικά πεδία στην κατηγορία 2B ως “ενδεχομένως καρκινογενή” για πρόκληση της παιδικής λευχαιμίας. Τα ELF ηλεκτρικά πεδία

1.4. ΟΡΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΤΩΝ ΧΑΜΗΛΟΣΥΧΝΩΝ ΠΕΔΙΩΝ¹³

καθώς και οι ενδείξεις για όλες τις άλλες μορφές καρκίνου από την έκθεση στα μαγνητικά πεδία κατατάχθηκαν στην κατηγορία 3 ως “αταξινόμητα” ως προς την καρκινογεννητικότητα λόγω ανεπαρκούς ή μη τεκμηριωμένης επιστημονικής πληροφορίας [1, 3, 4, 9].

1.4 Όρια προστασίας έναντι των χαμηλόσυχνων πεδίων

Οι ίδιες οι χώρες θέτουν τα δικά τους εθνικά όρια για την έκθεση στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ωστόσο, η πλειοψηφία αυτών των εθνικών προτύπων βασίζεται στις οδηγίες που ορίζονται από τη Διεθνή επιτροπή προστασίας από τη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP). Πρόκειται για έναν μη κυβερνητικό οργανισμό, επίσημα αναγνωρισμένο από τον ΠΟΥ (παγκόσμιος οργανισμός υγείας), ο οποίος αξιολογεί τα επιστημονικά αποτελέσματα από ολόκληρο τον κόσμο. Μετά από αναλυτική εξέταση της βιβλιογραφίας, η Διεθνής επιτροπή προστασίας από τη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία εκδίδει οδηγίες με τις οποίες συνιστά κάποια όρια για την έκθεση. Αυτές οι οδηγίες αναθεωρούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα και, εάν κριθεί απαραίτητο, ενημερώνονται.

Το 1977 η Διεθνής Εταιρεία Προστασίας έναντι Ακτινοβολίας (IRPA) σχημάτισε τη Διεθνή Επιτροπή Προστασίας έναντι μη Ιονίζουσας Ακτινοβολίας (INIRC). Η Επιτροπή αυτή, σε συνεργασία με το Περιβαλλοντικό Τμήμα Υγείας της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας, δημοσίευσε τον Ιανουάριο 1990 την εργασία «Προσωρινές οδηγίες ορίων για την έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία 50/60Hz». Στις εργασίες αυτές, με διάρκεια εκπόνησης άνω των 10 ετών, είχαν σταθμισθεί και ληφθεί υπόψη όλες οι σχετικές επιστημονικές δημοσιεύσεις. Το 1997 ολοκληρώθηκαν οι οδηγίες της ICNIRP «Οδηγίες για όρια εκθέσεως σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία», οι οποίες δημοσιεύθηκαν τον Δεκέμβριο 1998. Για την εκπόνηση των οδηγιών αυτών εξετάστηκαν και σταθμίστηκαν επιπρόσθετα και όλες οι νεότερες σχετικές ερευνητικές εργασίες [2].

Οι κατευθυντήριες γραμμές της ICNIRP αποτελούνται από βασικούς περιορισμούς (Πίνακας 1.4) και επίπεδα αναφοράς (Πίνακας 1.5). Οι βασικοί περιορισμοί αφορούν το επαγόμενο ρεύμα στο εσωτερικό του ανθρώπου και έχουν οριστεί για τον γενικό πληθυσμό 50 φορές χαμηλότερα από τις τιμές στις οποίες προκύπτουν οι δυσμενείς επιδράσεις. Συγκεκριμένα για την συχνότητα των 50Hz η πυκνότητα του επαγόμενου ρεύματος στο ανθρώπινο σώμα ορίστηκε στα $2\text{mA}/\text{m}^2$. Επιπρόσθετα τα όρια εντάσεων των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων στους κανονισμούς δεν είναι και όρια επικινδυνότητας, αλλά εμπεριέχουν πολύ μεγάλους συντελεστές ασφαλείας, ώστε να καλύπτονται οι ασάφειες από την περιορισμένη γνώση σχετικά με την επίδραση των πεδίων και να ικανοποιείται η απαίτηση για την πρόληψη δυσμενών επιδρά-

σεων. Εμφανίζονται έτσι αποκλίσεις μεταξύ των οριακών τιμών των κανονισμών, επειδή οι συντελεστές ασφαλείας δεν είναι κοινοί για όλους τους κανονισμούς. Ακόμη οι τιμές για τον γενικό πληθυσμό είναι αρκετά μικρότερες από αυτές για τους επαγγελματικά απασχολούμενους αφού στον γενικό πληθυσμό εντάσσονται άτομα με ιδιαίτερες ευαισθησίες, όπως ασθενείς, ηλικιωμένους, παιδιά κλπ [1, 2, 5].

Ζώνη συχνότητων	Μαγνητική επαγωγή (mT)	Πυκνότητα ρεύματος (mA/m ²) (rms)
0 Hz	40	-
>0-1 Hz	-	8
1-4 Hz	-	8/f
4-1000 Hz	-	2
1000 Hz	-	-
100 kHz	-	f/500

Πίνακας 1.4: Βασικοί περιορισμοί για τα ΗΜΠ χαμηλών συχνότητων (Πηγή: [5]).

Ζώνη συχνότητων	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου E (V/m)	Ένταση μαγνητικού πεδίου H (A/m)	Μαγνητική Επαγωγή B (μT)
0-1 Hz	-	3,2x10 ⁴	4x10 ⁴
1-8 Hz	10000	3,2x10 ⁴ /f ²	4x10 ⁴ /f ²
8-25 Hz	10000	4000/f	5000/f
0.025-0.8 kHz	250/f	4/f	5/f
0.8-3 kHz	250/f	5	6.25
3-150 kHz	87	5	6.25

Πίνακας 1.5: Επίπεδα αναφοράς για τα ΗΜΠ χαμηλών συχνότητων (Πηγή: [5]).

Ελληνική Νομοθεσία

Για τις εκπομπές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχει εκδοθεί :

- Η Κοινή Υπουργική Απόφαση με αριθμό 3060 (ΦΟΡ) 238 (Φ.Ε.Κ. Αρ. 512, Τεύχος Δεύτερο, 25 Απριλίου 2002) από τα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και Υγείας και Πρόνοιας, με θέμα τα μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνότητων.

Η προαναφερθείσα ΚΥΑ βασίστηκε στη Σύσταση του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης “Σχετικά με τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία 0 Hz - 300 GHz” (L199, 1999/519/EC) και στις κατευθυντήριες γραμμές (guidelines) που εξεδόθησαν από την ICNIRP το 1998. Με τις αποφάσεις αυτές θεσπίζονται όρια για την ασφαλή έκθεση του κοινού στο περιβάλλον των διατάξεων εκπομπής χαμηλών συχνότητων, όπως γραμμές και υποσταθμοί υψηλής τάσης για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης,

ορίζονται οι αρμοδιότητες της ΕΕΑΕ (Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας) για την προφύλαξη του κοινού και του περιβάλλοντος από τα πεδία αυτά. Πρέπει εδώ να αναφερθεί ότι ως όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού στη χώρα μας στην περίπτωση των διατάξεων εκπομπής χαμηλών συχνοτήτων ισχύουν το 100% των τιμών των επιπέδων αναφοράς όπως αυτά ορίζονται στην προαναφερθείσα σύσταση της Ε.Ε (Πίνακας 1.6) [6].

	Συχνότητα ηλεκτρικού ρεύματος στην Ευρώπη	
Συχνότητα	50 Hz	50 Hz
	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)	Μαγνητικό πεδίο (μΤ)
Όρια έκθεσης του κοινού	5.000	100
Όρια επαγγελματικής έκθεσης	10.000	500

Πίνακας 1.6: Όρια ασφαλούς έκθεσης για τη συχνότητα των 50Hz στην Ελληνική νομοθεσία (Πηγή: [4]).

Βιβλιογραφία

- [1] Ενημερωτικό έντυπο της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), “Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία: Πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων - Βιολογικές επιπτώσεις - Έλεγχοι από την ΕΕΑΕ”, (2005), Ιστοσελίδα: http://www.eeae.gr/gr/docs/president/_xamilosihna.pdf
- [2] Δημήτριος Τσανάκας, “Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία γραμμών, υποσταθμών και συσκευών ηλεκτρικής ενεργείας ως περιβαλλοντικοί παράγοντες”, Πρακτικά Ημερίδας: «Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία: Μύθοι και πραγματικότητα», Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών 1-6-2005.
- [3] Ζτούπης Ιωάννης, “Μέτρηση και προσομοίωση χαμηλόσυχνων πεδίων από γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012.
- [4] World Health Organization (WHO), “Electromagnetic Fields and Public Health: Exposure to Extremely Low Frequency Fields, Fact Sheet No. 322”, June 2007.
- [5] Εφημερίς της κυβερνήσεως, Της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος 2ο, Αρ.Φύλλου 512, Απρίλιος 2012.
- [6] Ευ. Καραμπέτσος, “Ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Νομοθετικό πλαίσιο, όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού, αποτελέσματα ελέγχων”, Πρακτικά Ημερίδας: «Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία: Μύθοι και πραγματικότητα», Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών 1-6-2005.
- [7] Παπακοσμά Κρυσταλλία, Σεχρεμέλη Παναγιώτα, “Μαγνητικό Πεδίο Γραμμών Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα ΗΜΜΥ, Οκτώβριος 2006.
- [8] Δευτεραίος Ιωάννης, Παυλόπουλος Ξενοφών, “Μέθοδοι μείωσης του μαγνητικού πεδίου εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας”, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα ΗΜΜΥ, Ιούνιος 2008.

- [9] Ζτούπης Ιωάννης, “Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας”, Μεταπτυχιακή εργασία στο ΔΠΜΣ “Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή ΗΜΜΥ, Αθήνα, Ιούλιος 2009.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδοι υπολογισμού χαμηλόσυχνων πεδίων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στις διάφορες μεθόδους υπολογισμού των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας. Αρχικά γίνεται αναφορά σε διάφορες γνωστές αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούνται στις μέρες μας για τον υπολογισμό των χαμηλόσυχνων πεδίων. Πρόκειται για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, την μέθοδο των ροπών, τη μέθοδο των οριακών στοιχείων καθώς επίσης και την υβριδική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων/οριακών στοιχείων. Κυριότερη έμφαση δίνεται στην ανάπτυξη των σχέσεων των μεθόδων υπολογισμού των πεδίων (κυρίως μέσω Biot Savart και της CSM μεθόδου), όπου παρατίθενται αρκετές εφαρμογές όσον αφορά τον υπολογισμό του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου κάτω από γραμμές μεταφοράς. Εξετάζονται κυρίως δύο προσεγγίσεις: η άπειρη θεώρηση των αγωγών και η θεώρηση με βύθισμα, μέσω των οποίων μελετώνται οι διάφορες περιπτώσεις και εφαρμογές σε γραμμές μεταφοράς.

2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Αναλυτικές λύσεις μπορούν να βρεθούν σε προβλήματα με απλές γεωμετρίες και απλά υλικά μέσα. Στα προβλήματα της πράξης η ικανοποίηση των προϋποθέσεων αυτών αποτελεί την εξαίρεση και όχι τον κανόνα. Έτσι, για την λύση πρακτικών προβλημάτων καταφεύγουμε συνήθως στη χρήση διαφόρων γραφικών, αναλογικών ή αριθμητικών μεθόδων. Σήμερα υπάρχει μεγάλη ποικιλία ιδιαίτερα αποτελεσματικών αριθμητικών μεθόδων. Εδώ θα αναφερθεί εισαγωγικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method - FEM) [2].

Σε αυτήν τη μέθοδο η περιοχή του πεδίου αντικαθίσταται από ένα πλέγμα (grid) στους κόμβους του οποίου υπολογίζονται οι προσεγγιστικές τιμές των μεγεθών του πεδίου. Ο χώρος στον οποίο εκτείνεται το πεδίο θεωρείται ότι

απαρτίζεται από πολλά μικρά στοιχεία πεπερασμένων διαστάσεων. Οι εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη στους κόμβους του συστήματος προκύπτουν συνήθως, μέσα από διαδικασίες ελαχιστοποίησης κάποιων ενεργειακών συναρτησιακών εκφράσεων, που περιλαμβάνουν τα ζητούμενα πεδιακά μεγέθη. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αριθμητική επίλυση πεδιακών προβλημάτων, τόσο σε μόνιμες, όσο και σε μεταβατικές καταστάσεις.

Πριν προχωρήσει η ανάλυση στα βήματα της μεθόδου πρέπει να αναφερθούν τα εξής. Θεωρείται ότι το ζητούμενο πεδιακό μέγεθος είναι το ηλεκτρικό δυναμικό ϕ . Σύμφωνα με το θεώρημα της ελάχιστης ενέργειας του Thomson, η πραγματική συνάρτηση δυναμικού $\phi(x,y)$ του πεδίου που ικανοποιεί ως γνωστόν την εξίσωση Laplace

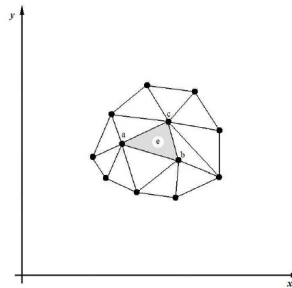
$$\nabla^2 \phi = 0, \quad (2.1)$$

ελαχιστοποιεί τη συναρτησιακή

$$W = \frac{1}{2} \epsilon \iint_S (\nabla \phi)^2 dx dy \quad (2.2)$$

Η (2.2) εκφράζει, προφανώς, την ανά μονάδα μήκους του συστήματος ενταμιευμένη δυναμική ενέργεια.

Το πρώτο βήμα στην πορεία της μεθόδου είναι ο χωρισμός της περιοχής του πεδίου σε ένα σύνολο αλληλοσυνδεόμενων πεπερασμένων στοιχείων. Τα απλούστερα στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα διδιάστατο πρόβλημα είναι τα τριγωνικά στοιχεία. Η χρησιμοποίηση στοιχείων άλλου σχήματος (πχ παραλληλόγραμμα, καμπυλόγραμμα στοιχεία κλπ), αν και είναι δυνατή δεν πολυσυνηθίζεται, κυρίως λόγω της απλότητας των σχέσεων που προκύπτουν κατά τη χρήση των τριγωνικών στοιχείων και της ευκολίας με την οποία τα τελευταία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον προγραμματισμό στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται ένα τμήμα της περιοχής του πεδίου χωρισμένο σε μικρά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία και το τυπικό στοιχείο e με κορυφές τους κόμβους a, b, c .



Σχήμα 2.1: Διαίρεση τμήματος της περιοχής του πεδίου σε τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία.

Το δεύτερο βήμα, μετά τη διακριτοποίηση της περιοχής του πεδίου σε πολλά τριγωνικά στοιχεία, είναι να καθορισθεί ο προσεγγιστικός τρόπος μεταβολής της συνάρτησης δυναμικού ϕ σε κάθε τριγωνικό στοιχείο. Στην περίπτωση όπου κάποιος κόμβος ανήκει σε όριο του προβλήματος με γνωστή τιμή δυναμικού (συνθήκη Dirichlet) η τιμή αυτή λαμβάνεται από την αρχή ως η τιμή του δυναμικού στον θεωρούμενο κόμβο. Η μεταβολή του δυναμικού σε κάθε στοιχείο μπορεί να είναι οποιαδήποτε, συνήθως όμως χρησιμοποιούνται απλές γραμμικές προσεγγιστικές εκφράσεις. Για παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί ότι η συνάρτηση δυναμικού $\phi(x,y)$ στο τυχόν τριγωνικό στοιχείο e (Σχήμα 2.1) με κορυφές a, b, c μεταβάλλεται γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\phi^e(x, y) = a^e + b^e x + c^e y \quad (2.3)$$

όπου οι σταθεροί συντελεστές a^e, b^e, c^e είναι καθορισμένοι, όταν είναι γνωστά τα δυναμικά των κόμβων a, b, c .

Το επόμενο βήμα είναι να υλοποιηθεί η «συναρμολόγηση» όλων των στοιχείων, υπολογίζοντας τη συνεισφορά τους στη συνολική ενέργεια του συστήματος. Λόγω της απαίτησης συνεχούς μεταβολής της συνάρτησης δυναμικού $\phi(x,y)$ στα κοινά όρια των γειτονικών στοιχείων, τα δυναμικά που αντιστοιχούν στις κοινές κορυφές διαφόρων τριγώνων και αντιπροσωπεύουν στην ουσία τον ίδιο κόμβο, οφείλουν να έχουν την ίδια τιμή.

Το τελευταίο βήμα της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση της σχέσης που δίνει την ενέργεια του συστήματος έτσι όπως έχει προκύψει από τα προηγούμενα βήματα. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει η συνάρτηση δυναμικού $\phi(x,y)$ που είναι και το ζητούμενο. Γνωρίζοντας πλέον την τιμή του δυναμικού σε κάθε σημείο της περιοχής λύσης, είναι δυνατόν να υπολογιστούν από αυτήν τιμές και για άλλα μεγέθη που ενδιαφέρουν [3, 9, 24].

2.2 Μέθοδος των ροπών

Η μέθοδος των ροπών είναι ένα από τα σπουδαιότερα εργαλεία για τη λύση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Είναι εννοιολογικά απλή και χρησιμοποιείται εύκολα σε διατάξεις διαφόρων σχημάτων. Έτσι, προβλήματα που είναι αδύνατον να λυθούν με διάφορες κλασικές μεθόδους, όπως π.χ η μέθοδος χωρισμού των μεταβλητών, λύνονται απλά με τη μέθοδο των ροπών [2].

Το 1960, ο R.F.Harrington και άλλοι εφάρμοσαν την τεχνική της μεθόδου των ροπών για τη λύση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων. Η μέθοδος των ροπών είναι μια τεχνική επίλυσης γραμμικών εξισώσεων της μορφής

$$\mathcal{L}(\phi) = f \quad (2.4)$$

όπου $\mathcal{L}(\cdot)$ είναι ένας γραμμικός τελεστής, f είναι μια γνωστή διέγερση και ϕ είναι μια άγνωστη ποσότητα. Για την επίλυση του προβλήματος σε ψηφιακό

υπολογιστή, ξεκινάμε εκφράζοντας την άγνωστη λύση με μια σειρά από συναρτήσεις βάσης u_n ,

$$\phi = \sum_{n=1}^N a_n u_n \quad (2.5)$$

όπου a_n είναι άγνωστοι συντελεστές οι οποίοι περιγράφουν το πλάτος του κάθε όρου της σειράς.

Τώρα αντί μιας εξίσωσης με μια συνεχή άγνωστη ποσότητα, f , έχουμε μια εξίσωση με N άγνωστους,

$$\mathcal{L}(a_1 u_1 + a_2 u_2 + \dots + a_N u_N) = f \quad (2.6)$$

Για την επίλυση των τιμών των a_n , χρειαζόμαστε N γραμμικές ανεξάρτητες εξισώσεις. Σε μορφή πινάκων γράφονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \langle w_1, \mathcal{L}(u_1) \rangle & \langle w_1, \mathcal{L}(u_2) \rangle & \dots & \langle w_1, \mathcal{L}(u_N) \rangle \\ \langle w_2, \mathcal{L}(u_1) \rangle & \langle w_2, \mathcal{L}(u_2) \rangle & \dots & \langle w_2, \mathcal{L}(u_N) \rangle \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle w_N, \mathcal{L}(u_1) \rangle & \langle w_N, \mathcal{L}(u_2) \rangle & \dots & \langle w_N, \mathcal{L}(u_N) \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle w_1, f \rangle \\ \langle w_2, f \rangle \\ \vdots \\ \langle w_N, f \rangle \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων έχει τη μορφή,

$$[Z][A] = [B] \quad (2.8)$$

όπου τα στοιχεία $[Z]$ είναι γνωστές ποσότητες οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν μέσω του γραμμικού τελεστή, $\mathcal{L}(\cdot)$, και από τις συναρτήσεις βάσης και βάρους που επιλέχθηκαν. Τα στοιχεία του $[B]$ καθορίζονται από την εφαρμογή των συναρτήσεων βάρους στην γνωστή συνάρτηση f . Τα άγνωστα στοιχεία του $[A]$ μπορούν να βρεθούν λύνοντας την εξίσωση 2.8. Στην συνέχεια η τιμή της ϕ καθορίζεται μέσω της εξίσωσης 2.5.

Η μέθοδος των ροπών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μεγάλης κλίμακας εξισώσεων περιλαμβάνοντας γραμμικές λειτουργίες συμπεριλαμβανομένων των ολοκληρωτικών και διαφορικών εξισώσεων. Αυτή η αριθμητική τεχνική έχει πολλές εφαρμογές, εκτός από την ηλεκτρομαγνητική μοντελοποίηση. Ωστόσο η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στην επίλυση εξισώσεων που προέρχονται από τις εξισώσεις του Maxwell [25].

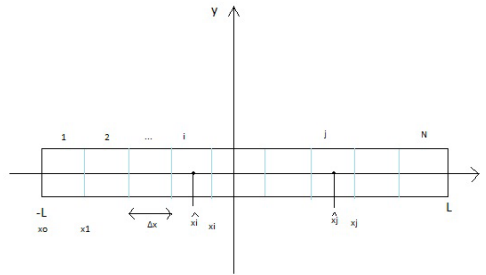
2.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου των ροπών σε ευθύγραμμο αγωγό

Έστω αγωγός σε ηλεκτροστατικό δυναμικό Φ . Το ηλεκτρικό φορτίο θα διανεμηθεί στην επιφάνεια του αγωγού ώστε η επιφάνεια του να είναι ισοδυναμική.

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \frac{\sigma(\vec{r}') dS'}{R}, \quad (2.9)$$

όπου όμως η επιφανειακή κατανομή ηλεκτρικού φορτίου $\sigma(\vec{r}')$ δεν είναι αρχικά γνωστή. Το δυναμικό $\Phi(\vec{r}')$ όμως είναι γνωστό στα σημεία της επιφάνειας του αγωγού. Επομένως η παραπάνω εξίσωση με άγνωστο την επιφανειακή πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου σ .

Ας εφαρμόσουμε έναν τρόπο επίλυσης όταν ο αγωγός είναι ένα λεπτό σύρμα ακτίνα r και μήκους $2L$ όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 2.2: Τμηματοποίηση ευθύγραμμου αγωγού για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου με τη μέθοδο των ροπών.

Το αγωγίμο σύρμα χωρίζεται σε N στοιχειώδη κομμάτια μήκους $x = \frac{2L}{N}$. Υποθέτουμε ότι η γραμμική (κατά προσέγγιση) πυκνότητα φορτίου είναι σταθερή σε κάθε στοιχειώδες τμήμα του αγωγού.

$$\Phi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{j=1}^N \int_{x_{j-1}}^{x_j} \frac{\lambda_j}{R_{ij}(x')} dx' \quad (2.10)$$

όπου,

$$R_{ij}(x) = |\hat{x}_i - \hat{x}'| \quad (2.11)$$

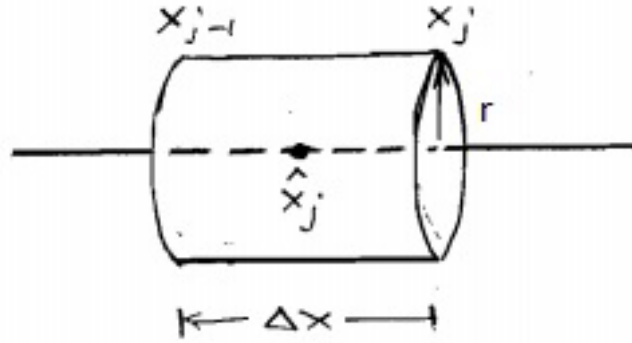
και

$$\hat{x}_i = \frac{1}{2}(x_i + x_{i-1}) \quad (2.12)$$

Προσεγγιστικά

$$\int_{x_{j-1}}^{x_j} \frac{\lambda_j dx}{R_{ij}} \simeq \frac{\lambda_j x}{R_{ij}} = \frac{\lambda_j x}{|\hat{x}_i - \hat{x}_j|}, i \neq j \quad (2.13)$$

Κάποια ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται όταν $i = j$ διότι ο όρος στον παρονομαστή μηδενίζεται. Στην περίπτωση αυτή η ανώτερη προσέγγιση δεν είναι εφακτική. Θεωρούμε λοιπόν ότι το δυναμικό στο κέντρο \hat{x}_j του j -στοιχείου λόγω του φορτίου του, που θεωρείται ομοιόμορφο κατανεμημένο στην επιφάνεια του κυλίνδρου (Σχήμα 2.3), δίνεται από την εξίσωση:

Σχήμα 2.3: Προσέγγιση σε περίπτωση που $i=j$

$$\Phi(\hat{x}_j) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_0^{2\pi} \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} \frac{\sigma_j r d\phi dx'}{(r^2 + x'^2)^{1/2}} = \frac{\sigma_j 2\pi r}{4\pi\epsilon} \int_{-\Delta x/2}^{\Delta x/2} \frac{dx'}{(r^2 + x'^2)^{1/2}} \\ \simeq \frac{\sigma_j 2\pi r}{4\pi\epsilon} \ln\left(\frac{\Delta x^2}{r^2}\right) \quad (2.14)$$

Όμως ,

$$q_j = 2\pi r \Delta x \sigma_j = (2\pi r \sigma_j) \Delta x = \lambda_j \Delta x \quad (2.15)$$

Άρα

$$\Phi(\hat{x}_j) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \lambda_j 2 \ln\left(\frac{\Delta x}{r}\right) \quad (2.16)$$

Επομένως

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \lambda_j \quad (2.17)$$

όπου

$$A_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{\Delta x}{|\hat{x}_i - \hat{x}_j|}, (i \neq j) \quad (2.18)$$

και

$$A_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon} 2 \ln\left(\frac{\Delta x}{r}\right) \quad (2.19)$$

Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση για κάθε στοιχειώδες κομμάτι σχημα-

τίζουμε το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Phi_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \Phi_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ A_{i1} & A_{i2} & \dots & A_{iN} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_i \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_N \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Όμως όλα τα στοιχεία έχουν το ίδιο δυναμικό εφόσον ο αγωγός είναι ισοδυναμική επιφάνεια. Έστω $\Phi_1 = \Phi_2 = \dots = \Phi_N = U$ Επομένως

$$[\lambda] = [A]^{-1}[U] \quad (2.21)$$

Βρίσκοντας το λ_j το δυναμικό μπορεί να βρεθεί για κάθε σημείο στο χώρο από την εξίσωση (αρχή επαλληλίας):

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\lambda_i \Delta x}{[(x - \hat{x}_i)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} \right) \quad (2.22)$$

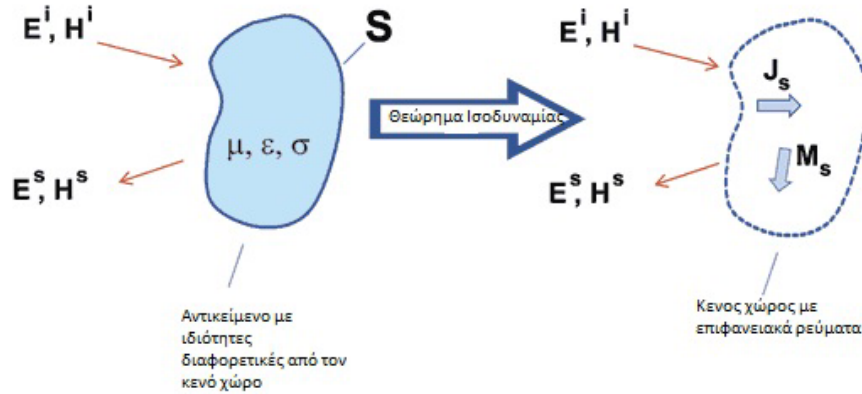
Τέλος γνωρίζοντας το δυναμικό σε κάθε σημείο του χώρου εύκολα προκύπτει και το ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο.

2.3 Μέθοδος οριακών στοιχείων

Η μέθοδος των οριακών (boundary element method -BEM) στοιχείων επιτρέπει την ανάλυση ενός προβλήματος χρησιμοποιώντας κόμβους που βρίσκονται μόνο στα σύνορα μεταξύ δύο υλικών. Αυτό επιτυγχάνεται μετασχηματίζοντας κατάλληλα την ολοκληρωτική εξίσωση. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η δεύτερη ταυτότητα του Green για την αναζήτηση κατάλληλων πηγών που επαληθεύουν τις εξισώσεις και τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι εισάγει πολύ περιορισμένη διακριτότητα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους (σχεδόν μια διάσταση λιγότερο). Εντούτοις οδηγεί σε συστήματα εξισώσεων με “γεμάτους” πίνακες (ενώ οι άλλες μέθοδοι δημιουργούν συστήματα με πίνακες “ζώνης”) και συναντά δυσκολίες στην αναπαράσταση μη γραμμικών υλικών [4].

Το πρώτο βήμα σε μια ανάλυση οριακών στοιχείων, είναι να αναπαραστήσουμε τη γεωμετρία του προβλήματος σαν συνεισφορά μιας ισοδύναμης κατανομής ρευμάτων σε ένα ομογενές μέσο (συνήθως κενό χώρο). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4, τα πεδία στο εξωτερικό ενός αντικειμένου αποτελούνται από τα πεδία που προσπίπτουν στο αντικείμενο, τα πεδία που ανακλώνται

από το αντικείμενο και από τα πεδία που προέρχονται από το αντικείμενο. Το θεώρημα ισοδυναμίας αναφέρει ότι κάθε κατανομή πεδίου εξωτερικά ενός αντικειμένου μπορεί να αναπαραχθεί επακριβώς με την αφαίρεση του αντικειμένου και αντικαθιστώντας το αντικείμενο με ένα σύνολο ισοδύναμων ηλεκτρικών και μαγνητικών ρευμάτων στην οριακή επιφάνεια.



Σχήμα 2.4: Αρχή της ισοδυναμίας (Πηγή: [25]).

Μια διατύπωση του διακριτού προβλήματος μπορεί να προκύψει θεωρώντας την ταυτότητα του Green σύμφωνα με την οποία αν Φ , β είναι δύο συναρτήσεις με πεδίο ορισμού Ω και όριο Γ τότε:

$$\int_{\Omega} (\beta \nabla^2 \Phi - \Phi \nabla^2 \beta) d\nu = \int_{\Gamma} (\beta \frac{\partial \Phi}{\partial n} - \Phi \frac{\partial \beta}{\partial n}) ds \quad (2.23)$$

Θεωρώντας ότι το Φ είναι το δυναμικό που επαληθεύει την εξίσωση του Laplace του οποίου αναζητείται η κατανομή και β η θεμελιώδης συνάρτηση του Green για τον κόμβο i (η β_i ικανοποιεί την εξίσωση $\nabla^2 \beta_i = -\delta_i$ όπου δ_i είναι η συνάρτηση Dirac σημείου i) η (2.23) γίνεται:

$$c_i \Phi_i + \int_{\Gamma} (\Phi \frac{\partial \beta_i}{\partial n} - \beta_i \frac{\partial \Phi}{\partial n}) ds \quad (2.24)$$

όπου

$$f(n) = \begin{cases} 0.5, & i \in \Gamma \text{ "λείο"} \\ 1, & \text{εάν } i \in \Omega \\ 0, & i \notin \Omega \end{cases} \quad (2.25)$$

Δεδομένου ότι η συνάρτηση β_i είναι γνωστής μορφής διακριτοποιώντας τις συναρτήσεις Φ και $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ στο όριο Γ το ολοκλήρωμα της (2.24) για κάθε κόμβο i του Γ προκύπτει ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων της μορφής:

$$[S][\Phi] - [H][\frac{\partial \Phi}{\partial n}] = 0 \quad (2.26)$$

με άγνωστους τα Φ_i και $\frac{\partial \Phi}{\partial n}|_i$. Αν θέλουμε να απαλείψουμε τα $\frac{\partial \Phi}{\partial n}|_i$ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την “συνέχεια” του $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ στα κοινά όρια μεταξύ δύο υποχώρων ώστε το τελικό σύστημα να περιέχει άγνωστους μόνο τα Φ_i . Αυτή η διαδικασία δεν είναι πάντα πλεονεκτική από πλευράς χρόνου υπολογισμού, δεδομένου ότι εισάγει την αντιστροφή κάποιου υποπίνακα [H] που είναι πολύ περισσότερο χρονοβόρα από την επίλυση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων [4, 25].

2.4 Υβριδική μέθοδος FEM-BEM

Πολλά πρακτικά προβλήματα είναι υπερβολικά πολύπλοκα για να λυθούν με ακρίβεια με μια απλή αριθμητική ή ασυμπτωτική μέθοδο. Είναι συχνά ωφέλιμο να συνδυάζονται δύο αριθμητικές τεχνικές μοντελοποίησης, προκειμένου να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα κάθε τεχνικής για να λύσουν προβλήματα που καμία τεχνική από τις δύο δε θα μπορούσε να μοντελοποιήσει μόνη της αποτελεσματικά. Για παράδειγμα, μια μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να συνδυαστεί με μια μέθοδο οριακών συνθηκών για να σχηματίσουν μια πιο ισχυρή υβριδική αριθμητική μέθοδο, για την επίλυση πεδίων εκτεινόμενων μέχρι το άπειρο και προβλημάτων με πολύπλοκα ανομοιογενή αντικείμενα.

Οι μέθοδοι FEM υπερέχουν στη μοντελοποίηση πολύπλοκων δομών αλλά είναι πιο αδύναμες όταν πρόκειται για μοντελοποίηση λεπτών καλωδίων και προβλημάτων ακτινοβολίας εκτεινόμενων μέχρι το άπειρο. Από την άλλη οι μέθοδοι BEM υπερέχουν στην μοντελοποίηση λεπτών καλωδίων και απεριόριστων γεωμετρικών αλλά δεν μπορούν να μοντελοποιήσουν πολύπλοκες δομές. Τα συμπληρωματικά πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων τα καθιστούν ιδανικά για υβριδισμό.

Υβριδικές FEM/BEM τεχνικές εισάγουν μια εικονική επιφάνεια (η οποία μπορεί να συμπίπτει ή και να μη συμπίπτει με μια πραγματική επιφάνεια του υλικού) που χωρίζει έναν εσωτερικό όγκο από τον εξωτερικό. Η εσωτερική περιοχή αναλύεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο FEM με άγνωστα τα επιφανειακά ηλεκτρικά και μαγνητικά ρεύματα ικανοποιώντας την οριακή συνθήκη στην εξωτερική επιφάνεια. Η εξωτερική περιοχή αναλύεται χρησιμοποιώντας μια BEM με άγνωστα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά ρεύματα στην εικονική επιφάνεια. Έτσι, αναπτύσσονται δύο σύνολα εξισώσεων πινάκων τα οποία περιέχουν αγνώστους στο όριο μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού όγκου. Επιβάλλοντας τα πεδία και των δύο μεριών της εικονικής επιφάνειας να είναι συνεπή το ένα με το άλλο, οι δύο εξισώσεις πινάκων συνδυάζονται σε μια μεγαλύτερη εξίσωση με μοναδική λύση [25].

2.5 Μέθοδοι επίλυσης χαμηλόσυχνων πεδίων

Παρακάτω παρουσιάζονται εκτενώς η ανάπτυξη των σχέσεων υπολογισμού τόσο για το μαγνητικό όσο για το ηλεκτρικό πεδίο και στη συνέχεια εφαρμόζονται στην περίπτωση ευθύγραμμων αγωγών αλλά και στην πιο ακριβή περίπτωση όπου οι αγωγοί θεωρούνται ως αγωγοί με βύθισμα.

2.5.1 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου

Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου γραμμής μεταφοράς γίνεται με τη βοήθεια του νόμου των **Biot – Savart**. Στην περίπτωση περισσότερων από μια γραμμών μεταφοράς εφαρμόζεται η αρχή της επαλληλίας συνυπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο την επίδραση όλων των αγωγών ή γραμμών μεταφοράς. Ο νόμος των Biot-Savart προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \nabla \times \int_V \vec{J}(\vec{r}') dV' \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_{av}} \right) \quad (2.27)$$

Στην (2.27) η ολοκλήρωση αναφέρεται στις συντεταγμένες της πηγής, οι οποίες δηλώνονται με \vec{r}' , ενώ ο υπολογισμός της περιστροφής αναφέρεται στις συντεταγμένες του σημείου παρατήρησης, οι οποίες δηλώνονται με \vec{r} . Για αυτό το λόγο μπορούμε να αλλάξουμε τους τελεστές ∇_x και \int_V στην (2.27) και να υπολογίσουμε την περιστροφή πριν από την ολοκλήρωση. Έτσι η (2.27) παίρνει τη μορφή

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \nabla \times \left[\frac{\vec{J}(\vec{r}')}{R} \right] dV \quad (2.28)$$

διότι η $\frac{1}{R_{av}} = \frac{1}{|\vec{r}_{av} - \vec{r}'|}$ είναι ανεξάρτητη από την \vec{r} και έχει μηδενική συμμετοχή στον υπολογισμό της περιστροφής. Χρησιμοποιούμε τη διανυσματική ταυτότητα

$$\nabla \times (f\vec{J}) = f\nabla \times \vec{J} + \nabla f \times \vec{J} \quad (2.29)$$

με $f = \frac{1}{R}$. Όμως το \vec{J} είναι ανεξάρτητο του \vec{r} και γι' αυτό ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος της (2.29) είναι μηδενικός. Στον δεύτερο όρο υπάρχει το $\nabla f = \nabla \left(\frac{1}{R} \right)$ και είναι γνωστό ότι $\nabla \left(\frac{1}{R} \right) = -\frac{\hat{R}}{R^2}$. Αντικαθιστώντας στην (2.28) καταλήγουμε στο νόμο των **Biot – Savart**.

$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu \int_V \frac{\vec{J}(\vec{r}') \times \hat{R}}{4\pi R^2} dV' \quad (2.30)$$

Στη περίπτωση λεπτού νηματοειδούς αγωγού με την αντικατάσταση $\vec{J}dV' = Id\vec{l}'$, η εξίσωση (2.30) παίρνει τη μορφή

$$\vec{B} = \mu_o \int_l I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_o}{4\pi r_o^3} \quad (2.31)$$

όπου:

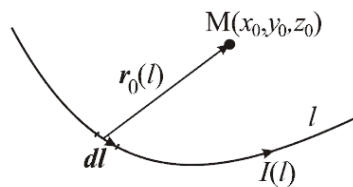
\vec{B} : ένταση του μαγνητικού πεδίου,

μ_o : μαγνητική διαπερατότητα του κενού,

I : ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό,

$d\vec{l}$: το διαφορικό στοιχείο στη κατεύθυνση του ρεύματος και

\vec{r}_o : το διάνυσμα απόστασης από την πηγή (x, y, z) στο τυχαίο σημείο $M(x_o, y_o, z_o)$



Σχήμα 2.5: Εφαρμογή νόμου Biot-Savart.

2.5.1.1 Ευθύγραμμος αγωγός άπειρου μήκους - Νόμος Ampere

Σε περίπτωση ευθύγραμμου άπειρου αγωγού η τελευταία σχέση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\vec{B} = \mu_o \int_{-\infty}^{\infty} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_o}{4\pi r_o^3} \quad (2.32)$$

όπου

$$dl = dx \quad (2.33)$$

$$\vec{r}_o = (x_o - x)\hat{i}_x + (y_o - y)\hat{i}_y + (z_o - z)\hat{i}_z \quad (2.34)$$

$$r_o = \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - y)^2 + (z_o - z)^2} \quad (2.35)$$

$$d\vec{l} \times \vec{r}_o = [(y_o - y)\hat{i}_x - (z_o - z)\hat{i}_y]dx \quad (2.36)$$

Επομένως:

$$\vec{B} = \mu_0 I \frac{\hat{\phi}}{2\pi r_o} \quad (2.37)$$

όπου,

I : ένταση ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό,

r_o : η απόσταση του αγωγού από το σημείο υπολογισμού της μαγνητικής πεδιακής έντασης

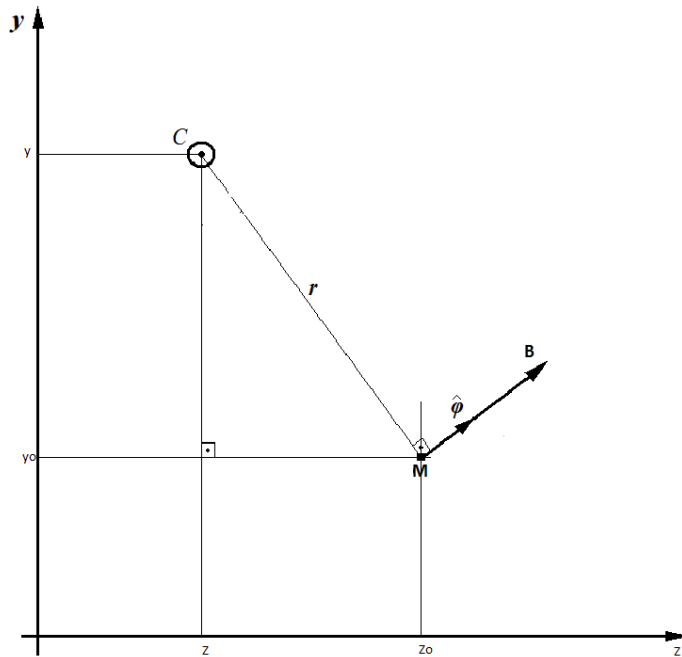
$\hat{\phi}$: μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο ευθύγραμμο τμήμα που σχηματίζεται από τον αγωγό και το σημείο υπολογισμού του πεδίου, η φορά του οποίου δίνεται από τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου

ή σε καρτεσιανές συντεταγμένες

$$\vec{B}_z = \mu_0 I \frac{(y_o - y)}{2\pi r_o^2} \quad (2.38)$$

$$\vec{B}_y = -\mu_0 I \frac{(z_o - z)}{2\pi r_o^2} \quad (2.39)$$

Σχηματικά, η εφαρμογή του νόμου αυτού στην περίπτωση αυτή, ο οποίος είναι γνωστός και ως νόμος Ampere, απεικονίζεται παρακάτω στο σχήμα.



Σχήμα 2.6: Εφαρμογή του νόμου Ampere για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου άπειρου ευθύγραμμου αγωγού.

Με βάση τις σχέσεις (2.38) και (2.39), το συνισταμένο μαγνητικό πεδίο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$B = \sqrt{B_z^2 + B_y^2} \quad (2.40)$$

Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε τριφασική γραμμή μεταφοράς

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τη γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις που βασίζονται στο νόμο του Ampère και δίνουν τη μαγνητική πεδιακή ένταση ρευματοφόρων αγωγών αμελητέας διατομής και απείρου μήκους. Ο νόμος του Ampère προτιμήθηκε λόγω του μεγάλου μήκους των αγωγών σε σύγκριση με την ακτίνα αυτών και, παρά την απλότητά του, η εφαρμογή του δίνει πολύ καλά αποτελέσματα τα οποία συμφωνούν με έγκυρα λογισμικά υπολογισμού των πεδίων. Στην ανάλυση που ακολουθεί γίνονται οι εξής παραδοχές, με σκοπό την απλοποίηση του θεωρητικού μοντέλου της γραμμής και την ουσιαστική διατύπωση του προβλήματος:

- Τα επαγόμενα στη γη ρεύματα δεν επηρεάζουν ούτε το συνολικό μαγνητικό πεδίο ούτε τα ρεύματα των άλλων αγωγών
- Όλοι οι αγωγοί θεωρούνται ευθείς, απείρου μήκους και τοποθετημένοι στο σημείο του μέγιστου βέλους ανάρτησης (χαμηλότερο σημείο)
- Το επαγόμενο ρεύμα στον αγωγό προστασίας είναι αμελητέο και δεν επηρεάζει τον υπολογισμό του πεδίου σε ύψη πρακτικού ενδιαφέροντος

Επομένως εφαρμόζοντας επαλληλία για τις τρεις φάσεις του κυκλώματος υπολογίζεται το συνολικό μαγνητικό πεδίο στο χώρο, το οποίο δίνεται από την εξής σχέση.

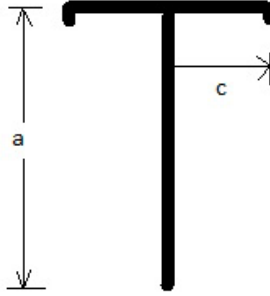
$$B = \sum_{k=1}^3 \mu_o I_k \frac{\hat{\phi}_k}{2\pi r_{ok}} \quad (2.41)$$

Έτσι, στην περίπτωση μιας τριφασικής γραμμής μεταφοράς, η οποία αποτελείται από τρεις αγωγούς, το κύκλωμα διαρρέεται από τα εξής ρεύματα:

$$I_1 = I_a = I_o \left[\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.42)$$

$$I_2 = I_b = I_o [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)] \quad (2.43)$$

$$I_3 = I_c = I_o \left[\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + j \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.44)$$



Σχήμα 2.7: Διάταξη πυλώνων γραμμών μεταφοράς απλού κυκλώματος

Για τη διάταξη του Σχήματος 2.7 προκύπτουν οι πιο κάτω σχέσεις υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου

$$\vec{B}_{az} = \mu_o I_a \frac{(y_o - a)}{2\pi r_{oa}^2} \quad (2.45)$$

$$\vec{B}_{bz} = \mu_o I_b \frac{(y_o - a)}{2\pi r_{ob}^2} \quad (2.46)$$

$$\vec{B}_{cz} = \mu_o I_c \frac{(y_o - a)}{2\pi r_{oc}^2} \quad (2.47)$$

$$\vec{B}_{ay} = -\mu_o I_a \frac{(z_o + c)}{2\pi r_{oa}^2} \quad (2.48)$$

$$\vec{B}_{by} = -\mu_o I_b \frac{(z_o)}{2\pi r_{ob}^2} \quad (2.49)$$

$$\vec{B}_{cy} = -\mu_o I_c \frac{(z_o - c)}{2\pi r_{oc}^2} \quad (2.50)$$

όπου,

$$r_{oa} = \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - a)^2 + (z_o + c)^2} \quad (2.51)$$

$$r_{ob} = \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - a)^2 + (z_o)^2} \quad (2.52)$$

$$r_{oc} = \sqrt{(x_o - x)^2 + (y_o - a)^2 + (z_o - c)^2} \quad (2.53)$$

Έτσι το συνισταμένο μαγνητικό πεδίο είναι:

$$B_z = B_{az} + B_{bz} + B_{cz} \quad (2.54)$$

$$B_y = B_{ay} + B_{by} + B_{cy} \quad (2.55)$$

$$B = B_z \hat{i}_z + B_y \hat{i}_y \quad (2.56)$$

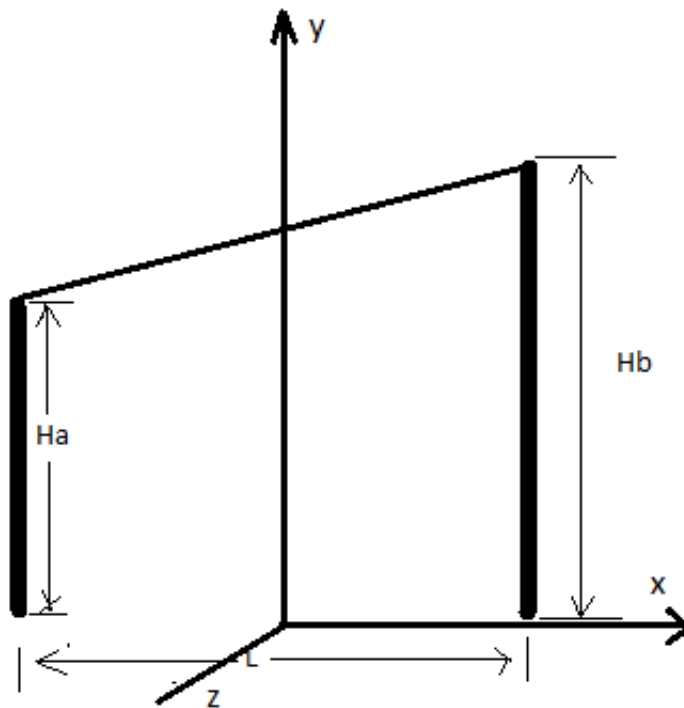
και το μέτρο του μαγνητικού πεδίου προκύπτει:

$$B = \sqrt{|B_z|^2 + |B_y|^2} \quad (2.57)$$

Εφαρμογή σε τριφασική γραμμή όπου οι δύο πυλώνες βρίσκονται σε διαφορετικό ύψος

Στην περίπτωση ευθύγραμμου αγωγού μήκους L ο νόμος των Biot-Savart εφαρμόζεται ως εξής:

$$\vec{B} = \mu_0 \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_o}{4\pi r_o^3} \quad (2.58)$$



Σχήμα 2.8: Ευθύγραμμος αγωγός πεπερασμένου μήκους με τους δύο πυλώνες σε διαφορετικό ύψος

Η εξίσωση του αγωγού δίνεται από την σχέση

$$y = \frac{(H_b - H_a)}{L}x + \frac{(H_a + H_b)}{2} \quad (2.59)$$

Επομένως

$$\vec{dl} = dx \hat{i}_x + dy \hat{i}_y \quad (2.60)$$

$$\vec{dl} = dx \left(\hat{i}_x + \frac{dy}{dx} \hat{i}_y \right) = dx \left(\hat{i}_x + \frac{(H_b - H_a)}{L} \hat{i}_y \right) \quad (2.61)$$

$$\begin{aligned} \vec{dl} \times \vec{r}_o = & \left[\frac{H_b - H_a}{L} (z_o - z) \hat{i}_x - (z_o - z) \hat{i}_y \right. \\ & \left. + \left((y_o - y) - (x_o - x) \frac{H_b - H_a}{L} \right) \hat{i}_z \right] dx \quad (2.62) \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (2.58) έχουμε :

$$\vec{B}_x = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{\frac{H_b - H_a}{L} (z_o - z)}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.63)$$

$$\vec{B}_y = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{-(z_o - z)}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.64)$$

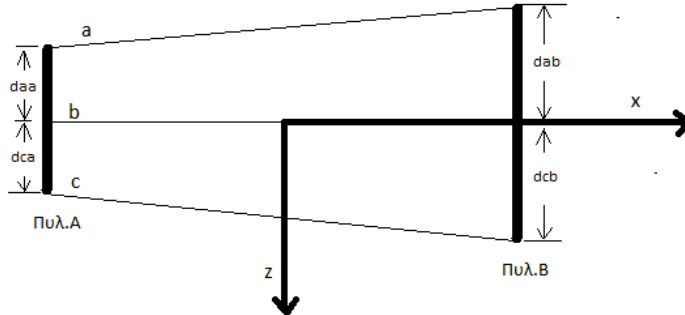
$$\vec{B}_z = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{(y_o - y) - (x_o - x) \frac{H_b - H_a}{L}}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.65)$$

Στην περίπτωση τριφασικής γραμμής, οι σχέσεις (2.63)-(2.65) εφαρμόζονται ξεχωριστά για κάθε φάση της γραμμής και στη συνέχεια με επαλληλία προκύπτει το συνολικό μαγνητικό πεδίο.

Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε τριφασική γραμμή μεταφοράς όπου οι αγωγοί δεν είναι παράλληλοι

Η διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι τώρα οι δύο πυλώνες είναι διαφορετικοί, επομένως οι αγωγοί των φάσεων δεν είναι πλέον παράλληλοι αφού τα δύο άκρα τους ίσως να μην αναρτώνται στην ίδια κάθετη απόσταση ως προς τον πυλώνα.

Για παράδειγμα παρατηρώντας το πιο κάτω σχήμα, στο οποίο φαίνεται η κάτοψη γραμμής μεταφοράς μεταξύ δύο διαφορετικών πυλώνων, παρατηρούμε ότι οι φάσεις α και γ δεν είναι παράλληλες ως προς τη φάση β, αλλά αντίθετα απομακρύνονται καθώς πλησιάζουν στον πυλώνα Β.



Σχήμα 2.9: Κάτοψη γραμμών μεταφοράς δύο διαφορετικών πυλώνων.

Στην περίπτωση αυτή στη σχέση (2.60) προστίθεται και το διαφορικό στοιχείο ως προς την z κατεύθυνση το οποίο ακολουθεί την εξίσωση

$$z = \frac{(d_{ab} - d_{aa})}{L}x + \frac{(d_{aa} + d_{ab})}{2} \quad (2.66)$$

και έτσι η σχέση (2.60) τροποποιείται και προκύπτει η

$$\vec{dl} = dx \left(\hat{i}_x + \frac{dy}{dx} \hat{i}_y + \frac{dz}{dx} \hat{i}_z \right) = dx \left(\hat{i}_x + \frac{(H_b - H_a)}{L} \hat{i}_y + \frac{(d_{ab} - d_{aa})}{L} \hat{i}_z \right) \quad (2.67)$$

Στη συνέχεια ακολουθώντας πανομοιότυπη διαδικασία καταλήγουμε στις σχέσεις υπολογισμού μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμων αγωγών οι οποίοι αναρτώνται στα δύο τους άκρα σε διαφορετικού είδους πυλώνες.

2.5.1.2 Αγωγός με βύθισμα

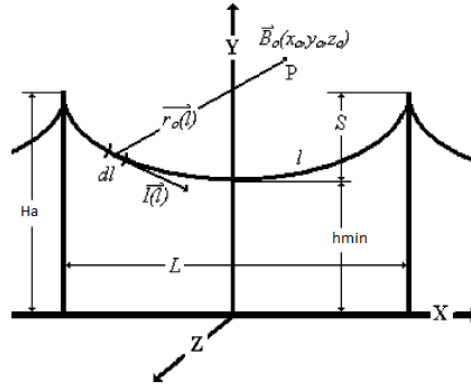
Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου σε πιο ρεαλιστικές περιπτώσεις θεωρούμε τον αγωγό ότι δεν είναι πλέον ευθύγραμμος αλλά εμφανίζει βύθισμα, όπως ουσιαστικά συμβαίνει στην πραγματικότητα. Το ακριβές σχήμα του αγωγού μεταξύ δύο πυλώνων ιδίου ύψους μπορεί να περιγραφεί με μεγάλη ακρίβεια σύμφωνα με την σχέση:

$$y = hmin + \frac{x^2}{2C} \quad (2.68)$$

όπου,

$hmin$: το ελάχιστο ύψος του αγωγού ως προς το έδαφος το οποίο ισούται με $hmin = H_a - S$, με H_a να αντιστοιχεί στο ύψος του πυλώνα και S να αντιστοιχεί στο βύθισμα της γραμμής,

- C: σταθερά και ισούται με τη λύση της εξίσωσης $C = \frac{L^2}{8S}$. Η παράμετρος C σχετίζεται επίσης με τις μηχανικές παραμέτρους της γραμμής $C = \frac{T_h}{w}$, όπου T_h είναι η τάση του αγωγού στο κατώτερο σημείο του ως προς τη γη και w είναι το βάρος ανά μονάδα μήκους της γραμμής.



Σχήμα 2.10: Εφαρμογή νόμου Biot-Savart σε αγωγό με βύθισμα.

Το διαφορικό στοιχείο στη κατεύθυνση του ρεύματος \vec{dl} , με βάση το σχήμα (2.10) ορίζεται ως εξής:

$$\vec{dl} = dx(\hat{i}_x + \frac{dy}{dx}\hat{i}_y) = dx(\hat{i}_x + \frac{x}{C}\hat{i}_y) \quad (2.69)$$

Έτσι το εξωτερικό γινόμενο $\vec{dl} \times \vec{r}_o$ αναλύεται:

$$\vec{dl} \times \vec{r}_o = [\frac{x}{C}(z_o - z)\hat{i}_x - (z_o - z)\hat{i}_y + [(y_o - y) - (x_o - x)\frac{x}{C}]\hat{i}_z]dx \quad (2.70)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (2.58) έχουμε :

$$\vec{B}_x = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{x}{C} \frac{(z_o - z)}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.71)$$

$$\vec{B}_y = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{-(z_o - z)}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.72)$$

$$\vec{B}_z = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{(y_o - y) - (x_o - x)\frac{x}{C}}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.73)$$

με r_o σύμφωνα με την Σχέση (2.35)

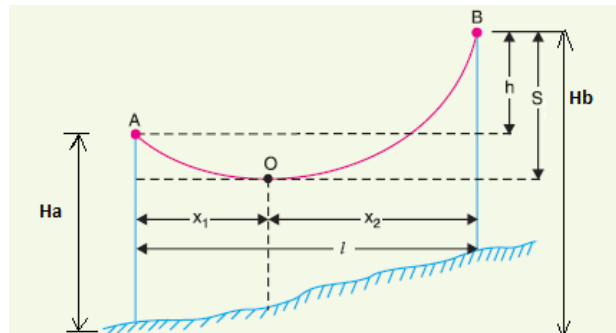
Το μέτρο του ολικού μαγνητικού πεδίου προκύπτει:

$$B = \sqrt{|B_x|^2 + |B_y|^2 + |B_z|^2} \quad (2.74)$$

Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου με θεώρηση βυθίσματος αγωγών σε τριφασική γραμμή μεταφοράς (Σχήμα 2.7)

Εφαρμόζοντας επαλληλία για τις 3 φάσεις σύμφωνα με τις Σχέσεις 2.71-2.73, εύκολα προκύπτει το ολικό μαγνητικό πεδίο απλού κυκλώματος.

Εφαρμογή σε αγωγό με βύθισμα όπου οι δύο πυλώνες βρίσκονται σε διαφορετικό ύψος



Σχήμα 2.11: Υπολογισμός βυθίσματος όταν οι πυλώνες βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη (Πηγή: [7]).

Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη του αγωγού είναι η ίδια με την Σχέση 2.68, με τη διαφορά ότι τώρα έχουμε διαφορετικά όρια ολοκλήρωσης και η σταθερά C που προκύπτει είναι διαφορετική. Για τον υπολογισμό της C και των x_1 και x_2 (τα οποία αντιστοιχούν και στα όρια ολοκλήρωσης του νόμου Biot-Savart) ακολουθείται η πιο κάτω διαδικασία.

Στο σημείο x_2 έχουμε:

$$H_B = h_{min} + \frac{x_2^2}{2C} \quad (2.75)$$

Ενώ στο σημείο x_1 έχουμε:

$$H_A = h_{min} + \frac{x_1^2}{2C} \quad (2.76)$$

Επίσης από τα δεδομένα του Σχήματος 2.11 έχουμε ότι

$$x_1 + x_2 = l \quad (2.77)$$

Αφαιρώντας την Σχέση 2.75 με τη 2.76 καταλήγουμε στη σχέση

$$H_B - H_A = (x_2 - x_1)(x_2 + x_1) \frac{1}{2C} = (x_2 - x_1) \frac{l}{2C} \quad (2.78)$$

Από την 2.77 και 2.78 λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων καταλήγουμε στις πιο κάτω λύσεις για το x_1 και x_2 :

$$x_1 = -\frac{l}{2} + \frac{(Hb - Ha)C}{l} \quad (2.79)$$

$$x_2 = \frac{l}{2} + \frac{(Hb - Ha)C}{l} \quad (2.80)$$

Για επιθυμητό βύθισμα αγωγού S και για γνωστό ύψος των δύο πυλώνων H_A και H_B εύκολα βρίσκουμε και τη σταθερά C

Έτσι από Σχέση 2.75 προκύπτει ότι

$$C = \frac{x_2^2}{2(H_B - h_{min})} = \frac{(\frac{l}{2} + (H_B - H_A) \frac{C}{l})^2}{2(H_B - h_{min})} \quad (2.81)$$

Δηλαδή, από τη λύση της πιο κάτω δευτεροβάθμιας εξίσωσης υπολογίζεται το C

$$\left(\frac{(H_B - H_A)}{l}\right)^2 C^2 - (H_A + H_B - 2h_{min})C + \frac{l^2}{4} = 0 \quad (2.82)$$

Εφαρμογή σε απλό κύκλωμα με βύθισμα όπου οι φάσεις των αγωγών δεν είναι παράλληλες

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.9 έχουμε μια μεταβολή και ως προς την z κατεύθυνση. Επομένως ισχύει και πάλι η Σχέση 2.66 και έτσι η Σχέση 2.69, η οποία περιγράφει το διαφορικό στοιχείο στην κατεύθυνση του ρεύματος, τροποποιείται και ορίζεται πλέον ως εξής:

$$\vec{dl} = dx(\hat{i}_x + \frac{dy}{dx}\hat{i}_y + \frac{dz}{dx}\hat{i}_z) = dx(\hat{i}_x + \frac{x}{C}\hat{i}_y + \frac{d_{ab} - d_{aa}}{L}\hat{i}_z) \quad (2.83)$$

Το εξωτερικό γινόμενο $\vec{dl} \times \vec{r}_o$ αναλύεται:

$$\vec{dl} \times \vec{r}_o = \left[\left[\frac{x}{C}(z_o - z) - (y_o - y) \frac{(d_{ab} - d_{aa})}{L} \right] \hat{i}_x + \left[(x_o - x) \frac{(d_{ab} - d_{aa})}{L} - (z_o - z) \right] \hat{i}_y + \left[(y_o - y) - (x_o - x) \frac{x}{C} \right] \hat{i}_z \right] dx \quad (2.84)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (2.58) έχουμε :

$$\vec{B}_x = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{\left[\frac{x}{C}(z_o - z) - (y_o - y) \frac{(d_{ab} - d_{aa})}{L} \right]}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.85)$$

$$\vec{B}_y = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{(x_o - x) \frac{(d_{ab} - d_{aa})}{L} - (z_o - z)}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.86)$$

$$\vec{B}_z = \mu_o \int_{-L/2}^{L/2} I \frac{(y_o - y) - (x_o - x) \frac{x}{C}}{4\pi r_o^3} dx \quad (2.87)$$

με r_o σύμφωνα με την Σχέση (2.35)

Το μέτρο του ολικού μαγνητικού πεδίου προκύπτει από τη Σχέση 2.74

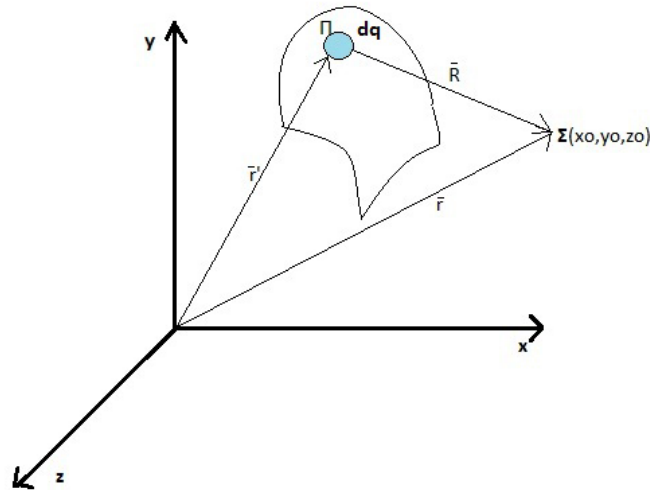
2.5.2 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου

Ένα στοιχειώδες φορτίο dq , που βρίσκεται στο σημείο Π του όγκου V , προκαλεί ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο Σ (Σχήμα 2.12), με ένταση

$$d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon R^2} \hat{R}, \quad (2.88)$$

όπου

$$\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}' \quad (2.89)$$



Σχήμα 2.12: Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου.

με \vec{r}' και \vec{r} τα διανύσματα θέσης του dq και του σημείου υπολογισμού Σ , αντίστοιχα, και \vec{R} το μοναδιαίο διάνυσμα με φορά από το Π προς το Σ . Το

συνολικό ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο Σ βρίσκεται με άθροιση (ολοκλήρωση) των συνεισφορών των στοιχειωδών φορτίων dq , σε όλα τα σημεία του όγκου V . Τα στοιχειώδη φορτία dq μπορεί να ανήκουν σε χωρικές, επιφανειακές ή γραμμικές κατανομές, ή να είναι σημειακά φορτία. Με βάση τις πιο πάνω παρατηρήσεις προκύπτει αναλυτικότερα ότι

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{\text{σε όλα τα φορτία}} \frac{dq}{R^2} \hat{R} \quad (2.90)$$

Έστω τώρα ότι στον απέραντο χώρο υπάρχει ένας αγωγός και ηλεκτρικά φορτία έξω από αυτόν. Στην περίπτωση αυτή στην επιφάνεια του αγωγού επάγονται φορτία, τα οποία κατανέμονται με τρόπο ώστε το πεδίο στο εσωτερικό του να είναι μηδενικό και ο όγκος του ισοδυναμικός. Γενικά, η κατανομή των επιφανειακών φορτίων είναι άγνωστη και γι' αυτό ο υπολογισμός του δυναμικού και του πεδίου είναι δύσκολος. Όμως, για μερικές απλές γεωμετρίες, όπως στην περίπτωση μας, που περιλαμβάνουν απέραντα αγωγήμα επίπεδα (έδαφος), η λύση μπορεί να βρεθεί με αφαίρεση του αγωγού και αντικατάστασή του από ένα σύνολο ισοδύναμων φορτίων, τοποθετημένων στο χώρο που κάλυπτε πριν ο αγωγός. Τα φορτία αυτά ονομάζονται είδωλα και επιλέγονται κατάλληλα, έτσι ώστε μαζί με τα αρχικά φορτία να καθιστούν ισοδυναμική την επιφάνεια του αγωγού, χωρίς να μεταβάλλουν το δυναμικό του ή το συνολικό φορτίο του, ανάλογα με τα δεδομένα του προβλήματος. Αν είναι γνωστά τα είδωλα, το πρόβλημα λύνεται με επαλληλία, σαν να μην υπάρχει ο αγωγός, αλλά μόνον αυτά και τα αρχικά φορτία. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται **μέθοδος των ειδώλων ή μέθοδος κατοπτρισμού** [2].

Επομένως ένα σημειακό φορτίο q επάνω από απέραντο αγωγήμα επίπεδο μηδενικού δυναμικού, είναι ισοδύναμο με ένα σημειακό φορτίο q και το αντικατοπτρικό του $-q$. Έτσι το ηλεκτρικό πεδίο πάνω από τον απέραντο αγωγό υπολογίζεται ως επαλληλία των φορτίων q και $-q$.

Στην περιπτώσεις που εξετάζουμε, ενδιαφερόμαστε για το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει από ένα απλό αγωγό μήκους L , τοποθετημένο σε συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος. Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα προαναφέρθηκαν η εξίσωση υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου μετατρέπεται ως εξής:

$$E(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_1(r')} \frac{q(r')\vec{R}_1}{R_1^3} dl'_1 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_2(r')} \frac{q(r')\vec{R}_2}{R_2^3} dl'_2, \quad (2.91)$$

Ομοίως η τάση των αγωγών αυτών ακολουθεί την σχέση

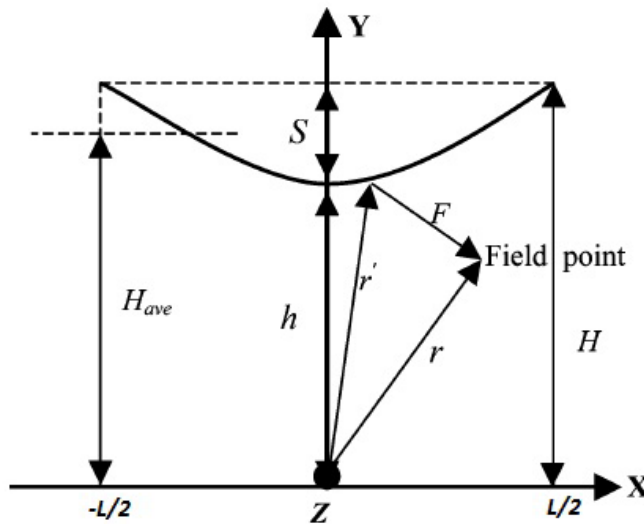
$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_1(r')} \frac{q(r')}{R_1} dl'_1 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_2(r')} \frac{q(r')}{R_2} dl'_2, \quad (2.92)$$

2.5.2.1 Ηλεκτρικό πεδίο ευθύγραμμου αγωγού

Το ηλεκτρικό πεδίο, με ευθύγραμμη θεώρηση του αγωγού, μπορεί να υπολογιστεί εύκολα με τη βοήθεια της μεθόδου ισοδυνάμων φορτίων (CSM - charge simulation method). Ο υπολογισμός αυτός με τη βοήθεια αυτής της μεθόδου μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη.

- υπολογισμό των ισοδυνάμων φορτίων ανά μονάδα μήκος του αγωγού
- υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από αυτά τα φορτία

Μέσω της CSM υπολογίζεται το ηλεκτρικό πεδίο στις δύο διαστάσεις, αφού οι αγωγοί θεωρούνται ευθύγραμμοι και έτσι το πεδίο κατά μήκος τους θεωρείται σταθερό. Το βύθισμα της γραμμής λαμβάνεται υπόψη παίρνοντας το "μέσο ύψος" του αγωγού όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



Σχήμα 2.13: Υπολογισμός μέσου ύψους αγωγού.

$$H_{ave} = H - \frac{2}{3}S \quad (2.93)$$

όπου

H : το μέγιστο ύψος του αγωγού (σε μέτρα)

S : το βύθισμα του αγωγού (σε μέτρα)

H_{ave} : το μέσο ύψος του αγωγού (σε μέτρα)

Επίσης σε περίπτωση που οι φάσεις των γραμμών μεταφοράς αποτελούνται από μια δέσμη αγωγών τότε αντικαθίστανται από ένα ισοδύναμο αγωγό με ισοδύναμη ακτίνα r_{eq} , η οποία δίνεται από την εξίσωση

$$r_{eq} = R \left(\frac{Nr_c}{R} \right)^{(1/N)} \quad (2.94)$$

όπου

N : αριθμός των αγωγών στη δέσμη,

R : η ολική ακτίνα όλης της δέσμης αγωγών.

Επομένως, οι μερικές χωρητικότητες των γραμμών μεταφοράς, λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω καθώς επίσης και τους αγωγούς των φάσεων μαζί με τα είδωλα τους, μπορούν εύκολα να υπολογιστούν. Έτσι από τον ορισμό της χωρητικότητας έχουμε

$$[Q] = [C][V] \quad (2.95)$$

Ο πίνακας C είναι συμμετρικός και εξαρτάται μόνο από την γεωμετρική διαμόρφωση των αγωγών. Για τον υπολογισμό του $[C]$, πρέπει να υπολογιστούν οι συντελεστές δυναμικού βάσει των πιο κάτω εξισώσεων:

$$I_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (2.96)$$

$$A_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2.97)$$

$$p_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2H_{avei}}{r_{eqi}} \quad (2.98)$$

$$p_{ij} = p_{ji} = \ln \left(\frac{I_{ij}}{A_{ij}} \right) \quad (2.99)$$

όπου

x_i, y_i : συντεταγμένες του i σημείου περιγράμματος,

x_j, y_j : συντεταγμένες του j γραμμικού φορτίου

p_{ij} : συντελεστές δυναμικού Maxwell μεταξύ του σημείου i και του γραμμικού φορτίου j .

Τέλος ο πίνακας των μερικών χωρητικοτήτων C υπολογίζεται ως το αντίστροφος πίνακας του P , πίνακα συντελεστών δυναμικού.

Αφού υπολογιστούν τα φορτία ανά μονάδα μήκους των αγωγών είναι δυνατόν να υπολογιστεί και το ολικό ηλεκτρικό πεδίο το οποίο δημιουργείται

από την υπέρθεση των πεδίων που προκαλούν οι διάφοροι αγωγοί και τα είδωλα τους. Έτσι εφαρμόζοντας τη Σχέση 2.91 στην περίπτωση άπειρου μήκους αγωγών καταλήγουμε στην εξής μορφή:

$$\vec{E} = \frac{q}{2\pi\epsilon_o} \left(\frac{1}{R_1^2} \vec{R}_1 - \frac{1}{R_2^2} \vec{R}_2 \right) \quad (2.100)$$

με

R_1 : απόσταση του αγωγού από το σημείο υπολογισμού,

R_2 : απόσταση του ειδώλου του αντίστοιχου αγωγού από το σημείο υπολογισμού

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες οι πιο πάνω σχέσεις αναλύονται :

$$E_{xi} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_o} (x_o - x_i) \left(\frac{1}{A_{oj}^2} - \frac{1}{I_{oj}^2} \right) \quad (2.101)$$

$$E_{yi} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_o} \left((y_o - y_i) \frac{1}{A_{oj}^2} - (y_o + y_i) \frac{1}{I_{oj}^2} \right) \quad (2.102)$$

όπου

x_o, y_o : συντεταγμένες του σημείου υπολογισμού

και το ολικό ηλεκτρικό πεδίο στις δύο διαστάσεις υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$E = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2} \quad (2.103)$$

με

$$E_x = \sum_{k=1}^i E_{xi} \quad (2.104)$$

$$E_y = \sum_{k=1}^i E_{yi} \quad (2.105)$$

2.5.2.2 Αγωγός με βύθισμα

Όπως στο μαγνητικό πεδίο έτσι και στο ηλεκτρικό, για τον υπολογισμό του σε πιο ρεαλιστικές περιπτώσεις θεωρούμε ότι ο αγωγός δεν είναι πλέον ευθύγραμμος αλλά εμφανίζει βύθισμα, το οποίο βασίζεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της γραμμής καθώς επίσης και στην μορφολογία του εδάφους όπου στηρίζονται οι πυλώνες. Επομένως χρησιμοποιούμε την ίδια σχέση για την περιγραφή της καμπύλης του αγωγού, όπως αυτή περιγράφηκε για το μαγνητικό πεδίο (Σχέση 2.68). Επίσης το διαφορικό στοιχείο στη κατεύθυνση

του ρεύματος \vec{dl} είναι το ίδιο σύμφωνα με τη Σχέση 2.69. Το μέτρο του διαφορικού στοιχείου αυτού, το οποίο είναι απαραίτητο σύμφωνα με την γενική σχέση υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου (Σχέση 2.91), είναι:

$$dl = \sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2} dx \quad (2.106)$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση αυτή στις σχέσεις 2.91 και 2.92 λαμβάνουμε τις ακόλουθες μορφές εξισώσεων:

$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q(r')\vec{R}_1}{R_1^3} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2} dx - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q(r')\vec{R}_2}{R_2^3} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2} dx, \quad (2.107)$$

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q(r')}{R_1} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2} dx - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{q(r')}{R_2} \sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2} dx \quad (2.108)$$

Στη περίπτωση που οι γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από περισσότερους από ένα αγωγούς, τα φορτία που προκαλούνται από τον κάθε αγωγό υπολογίζονται μέσω των συντελεστών δυναμικού.

Για παράδειγμα σε περίπτωση τριών αγωγών οι εξισώσεις διατυπώνονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} I_{1,1} - I_{2,1} & I_{1,2} - I_{2,2} & I_{1,3} - I_{2,3} \\ I_{2,1} - I_{2,1} & I_{2,2} - I_{2,2} & I_{2,3} - I_{2,3} \\ I_{3,1} - I_{2,3} & I_{3,2} - I_{2,3} & I_{3,3} - I_{2,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (2.109)$$

με

$$I_{1,i,j} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} dx \quad (2.110)$$

$$I_{2,i,j} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{C}\right)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} dx \quad (2.111)$$

Έχοντας πλέον υπολογίσει τα γραμμικά φορτία, το ηλεκτρικό πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο (x,y,z) πάνω από την επιφάνεια του εδάφους δίνεται από

$$E(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} [q_1 \quad q_2 \quad q_3] \begin{bmatrix} I_{3,1} - I_{4,1} \\ I_{3,2} - I_{4,2} \\ I_{3,3} - I_{4,3} \end{bmatrix} \quad (2.112)$$

με (x_i, y_i, z_i) οι συντεταγμένες των επιφανειακών σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια του κάθε αντίστοιχου αγωγού των τριών φάσεων, με $i=1,2,3$, όπου σε αυτούς τους υπολογισμούς θεωρούμε ότι τα σημεία αυτά βρίσκονται στο μέσο του αγωγού και στο κατώτερο σημείο αυτού. Δηλ. $x_i = 0$, $y_i = h_{min} - r$, $z = z_i$.

$$I3_i = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{[(x_o - x_i)\hat{i}_x + (y_o - y_i)\hat{i}_y + (z_o - z_i)\hat{i}_z] \sqrt{1 + (\frac{x}{C})^2}}{\sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o - y_i)^2 + (z_o - z_i)^2}} dx \quad (2.113)$$

$$I4_i = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{[(x_o - x_i)\hat{i}_x + (y_o + y_i)\hat{i}_y + (z_o - z_i)\hat{i}_z] \sqrt{1 + (\frac{x}{C})^2}}{\sqrt{(x_o - x_i)^2 + (y_o + y_i)^2 + (z_o - z_i)^2}} dx \quad (2.114)$$

Εφαρμογή σε απλό κύκλωμα με βύθισμα όπου οι φάσεις των αγωγών δεν είναι παράλληλες

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.9 έχουμε μια μεταβολή και ως προς την z κατεύθυνση. Επομένως ισχύει και πάλι η Σχέση 2.83 και έτσι η Σχέση 2.106, η οποία περιγράφει το μέτρο του διαφορικού στοιχείου στην κατεύθυνση του ρεύματος, τροποποιείται και ορίζεται πλέον ως εξής:

$$dl = \sqrt{1 + (\frac{x}{C})^2 + \frac{d_{ab} - d_{aa}}{L}} dx \quad (2.115)$$

Τέλος αντικαθιστούμε το τροποποιημένο dl στις σχέσεις υπολογισμού του ηλεκτρικού πεδίου.

Βιβλιογραφία

- [1] Ι.Α.Βομβορίδη, “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία”, Μέρη Α’ και Β’, Εκδόσεις Συμειών, Αθήνα 2009.
- [2] Ι.Ρουμελιώτης, Ι.Τσαλαμέγκας, “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία”, Τόμος Α’ και Β’, Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2011.
- [3] Θ.Δ.Τσιμπούκη, “Εισαγωγή στη βασική θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου”, Τόμος Ι, Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη 1991.
- [4] Α.Κλαδάς, “Σημειώσεις μαθήματος Ανάλυση Πεδίων Χαμηλής Συχνότητας με Η/Υ”, Αθήνα 2005.
- [5] Mirjana Peric, Slavoljub Aleksic, “Influence of Conductor Sag on Magnetic Field Distribution in Vicinity of Power Lines”, Faculty of Electronic Engineering of Niš, Serbia Dec 2011.
- [6] Klemen DEZELAK, Gorazd STUMBERGER, Franc JAKL, “Emissions of electromagnetic fields caused by sagged overhead power lines”, University of Maribor, Slovenia 2011.
- [7] V.K. Mehta, Rohit Mehta, “Principles of Power System”, Chapter 8, Publisher S. Chand and Company Ltd, July 2007.
- [8] S. Tupsie, A. Isaramongkolrak, and P. Pao-la-or, “Analysis of Electromagnetic Field Effects Using FEM for Transmission Lines Transposition, World Academy of Science, Engineering and Technology 53 2009.
- [9] Εμμανουήλ Δάφκος, Νεκτάριος Κιούρος, “Μελέτη της επίδρασης της γης στις σύνθετες αγωγιμότητες γραμμών μεταφοράς”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 2005,
- [10] Adel Z. El Dein, “Magnetic-Field Calculation Under EHV Transmission Lines for More Realistic Cases”, IEEE transactions on power delivery, Vol. 24, No. 4, October 2009.

- [11] Adel Z. El Dein, Mohamed A.A. Wahab, M.M. Hamada, T.H. Emmary “The Effects of the Span Configurations and Conductor Sag on the Electric-Field Distribution Under Overhead Transmission Lines”, IEEE transactions on power delivery, Vol. 25, No. 4, October 2010.
- [12] Adel Z. El Dein, “Calculations of the Charge Distribution along Multi-Overhead Transmission Lines’ Conductors and Ground Surface Electric Field”, Department of Electrical Engineering, Faculty of Energy Engineering, Aswan University, Egypt 2010
- [13] Adel Z. El Dein, “The Effects of the Span Configurations and Conductor Sag on the Magnetic-Field Distribution under Overhead Transmission Lines”, Journal of physics, Vol.1, No.2, July 2012.
- [14] J.C. Fernandez, H.L. Soibelzon, “The influence of sag in the electric field of high voltage overhead transmission lines”, 12th ISH, 2000.
- [15] Slavko Vujevic, Dino Lovric, Petar Sarajcev, “Comparison of 2D algorithms for the computation of power line electric and magnetic fields”, University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture, Croatia, May 2010
- [16] Sean J Mc Guinness, “Evaluation of Commercial EMF Software”, Diploma thesis, University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, October 2006.
- [17] D.Tsanakas, E.Mimos, A.Tzinevrakis, “Regulations for protection against electric and magnetic fields and optimum solution for the development of 150kV transmission lines in suburban regions, Department of Electrical and Computer Engineering University of Patras, May 2006.
- [18] Ευαγγέλου Ι. Μίμου, “Πειραματικός και υπολογιστικός καθορισμός της έκθεσης ανθρώπων σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία”, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Απρίλιος 2009.
- [19] Δημουλάς Ευριπίδης, “Προσομοίωση μαγνητικών πεδίων εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα ΗΜΜΥ, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη 2008.
- [20] I.O. Habiballah, T.K. Abdel-Galil, M.M.Dawoud, C.A.Belhadj, M.A.Majeed, T.A.Al-Betairi, “ELF Electric and Magnetic Fields Exposure Assessment of Live-Line Workers for 132 kV Transmission Line of SEC”, IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela 2006.

- [21] Klemen Dezelak, “Optimization Based Reduction of Electric and Magnetic Fields Emitted by Overhead Lines”, XI International PhD Workshop OWD 2009, 17–20 October 2009.
- [22] Αντωνίου Ε. Τζινευράκη, “Συμβολή στην ανάλυση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας”, Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Μάρτιος 2009.
- [23] Jovanio Junior, R. Marcos, C.Tenorio, A.Mateus, C.Egoavil, “Development of a matlab software for real-time mapping of electric fields on transmission power line”, IEEE, Federal University of Rondonia, Brazil 2011.
- [24] Δημήτριος Ν. Χατζηπέτρος, “Πεδιακή ανάλυση συνθετικών μονωτήρων υψηλής τάσης”, ΕΜΠ, Διπλωματική εργασία, Σχολή ΗΜΜΥ, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Ύψηλων Τάσεων, Αθήνα 2012.
- [25] Electromagnetic Modelling, The Clemson university vehicular electronics laboratory, (web: www.cvel.clemson.edu/modeling).

Κεφάλαιο 3

Ανάπτυξη λογισμικού για τον υπολογισμό χαμηλόσυχνων πεδίων κάτω από γραμμές μεταφοράς

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας κάτω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη περιγραφή του περιβάλλοντος ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκε (MATLAB) και των χρήσιμων εργαλείων, που προσφέρονται από αυτό για τη δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUIDE-Graphical User Interface Design Environment). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα βασικά μέρη του λογισμικού, ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, η επεξεργασία τους και τα αποτελέσματα που εξάγονται. Τέλος, εξετάζονται κάποιες εφαρμογές και παρατίθενται σε γραφήματα τα αποτελέσματά τους.

3.1 Περιβάλλον ανάπτυξης της εφαρμογής

Το περιβάλλον που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη της εφαρμογής υπολογισμού χαμηλόσυχνων πεδίων είναι το MATLAB σε έκδοση 7.12.0.635 (R2011a).

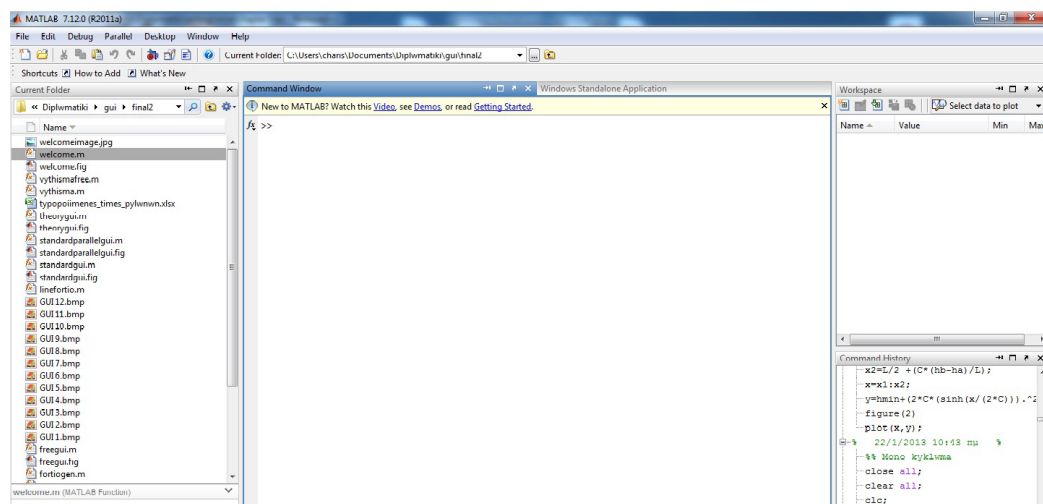
Το MATLAB είναι μια γλώσσα τέταρτης γενιάς, έχει διαδραστικό περιβάλλον και επιτρέπει στο χρήστη να κάνει τεχνικούς υπολογισμούς. Χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προγραμματισμό, καθώς περιέχει αρκετές εντολές, όπως while, for και if. Οι βασικές εντολές της χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εντολές ελέγχου ροής (if) και τις εντολές για επαναληπτικές δια-

δικασίες (for, while). Συνοπτικά η γλώσσα MATLAB έχει τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Μαθηματικούς/αριθμητικούς υπολογισμούς
- Ανάπτυξη αλγορίθμων
- Μοντελοποίηση και αναπαράσταση
- Ανάλυση και γραφική παρουσίαση δεδομένων

3.1.1 Το περιβάλλον του MATLAB

Τα βασικότερα μέρη του περιβάλλοντος του MATLAB είναι (Σχήμα 3.1):



Σχήμα 3.1: Το περιβάλλον του Matlab.

- Command window (παράθυρο εντολών): Μέσα στο παράθυρο αυτό γράφονται οι εντολές, δίνεται η εντολή εκτέλεσής τους και εμφανίζονται τα αποτελέσματα των πράξεων, δηλαδή γίνονται όλες οι αλληλεπιδράσεις του χρήστη με το πρόγραμμα.
- Command history (ιστορικό εντολών): Σε αυτό το παράθυρο φαίνονται οι εντολές που εκτέλεσε ο χρήστης και αν θέλει μπορεί να τις αντιγράψει ή να τις σύρει (drag and drop) στο παράθυρο εντολών.

- **Workspace (χώρος εργασίας):** Ο χώρος διεκπεραίωσης των πράξεων είναι ο βασικός χώρος λειτουργίας του προγράμματος. Ο χώρος αυτός βρίσκεται στη μνήμη του υπολογιστή και μέσα σε αυτόν εκτελούνται οι πράξεις και ταυτόχρονα διατηρούνται όλα τα αποτελέσματά τους, με σκοπό να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενες πράξεις.
- **Current directory (τρέχων κατάλογος):** Είναι το σημείο αναφοράς των αρχείων του προγράμματος. Αν είναι επιθυμητό να κληθεί μια συνάρτηση ή ένα m-file πρέπει να βρίσκεται στο τρέχοντα κατάλογο.

3.1.2 Δημιουργία και εκτέλεση m-files

Ένα από τα πράγματα που κάνουν το Matlab να υπερτερεί απέναντι σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού, είναι η ευκολία με την οποία μπορεί κανείς να προγραμματίσει. Στη γενική περίπτωση, για απλούς υπολογισμούς, το παράθυρο εντολών είναι αρκετά εύχρηστο. Όσο αυξάνεται όμως το πλήθος των εντολών ή πρέπει να αλλάζουν οι τιμές κάποιων μεταβλητών, η διαδικασία να γράφει ο χρήστης στο παράθυρο εντολών είναι χρονοβόρα. Το κυριότερο είναι ότι όταν κλείσει το πρόγραμμα τότε ότι γράφτηκε στο παράθυρο εντολών θα σβηστεί.

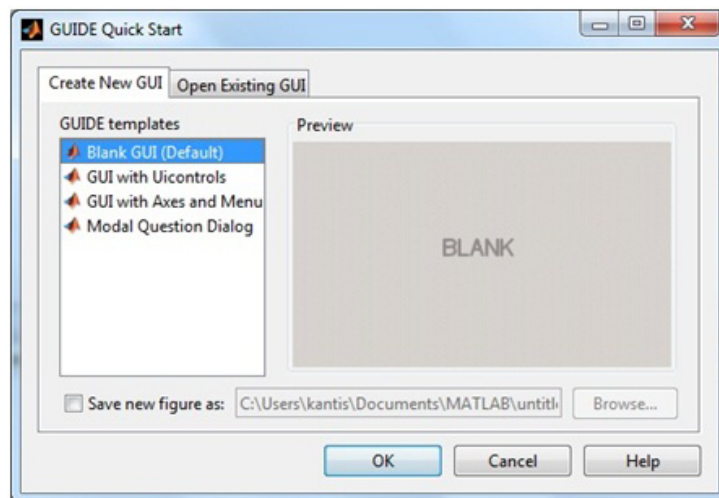
Για να λυθούν τα παραπάνω προβλήματα, θα πρέπει να γίνεται αποθήκευση των εντολών αυτών σε ένα αρχείο, το οποίο θα καλείται από το παράθυρο εντολών και θα εκτελούνται οι ανάλογες εντολές. Το MATLAB δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει τα λεγόμενα m-files, τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα script files και τις functions.

- **Script files:** Για να δημιουργηθεί ένα script file, ακολουθείται η διαδικασία: File→New→Script και ανοίγει ο editor. Μέσα στο παράθυρο αυτό συντάσσονται οι εντολές, όπως ακριβώς θα συντάσσονταν και μέσα στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Τα αρχεία αυτά αποθηκεύονται μέσα στην ενεργό διεύθυνση αποθήκευσης του MATLAB, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα άμεσης εκτέλεσής τους με την κλήση του ονόματός τους από το παράθυρο εντολών. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα να αποθηκεύεται πλήθος εντολών, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται όποτε απαιτείται. Τα script files λειτουργούν με γενικές μεταβλητές, δηλαδή είναι “ορατές” και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και έξω από το συγκεκριμένο αρχείο.
- **Functions:** Αποτελούν τη δεύτερη κατηγορία των m-files και η διαδικασία δημιουργίας τους είναι: File→New→Function. Η μεγάλη διαφορά τους με τα script files είναι ότι οι μεταβλητές είναι τοπικές, δηλαδή μια μεταβλητή που περιέχεται σε μια function δεν μπορεί να επηρεαστεί από διαδικασίες εκτός function. Ακόμα μπορεί να δεχθεί δεδομένα σαν ορίσματα και να επιστρέφει αποτελέσματα. Μια function πρέπει πάντα να αρχίζει με την ακόλουθη γραμμή: `function [out1,...,outn] = name`

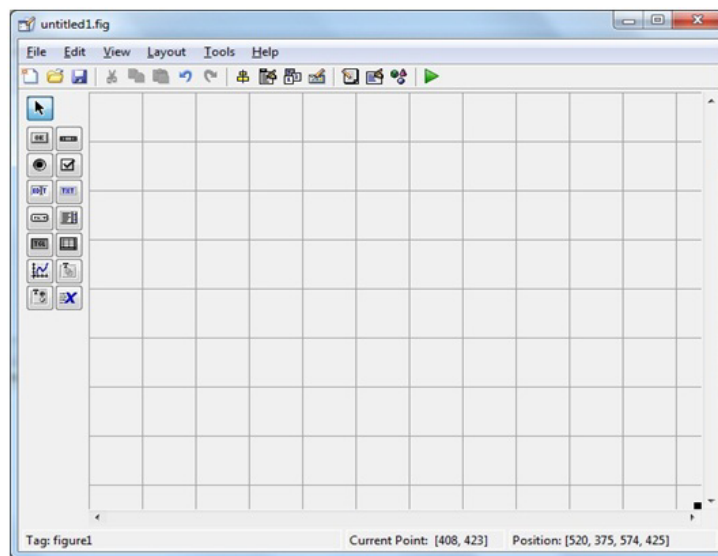
(input1,...,inputm), όπου out1, ..., outn είναι τα αποτελέσματα που επιστρέφονται, name είναι το όνομά της και input1,..., inputm τα ορίσματά της. Μια function δεν είναι απαραίτητο να έχει ορίσματα ή να επιστρέφει αποτελέσματα. Σαν ορίσματα, (αντίστοιχα αποτελέσματα), μπορούν να μπουν μεταβλητές των οποίων οι τιμές μπορούν να είναι πολλών ειδών. Όπως για παράδειγμα αριθμοί, συμβολοσειρές, πίνακες και πολλές άλλες δομές που μπορεί να επεξεργαστεί το MATLAB [1, 2, 3].

3.1.3 Δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος (GUI)

Μια πολύ χρήσιμη δυνατότητα που προσφέρει το MATLAB στο χρήστη, είναι να δημιουργήσει γραφικό περιβάλλον για τις εφαρμογές του. Η εκκίνηση του GUIDE γίνεται εύκολα με δύο τρόπους. Πρώτον, εκτελώντας την εντολή guide στο παράθυρο εντολών και δεύτερον, επιλέγοντας από τη γραμμή του μενού File→New→GUI. Στη συνέχεια, ο οδηγός ρωτάει το χρήστη αν θέλει να δημιουργήσει ένα κενό παράθυρο (Blank GUI), ένα παράθυρο βασισμένο σε κάποια πρότυπα ή να ανοίξει ένα έτοιμο παράθυρο (Σχήμα 3.2). Στη συνέχεια, αν ο χρήστης πατήσει την προεπιλεγμένη επιλογή “Blank GUI” θα ανοίξει ένα άδειο παράθυρο, στο οποίο μπορεί να δημιουργήσει το δικό του GUI (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.2: Επιλογές για δημιουργία νέου γραφικού περιβάλλοντος.



Σχήμα 3.3: Περιβάλλον και εργαλεία για τη δημιουργία GUI.

Ακολουθως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, το περιβάλλον δημιουργίας του παραθύρου αποτελείται από μια κεντρική γραμμή επιλογών, μια γραμμή εργαλείων και μια κάθετη εργαλειοθήκη στα αριστερά. Η γκριζα περιοχή με το πλέγμα είναι το φόντο του παραθύρου. Η κάθετη εργαλειοθήκη περιέχει τα παρακάτω 14 αντικείμενα (objects), με τα οποία ο χρήστης μπορεί να εμπλουτίσει το γραφικό του περιβάλλον:

Push button: κουμπί που όταν πατηθεί εκτελεί μια επιθυμητή λειτουργία.

Slider: δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλλει ο χρήστης κάποια μεταβλητή, με τη βοήθεια μιας μπάρας μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής. Συνοδεύει κάποιο κείμενο ή γράφημα και η μπάρα μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κάθετη.

Radio button: στρογγυλό κουμπί με το οποίο ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μόνο μια επιλογή από ένα πλήθος επιλογών. Διαλέγοντας μια, αναιρείται κάποια άλλη.

Check box: δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να διαλέξει μια ή περισσότερες επιλογές.

Edit text: είναι ένα πεδίο στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να μορφοποιήσει αλφαριθμητικά δεδομένα. Μπορεί να γίνει εισαγωγή κειμένου μονής ή πολλαπλής γραμμής.

Static text: προβάλλει στην οθόνη μια γραμμή κειμένου. Το κείμενο αυτό δε μπορεί να το επεξεργαστεί ο χρήστης του λογισμικού.

Pop-up menu: παρέχει στο χρήστη μια λίστα επιλογών που ανοίγει όταν πατηθεί.

List box: παρέχει στο χρήστη μια λίστα ενός ή περισσότερων επιλογών που παραμένει ανοιχτή. Όταν υπάρχουν πολλές επιλογές εμφανίζεται αυτόματα μια μπάρα.

Toggle button: δίνει τη δυνατότητα επιλογής ή όχι μιας λειτουργίας.

Table: παρέχει στο χρήστη επιλογές σε μορφή πίνακα.

Axes: δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής μιας γραφικής παράστασης στο παράθυρο.

Panel: χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση πολλών στοιχείων ελέγχου.

Button group: είναι σαν το panel, αλλά επιδρά αυτόματα στην ομαδοποίηση των radio buttons και toggle buttons.

ActiveX control: αντικείμενο ελέγχου ActiveX.

Η εισαγωγή των παραπάνω αντικειμένων στο παράθυρο είναι απλή και γίνεται με απλό σύρσιμο (drag and drop). Ειδικά τα αντικείμενα push button, radio button, slider, edit text, static text, list box, pop-up menu, check box και toggle button ανήκουν στην κατηγορία των στοιχείων ελέγχου (uicontrols). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όσες φορές θέλει το κάθε αντικείμενο στο παράθυρο. Μέσω του object browser βλέπει πόσα και ποια αντικείμενα υπάρχουν στο συγκεκριμένο παράθυρο της εφαρμογής του και επιλέγοντάς τα βλέπει τη θέση τους. Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να στοιχίσει κάθετα ή οριζόντια όποια στοιχεία ελέγχου επιθυμεί, μέσω του εικονιδίου align objects. Χρησιμοποιώντας τον property inspector, μέσω του εικονιδίου ή με διπλό κλικ ή δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο, μπορεί να καθορίσει τις ιδιότητες των κουμπιών, όπως το χρώμα του φόντου, τη γραμματοσειρά, το είδος των γραμμμάτων, αν είναι ορατό ή όχι ένα στοιχείο, τη θέση του, την ετικέτα του (tag) ή το κείμενο (string) που θα είναι πάνω του κ.α. Αυτές είναι κάποιες από τις κοινές ιδιότητες σε όλα τα στοιχεία ελέγχου που χρησιμοποιούνται.

Τα περισσότερα στοιχεία ελέγχου συνοδεύονται από μια συνάρτηση callback, στην οποία ο χρήστης προσθέτει τις εντολές που θέλει να εκτελεί η ενεργοποίηση του κάθε στοιχείου ελέγχου. Όποιες μεταβλητές χρησιμοποιήσει μέσα στη συνάρτηση είναι τοπικές και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν από άλλες συναρτήσεις. Αρχικά, δημιουργούνται δύο callbacks που είναι η opening function και η output function. Η πρώτη εκτελείται πριν η εικόνα του GUI (figure) γίνει ορατή στο χρήστη, αλλά αφού δημιουργήσει όλα τα αντικείμενα που θέλει και η δεύτερη επιστρέφει δεδομένα στο παράθυρο εντολών. Και στις δύο περιπτώσεις μπορεί ο χρήστης να προσθέσει δικό του κώδικα, όπως για παράδειγμα στην opening function μπορεί να αρχικοποιήσει δεδομένα. Κάθε

3.2. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΧΑΜΗΛΟΣΥΧΝΩΝ ΠΕΔΙΩΝ 57

φορά που εισάγεται ένα γραφικό αντικείμενο με το GUIDE παράγεται και στο m-file το αντίστοιχο callback.

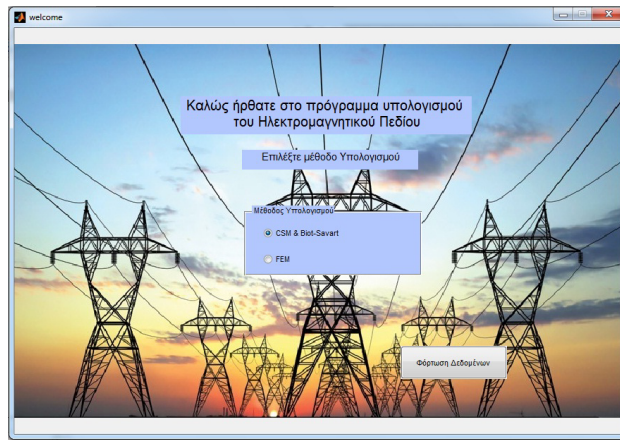
Τέλος, το GUI δημιουργεί για κάθε παράθυρο δύο αρχεία, το m-αρχείο και το fig-αρχείο. Το fig-αρχείο είναι το αρχείο στο οποίο το MATLAB αποθηκεύει όλα τα αντικείμενα που έχει εισάγει ο χρήστης, την ακριβή θέση τους, καθώς και όλες τις τιμές των ιδιοτήτων τους που μπορεί να υπάρχουν. Εδώ ο χρήστης σχεδιάζει την εμφάνιση του παραθύρου. Το m-αρχείο είναι το αρχείο στο οποίο ο χρήστης θα γράψει τον κώδικα που θα ενσωματωθεί στα στοιχεία ελέγχου, ώστε αυτά να εκτελέσουν τις επιθυμητές λειτουργίες. Αυτό το αρχείο αναφέρεται και σαν GUI m-file. Κάθε αρχείο *.fig πρέπει να συνοδεύεται από το αντίστοιχο αρχείο *.m με το ίδιο όνομα. Κάθε φορά που ο χρήστης δημιουργεί ένα νέο παράθυρο (figure), το GUI δημιουργεί αυτόματα και τους δύο αυτούς τύπους αρχείων [1, 4].

3.2 Λογισμικό υπολογισμού χαμηλόσυχνων πεδίων

Με τη βοήθεια του Matlab υλοποιήθηκε το λογισμικό για τον υπολογισμό χαμηλόσυχνων πεδίων που προέρχονται από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πρόγραμμα αυτό υλοποιήθηκαν τα όσα αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2, όπως για παράδειγμα υπολογισμός μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου, με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών και με θεώρηση βυθίσματος, τυποποιημένων γραμμών μεταφοράς του ελληνικού δικτύου. Επίσης δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει αυθαίρετες διατάξεις γραμμών μεταφοράς και να υπολογίσει τα πεδία, καθώς επίσης να πειραματιστεί για το ποια ακολουθία φάσεων συνιστά τη βέλτιστη διάταξη. Στη συνέχεια ακολουθεί μια γνωριμία με το λογισμικό αυτό και δίνονται οι απαραίτητες οδηγίες για την ορθή του λειτουργία.

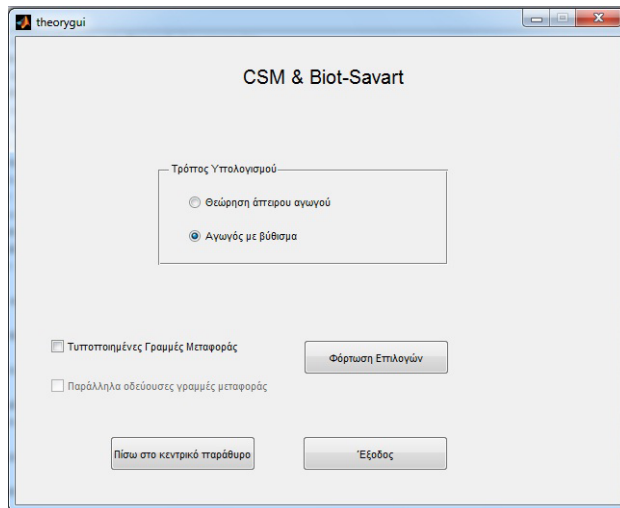
Το λογισμικό ξεκινάει με το άνοιγμα του γραφικού περιβάλλοντος “welcome fig” ή πληκτρολογώντας “welcome” στο παράθυρο εντολών (command window), αφού βεβαιωθούμε πρώτα ότι όλα τα σχετικά αρχεία του λογισμικού βρίσκονται στον τρέχοντα κατάλογο.

Έτσι εμφανίζεται το πιο κάτω παράθυρο (Σχήμα 3.4), το οποίο καλωσορίζει τον χρήστη και ζητάει από αυτόν να επιλέξει με ποια μέθοδο επιθυμεί να υπολογίσει τα χαμηλόσυχνα πεδία.



Σχήμα 3.4: Παράθυρο εκκίνησης του λογισμικού.

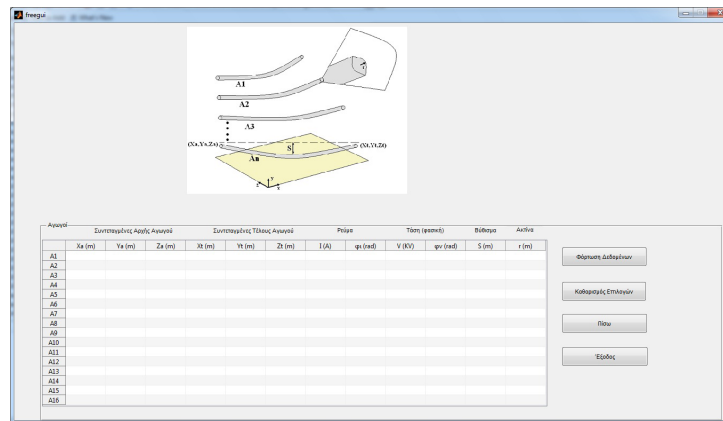
Στην παρούσα εργασία υλοποιήθηκε μόνο η πρώτη επιλογή. Δηλαδή υπολογισμός των πεδίων μέσω των εξισώσεων Biot-Savart και της CSM μεθόδου. Επομένως επιλέγοντας τη συγκεκριμένη επιλογή και πατώντας το κουμπί “Φόρτωση Δεδομένων” προχωράμε στο επόμενο παράθυρο του γραφικού περιβάλλοντος, το οποίο αποτελεί το κεντρικό παράθυρο μέσα από το οποίο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει υπολογισμό ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών ή με θεώρηση βυθίσματος, τυποποιημένων διατάξεων ή αυθαίρετων καθώς επίσης και υπολογισμό πεδίων παράλληλα οδευουσών γραμμών.



Σχήμα 3.5: Κεντρικό παράθυρο επιλογών.

Επιλέγοντας “Αγωγός με βύθισμα” και πατώντας “Φόρτωση Επιλογών” περνάμε στο γραφικό περιβάλλον όπου ο χρήστης θέλει να υπολογίσει τα χα-

μηλόσυχνα πεδία μιας τυχαίας διάταξης αγωγών, την οποία ορίζει μόνος του με βάση την εισαγωγή δεδομένων που θα καταχωρήσει στο πρόγραμμα (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Ελεύθερες επιλογές χρήστη στην περίπτωση υπολογισμού πεδίων με θεώρηση του βυθίσματος των αγωγών.

Εφαρμογή σε γραμμή απλού κυκλώματος 150KV με βύθισμα

Ας προχωρήσουμε λοιπόν σε μια εφαρμογή για να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος που θα εισαχθούν τα δεδομένα στον πιο πάνω πίνακα του προγράμματος. Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο για μια γραμμή απλού κυκλώματος η οποία έχει τα πιο κάτω στοιχεία:

Γραμμή	Υψος	Απόσταση z (m)	Μήκος γραμμής (m)	Βύθισμα (m)	Ακτίνα (m)
A1	19.95	-6.6	400	9	0.012
A2	19.95	0	400	9	0.012
A3	19.95	6.6	400	9	0.012

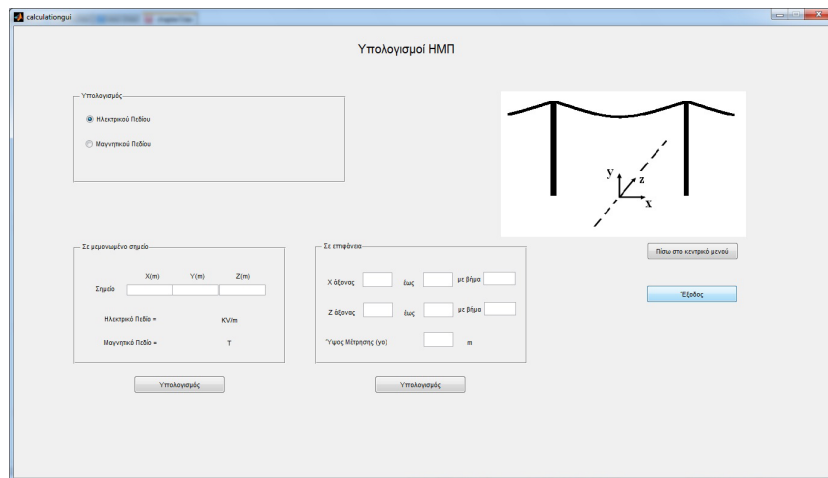
Τότε ο αντίστοιχος πίνακας του προγράμματος συμπληρώνεται ως εξής:

Αγωγός	Συντεταγμένες Αρχής Αγωγού			Συντεταγμένες Τέλους Αγωγού			Ρόση		Τάση (φασική)		Βύθισμα		Ακτίνα
	Xa (m)	Ya (m)	Za (m)	Xb (m)	Yb (m)	Zb (m)	I (A)	φa (rad)	V (KV)	φv (rad)	S (m)	r (m)	
A1	-200	19.9500	-6.6000	200	19.9500	-6.6000	100	-2.0940	86.6000	-2.0940	9	0.0120	
A2	-200	19.9500	0	200	19.9500	0	100	0	86.6000	0	9	0.0120	
A3	-200	19.9500	6.6000	200	19.9500	6.6000	100	2.0940	86.6000	2.0940	9	0.0120	
A4													
A5													
A6													
A7													
A8													
A9													
A10													
A11													
A12													
A13													
A14													
A15													
A16													

Σχήμα 3.7: Εισαγωγή δεδομένων στο πρόγραμμα για την περίπτωση απλού κυκλώματος 150KV.

Παρατηρώντας τον πίνακα (Σχήμα 3.7) βλέπουμε ότι υπάρχει η δυνατότητα η γραμμή στα δύο της άκρα να βρίσκεται σε διαφορετικά ύψη και σε διαφορετικές αποστάσεις ως προς τον z άξονα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρούμε ότι τα δύο άκρα της κάθε γραμμής μεταξύ τους βρίσκονται στο ίδιο ύψος και στην ίδια απόσταση από τον z άξονα. Γι' αυτό εισάγουμε τα ίδια δεδομένα στις αντίστοιχες στήλες. Επίσης, επειδή από τα δεδομένα και οι τρεις γραμμές είναι 400 m, υποθέτουμε στο πρόγραμμα ότι κάθε γραμμή θα ξεκινάει από τα -200m και θα καταλήγει στα +200m. Επιπλέον, επειδή στο πρόγραμμα εισάγεται η φασική τάση μετατρέπουμε την πολική τάση των 150 KV στην αντίστοιχη φασική η οποία ισούται με 86.6 KV. Τέλος, οι τιμές γωνίας του ρεύματος και της τάσης εισάγονται σε μονάδες μέτρησης rad (π.χ -2.094 rad αντιστοιχεί στην γωνία των -120 μοιρών).

Επόμενο βήμα είναι να πατήσουμε την εντολή “Φόρτωση Δεδομένων”. Μεταφερόμαστε πλέον στο γραφικό περιβάλλον υπολογισμών όπου έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις τιμές μεμονωμένων σημείων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ή σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα αφού πρώτα δώσουμε τα όρια υπολογισμού καθώς επίσης και το ύψος μέτρησης (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8: Γραφικό περιβάλλον υπολογισμών των ELF πεδίων.

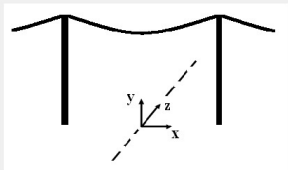
Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε σε δισδιάστατη μορφή το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο των τριών αγωγών όπου εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή (δηλ. για $x=0$) και με όρια $\pm 50m$ εκατέρωθεν του άξονα των x . Τότε από το γραφικό περιβάλλον επιλέγουμε στην καρτέλα υπολογισμού το μαγνητικό πεδίο και συμπληρώνουμε την αντίστοιχη καρτέλα “σε επιφάνεια” σύμφωνα με το πιο κάτω σχήμα.

Υπολογισμοί ΗΜΠ

Υπολογισμός

Ηλεκτρικού Πεδίου

Μαγνητικού Πεδίου



Σε μεμονωμένο σημείο

X(m) Y(m) Z(m)

Σημείο

Ηλεκτρικό Πεδίο = KV/m

Μαγνητικό Πεδίο = T

Σε επιφάνεια

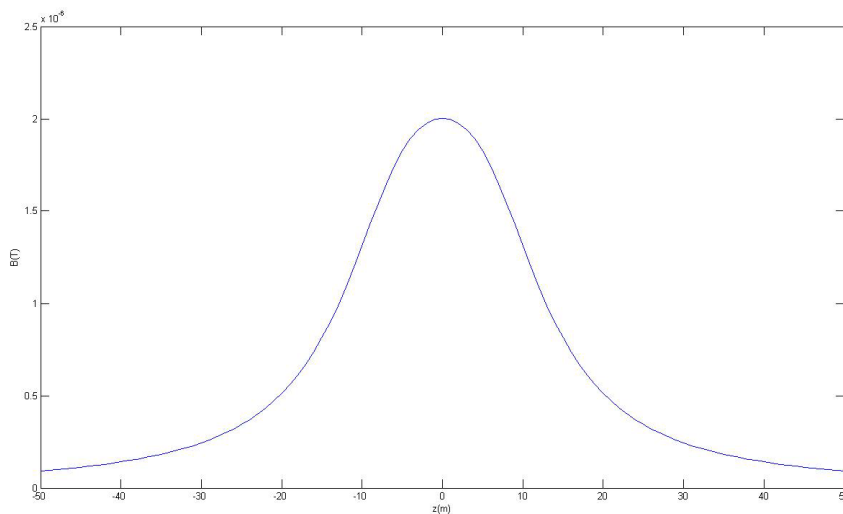
X άξονας έως με βήμα

Z άξονας έως με βήμα

Υψος Μέτρησης (y0) m

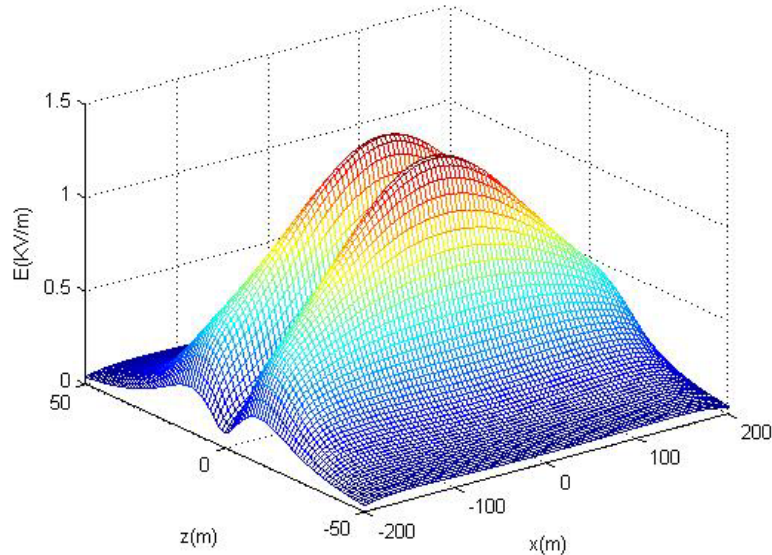
Σχήμα 3.9: Εισαγωγή δεδομένων για τον υπολογισμό μαγνητικού πεδίου σε δισδιάστατο γράφημα.

Πατώντας στην αντίστοιχη καρτέλα το κουμπί υπολογισμού προκύπτει το δισδιάστατο γράφημα (Σχήμα 3.10).



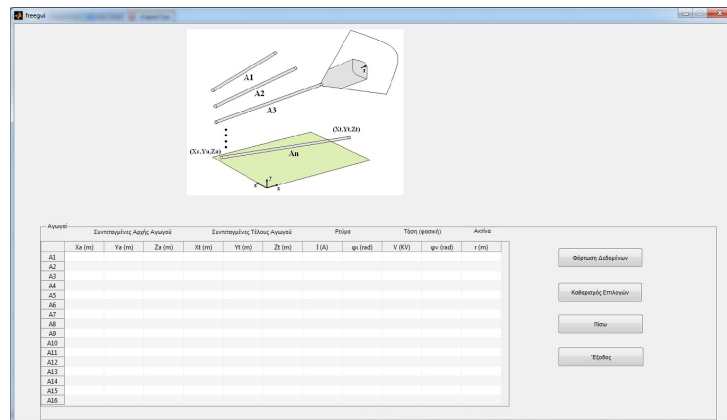
Σχήμα 3.10: Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε δισδιάστατο γράφημα.

Αντίστοιχα τώρα για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε τρισδιάστατο γράφημα με όρια $x = \pm 200m$, $z = \pm 50m$ ακολουθώντας πανομοιότυπη διαδικασία προκύπτει πολύ εύκολα το επιθυμητό αποτέλεσμα (Σχήμα 3.11).



Σχήμα 3.11: Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε τρισδιάστατο γράφημα.

Επιλέγοντας “Πίσω στο κεντρικό μενού” επιστρέφουμε ξανά στο κεντρικό παράθυρο επιλογών. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό χαμηλόσυχνων πεδίων τυχαίας διάταξης με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών επιλέγουμε απλά “Θεώρηση άπειρου αγωγού” από το κεντρικό μενού και στη συνέχεια και πάλι “Φόρτωση Επιλογών”. Παρατηρούμε ότι περνάμε σε ένα πανομοιότυπο περιβάλλον με το προηγούμενο όπου τώρα η μόνη διαφορά είναι ότι απουσιάζει η στήλη του βυθίσματος της γραμμής (Σχήμα 3.12)



Σχήμα 3.12: Ελεύθερες επιλογές χρήστη στην περίπτωση υπολογισμού πεδίων με άπειρη θεώρηση των αγωγών.

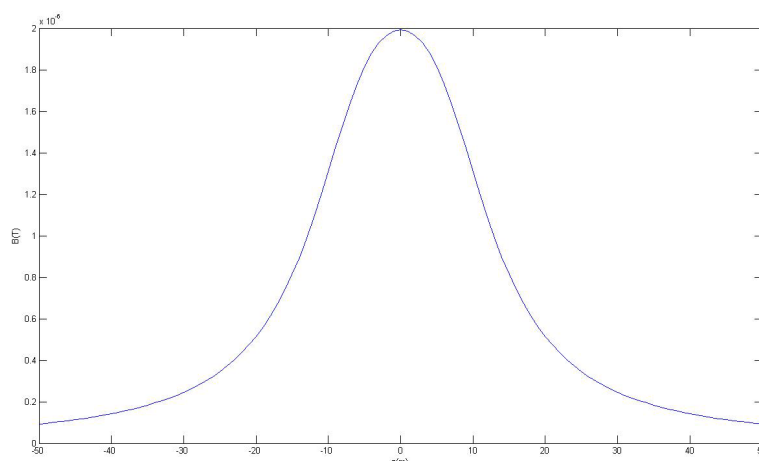
Εφαρμογή σε γραμμή απλού κυκλώματος 150KV με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών

Για τον υπολογισμό των πεδίων με άπειρη θεώρηση θα προχωρήσουμε σε μια εφαρμογή η οποία θα μας δώσει χρήσιμα συμπεράσματα συγκρίνοντας τις δυο θεωρήσεις των αγωγών. Θα χρησιμοποιήσουμε τα ίδια δεδομένα με την προηγούμενη εφαρμογή με τη διαφορά ότι τώρα οι αγωγοί θεωρείται ότι αναρτώνται στο $H=11$ το οποίο αντιστοιχεί και το κατώτερο σημείο των αγωγών με βύθισμα.

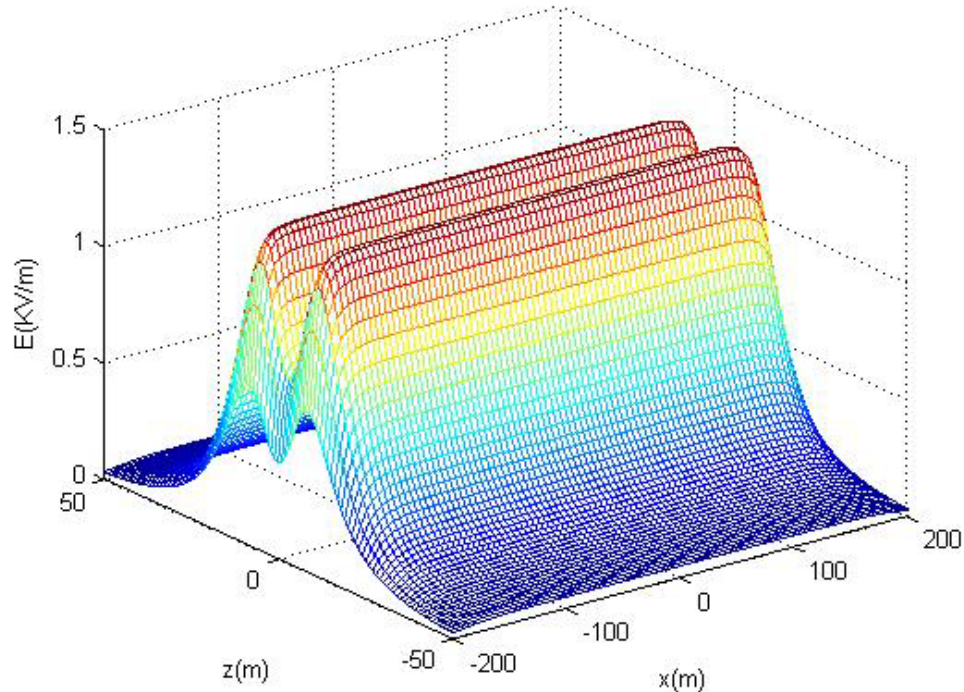
Γραμμή	Ύψος	Απόσταση z (m)	Μήκος γραμμής (m)	Ακτίνα (m)
A1	11	-6.6	400	0.012
A2	11	0	400	0.012
A3	11	6.6	400	0.012

Ο αντίστοιχος πίνακας του προγράμματος συμπληρώνεται ομοίως με την προηγούμενη εφαρμογή. Επόμενο βήμα είναι να πατήσουμε την εντολή “Φόρτωση Δεδομένων”. Μεταφερόμαστε ξανά στο γραφικό περιβάλλον υπολογισμών.

Έστω τώρα ότι θέλουμε και πάλι να υπολογίσουμε σε δισδιάστατη μορφή το μαγνητικό πεδίο στο $x=0$, με όρια $\pm 50m$ εκατέρωθεν του άξονα των x , καθώς επίσης και το ηλεκτρικό πεδίο σε τρισδιάστατο γράφημα με όρια $x = \pm 200m, z = \pm 50m$. Συμπληρώνοντας και πάλι τις αντίστοιχες καρτέλες και επιλέγοντας κάθε φορά το υπολογιζόμενο πεδίο προκύπτουν τα δύο αντίστοιχα γραφήματα (Σχήμα 3.13 και Σχήμα 3.14).



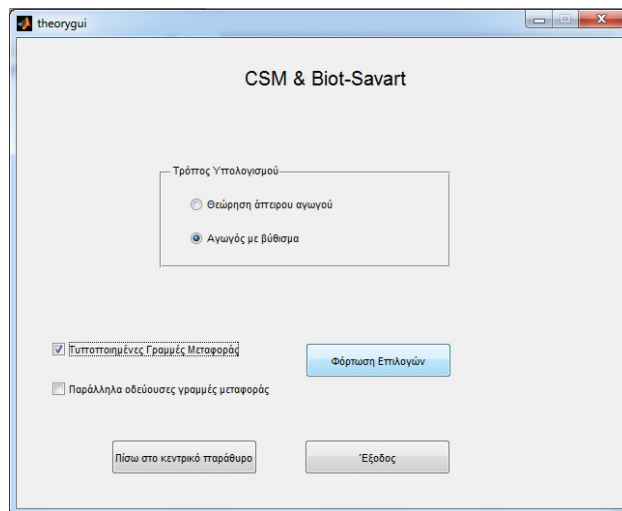
Σχήμα 3.13: Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε δισδιάστατο γράφημα.



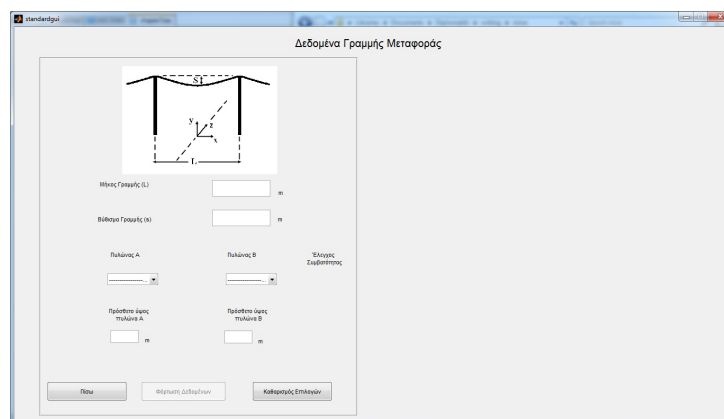
Σχήμα 3.14: Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε τρισδιάστατο γράφημα.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 3.11-3.14 βλέπουμε ότι οι τιμές των πεδίων, τόσο για άπειρη θεώρηση των αγωγών όσο και για τη θεώρηση με βύθισμα, είναι πολύ κοντά. Βέβαια, λόγω της θεώρησης με βύθισμα, έχουμε πεδίο στις 3 διαστάσεις αφού επηρεάζεται και η μεταβλητή x , σε αντίθεση με την άπειρη θεώρηση, όπου κατά μήκος της γραμμής το πεδίο θεωρείται σταθερό.

Προχωράμε τώρα για να γνωρίσουμε και κάποιες άλλες δυνατότητες του λογισμικού. Επιστρέφοντας πίσω στο κεντρικό μενού και ενεργοποιώντας την επιλογή “Τυποποιημένες Γραμμές Μεταφοράς” είτε με άπειρη θεώρηση είτε με θεώρηση με βύθισμα έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία παράγονται από τυποποιημένες διατάξεις γραμμών μεταφοράς του ελληνικού δικτύου (Για τις ακριβείς διαστάσεις των τυποποιημένων πυλώνων βλέπετε στο αντίστοιχο παράρτημα). Έχοντας ενεργοποιημένη την επιλογή αυτή και επιλέγοντας τρόπο υπολογισμού “Αγωγός με βύθισμα” πατούμε την εντολή “Φόρτωση Επιλογών” (Σχήμα 3.15) Περνάμε πλέον στο γραφικό περιβάλλον τυποποιημένων περιπτώσεων γραμμών μεταφοράς το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3.16).



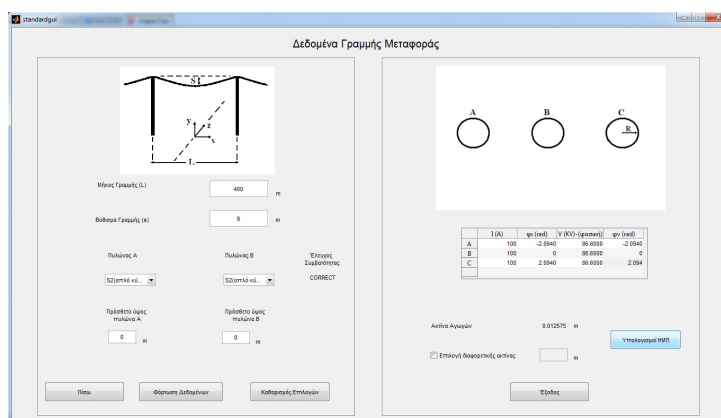
Σχήμα 3.15: Τυποποιημένες περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς.



Σχήμα 3.16: Γραφικό περιβάλλον τυποποιημένων περιπτώσεων γραμμών μεταφοράς.

Ακολούθως εισάγονται τα δεδομένα από τον χρήστη σύμφωνα με το σχήμα, τα οποία είναι το μήκος και το βύθισμα της γραμμής καθώς και η επιλογή των τυποποιημένων πυλώνων A και B μέσω των οποίων αναρτώνται τα δύο άκρα των γραμμών μεταφοράς. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή των πυλώνων καθώς δεν είναι δυνατόν να επιλεγεί στο πρώτο άκρο πυλώνας των 150KV και στο δεύτερο πυλώνας 400 KV ή δεν είναι δυνατόν να επιλεγεί στο ένα άκρο πυλώνας μονού κυκλώματος και στο δεύτερο άκρο πυλώνας διπλού κυκλώματος. Αν η επιλογή που δώσει ο χρήστης είναι σωστή τότε εμφανίζεται το ανάλογο μήνυμα ορθότητας στον έλεγχο συμβατότητας και μόνο τότε ενεργοποιείται το κουμπί “Φόρτωση Δεδομένων” για να συνεχιστεί η διαδικασία υπολογισμού. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ο χρήστης να εισάγει κάποιο πρόσθετο ύψος που είναι πιθανόν να έχει ένας από τους δύο πυλώνες φαινόμενο

το οποίο παρατηρείται έντονα στην πραγματικότητα λόγω της ανομοιομορφίας του εδάφους. Αφού έχουμε συμπληρώσει ορθά τα δεδομένα αυτά προχωράμε στην φόρτωση δεδομένων και στο γραφικό περιβάλλον εμφανίζονται κάποιες άλλες επιλογές όπως μέτρο και φάση γωνιάς και ρεύματος κάθε φάσης καθώς επίσης η ακτίνα των αγωγών. Στο πρόγραμμα βρίσκεται αποθηκευμένη η τυποποιημένη ακτίνα των αγωγών. Αν επιθυμεί ο χρήστης να εισάγει μια διαφορετική ακτίνα τότε ενεργοποιεί την επιλογή “Επιλογή διαφορετικής ακτίνας” και εισάγει την επιλογή του στο αντίστοιχο πλαίσιο (Σχήμα 3.17).



Σχήμα 3.17: Γραφικό περιβάλλον τυποποιημένων περιπτώσεων γραμμών μεταφοράς.

Εφαρμογή σε τυποποιημένους πυλώνες S2 απλού κυκλώματος 150KV με βύθισμα

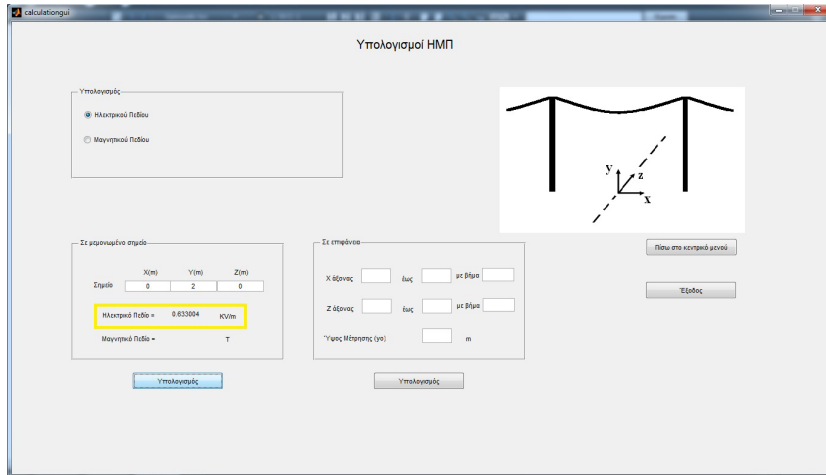
Ας προχωρήσουμε λοιπόν σε μια εφαρμογή. Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο για μια τυποποιημένη περίπτωση όπου οι δύο πυλώνες είναι τύπου S2 τα δεδομένα των οποίων φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

Πυλώνας	Ύψος	Απόσταση Α-φάσης (m)	Απόσταση Β-φάσης (m)	Απόσταση Γ-φάσης (m)
Α-τύπου S2	19.95	-5	0	5
Β-τύπου S2	19.95	-5	0	5

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα σύμφωνα με τα προηγούμενα σχήματα (3.16-3.17). Αφού εισάγουμε τα απαραίτητα δεδομένα επιλέγουμε “Υπολογισμοί ΗΜΠ” και προχωράμε στο γραφικό περιβάλλον υπολογισμών, οι δυνατότητες του οποίου περιγράφηκαν στις προηγούμενες εφαρμογές.

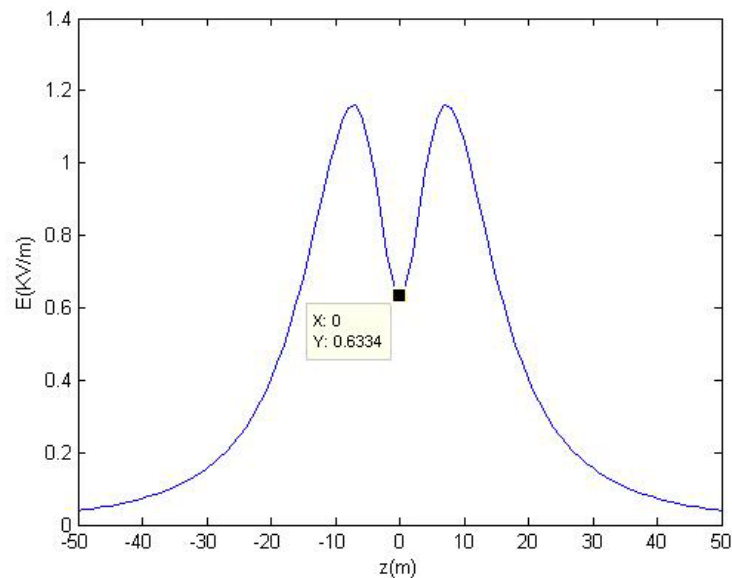
Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε μεμονωμένο σημείο, έστω στο σημείο $\Sigma(0,2,0)$ το οποίο αντιστοιχεί στο κατώτερο σημείο των γραμμών

στο κέντρο μεταξύ των δύο πυλώνων και σε ύψος μέτρησης τα 2m, εισάγουμε τα αντίστοιχα δεδομένα στην πρώτη καρτέλα και πατάμε το αντίστοιχο κουμπί υπολογισμού (Σχήμα 3.18)

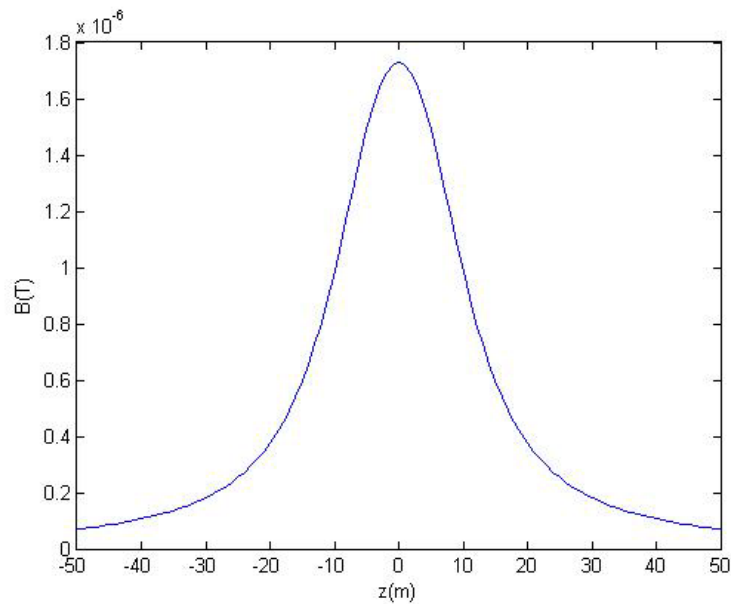


Σχήμα 3.18: Ηλεκτρικό πεδίο μεμονωμένου σημείου $\Sigma(0,2,0)$.

Ας δημιουργήσουμε επίσης και τα διδιάστατα γραφήματα τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο στο $x=0$ και με όρια υπολογισμού $z = \pm 50m$ εκατέρωθεν του άξονα x (Σχήμα 3.19, Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.19: Διδιάστατο γράφημα ηλεκτρικού πεδίου στο $x=0$.



Σχήμα 3.20: Δισδιάστατο γράφημα μαγνητικού πεδίου στο $x=0$.

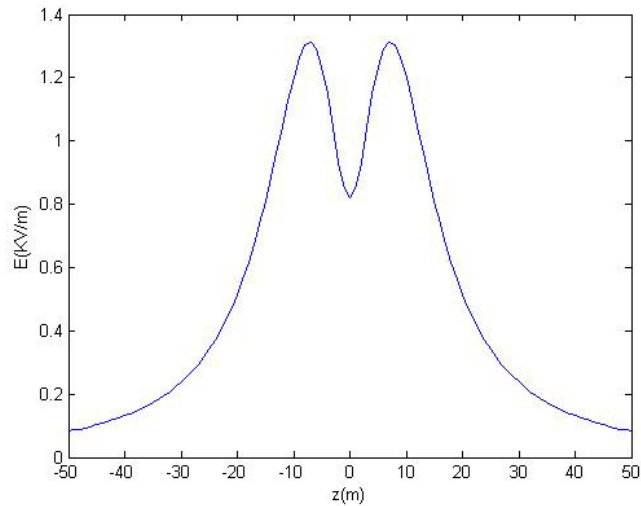
Εφαρμογή σε τυποποιημένους πυλώνες S2 απλού κυκλώματος 150KV με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών

Για σκοπούς σύγκρισης θα προχωρήσουμε στην ίδια εφαρμογή με τη διαφορά ότι τώρα θα επιλέξουμε από το κεντρικό μενού την άπειρη θεώρηση αγωγών και ενεργοποιημένη ξανά την επιλογή “Τυποποιημένες γραμμές μεταφοράς”. Η μοναδική διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι η επιλογή για εισαγωγή βυθίσματος των γραμμών είναι απενεργοποιημένη. Επίσης για σκοπούς σύγκρισης θα εισαχθούν επιπρόσθετα ύψη -9m έτσι ώστε ο υπολογισμός να θεωρεί ότι οι αγωγοί αναρτώνται σε ύψος 11.95 το οποίο αντιστοιχεί στο χαμηλότερο σημείο των αντίστοιχων αγωγών με βύθισμα της προηγούμενης εφαρμογής. Τα δεδομένα των οποίων φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

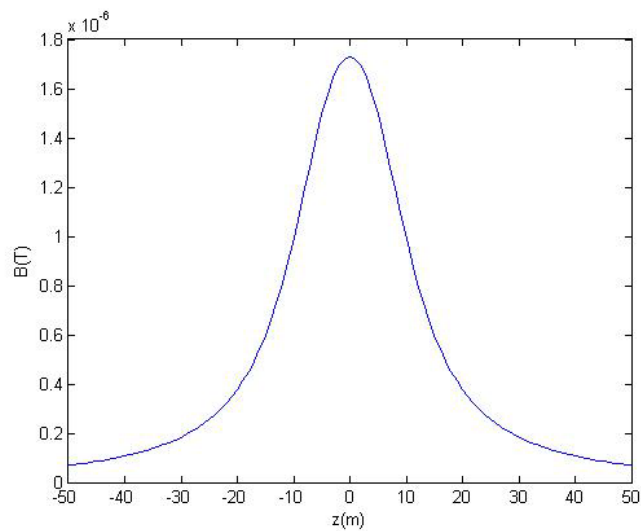
Πυλώνας	Ύψος	Απόσταση Α-φάσης (m)	Απόσταση Β-φάσης (m)	Απόσταση Γ-φάσης (m)
A-τύπου S2	11.95	-5	0	5
B-τύπου S2	11.95	-5	0	5

Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή. Αφού εισάγουμε τα απαραίτητα δεδομένα επιλέγουμε “Υπολογισμοί ΗΜΠ” και προχωράμε στο γραφικό περιβάλλον υπολογισμών. Στη συνέχεια θα

αναπαραστήσουμε ξανά τα δισδιάστατα γραφήματα των δύο πεδίων (Σχήμα 3.21-3.22).



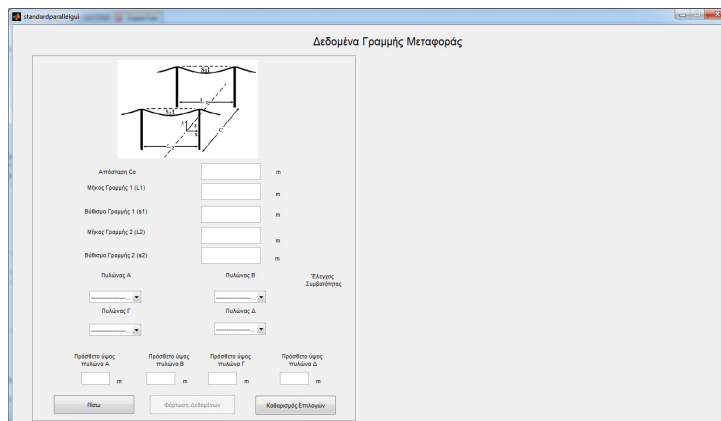
Σχήμα 3.21: Δισδιάστατο γράφημα ηλεκτρικού πεδίου στο $x=0$.



Σχήμα 3.22: Δισδιάστατο γράφημα μαγνητικού πεδίου στο $x=0$.

Παρατηρώντας τα γραφήματα των δύο τελευταίων εφαρμογών καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι πάλι οι δύο προσεγγίσεις των αγωγών (ευθύγραμμη θεώρηση και θεώρηση με βύθισμα) βρίσκονται αρκετά κοντά αφού τα αποτελέσματα τους μέσω από τα γραφήματα είναι σχεδόν όμοια.

Τελευταία δυνατότητα του λογισμικού αυτού είναι ο υπολογισμός των χαμηλόσυχνων πεδίων που προέρχεται από παράλληλα οδεύουσες τυποποιημένες γραμμές. Η δυνατότητα αυτή γίνεται εφικτή όταν από το κεντρικό μενού ενεργοποιήσουμε πρώτα την επιλογή “Τυποποιημένες Γραμμές Μεταφοράς” και στην συνέχεια ενεργοποιώντας και την επιλογή “Παράλληλα οδεύουσες γραμμές μεταφοράς”. Πατώντας στην συνέχεια “Φόρτωση Επιλογών” περνάμε στο γραφικό περιβάλλον παράλληλων οδευουσών γραμμών (Σχήμα 3.23).

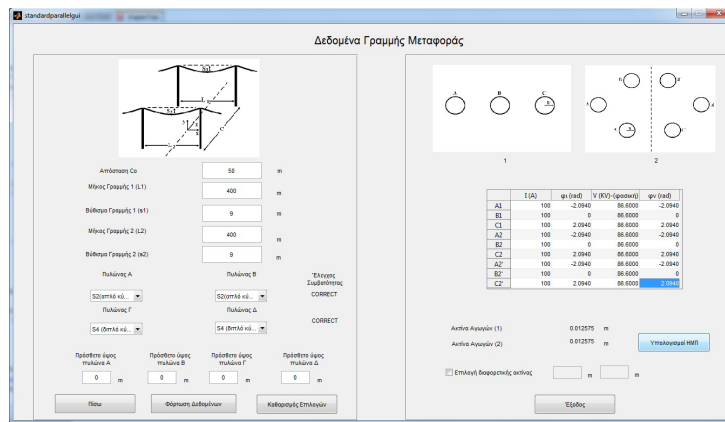


Σχήμα 3.23: Γραφικό περιβάλλον παράλληλα οδευουσών γραμμών με θεώρηση βυθίσματος.

Τα δεδομένα εισάγονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως στις τυποποιημένες περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς των προηγούμενων εφαρμογών. Ένα επιπρόσθετο δεδομένο είναι η σχετική απόσταση C_0 των δύο γραμμών. Και πάλι γίνεται έλεγχος συμβατότητας των δύο γραμμών και αφού οι επιλογές που δώσει ο χρήστης είναι σωστές τότε ενεργοποιείται η επιλογή για να μπορεί να συνεχίσει την συγκεκριμένη διαδικασία υπολογισμού.

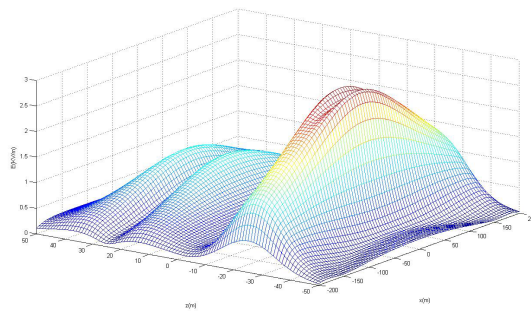
Εφαρμογή σε παράλληλα οδεύουσες γραμμές μονού και διπλού κυκλώματος 150 KV με θεώρηση βυθίσματος

Προχωράμε τώρα σε ακόμα μια εφαρμογή. Έστω ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τα πεδία που προέρχονται από δύο παράλληλα οδεύουσες γραμμές οι οποίες αποτελούνται, η μεν πρώτη από μονό κύκλωμα τυποποιημένων πυλώνων S2 και η μεν δεύτερη από διπλό κύκλωμα τυποποιημένων πυλώνων S4. Έστω επίσης τα δύο κυκλώματα απέχουν μεταξύ τους μια απόσταση $C_0 = 50m$. Τα υπόλοιπα δεδομένα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

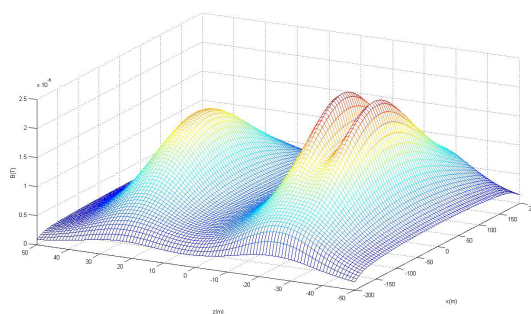


Σχήμα 3.24: Εισαγωγή δεδομένων στο γραφικό περιβάλλον παράλληλα οδευουσών γραμμών με θεώρηση βυθίσματος.

Τέλος προχωρούμε στην αναπαράσταση τρισδιάστατων γραφημάτων τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο της πιο πάνω εφαρμογής (Σχήμα 3.25-3.26).



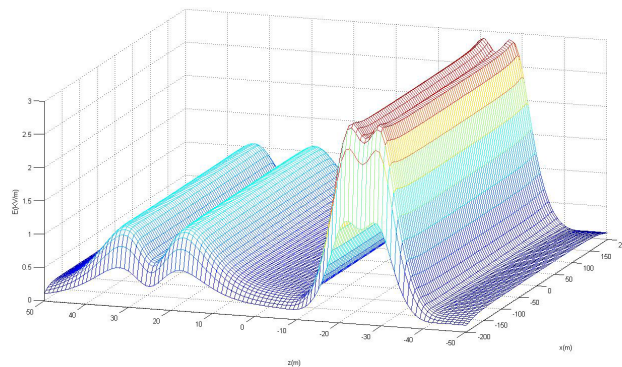
Σχήμα 3.25: Ηλεκτρικό πεδίο παράλληλα οδευουσών γραμμών με θεώρηση βυθίσματος



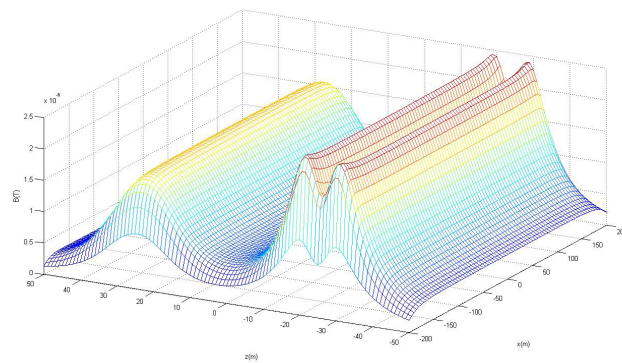
Σχήμα 3.26: Μαγνητικό πεδίο παράλληλα οδευουσών γραμμών με θεώρηση βυθίσματος.

Εφαρμογή σε παράλληλα οδεύουσες γραμμές μονού και διπλού κυκλώματος 150 KV με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών

Στην εφαρμογή αυτή θα αναπαραστήσουμε τα τρισδιάστατα γραφήματα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που προκύπτουν από τις παράλληλα οδεύουσες γραμμές με τα ίδια δεδομένα της προηγούμενης εφαρμογής, με τη διαφορά ότι τώρα θα τα υπολογίσουμε με τη θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών. Το γραφικό περιβάλλον και η εισαγωγή δεδομένων είναι ακριβώς όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή. Για το σκοπό αυτό προχωράμε απευθείας στα τρισδιάστατα γραφήματα (Σχήμα 3.27-3.28).



Σχήμα 3.27: Ηλεκτρικό πεδίο παράλληλα οδεουσών γραμμών με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών.



Σχήμα 3.28: Μαγνητικό πεδίο παράλληλα οδεουσών γραμμών με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών.

Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Ανδρέας, “Υπολογισμός βέλτιστου πλήθους θέσης και μεγέθους εγκαταστάσεων πυκνωτών για μείωση των απωλειών ισχύος σε ακτινικά δίκτυα διανομής”, Κεφάλαιο 5, Ιούλιος 2011.
- [2] Α. Αρβανιτίδης, και Χ. Σαραγιώτης, “Εισαγωγή στο MATLAB”, http://users.auth.gr/arvanit/Eisagogi_sto_Matlab.pdf
- [3] Γ. Θεοδώρου, και Ν. Θεοδώρου, “Πρακτικός οδηγός στο MATLAB”, http://users.auth.gr/theodoru/CompuStat/MATLAB_AUTH.pdf
- [4] Δ. Βαρσάμης, “MATLAB - Graphical User Interfaces”, http://teiserron.gr/index.php?topic=1531.0;prev_next=prev

Κεφάλαιο 4

Έλεγχος ορθότητας λογισμικού μέσω σύγκρισης με εμπορικό λογισμικό (CDEGS) και με επιστημονικά άρθρα

Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται την σύγκριση του προγράμματος που αναπτύχθηκε στο Matlab με εμπορικό λογισμικό (CDEGS). Η σύγκριση αυτή είναι μια σύγκριση όχι μόνο 2 λογισμικών αλλά και 2 διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού πεδίων αφού το εμπορικό λογισμικό (CDEGS) χρησιμοποιεί ως μέθοδο υπολογισμού την μέθοδο των ροπών (M.O.M), η οποία έχει περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 2. Μέσω των αποτελεσμάτων σύγκρισης θα ελεγχθεί η ορθότητα του προγράμματος που έχουμε αναπτύξει, τα οποία θα αποτελέσουν και μέτρο για την ακρίβεια του.

Οι συγκρίσεις θα αφορούν εφαρμογές των γραμμών του ελληνικού συστήματος μεταφοράς. Θα μπορούσαμε βέβαια να ελέγξουμε τα 2 λογισμικά όχι μόνο για οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς αλλά και για πολύπλοκα συστήματα αγωγών αφού μπορούμε να εισάγουμε αυθαίρετα παραμέτρους, όπως οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών, το ύψος κάθε αγωγού ως προς τη γη, το βύθισμα του αγωγού, η διάμετρος των αγωγών, το μήκος της γραμμής καθώς επίσης το μέτρο και η γωνία των τάσεων και των ρευμάτων.

Επιπρόσθετα οι συγκρίσεις θα γίνουν για όλες τις γραμμές που θα σχεδιαστούν στο CDEGS με πιστή υλοποίηση τους στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Matlab. Σε κάθε περίπτωση θα ελέγχονται τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού πεδίου (E) και μαγνητικού πεδίου (B) στο μέσο (0m), 50m και 100m μακριά από αυτό για προφίλ από -50m έως 50m. Αξίζει να σημειωθεί ότι θα ήταν ιδανική και η σύγκριση των τρισδιάστατων αποτελεσμάτων, μιας και τα 2 λογισμικά παρέχουν την δυνατότητα αυτή, αλλά για λόγους “ευκρίνειας” θα αρκεστούμε στην παραπάνω προσέγγιση δισδιάστατων γραφημάτων.

Τέλος, θα υπάρξουν συγκρίσεις με τα αποτελέσματα από διάφορα επιστημονικά άρθρα και συγκεκριμένα από το [1]. Συγκεκριμένα θα προσομοιωθούν στο λογισμικό διατάξεις με βάση τα δεδομένα που έχουν τα άρθρα και θα ελεγχθεί κατά πόσο υπάρχει συμφωνία με τα αποτελέσματα αυτά.

4.1 Σύγκριση με CDEGS

Ως πρώτη σύγκριση θεωρήσαμε μια γραμμή απλού κυκλώματος η οποία αναρτάται σε δύο τυποποιημένους πυλώνες S2 (βλέπετε σχετικό Παράρτημα A') με τα ακόλουθα στοιχεία:

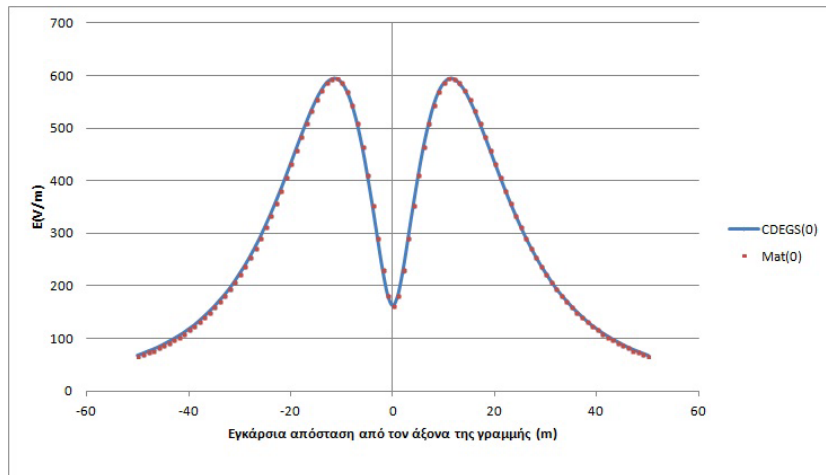
Μήκος γραμμής $L=300\text{m}$

Βύθισμα γραμμής $s=3\text{m}$

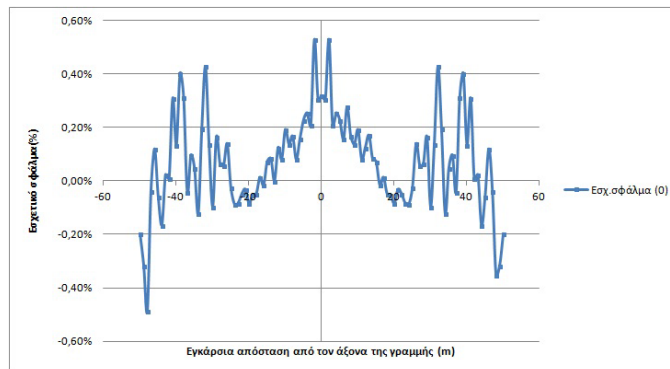
Φορτίο γραμμής $I=200\text{A}$

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο:

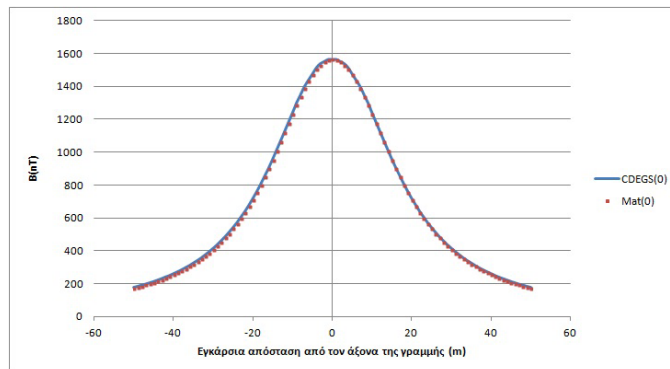
$x=0\text{m}$



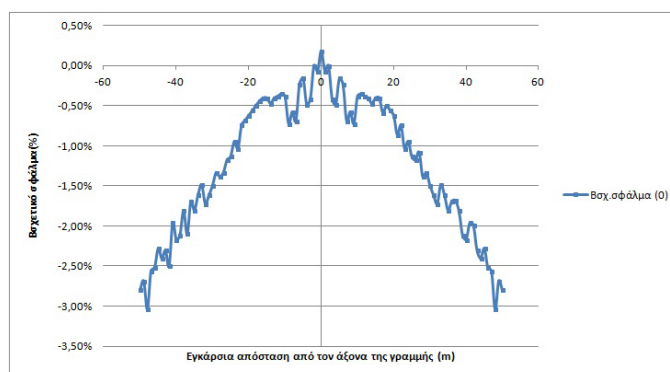
Σχήμα 4.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.



Σχήμα 4.2: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0m$.

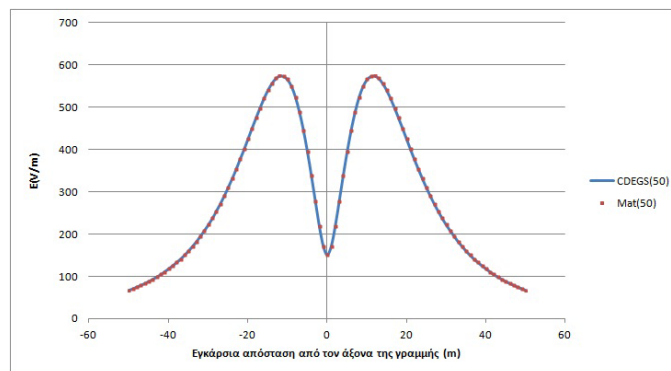


Σχήμα 4.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0m$.

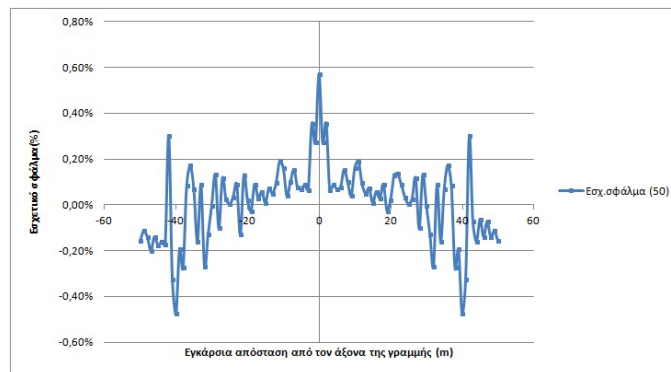


Σχήμα 4.4: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0m$.

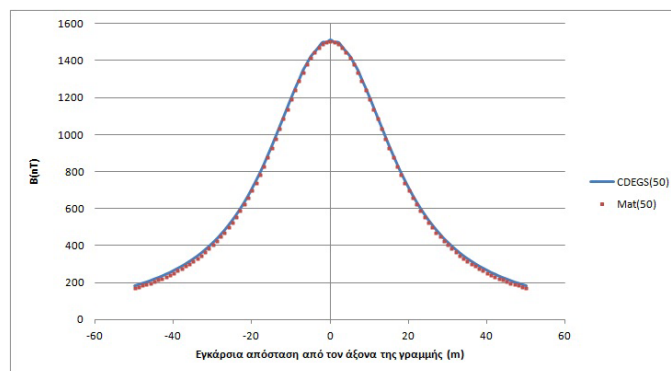
$x=50m$



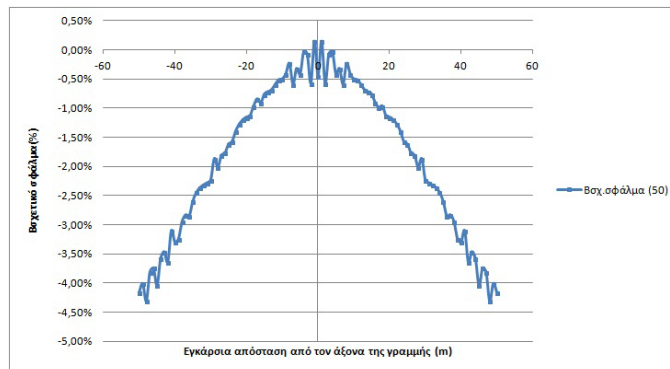
Σχήμα 4.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.



Σχήμα 4.6: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.

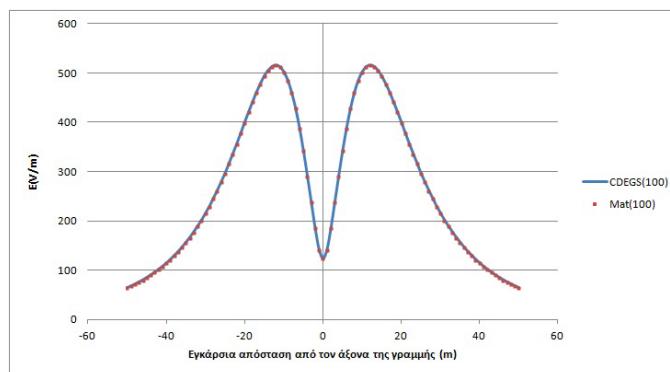


Σχήμα 4.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.

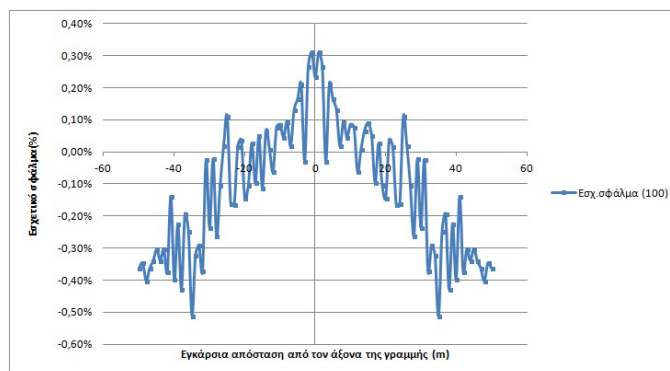


Σχήμα 4.8: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50m$.

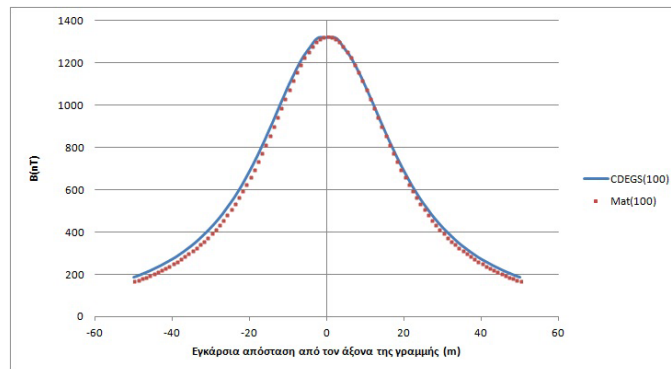
$x=100m$



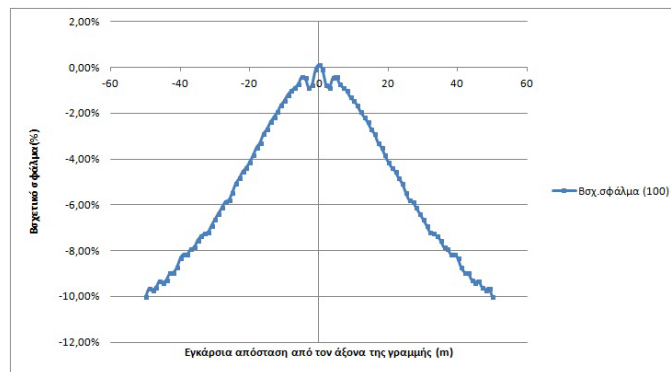
Σχήμα 4.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100m$.



Σχήμα 4.10: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100m$.



Σχήμα 4.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$.



Σχήμα 4.12: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$.

Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα συμπεραίνουμε ότι σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα του λογισμικού στο Matlab είναι πολύ ικανοποιητικά, με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, αφού όλες οι τιμές σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ κοντά σε σχέση με τις υπολογισμένες τιμές του εμπορικού λογισμικού CDEGS. Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα για το ηλεκτρικό πεδίο είναι σχεδόν όμοια με το CDEGS με τα σχετικά σφάλματα να κυμαίνονται σε πολύ χαμηλές τιμές μικρότερες και από 0,6%. Επίσης αυτό που παρατηρείται είναι ότι σφάλματα είναι ελαφρώς μεγαλύτερα στα σημεία όπου το ηλεκτρικό πεδίο έχει μικρές τιμές, και συγκεκριμένα στα σημεία κοντά στο $z=0$ και στα άκρα εκατέρωθεν του άξονα της γραμμής. Αυτή η παρατήρηση είναι λογική αφού όταν οι τιμές είναι πολύ μικρές τότε τα σχετικά σφάλματα είναι σαφώς μεγαλύτερα.

Όσο αφορά τα αποτελέσματα του μαγνητικού πεδίου, κρίνονται και αυτά πολύ ικανοποιητικά. Στο επίπεδο $x=0\text{m}$ τα σφάλματα είναι μέχρι και 3% ενώ

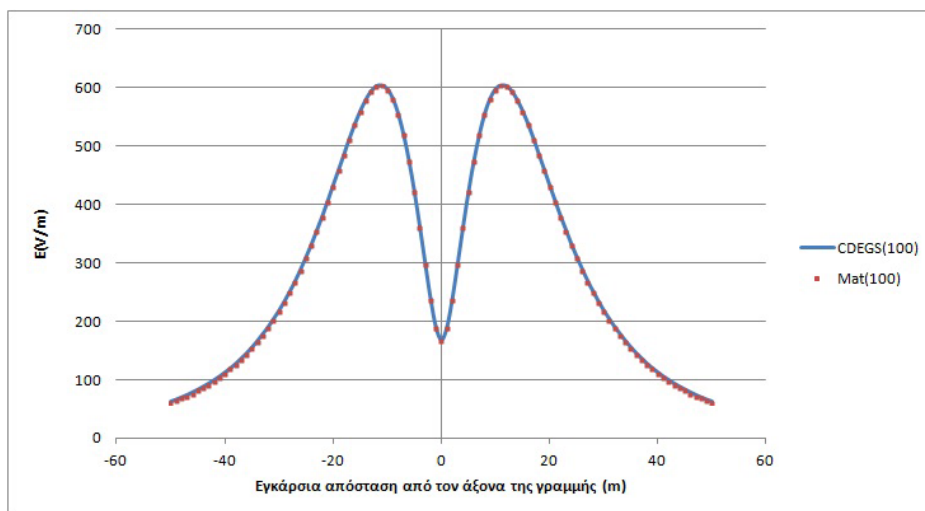
όσο προχωρούμε κατά μήκος της γραμμής για $x=50\text{m}$ και $x=100\text{m}$ τα σφάλματα μεγαλώνουν (φτάνουν μέχρι και 10%). Αυτό οφείλεται ακριβώς στον ίδιο παράγοντα με τον προηγούμενο, όπου οι πολύ μικρές του μαγνητικού πεδίου (μερικές εκατοντάδες nT) οδηγούν σε μεγάλα σφάλματα και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα αφού όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της γραμμής (όπου εμφανίζει και την μεγαλύτερη τιμή του πεδίου), το πεδίο μικραίνει. Το ίδιο συμβαίνει και παρατηρώντας ένα-ένα τα διαγράμματα σχετικού σφάλματος του μαγνητικού πεδίου όπου έχουν μια αυξητική τάση καθώς απομακρυνόμαστε από τον κεντρικό άξονα της γραμμής. Αυτό οφείλεται και πάλι στις πολύ μικρές τιμές του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες μικραίνουν ακόμα πιο πολύ όσο απομακρυνόμαστε δεξιά και αριστερά της γραμμής.

Έπειτα εξετάζουμε την ίδια γραμμή με την προηγούμενη, με διάφορες όμως παραλλαγές της για να παρατηρήσουμε κατά πόσο η ακρίβεια που είδαμε προηγουμένως παραμένει σταθερή ή όχι. Θα εξετάσουμε μόνο τις περιπτώσεις όπου $x=100$, οι οποίες όπως συμπεράναμε από τα προηγούμενα γραφήματα αποτελούν την χειρότερη περίπτωση, αφού εμφάνιζε τα περισσότερα σφάλματα. Έτσι κοιτάζουμε τι γίνεται στις περιπτώσεις που:

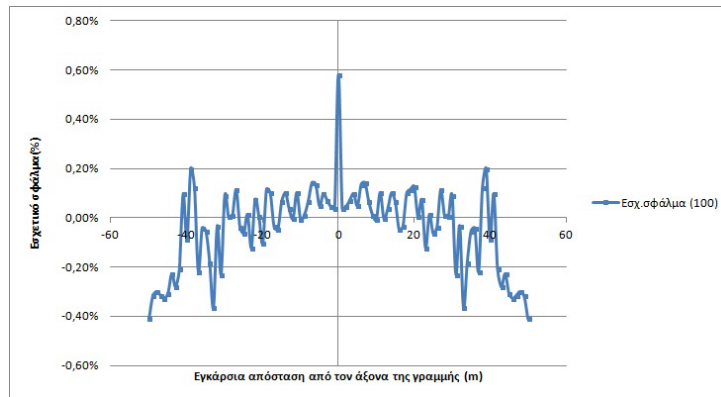
- Αυξομειώσουμε το ύψος της γραμμής.

Για ύψος αγωγών μικρότερο κατά 1.5m

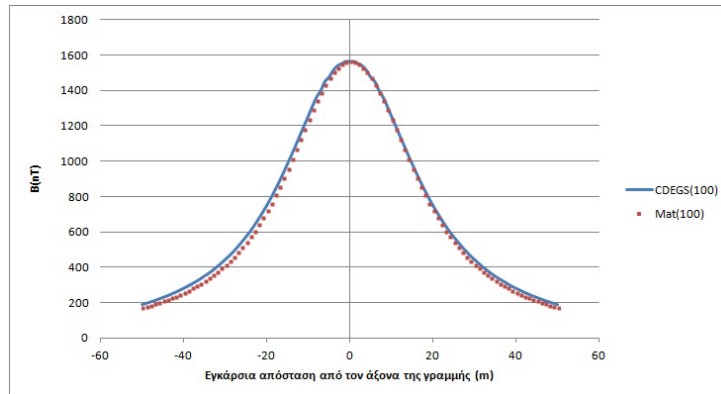
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



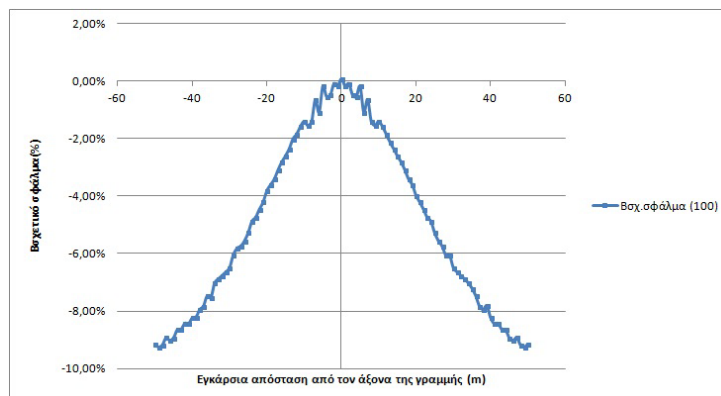
Σχήμα 4.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 1.5m.



Σχήμα 4.14: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 1.5m.



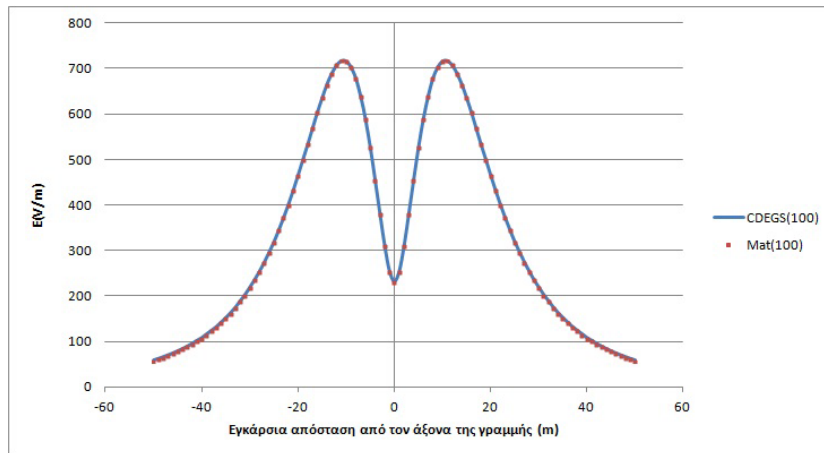
Σχήμα 4.15: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 1.5m.



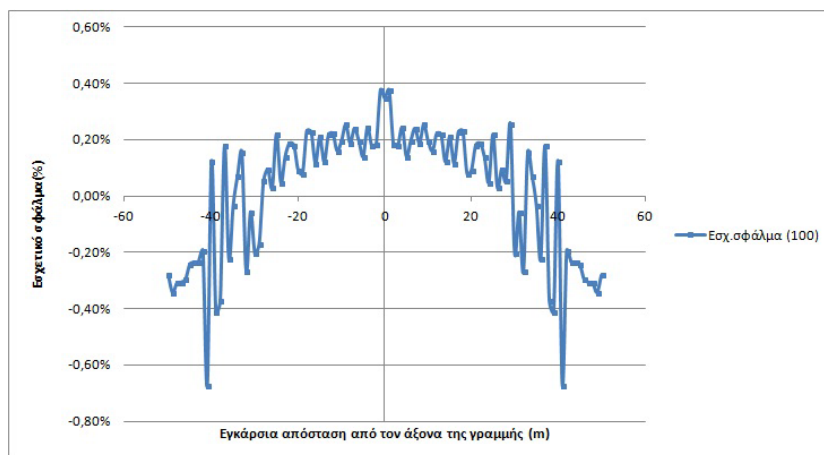
Σχήμα 4.16: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 1.5m.

Για ύψος αγωγών μικρότερο κατά 3m

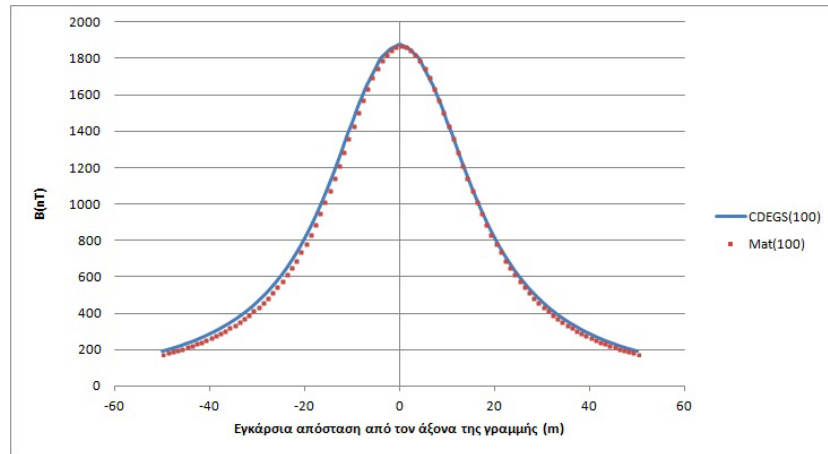
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



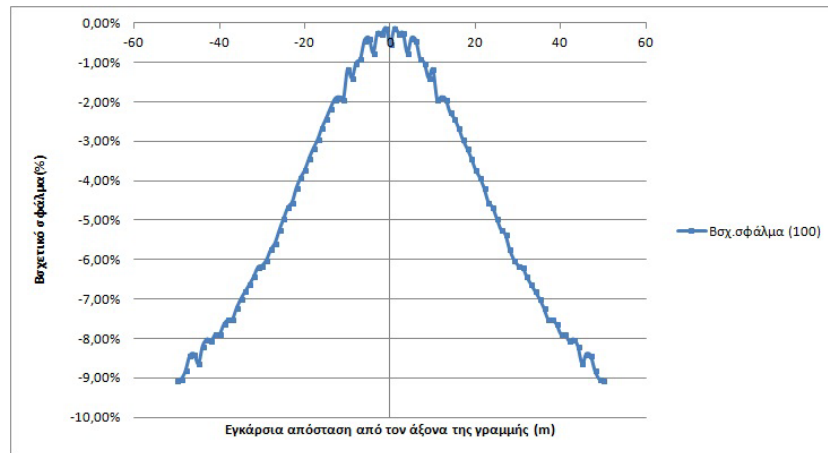
Σχήμα 4.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 3m.



Σχήμα 4.18: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 3m.



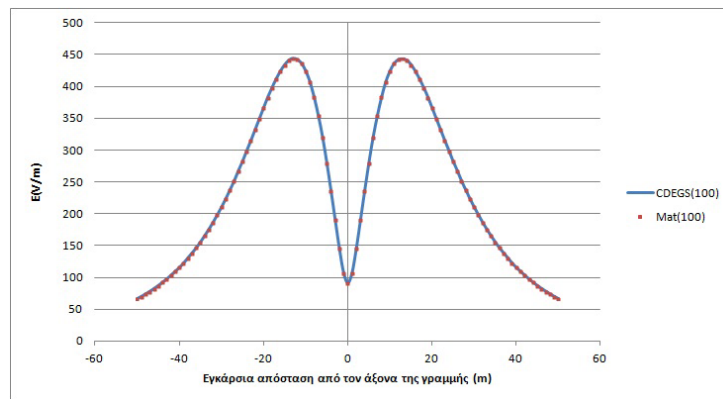
Σχήμα 4.19: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 3m.



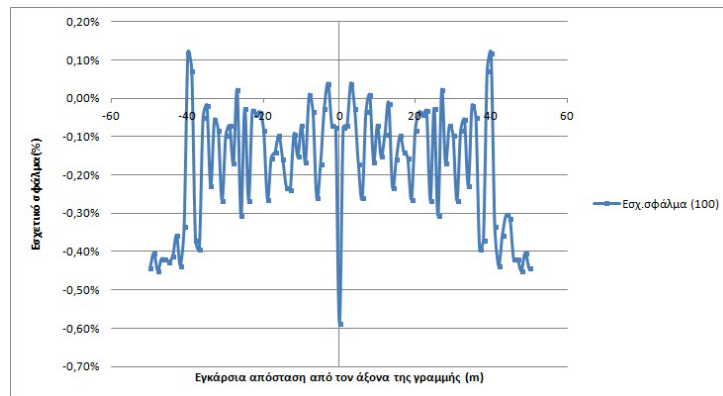
Σχήμα 4.20: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μικρότερο κατά 3m.

Για ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 1.5m

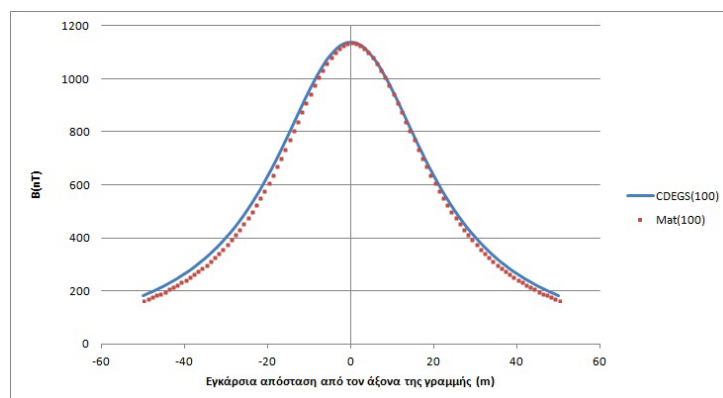
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



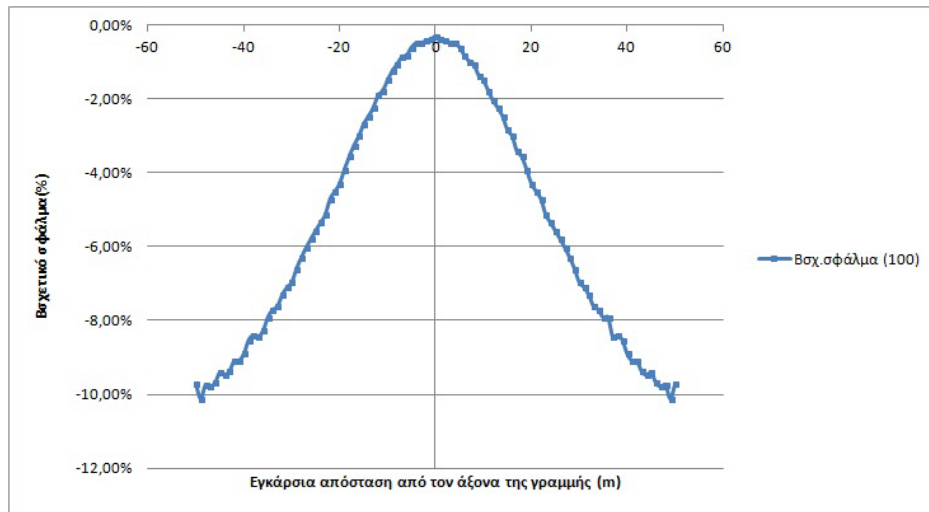
Σχήμα 4.21: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 1.5m.



Σχήμα 4.22: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 1.5m.



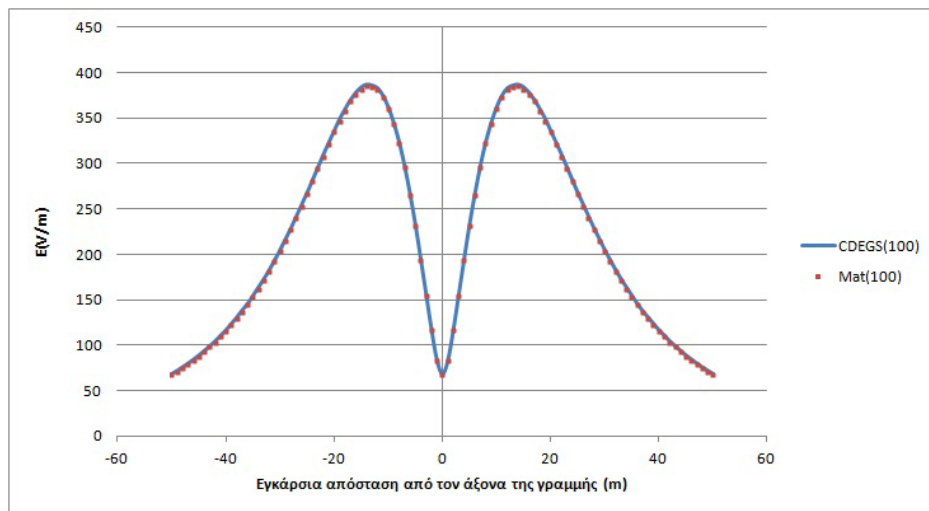
Σχήμα 4.23: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 1.5m.



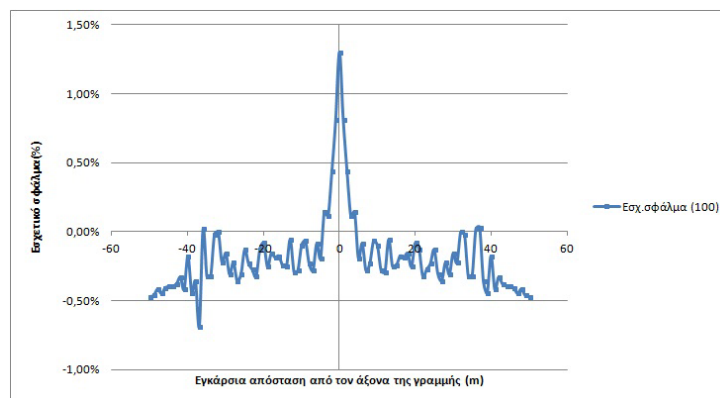
Σχήμα 4.24: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 1.5m.

Για ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 3m

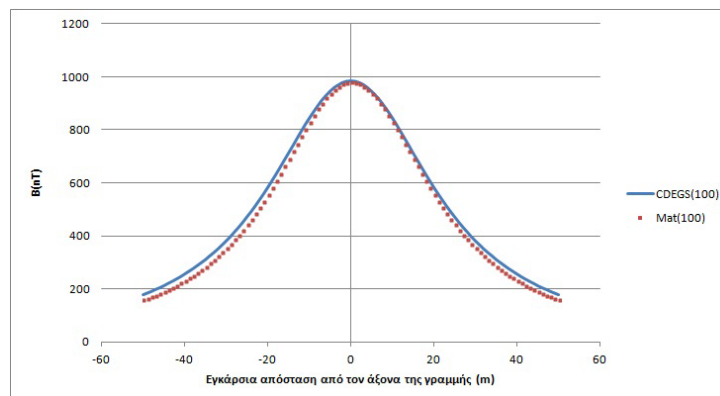
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



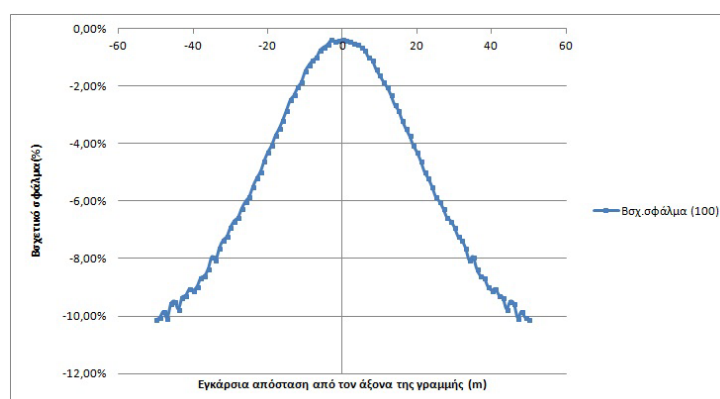
Σχήμα 4.25: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 3m.



Σχήμα 4.26: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 3m.



Σχήμα 4.27: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 3m.



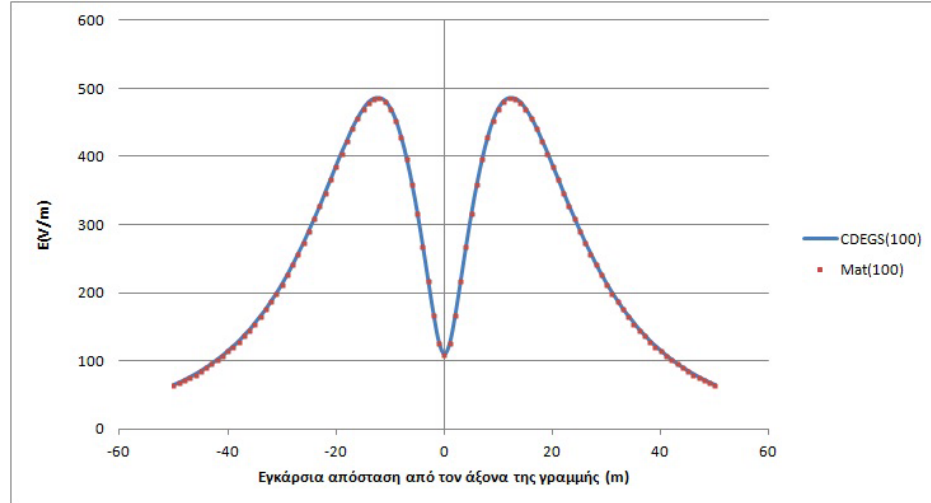
Σχήμα 4.28: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και ύψος αγωγών μεγαλύτερο κατά 3m.

Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ακρίβεια παραμένει η ίδια στην περίπτωση μεταβολής των υψών των πυλώνων. Τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό τα αποτελέσματα είναι σχεδόν όμοια με την προηγούμενη γραμμή μεταφοράς. Η μικρή μείωση του σφάλματος στο μαγνητικό πεδίο για ύψος αγωγών μικρότερο κατά 1.5m και 3m εξηγείται στο γεγονός ότι λόγω του ότι οι αγωγοί βρίσκονται σε μικρότερο ύψος, το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο έχει μεγαλύτερες τιμές για το ύψος μέτρησης 1m και έτσι τα σχετικά σφάλματα είναι ελαφρώς μικρότερα.

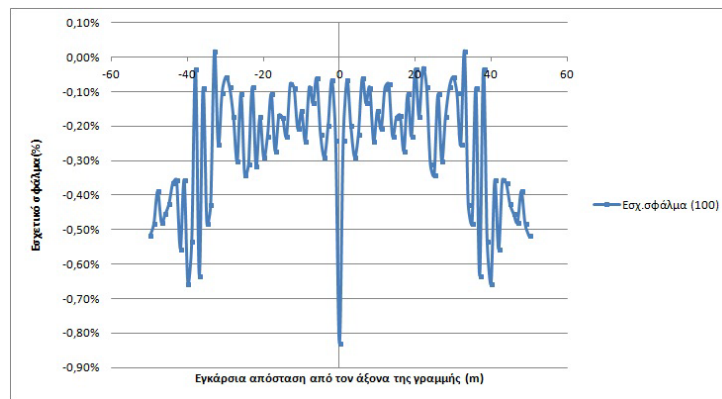
- Αυξομειώσουμε το βύθισμα της γραμμής.

Για βύθισμα αγωγών $s=2\text{m}$

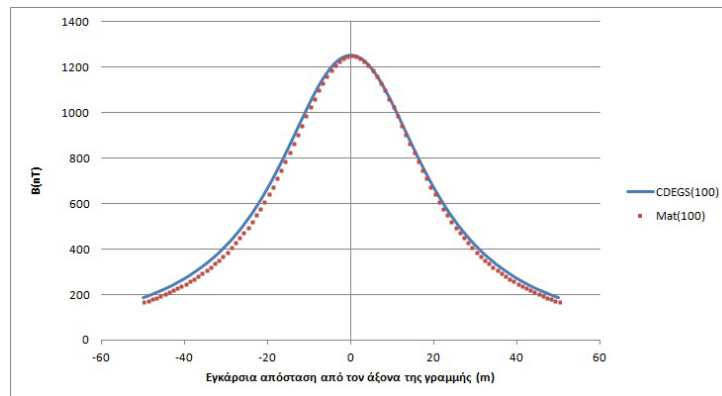
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



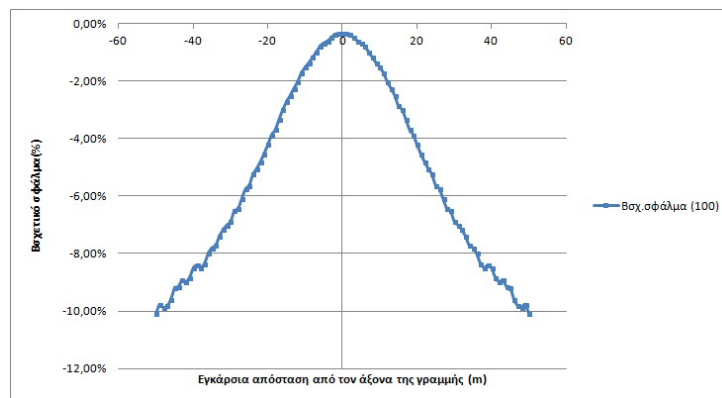
Σχήμα 4.29: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=2\text{m}$.



Σχήμα 4.30: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=2\text{m}$.



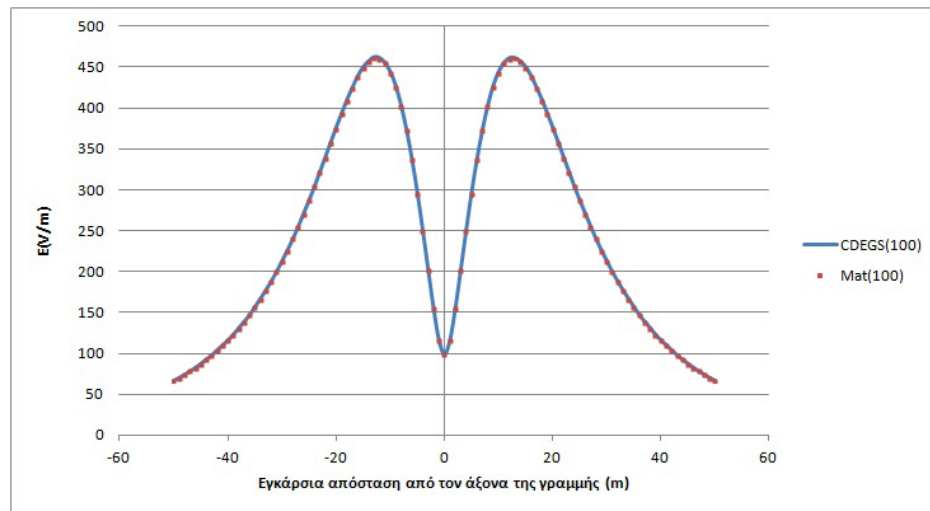
Σχήμα 4.31: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=2\text{m}$.



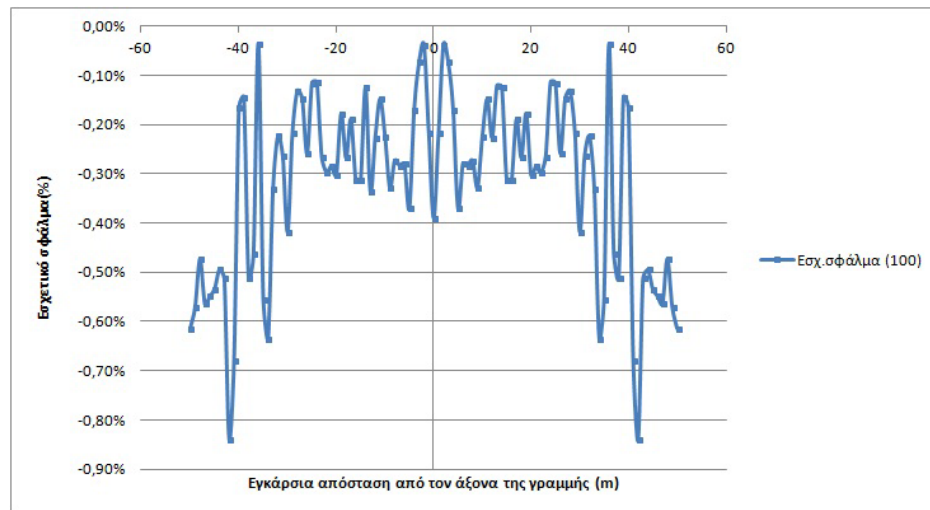
Σχήμα 4.32: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=2\text{m}$.

Για βύθισμα αγωγών $s=1\text{m}$

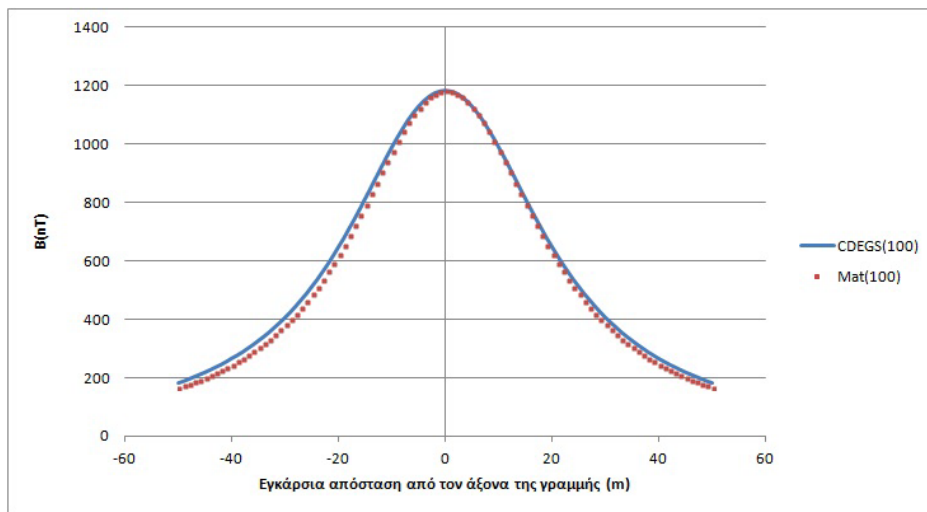
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



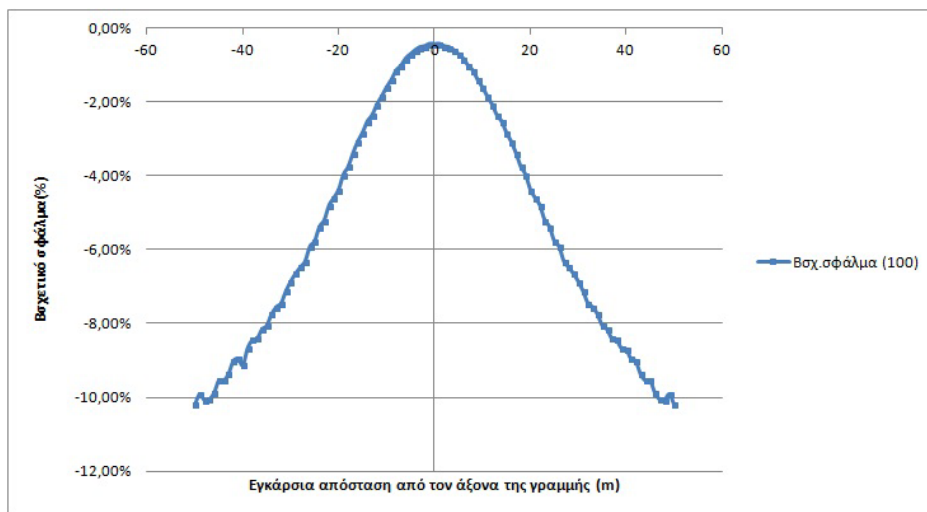
Σχήμα 4.33: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=1\text{m}$.



Σχήμα 4.34: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=1\text{m}$.



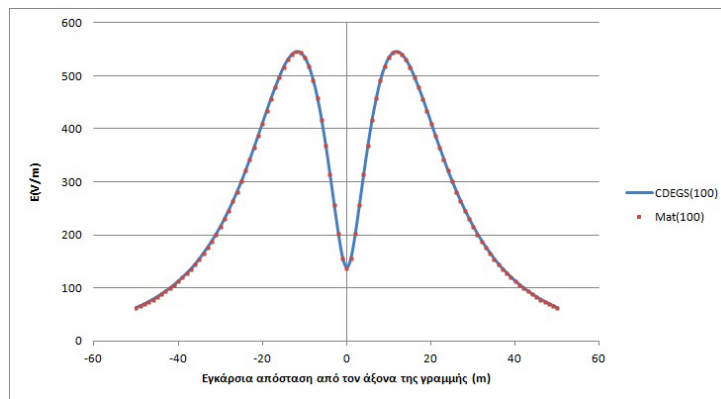
Σχήμα 4.35: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=1\text{m}$.



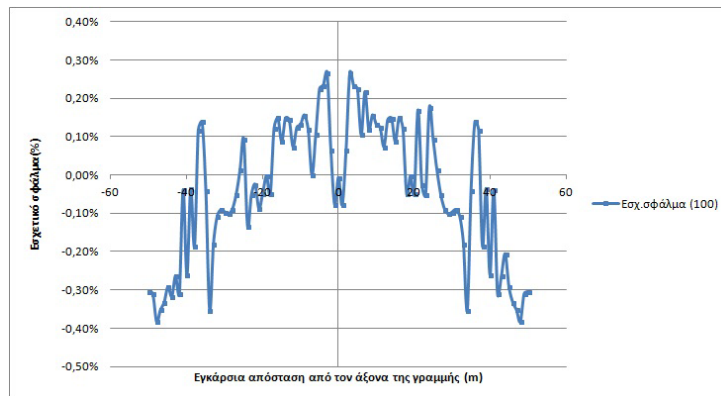
Σχήμα 4.36: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=1\text{m}$.

Για βύθισμα αγωγών $s=4\text{m}$

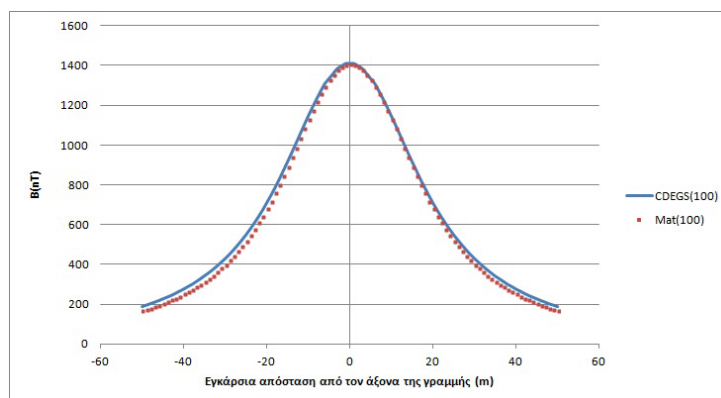
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



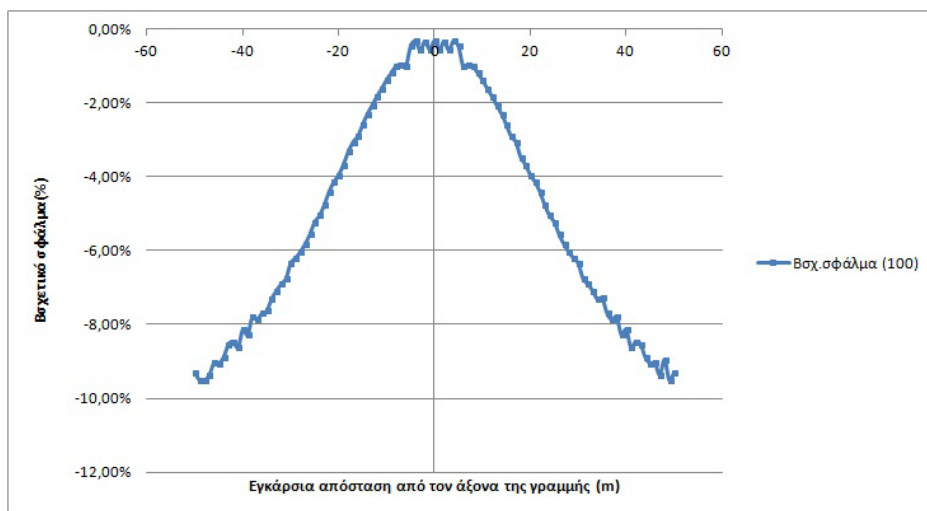
Σχήμα 4.37: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=4\text{m}$.



Σχήμα 4.38: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=4\text{m}$.



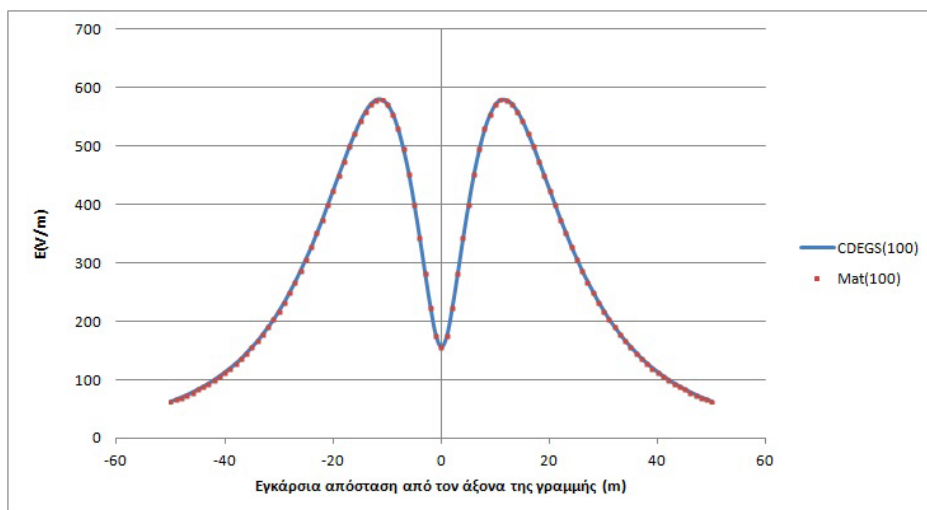
Σχήμα 4.39: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=4\text{m}$.



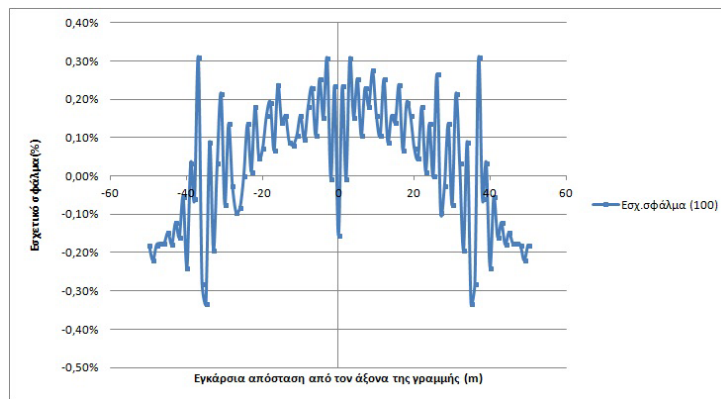
Σχήμα 4.40: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=4\text{m}$.

Για βύθισμα αγωγών $s=5\text{m}$

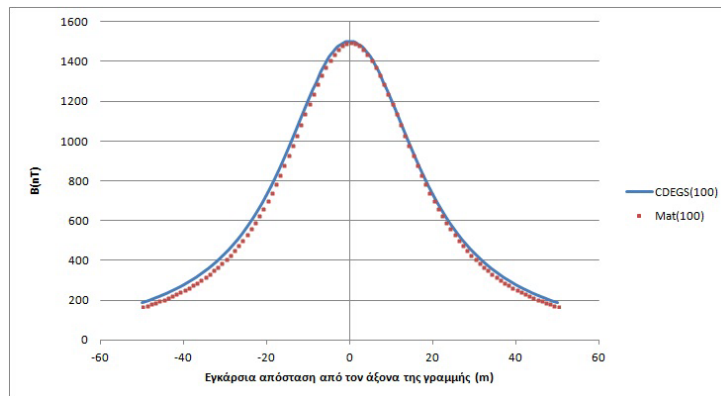
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



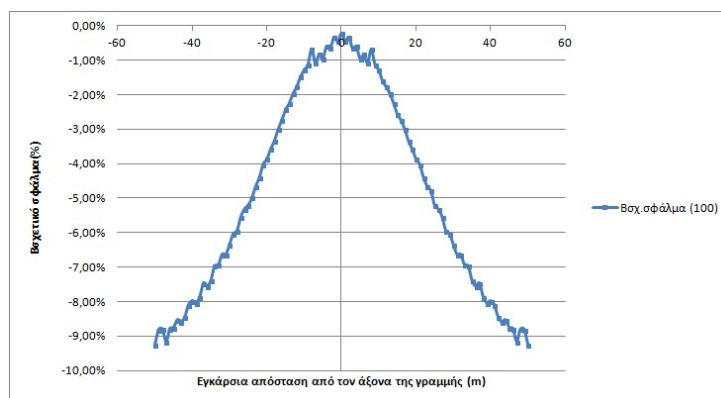
Σχήμα 4.41: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=5\text{m}$.



Σχήμα 4.42: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=5\text{m}$.



Σχήμα 4.43: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=5\text{m}$.



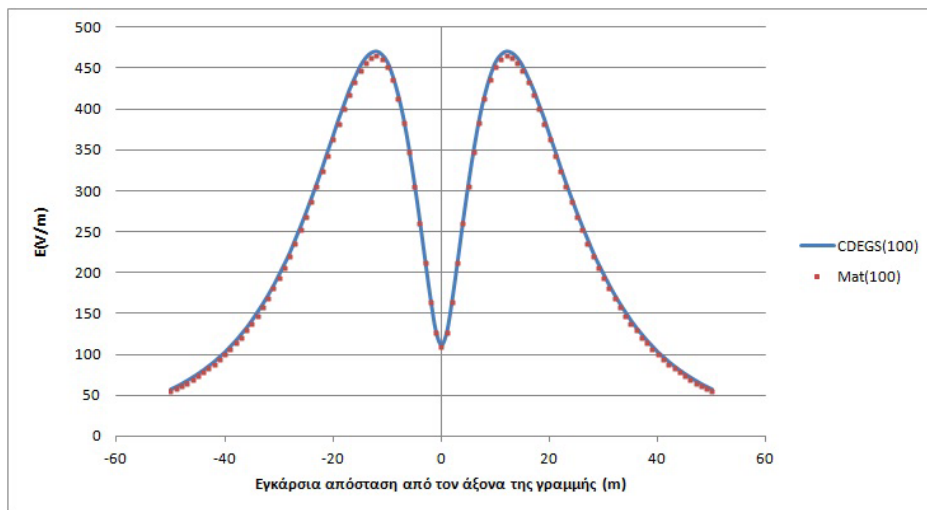
Σχήμα 4.44: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και βύθισμα $s=5\text{m}$.

Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα καταλήγουμε και πάλι στο συμπέρασμα ότι αυξομειώνοντας το βύθισμα της γραμμής δεν μεταβάλλεται η ακρίβεια των υπολογισμών. Επίσης παρατηρώντας τα σχετικά σφάλματα για το μαγνητικό πεδίο, φαίνεται μια μικρή μείωση στις τιμές, λόγω ακριβώς του λόγου που προαναφέρθηκε προηγουμένως, ότι δηλαδή λόγω μεγαλύτερου βυθίσματος οι αγωγοί είναι πιο κοντά προς το ύψος μέτρησης. Επομένως οι τιμές του μαγνητικού έχουν μεγαλύτερες τιμές και ως επακόλουθο τα σχετικά σφάλματα να είναι ελαφρώς μικρότερα. Συμπερασματικά λοιπόν τα αποτελέσματα του λογισμικού σε Matlab είναι και πάλι πολύ κοντά σε αυτά του εμπορικού CDEGS.

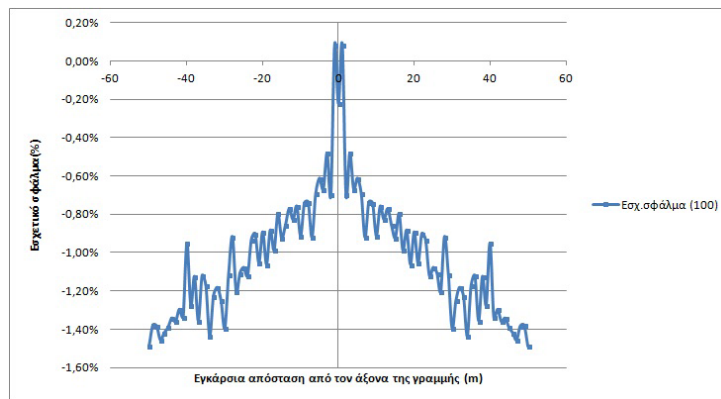
- Αυξομειώσουμε το άνοιγμα της γραμμής.

Για άνοιγμα γραμμής $L=250\text{m}$

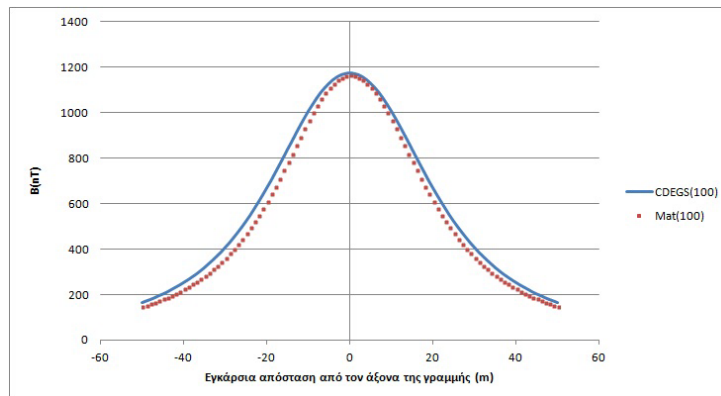
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



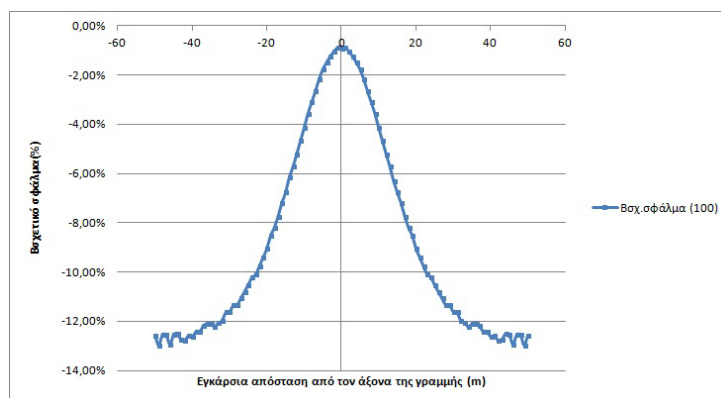
Σχήμα 4.45: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=250\text{m}$.



Σχήμα 4.46: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=200\text{m}$.



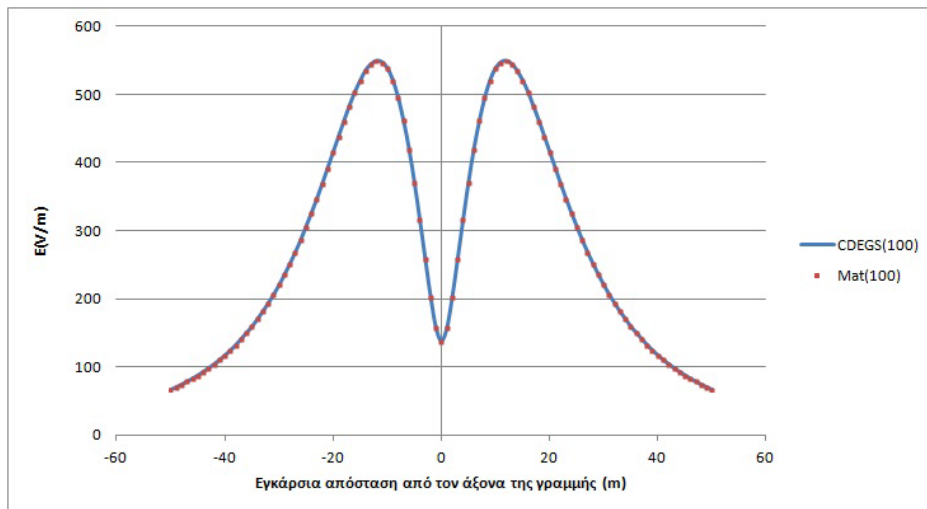
Σχήμα 4.47: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=200\text{m}$.



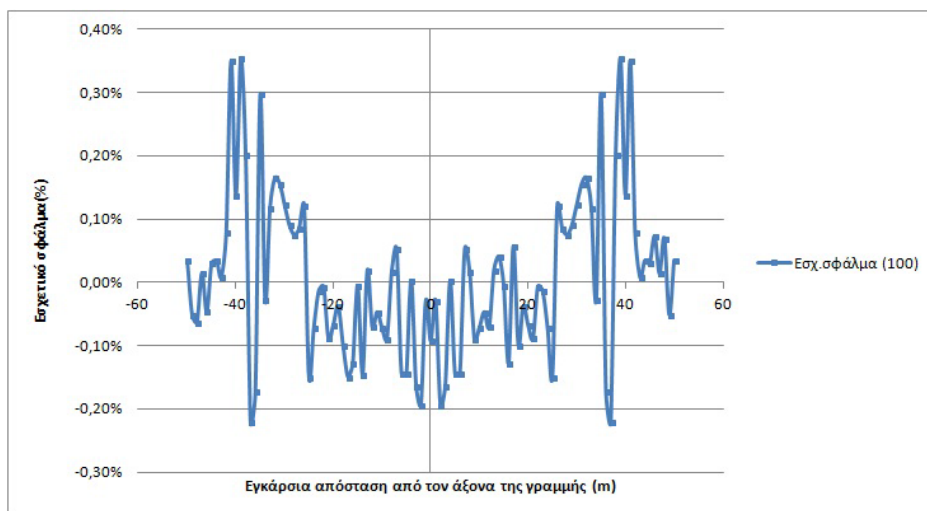
Σχήμα 4.48: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=200\text{m}$.

Για άνοιγμα γραμμής $L=400\text{m}$

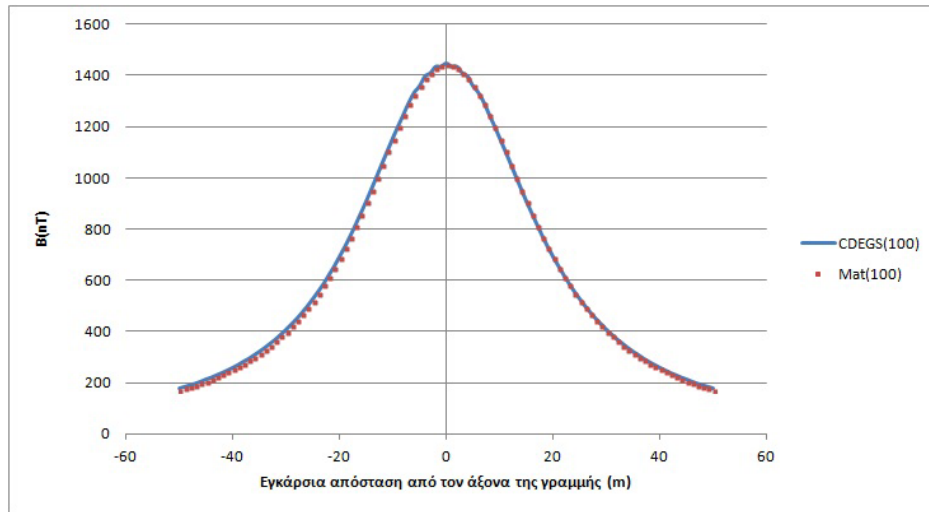
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



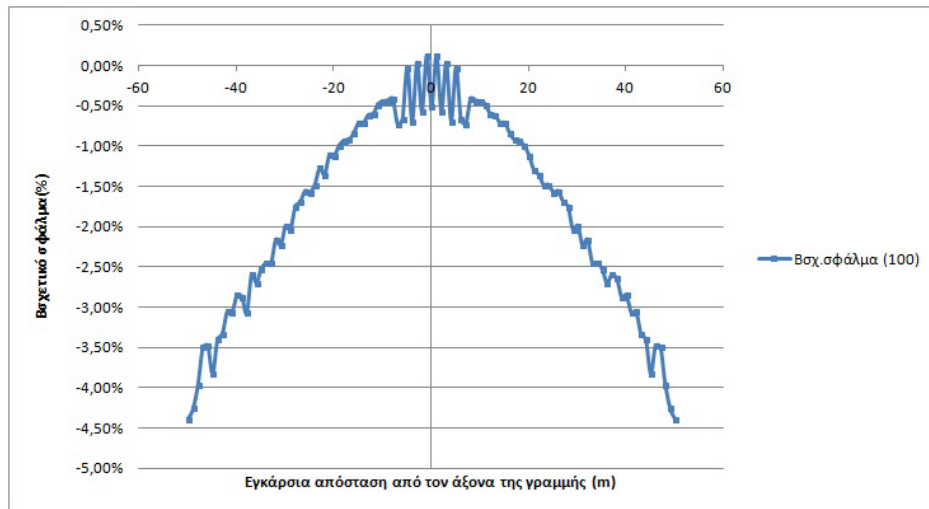
Σχήμα 4.49: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=400\text{m}$.



Σχήμα 4.50: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=400\text{m}$.



Σχήμα 4.51: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=400\text{m}$.



Σχήμα 4.52: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και άνοιγμα γραμμής $L=400\text{m}$.

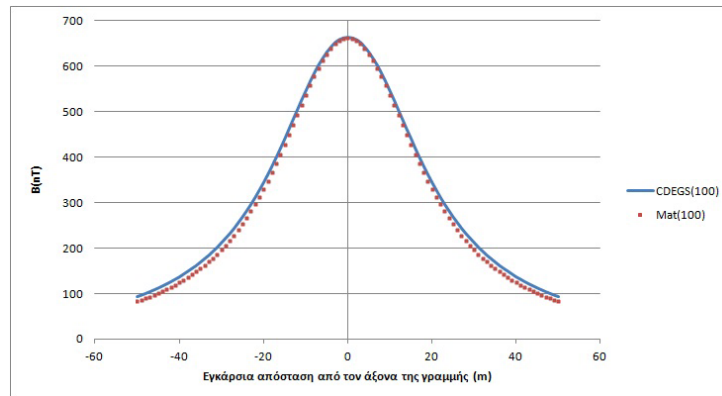
Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα καταλήγουμε στο εξής ενδιαφέρον συμπέρασμα. Για μεγαλύτερο άνοιγμα γραμμής έχουμε σαφώς μεγαλύτερη ακρίβεια και αυτό φαίνεται από τα μηδανιμά σχετικά σφάλματα του ηλεκτρικού πεδίου αλλά και από την ελαχιστοποίηση των σχετικών σφαλμάτων στο μαγνητικό (από μέγιστο σχετικό σφάλμα στα 9% μειώθηκε στο 4%). Το αντίθετο συμβαίνει όταν μικραίνει το άνοιγμα της

γραμμής όπου τα σφάλματα μεγαλώνουν. Αυτό οφείλεται στη συνάρτηση ολοκλήρωσης της Matlab καθώς δεν ήταν δυνατόν να ευρεθεί τρόπος όπου να προκαθορίζεται το βήμα ολοκλήρωσης και έτσι για μεγαλύτερο μήκος αγωγού είχαμε μεγαλύτερη ακρίβεια. Κατά τα άλλα και πάλι όλα τα αποτελέσματα είναι σε αποδεκτά πλαίσια και όλα συγκλίνουν πολύ κοντά στο εμπορικό πρόγραμμα CDEGS.

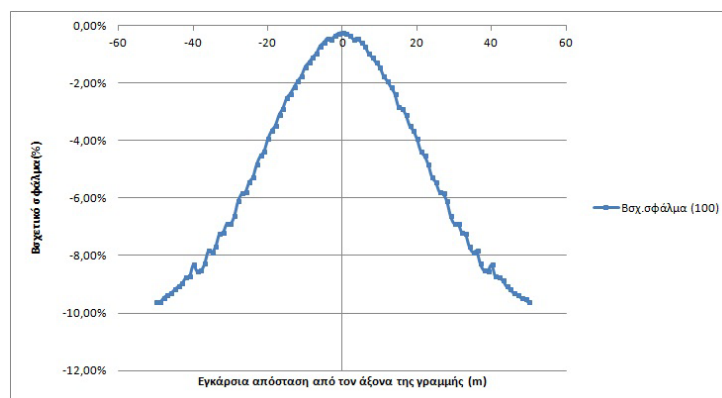
- Αυξομειώσουμε το φορτίο της γραμμής.

Για φορτίο γραμμής $I=100A$

Στην περίπτωση αυτή ελέγχουμε μόνο το μαγνητικό πεδίο αφού είναι το μόνο που επηρεάζεται από την μεταβολή του φορτίου. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100m$:



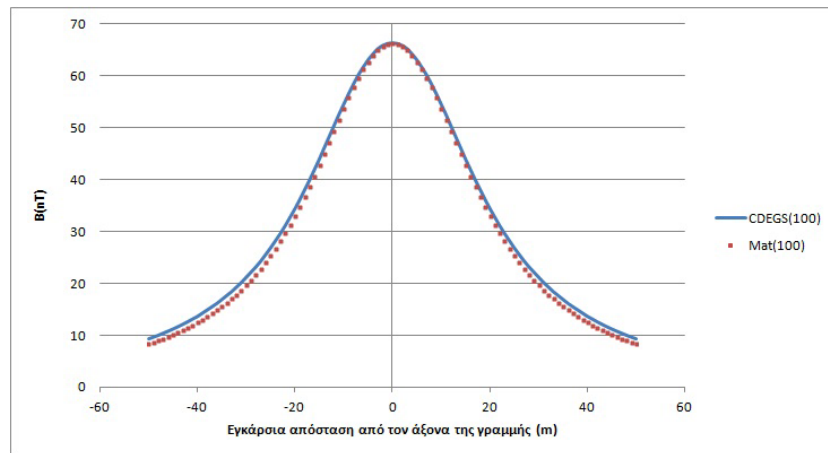
Σχήμα 4.53: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100m$ και φορτίο γραμμής $I=100A$.



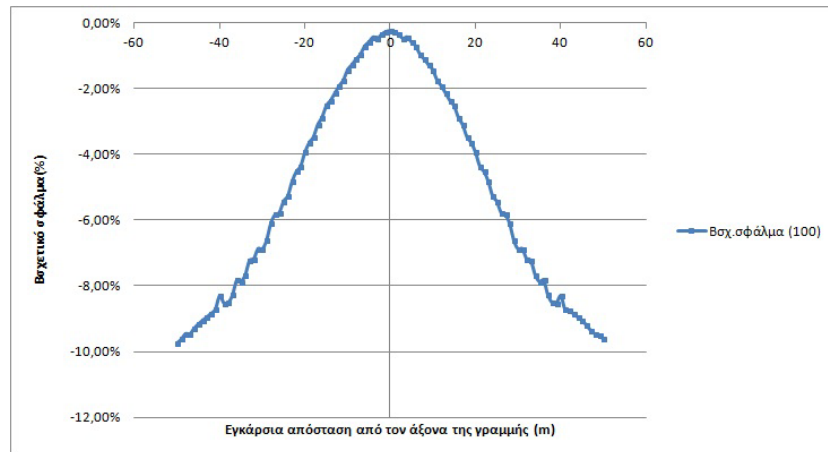
Σχήμα 4.54: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100m$ φορτίο γραμμής $I=100A$.

Για φορτίο γραμμής $I=10A$

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100m$:



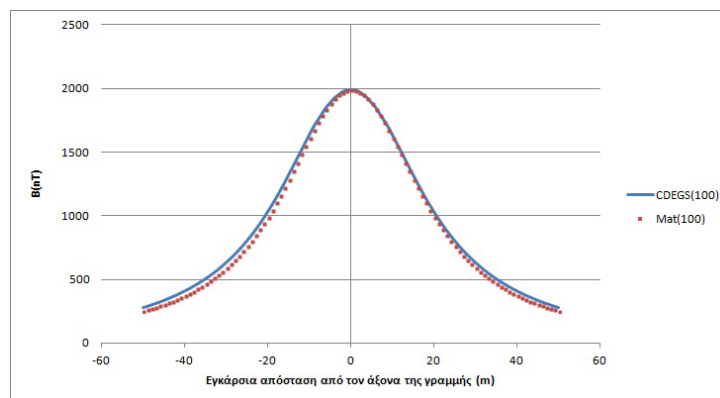
Σχήμα 4.55: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100m$ και φορτίο γραμμής $I=10A$.



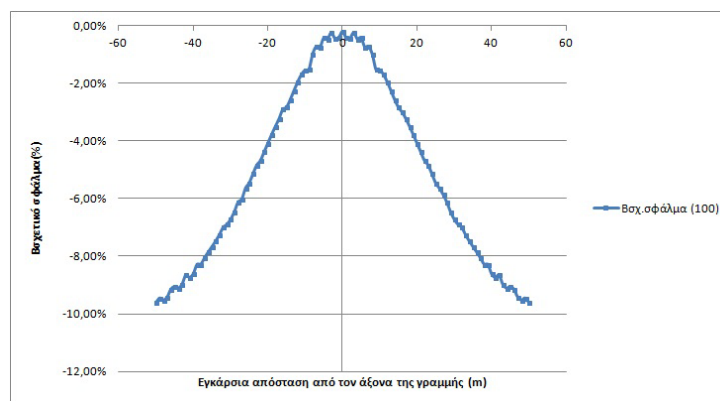
Σχήμα 4.56: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100m$ και φορτίο γραμμής $I=10A$.

Για φορτίο γραμμής $I=300A$

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100m$:



Σχήμα 4.57: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και φορτίο γραμμής $I=300\text{A}$.

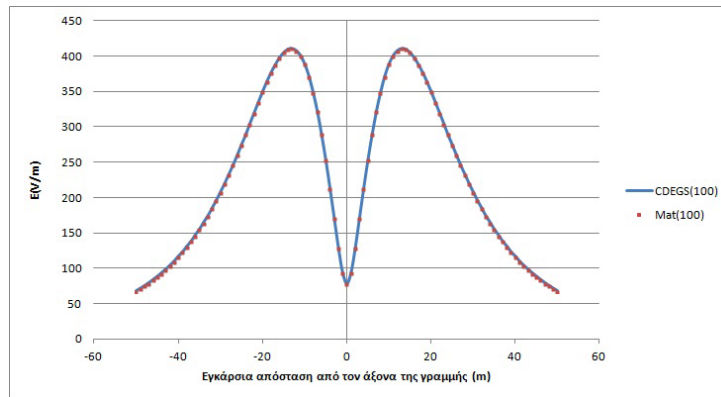


Σχήμα 4.58: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και φορτίο γραμμής $I=300\text{A}$.

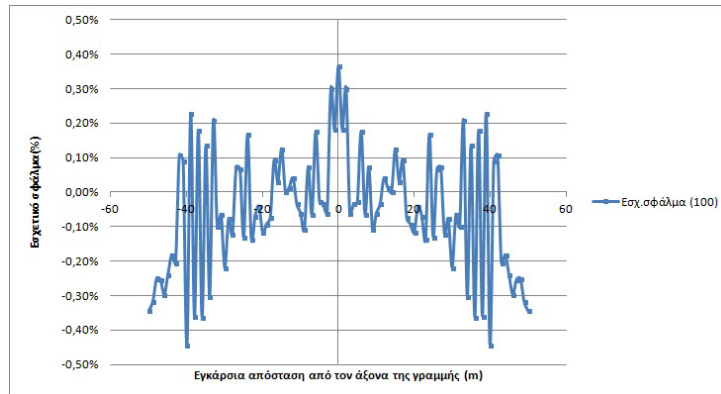
Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα, βλέπουμε ότι η ακρίβεια δεν επηρεάζεται από την αυξομείωση του φορτίου της γραμμής. Σε όλες τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά με το CDEGS, με τα σφάλματα στην χειρότερη περίπτωση φτάνουν το 10%.

- Οι δύο πυλώνες έχουν διαφορά ύψους 4m.

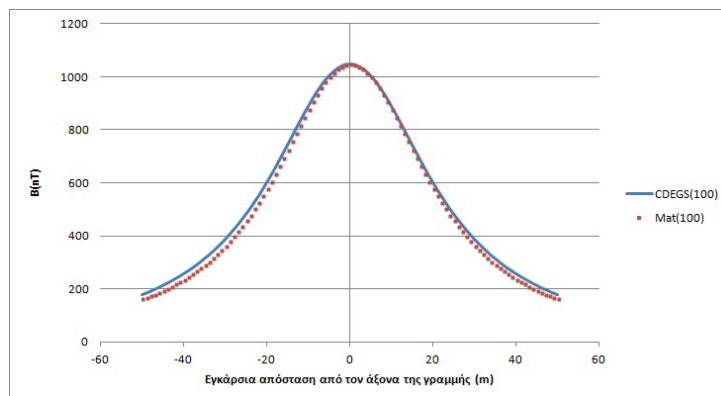
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



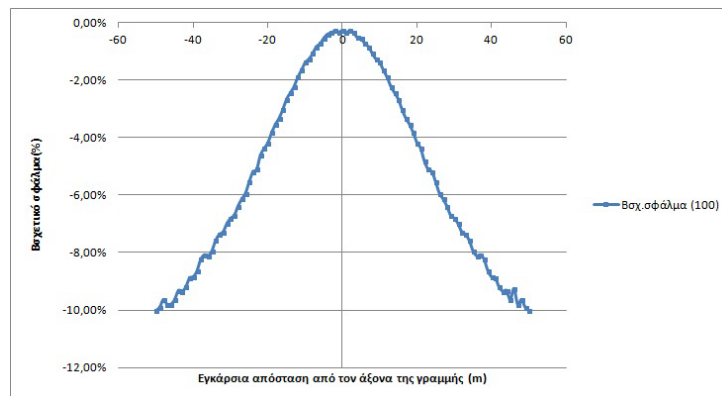
Σχήμα 4.59: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και τους πυλώνες σε διαφορά ύψους 4m .



Σχήμα 4.60: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και τους πυλώνες σε διαφορά ύψους 4m .



Σχήμα 4.61: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και τους πυλώνες σε διαφορά ύψους 4m .

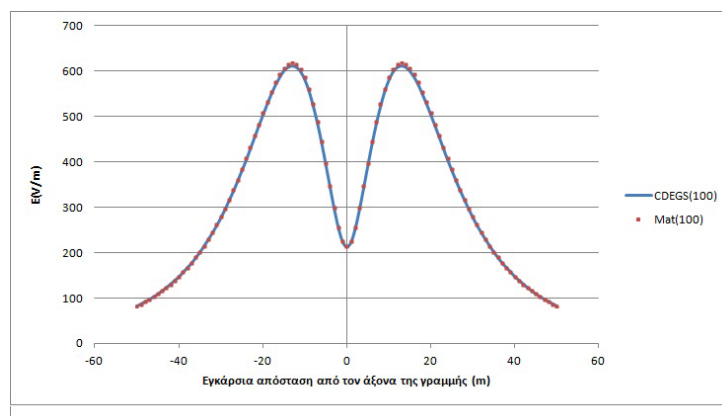


Σχήμα 4.62: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ και τους πυλώνες σε διαφορά ύψους 4m.

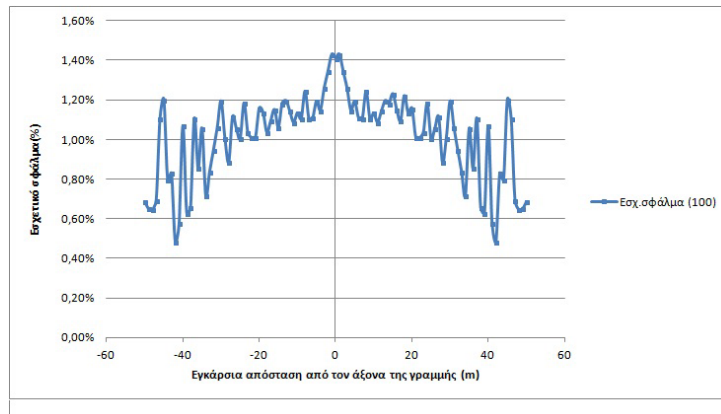
Τα συμπεράσματα είναι και πάλι όμοια με τις προηγούμενες παρατηρήσεις. Ότι δηλαδή έχουμε μια πολύ καλή σύγκλιση των αποτελεσμάτων με την ακρίβεια να μένει ανεπηρέαστη και σε μεταβολή της διαφοράς ύψους μεταξύ των πυλώνων.

- Αλλάζουμε τον τύπο του δεύτερου πυλώνα σε Z2

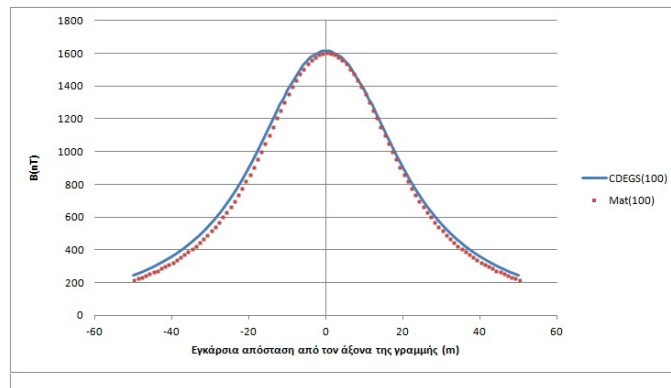
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



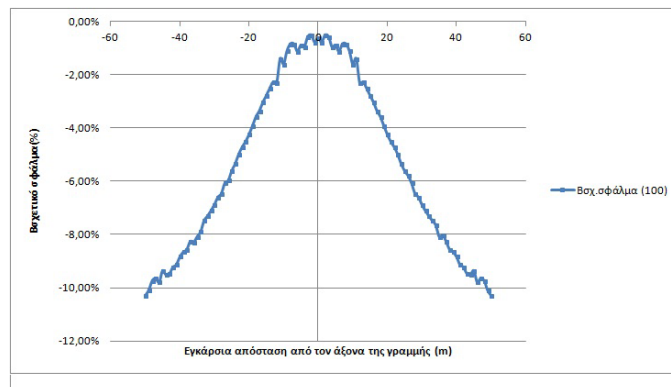
Σχήμα 4.63: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ με τύπο του 2ου πυλώνα Z2.



Σχήμα 4.64: Σχετικό σφάλμα (%) ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ με τύπο του 2ου πυλώνα Z2.



Σχήμα 4.65: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ με τύπο του 2ου πυλώνα Z2.

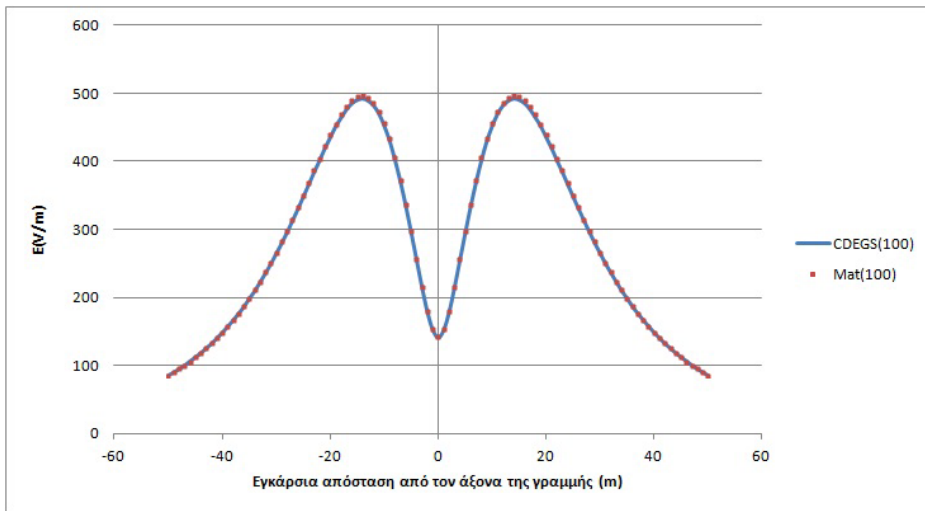


Σχήμα 4.66: Σχετικό σφάλμα (%) μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$ με τύπο του 2ου πυλώνα Z2.

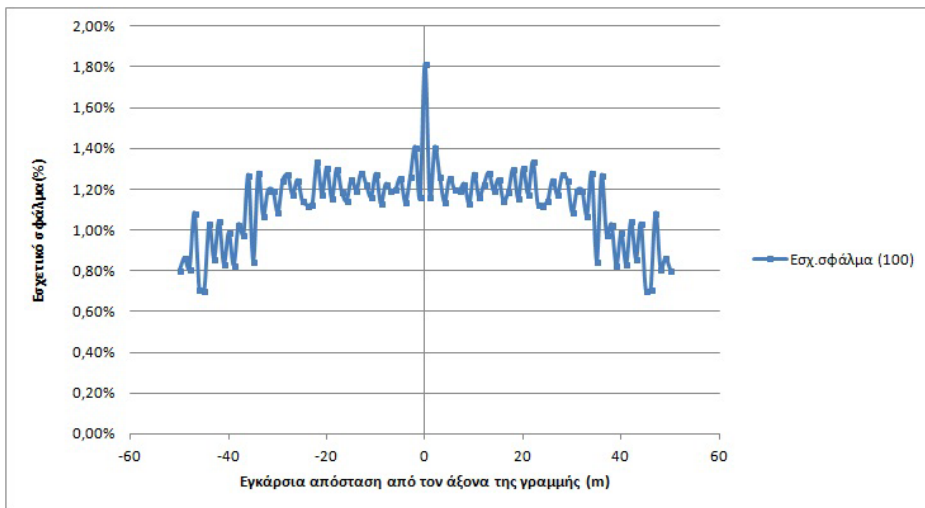
Ομοίως τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ ικανοποιητικά. Και πάλι η ακρίβεια δεν επηρεάζεται από την μεταβολή του είδους των πυλώνων.

- Αλλάξουμε τον τύπο του δεύτερου πυλώνα σε Z2 και τη διαφορά του ύψους τους σε 4m

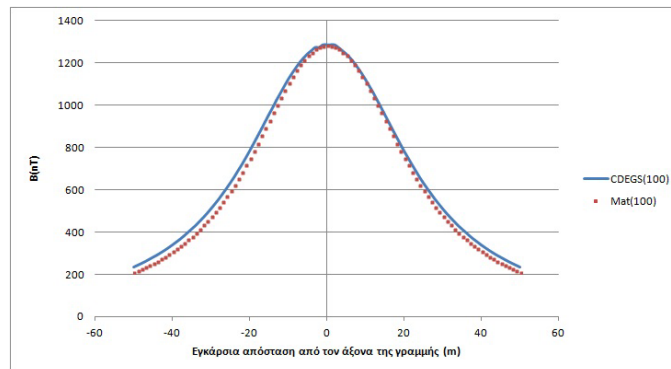
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης αυτής για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=100\text{m}$:



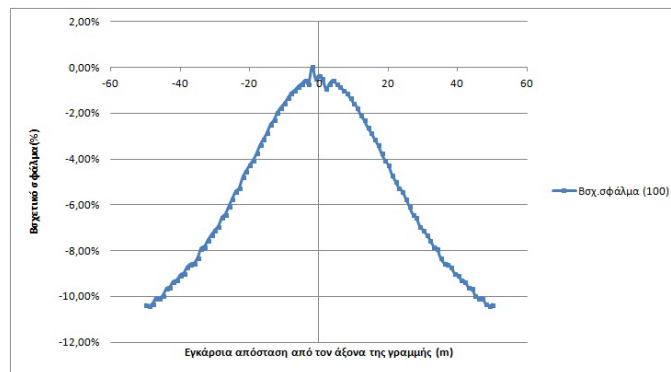
Σχήμα 4.67: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$, με τύπο 2ου πυλώνα Z2 και η διαφορά ύψους τους σε 4m.



Σχήμα 4.68: Σχετικό σφάλμα (%) ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$, με τύπο 2ου πυλώνα Z2 και η διαφορά ύψους τους σε 4m.



Σχήμα 4.69: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$, με τύπος 2ου δευτέρου πυλώνα Z2 και η διαφορά ύψους τους σε 4m.



Σχήμα 4.70: Σχετικό σφάλμα (%) μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=100\text{m}$, με τύπος 2ου πυλώνα Z2 και η διαφορά ύψους τους σε 4m.

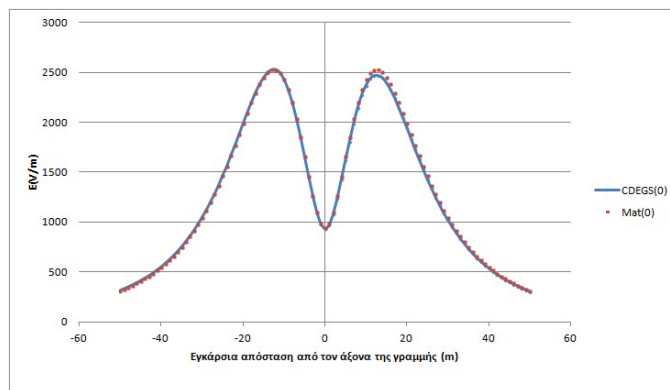
Η πιο πάνω προσομοίωση αποτελεί ουσιαστικά την πιο σπάνια και δύσκολη περίπτωση όσο αφορά τους υπολογισμούς, αφού η γραμμή μεταφοράς αναρτάται ουσιαστικά σε διαφορετικά είδη πυλώνων με αποτέλεσμα οι γραμμές να μην είναι παράλληλες μεταξύ τους, όπως επίσης υπάρχει και διαφορά μεταξύ των υψών των πυλώνων με αποτέλεσμα τα δύο άκρα των γραμμών να αναρτώνται σε διαφορετικά ύψη. Παρόλα αυτά το πρόγραμμα σε Matlab δίνει και πάλι πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία δεν διαφέρουν ως προς την ακρίβεια σε σχέση με την πρώτη περίπτωση μιας απλής διάταξης όμοιων πυλώνων και στο ίδιο ύψος.

Προχωράμε τώρα σε μια ακόμα σύγκριση, αυτή την φορά όμως γραμμής μεταφοράς 400KV. Στην περίπτωση γραμμής μεταφοράς 400KV οι φάσεις όπως είναι γνωστό αποτελούνται από πολλαπλούς αγωγούς. Στην συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς η οποία αναρτάται σε πυλώνες τύπου S6, έχουμε δύο

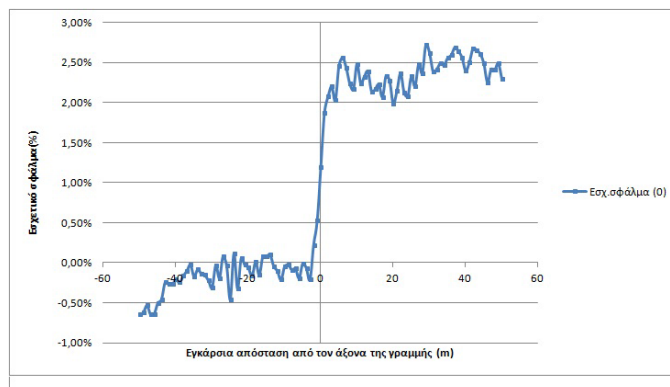
αγωγούς ανά φάση οι οποίοι απέχουν 40cm μεταξύ τους. Τα υπόλοιπα δεδομένα είναι όμοια με την προηγούμενη εφαρμογή. Δηλαδή $L=300\text{m}$, $s=3\text{m}$ και $I=200\text{A}$ ανά αγωγό φάσης. Στο εμπορικό πρόγραμμα η προσομοίωση έγινε ακριβώς με δύο αγωγούς ανά φάση, ενώ στο Matlab οι δύο αγωγοί ανά φάση θεωρούνται ένας αγωγός ο οποίος έχει μια ισοδύναμη ακτίνα $r_{eq} = 0.078\text{m}$, η οποία δίνεται από τη Σχέση 2.94 του Κεφαλαίου 2.

Έτσι προχωράμε στα γραφήματα της πιο πάνω περίπτωσης για να διαπιστώσουμε κατά πόσο το πρόγραμμα σε Matlab συγκλίνει στο εμπορικό πρόγραμμα CDEGS.

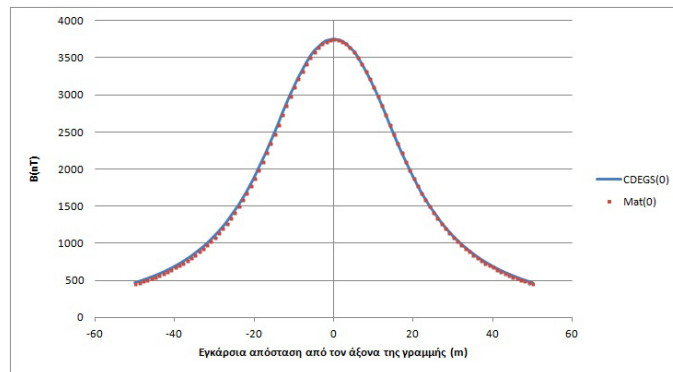
$x=0\text{m}$



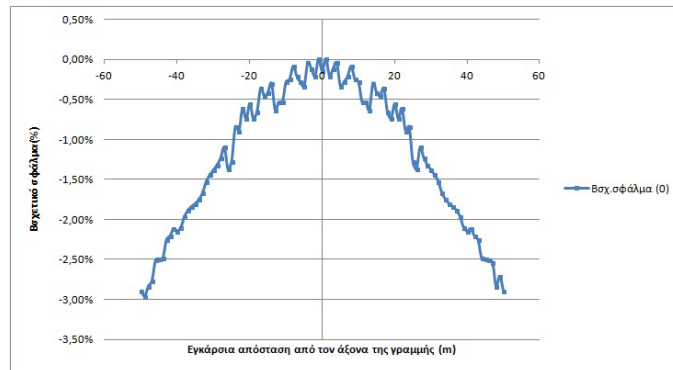
Σχήμα 4.71: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.



Σχήμα 4.72: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.

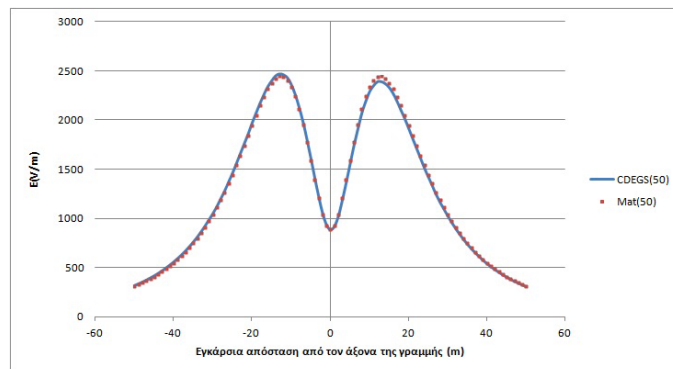


Σχήμα 4.73: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.

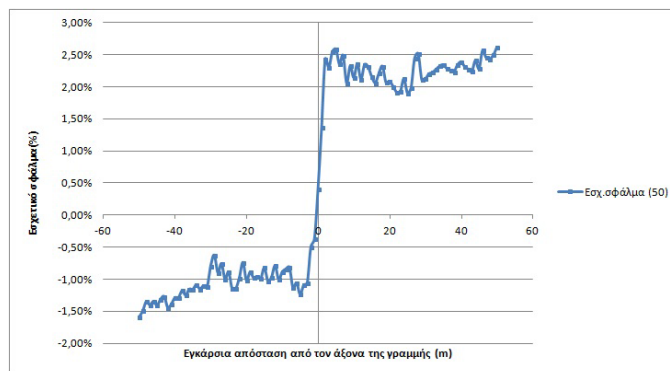


Σχήμα 4.74: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.

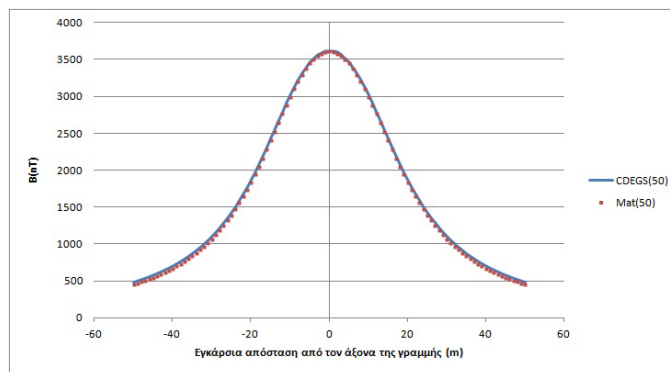
$x=50\text{m}$



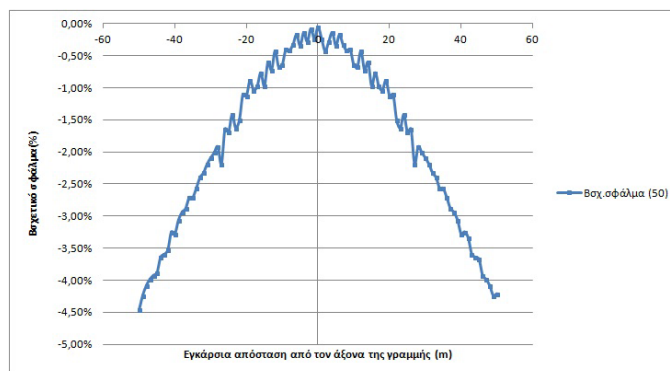
Σχήμα 4.75: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.



Σχήμα 4.76: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.



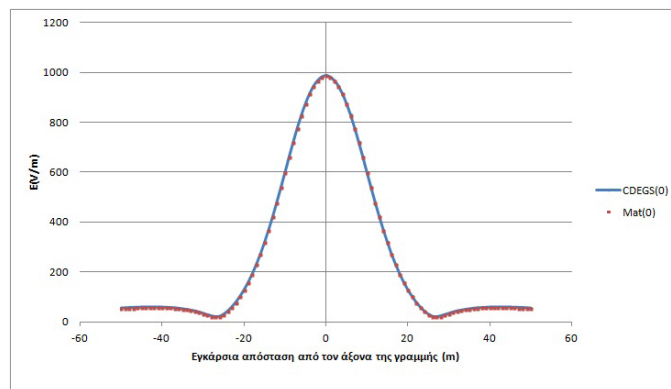
Σχήμα 4.77: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.



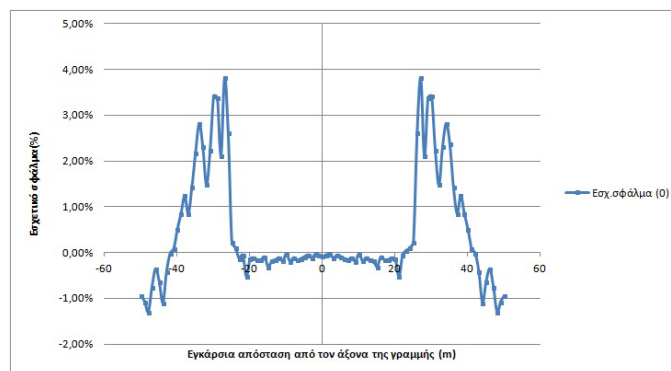
Σχήμα 4.78: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=50\text{m}$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γραφήματα για το κύκλωμα των 400KV, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές και το πρόγραμμα συγκλίνει πολύ με το CDEGS. Βλέπουμε λοιπόν ότι η προσέγγιση των πολλαπλών αγωγών της κάθε φάσης με ένα μοναδικό αγωγό ο οποίος φέρει την ισοδύναμη ακτίνα δεν αλλοιώνει τα αποτελέσματά μας. Συμπερασματικά λοιπόν έχουμε και εδώ πολύ ακριβή αποτελέσματα με αποτέλεσμα να επαληθεύεται και πάλι η ορθότητα του προγράμματος.

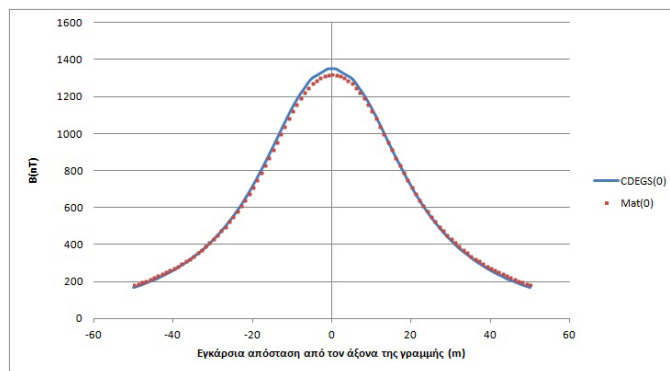
Τελευταία σύγκριση αποτελεί η σύγκριση με γραμμή διπλού κυκλώματος τύπου T4, με μήκος γραμμής $L=300\text{m}$, $I=200\text{m}$ και $s=3\text{m}$. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σύγκρισης για το ηλεκτρικό πεδίο (E), το μαγνητικό πεδίο (B) καθώς και τα αντίστοιχα τους σχετικά σφάλματα για το επίπεδο $x=0\text{m}$.



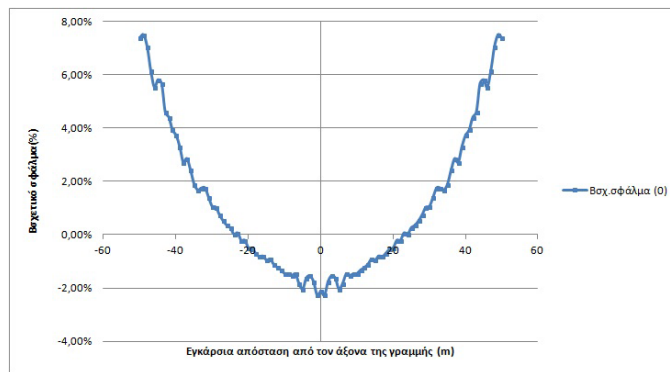
Σχήμα 4.79: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.



Σχήμα 4.80: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.



Σχήμα 4.81: Σύγκριση αποτελεσμάτων μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.

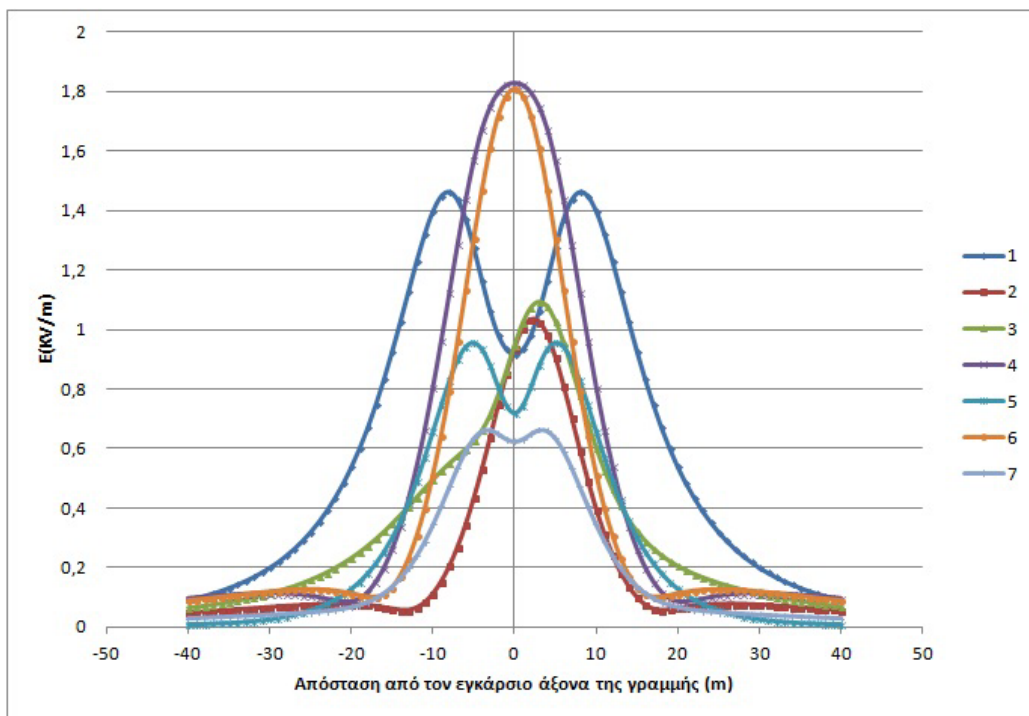


Σχήμα 4.82: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου με Matlab και CDEGS για το επίπεδο $x=0\text{m}$.

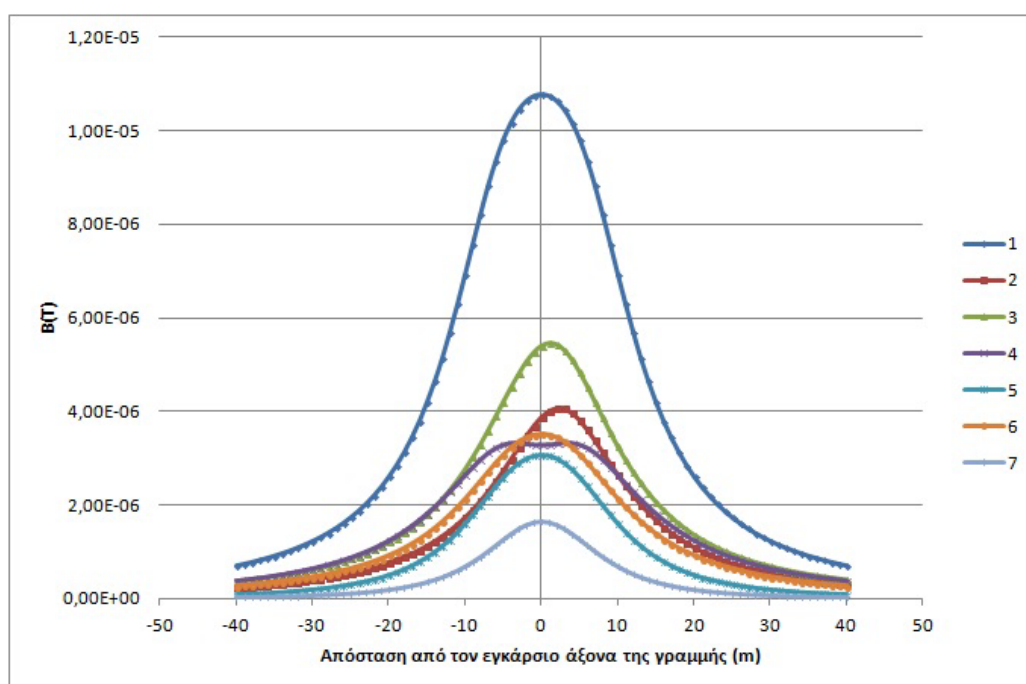
Παρατηρώντας τα πιο πάνω γραφήματα παρατηρείται μια αύξηση στο σφάλμα του ηλεκτρικού πεδίου κυρίως μετά τα 20m απόσταση από τη γραμμή. Σύμφωνα όμως με το Σχήμα 4.79 φαίνεται ξεκάθαρα ότι το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο αυτό παίρνει σχεδόν μηδενικές τιμές και ως λογικό επακόλουθο τα σχετικά σφάλματα να είναι πολύ μεγαλύτερα. Στη συνέχεια καθώς παρατηρείται μια μικρή αύξηση του πεδίου τα σφάλματα μικραίνουν και πάλι. Γενικά όμως τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά για το ηλεκτρικό πεδίο αφού στα σημεία εντός 20m εκατέρωθεν των γραμμών, όπου έχουμε ουσιαστικά υπολογίσιμο πεδίο, τα σχετικά σφάλματα είναι σχεδόν μηδενικά. Η ίδια συμπεριφορά συμβαίνει και στο μαγνητικό πεδίο όπου τα σχετικά σφάλματα είναι μικρότερα από 2% εντός της ζώνης των 20m, ενώ στη συνέχεια όπου έχουμε πολύ μικρές τιμές του μαγνητικού πεδίου τα σχετικά σφάλματα μεγαλώνουν μέχρι και 7%. Γενικότερα όμως η ακρίβεια του προγράμματος είναι αρκετά καλή και στις γραμμές διπλού κυκλώματος αφού οι υπολογισμένες τιμές του είναι σε συμφωνία με το CDEGS.

4.2 Σύγκριση με επιστημονικά άρθρα

Προχωράμε τώρα στην τελευταία σύγκριση του προγράμματος για επαλήθευση της ορθότητάς του. Αυτή τη φορά θα προσομοιωθούν σε αυτό οι περιπτώσεις διατάξεων γραμμών μεταφοράς σύμφωνα με το άρθρο [1] και θα συγκριθούν οι αναγραφόμενες μέγιστες τιμές καθώς και τα σχετικά τους σφάλματα έτσι όπως προκύπτουν από την σύγκριση του προγράμματος με τα δεδομένα και αποτελέσματα του άρθρου αυτού. Πιο κάτω φαίνονται οι προσομοιώσεις για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο έτσι όπως ακριβώς προσομοιώθηκαν και στο άρθρο, και στον επόμενο πίνακα δίνονται οι διάφορες επεξηγήσεις για το που αντιστοιχεί η κάθε γραμμή αλλά και τις μέγιστες τιμές των πεδίων και τα σχετικά τους σφάλματα.



Σχήμα 4.83: Αποτελέσματα ηλεκτρικού πεδίου με Matlab με βάση τα δεδομένα του άρθρου [1].



Σχήμα 4.84: Αποτελέσματα μαγνητικού πεδίου με Matlab με βάση τα δεδομένα του άρθρου [1].

α/α	Εφαρμογές	E _{mat} max (kV/m)	E _a max (kV/m)	B _{mat} mat (μT)	B _a max (T)	E _{σχ,σφ} (%)	B _{σχ,σφ} (%)
1	Απλό κύκλωμα συμβατικής γραμμής	1.46	1.37	10,8	10,52	6,57	4,38
2	Απλό κύκλωμα συμπαγούς γραμμής με τους αγωγούς σε κάθετη διάταξη	1.03	1.08	4,08	4,09	-4,63	2,66
3	Απλό κύκλωμα συμπαγούς γραμμής με τους αγωγούς σε τριγωνική διάταξη	1.09	1.12	5,46	5,47	-2,67	-0,24
4	Διπλό κύκλωμα συμβατικής γραμμής με συμμετρική διάταξη	1.83	1.87	3,34	3,34	-2,14	0
5	Διπλό κύκλωμα συμβατικής γραμμής με βέλτιστη διάταξη	0.95	0.94	3,09	3,09	1,06	0
6	Διπλό κύκλωμα συμπαγούς γραμμής με συμμετρικής διάταξη	1.81	1.86	3,53	3,54	-2,68	-0,28
7	Διπλό κύκλωμα συμπαγούς γραμμής με βέλτιστη διάταξη	0.66	0.63	1,65	1,65	4,76	0

Πίνακας 4.1: Συγκριτικά αποτελέσματα Matlab και άρθρου [1] μέγιστων τιμών ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και τα σχετικά τους σφάλματα.

Εξετάζοντας προσεκτικά τα πιο πάνω γραφήματα αλλά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον πιο πάνω πίνακα, επιβεβαιώνουμε την πλήρη ορθότητα του προγράμματος. Τα σχετικά σφάλματα είναι πολύ μικρά έως και μηδενικά γεγονός που επιβεβαιώνει την μεγάλη σύγκλιση των αποτελεσμάτων του προγράμματος με τα αποτελέσματα του άρθρου [1]. Κάποιες μικρές διαφορές στο ηλεκτρικό πεδίο οφείλονται στο γεγονός ότι δεν είχαμε γνώση για την ακριβή διάμετρο που χρησιμοποιήθηκε στο άρθρο. Επίσης δεν γνωρίζαμε την μέθοδο που χρησιμοποιούν, αν έχουν προχωρήσει σε προσέγγιση με βύθισμα ή χωρίς καθώς επίσης και αν έχουν λάβει υπόψη τους αγωγούς της γης.

Βιβλιογραφία

- [1] D. Tsanakas, E. Mimos, A. Tsinevrakis, “Regulations for protection against electric and magnetic fields and optimum solution for the development of 150kV transmission lines in suburban regions”, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Patras, Greece 2006.

Κεφάλαιο 5

Σύγκριση αποτελεσμάτων του λογισμικού με κανονικές μετρήσεις

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού θα δοκιμαστούν τα αποτελέσματα του λογισμικού συγκρίνοντας πραγματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν μέσα στα πλαίσια της εργασίας [1]. Συγκεκριμένα θα γίνουν πέντε προσομοιώσεις, η κάθε μια από τις οποίες θα αντιστοιχεί σε μια κανονική μέτρηση, συγκρίνοντας έτσι τις μετρήσεις τόσο στο ηλεκτρικό όσο και στο μαγνητικό πεδίο με τα αποτελέσματα του προγράμματος. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η απόκλιση των αποτελεσμάτων και θα σχολιαστούν οι παράγοντες που συμβαίνουν οι οποιεσδήποτε αποκλίσεις ελέγχοντας έτσι την ορθότητα του προγράμματος αλλά και καταλήγοντας σε χρήσιμα συμπεράσματα αναδεικνύοντας τυχόν προβλήματα τα οποία θα βοηθήσουν στην περαιτέρω βελτίωση του λογισμικού.

5.1 Μετρήσεις χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Οι μετρήσεις των χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι μια αναγκαία και πολύ σημαντική διαδικασία. Ιδιαίτερα σε “επιβαρυμένες” από πεδία περιοχές, η μέτρηση τους καθίσταται επιβεβλημένη. Μέσω των μετρήσεων αυτών ελέγχονται τα όρια των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων για να διαπιστωθεί κατά πόσο η ασφάλεια των ανθρώπων στις περιοχές αυτές είναι εξασφαλισμένη. Έτσι πραγματοποιούνται μετρήσεις σε διάφορους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης αλλά και γενικότερα σε περιοχές πλησίον γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεθοδολογία, με την οποία πραγματοποιούνται οι σημειακές μετρήσεις σε περιοχές πλησίον γραμμών μεταφοράς ή εντός των υποσταθμών, βασίζεται σε διεθνή πρότυπα, όπως τα IEEE Std 644:1994, IEC 61786:2003 και IEC

62110:2009. Βάσει των προτύπων αυτών υπολογίζεται το συνιστάμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (rms) στην συχνότητα των 50 Hz με την χρήση τριαξονικού οργάνου. Τα σημεία μέτρησης επιλέγονται στους άξονες και στις θέσεις όπως αυτές περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα και σε ύψος 1 m πάνω από το έδαφος.

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε υπό μέτρηση σημείο ο αντίστοιχος αισθητήρας μέτρησης συνδέεται απ' ευθείας στο πεδιόμετρο, το οποίο φέρεται ανά χείρας από τον χειριστή περίπου στο ύψος του θώρακα. Αντίθετα, για τις μετρήσεις ηλεκτρικών πεδίων ο αντίστοιχος αισθητήρας μέτρησης τοποθετείται πάνω σε τρίποδο και συνδέεται, μέσω οπτικής ίνας, με το απομακρυσμένο πεδιόμετρο (6-10m), για την αποφυγή των επιρροών του παρατηρητή, καθώς επίσης και άλλων που μπορεί να είναι κοντά στον πεδιακό αισθητήρα. Και στις δύο περιπτώσεις ο χειριστής για κάθε σημείο καταγράφει την τιμή στο πρωτόκολλο μέτρησης ή αποθηκεύει ορισμένες τιμές με συγκεκριμένη συχνότητα δειγματοληψίας. Ο χρόνος απόκτησης της μετρούμενης τιμής για κάθε σημείο ορίζεται τουλάχιστον 30sec. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία ενδιαφέροντος.

Επίσης, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη γειτνίαση αντικειμένων στους αισθητήρες πεδίου, γιατί η εκδήλωση σημαντικής πεδιακής διαταραχής είναι ικανή για την εισαγωγή ανεπιθύμητων σφαλμάτων στις μετρήσεις. Ειδικότερα, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ηλεκτρικού πεδίου θα πρέπει η απόσταση μεταξύ του πεδιόμετρου και των προσωρινών αντικειμένων να είναι τουλάχιστον τρεις φορές το ύψος του αντικειμένου, προκειμένου να μετρηθεί το ομογενές πεδίο. Για τον ίδιο λόγο, στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου τα προσωρινά μαγνητικά υλικά ή οι μη μαγνητικοί αγωγοί θα πρέπει να βρίσκονται μακριά από το σημείο μέτρησης τουλάχιστον τρεις φορές της μέγιστης διάστασης του αντικειμένου. Ακόμη, και για τα δύο είδη μετρήσεων η απόσταση μεταξύ του πεδιόμετρου και των μόνιμων αντικειμένων θα πρέπει να είναι 1m ή μεγαλύτερη, ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής ακρίβεια της μέτρησης του διαταραγμένου πεδίου πέριξ του αντικειμένου. Τέλος, το άτομο που χειρίζεται το όργανο μέτρησης θα πρέπει να διασφαλίζει ότι δεν στέκεται μεταξύ της πηγής του πεδίου και του αισθητήρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης [1].

5.2 Προσομοιώσεις

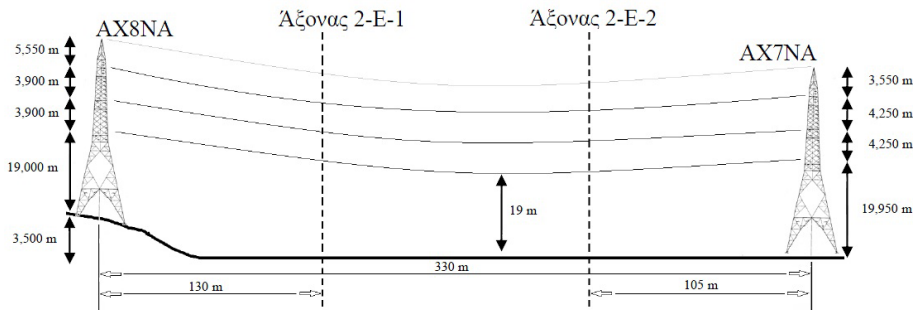
5.2.1 1^η Προσομοίωση

Τα στοιχεία της γραμμής μεταφοράς στην οποία έγινε η 1η μέτρηση έχουν συγκεντρωθεί στον πιο κάτω Πίνακα 5.1:

Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	150kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή διπλού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Συμμετρική	
Άνοιγμα της γραμμής	AX7NA-AX8NA	
Μήκος του ανοίγματος	330m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	19m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	166.4-170.8 A	159.3-162.6 A
Τύπος πυλώνα	Κωδικός AX7NA	Κωδικός AX8NA
	R4	T4

Πίνακας 5.1: Στοιχεία του προς μέτρηση τμήματος της γραμμής AX7NA-AX8NA

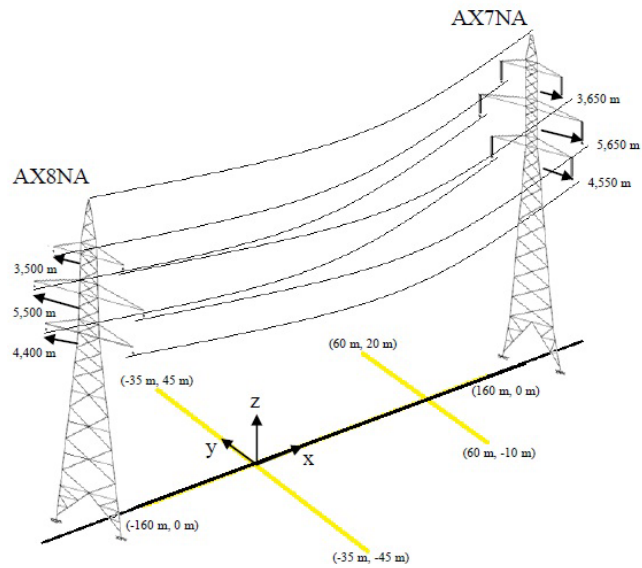
Τα παρακάτω Σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζουν δύο διαφορετικές όψεις της περιοχής μέτρησης στα οποία περιλαμβάνονται τα ύψη των αγωγών στους πυλώνες, η ελάχιστη απόσταση αγωγού και γης, οι θέσεις των αξόνων μέτρησης και η ιδιομορφία του εδάφους.



Σχήμα 5.1: Πλευρική όψη του τμήματος της γραμμής AX7NA – AX8NA (Πηγή: [1]).

Αξονας 2-E-1

Εισάγοντας τα κατάλληλα δεδομένα στο πρόγραμμα όπως μήκος γραμμής $L=330\text{m}$, βύθισμα γραμμής $s=3.5\text{m}$, επιλέγοντας τους τυποποιημένους πυλώνες R4 και T4 και εισάγοντας ρεύμα φορτίου και τάση για τα δύο κυκλώματα, πραγματοποιήσαμε την προσομοίωση για τον πρώτο άξονα 2-E-1, τα αποτελέσματα του οποίου παρατίθενται στον Πίνακα 5.2, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.



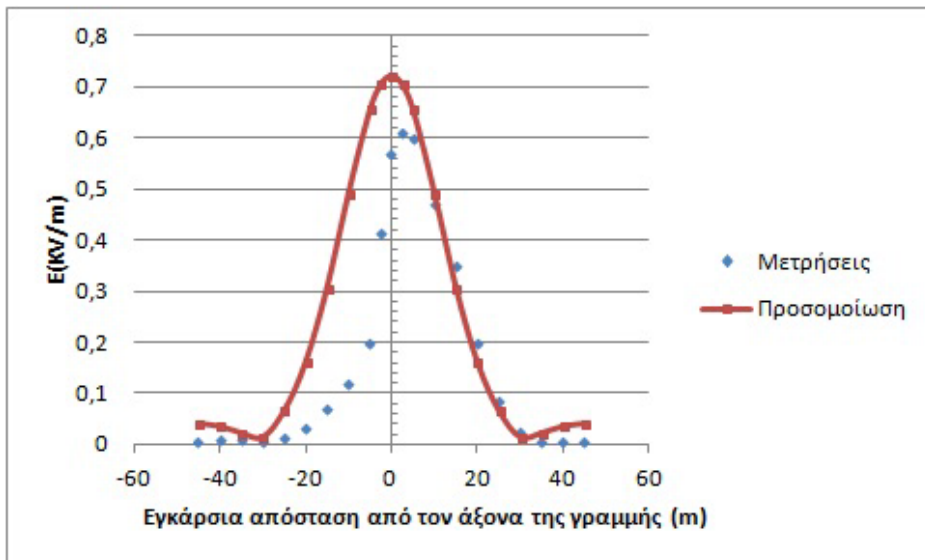
Σχήμα 5.2: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών κατά μήκος της γραμμής AX7NA-AX8NA (Πηγή: [1]).

α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-45	0,007	0,040	160,500	167,523	81,74	4,38
2	-40	0,010	0,034	194,000	203,038	70,97	4,66
3	-35	0,009	0,021	260,100	248,758	54,95	-4,36
4	-30	0,009	0,013	325,800	307,745	30,43	-5,54
5	-25	0,015	0,065	400,100	383,119	77,50	-4,24
6	-20	0,034	0,160	496,400	476,257	78,76	-4,06
7	-15	0,070	0,306	626,600	582,615	77,01	-7,02
8	-10	0,121	0,491	736,300	686,166	75,43	-6,81
9	-5	0,200	0,655	781,000	761,316	69,39	-2,52
10	-2,5	0,415	0,703	805,000	781,728	41,01	-2,89
11	0	0,572	0,720	810,700	789,326	20,53	-2,64
12	2,5	0,611	0,703	825,300	783,861	13,18	-5,02
13	5	0,601	0,655	824,400	765,257	8,20	-7,17
14	10	0,472	0,491	756,800	692,085	3,75	-8,55
15	15	0,353	0,306	635,600	588,572	-15,46	-7,40
16	20	0,201	0,160	516,100	481,331	-26,00	-6,74
17	25	0,087	0,065	393,800	387,141	-34,53	-1,69
18	30	0,028	0,013	330,300	310,850	-119,97	-5,89
19	35	0,008	0,021	295,800	251,145	63,51	-15,10
20	40	0,007	0,034	241,800	204,886	79,21	-15,27
21	45	0,008	0,040	211,800	168,969	79,95	-20,22

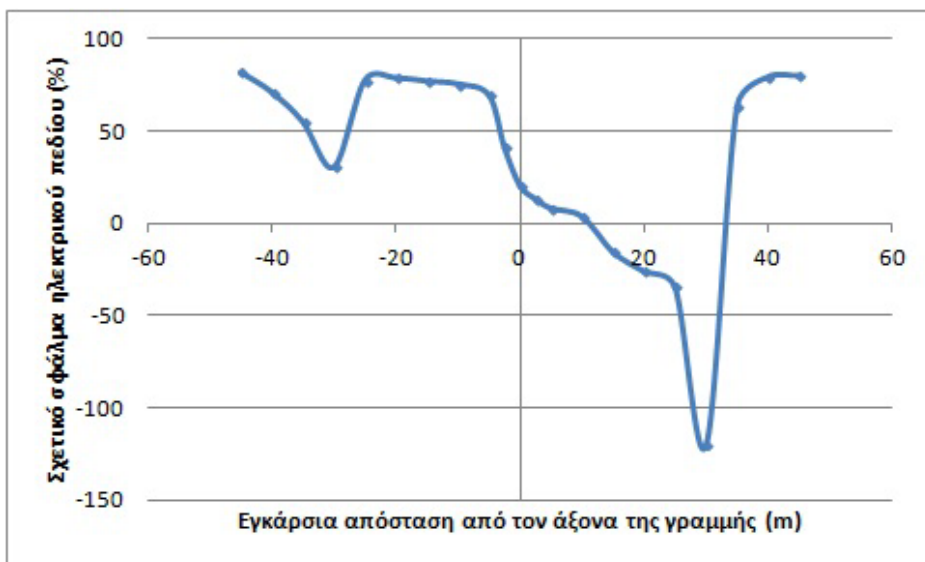
Πίνακας 5.2: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα της γραμμής AX7NA-AX8NA.

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε

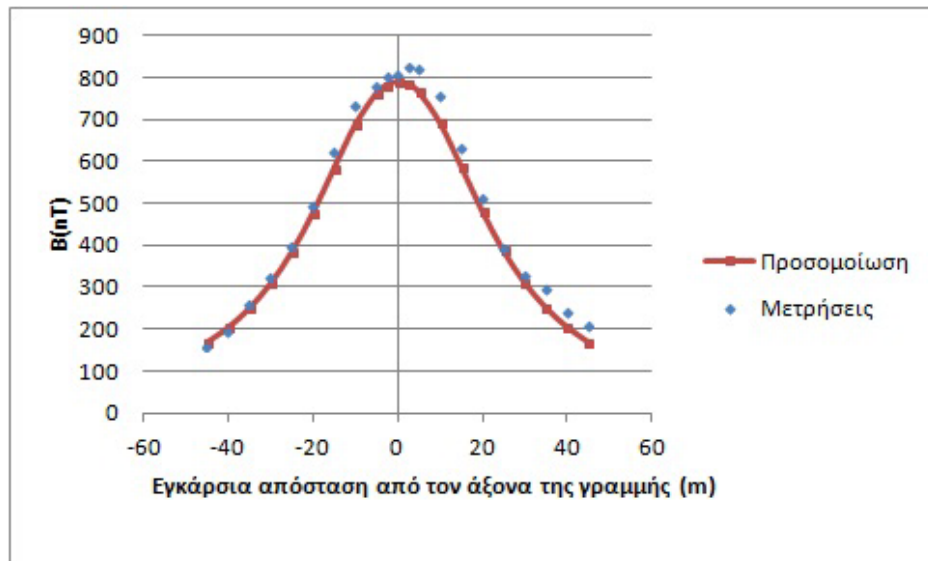
στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν 45m εκατέρωθεν του άξονα της γραμμής μεταφοράς και παρουσιάζονται με τις μετρήσεις καθώς και με τα σχετικά σφάλματα στα παρακάτω σχήματα.



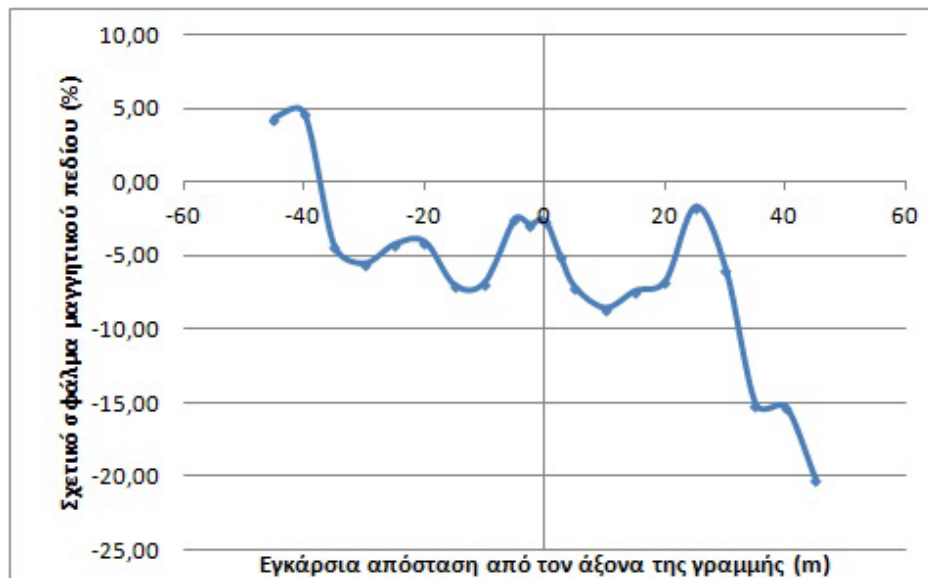
Σχήμα 5.3: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.4: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.5: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.6: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.3 οι μετρούμενες τιμές εμφανίζουν μια ασυμμετρία στους δύο ημιάξονες σε αντίθεση με τις υπολογισμένες τιμές οι οποίες είναι συμμετρικές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρουσία εμποδίων (ψηλές οικίες) στον αρνητικό ημιάξονα. Από την άλλη, το πρόγραμμα υπολογίζει το

ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο αγνοώντας την ύπαρξη εμποδίων. Σε αυτό το λόγο οφείλονται και τα μεγάλα σφάλματα για το ηλεκτρικό πεδίο.

Στο Σχήμα 5.5 βλέπουμε τις μετρούμενες και υπολογισμένες τιμές του μαγνητικού πεδίου οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά με αρκετά μικρά και αποδεκτά σφάλματα. Όπως γνωρίζουμε από το Κεφάλαιο 1, το μαγνητικό πεδίο μένει ανεπηρέαστο από την ύπαρξη εμποδίων γι' αυτό το λόγο τα αποτελέσματά μας κρίνονται πολύ ικανοποιητικά. Παρατηρείται αρκετά καλή σύγκλιση (σχετικά σφάλματα < 5%) μεταξύ υπολογισμών και πραγματικών τιμών μαγνητικής επαγωγής στη ζώνη μέτρησης από -35m μέχρι +30m. Έξω από τη ζώνη αυτή η σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση που παρατηρείται οφείλεται κυρίως στο ότι οι τιμές είναι μικρές και συνεπώς οι μικρές διαφορές μεταξύ υπολογισμών και πραγματικών τιμών οδηγούν σε μεγάλες τιμές σχετικού σφάλματος. Η περίπτωση της πιο πάνω προσομοίωσης αποτελεί μια από τις “δύσκολες” περιπτώσεις υπολογισμού των πεδίων καθώς οι πυλώνες είναι και ανισοϋφείς αλλά και διαφορετικού τύπου με αποτέλεσμα οι γραμμές των φάσεων να μην είναι εντελώς παράλληλες, γι' αυτό έχουμε κάποια σφάλματα. Επίσης ο άξονας μέτρησης είναι μακριά από το κέντρο της γραμμής, όπου έχουμε τα καλύτερα αποτελέσματα και είναι κοντά στους πυλώνες, γεγονός που προκαλεί αυξημένα σφάλματα λόγω της μεγαλύτερης συμβολής των διπλανών κυκλωμάτων της επόμενης συστοιχίας πυλώνων τα οποία αγνοούνται από το πρόγραμμα. Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε πως στη διαφορά μεταξύ των μετρήσεων και των προσομοιώσεων συμβάλλει η κλίση του εδάφους.

Άξονας 2-E-2

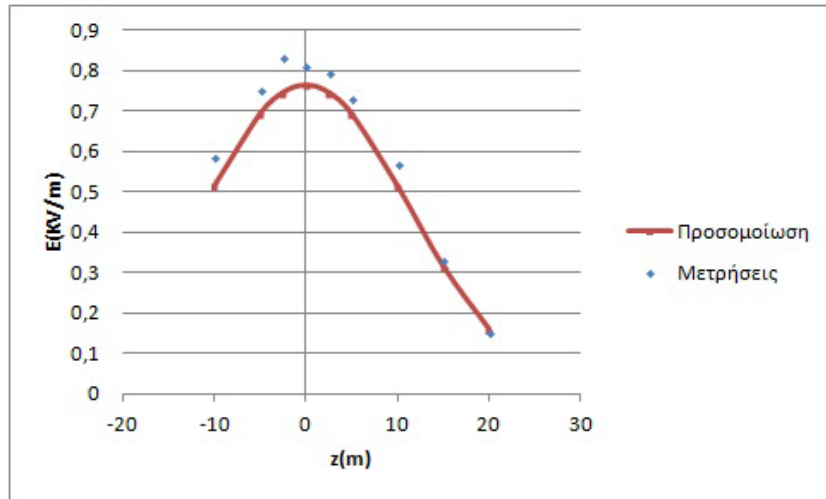
Τα αποτελέσματα για τον δεύτερο άξονα (Άξονας 2-E-2) παρατίθενται στον πιο κάτω Πίνακα 5.3, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.

α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-10	0,588	0,514	786,000	733,078	-14,272	-6,733
2	-5	0,753	0,693	851,700	815,509	-8,676	-4,249
3	-2,5	0,833	0,746	877,000	837,730	-11,720	-4,478
4	0	0,812	0,764	880,100	846,006	-6,250	-3,874
5	2,5	0,794	0,746	877,700	840,164	-6,462	-4,277
6	5	0,731	0,693	854,100	819,991	-5,499	-3,994
7	10	0,571	0,514	809,700	739,726	-11,045	-8,642
8	15	0,330	0,315	677,200	625,807	-4,906	-7,589
9	20	0,150	0,160	547,000	508,529	5,949	-7,033

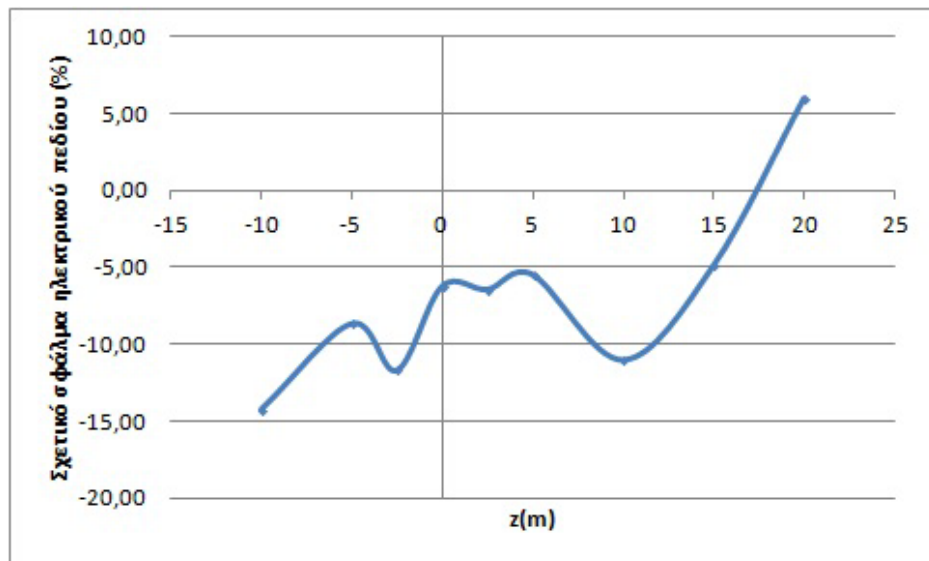
Πίνακας 5.3: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα της γραμμής AX7NA-AX8NA.

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν 45m

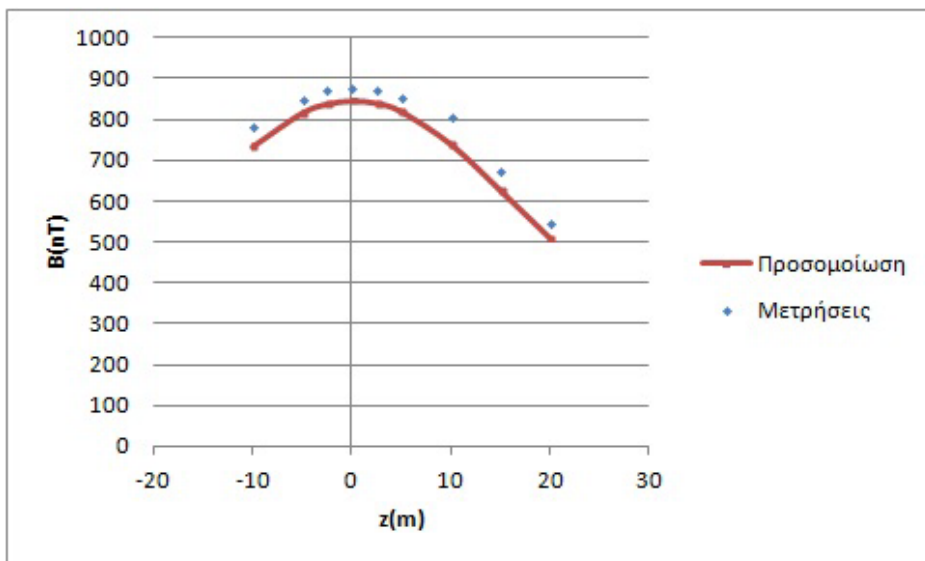
εκατέρωθεν του άξονα της γραμμής μεταφοράς και παρουσιάζονται με τις μετρήσεις καθώς και με τα σχετικά σφάλματα στα παρακάτω σχήματα.



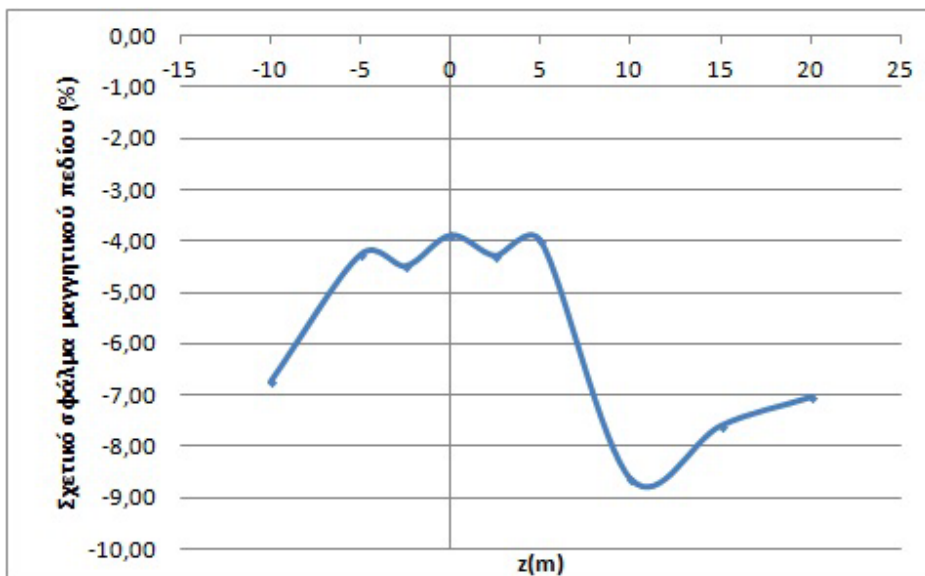
Σχήμα 5.7: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.8: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.9: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.10: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι η σύγκλιση των μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών για το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετά καλύτερη από ότι ήταν στον προηγούμενο εγκάρσιο άξονα, γιατί στο περιβάλλον του συγκεκριμένου άξονα μέτρησης δεν υπήρχαν μεγάλα αντικείμενα.

Μια μικρή απόκλιση παρατηρείται στο μαγνητικό πεδίο (μέχρι και 5% εκτός από κάποια μεμονωμένα σημεία τα οποία φτάνουν μέχρι και 9%) η οποία μπορεί να οφείλεται στην κλίση του εδάφους με αποτέλεσμα η μέτρηση να μην γινόταν ακριβώς στο 1m καθώς επίσης και στην πιθανή ύπαρξη γειτονικών πηγών μαγνητικού πεδίου οι οποίες αγνοούνται από το πρόγραμμα (το πρόγραμμα υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο μεταξύ δύο πυλώνων θεωρώντας τον υπόλοιπο χώρο κενό, ενώ στην πραγματικότητα το μαγνητικό πεδίο μεταξύ των δύο πυλώνων επηρεάζεται και από την επόμενη ή και προηγούμενη συστοιχία πυλώνων ιδιαίτερα όταν ο άξονας μέτρησης μας βρίσκεται κοντά στους πυλώνες).

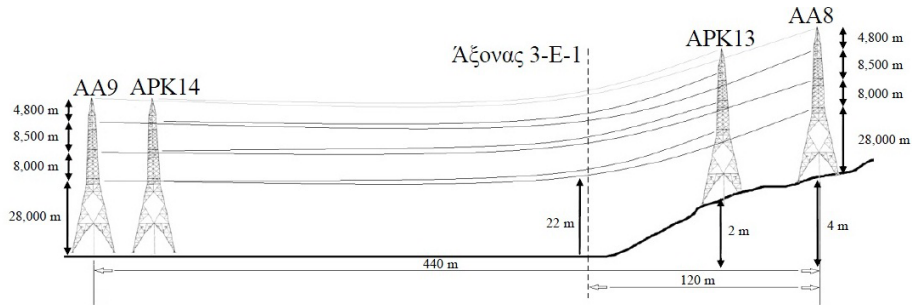
5.2.2 2^η Προσομοίωση

Τα στοιχεία της γραμμής μεταφοράς στην οποία έγινε η 2η μέτρηση έχουν συγκεντρωθεί στον πιο κάτω Πίνακα 5.4:

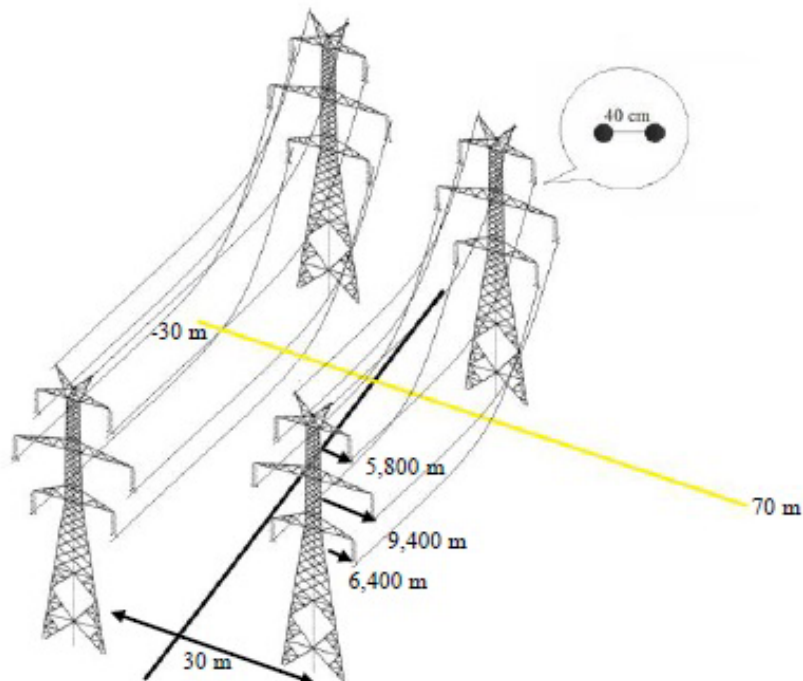
1η γραμμή λειτουργίας		
Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	400kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή διπλού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Βέλτιστη	
Άνοιγμα της γραμμής	APK139-APK140	
Μήκος του ανοίγματος	420m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	22m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	20.1-22.9 A	18.3-21 A
Τύπος πυλώνα	Κωδικός APK139	Κωδικός APK140
	S15	S15
2η γραμμή λειτουργίας		
Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	400kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή διπλού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Βέλτιστη	
Άνοιγμα της γραμμής	AA8-AA9	
Μήκος του ανοίγματος	440m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	24m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	-	-
Τύπος πυλώνα	Κωδικός AA8	AA9
	S15	S15

Πίνακας 5.4: Στοιχεία του προς μέτρηση τμήματος της γραμμής APK139-APK140 και AA8-AA9.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σκαριφήματα, όπου σημειώνονται οι άξονες μέτρησης και τα απαραίτητα στοιχεία του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων.



Σχήμα 5.11: Πλευρική όψη των τμημάτων των γραμμών APK140-APK139 και AA9-AA8 (Πηγή: [1]).



Σχήμα 5.12: Άξονας μέτρησης και θέσεις των αγωγών κατά μήκος των γραμμών APK140-APK139 και AA8-AA9 (Πηγή: [1]).

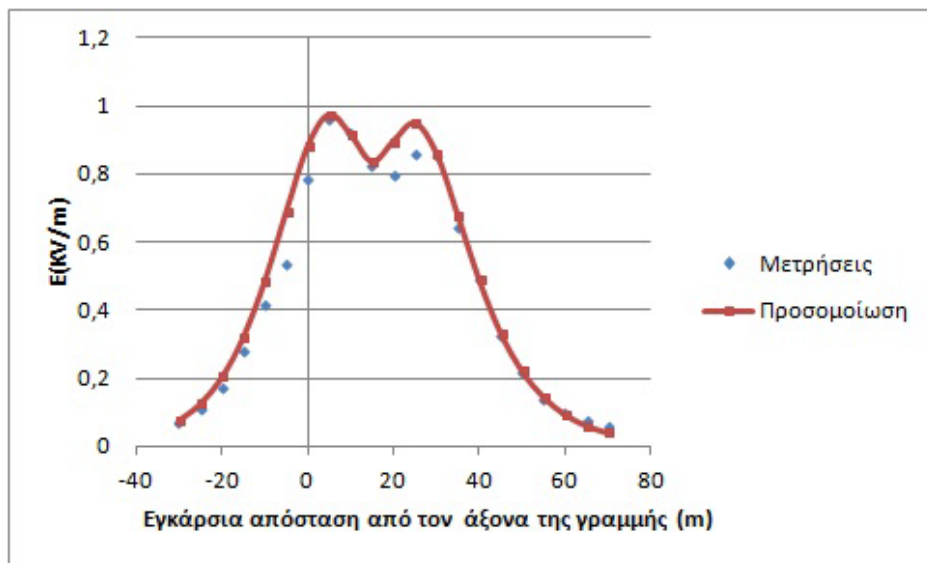
Αφού έγινε η συγκεκριμένη προσομοίωση στο πρόγραμμα (ενεργοποιώντας από το πρόγραμμα την επιλογή “Παράλληλα Οδεύουσες Γραμμές”, εισάγοντας

τα δεδομένα των γραμμών $L_1 = 220m$, $s_1 = 8m$, $L_2 = 240m$, $s_2 = 8m$, επιλέγοντας τύπο πυλώνα S15 και εισάγοντας ρεύμα φορτίου και τάση κυκλωμάτων), τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.5, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.

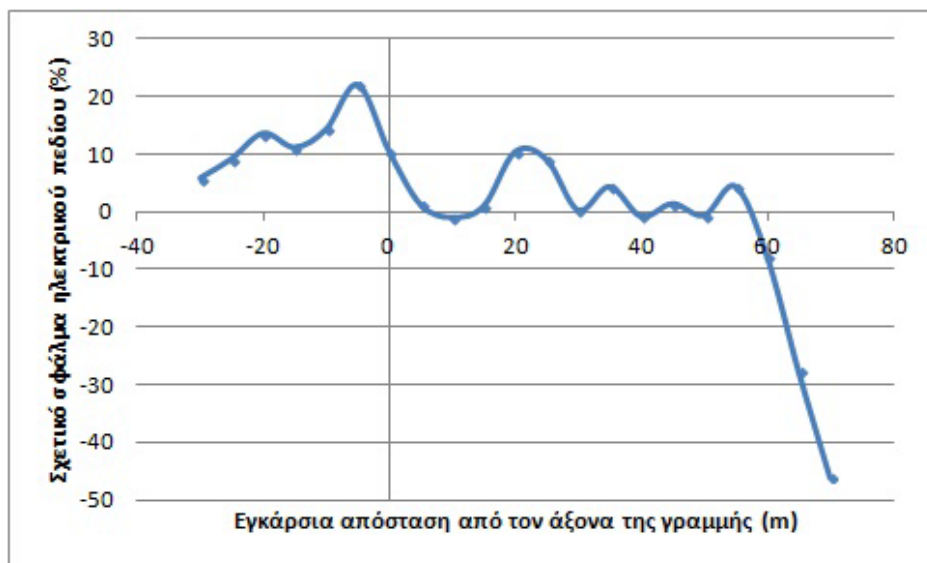
α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-30	0,073	0,078	30,820	25,170	5,77	-18,332
2	-25	0,116	0,127	36,900	31,216	9,137	-15,402
3	-20	0,177	0,205	41,230	38,984	13,501	-5,449
4	-15	0,287	0,322	53,450	48,866	11,056	-8,577
5	-10	0,418	0,487	63,650	61,139	14,226	-3,946
6	-5	0,538	0,689	71,670	75,654	21,906	5,559
7	0	0,790	0,881	82,570	91,348	10,329	10,631
8	5	0,962	0,973	98,200	105,813	1,127	7,752
9	10	0,924	0,914	115,800	115,642	-1,061	-0,137
10	15	0,827	0,835	120,300	117,925	0,909	-1,975
11	20	0,803	0,895	110,300	111,844	10,307	1,400
12	25	0,863	0,948	91,430	99,091	8,948	8,379
13	30	0,858	0,860	73,400	82,982	0,185	13,054
14	35	0,649	0,678	49,720	66,791	4,270	34,334
15	40	0,492	0,488	38,830	52,540	-0,896	35,309
16	45	0,329	0,334	34,640	40,928	1,319	18,151
17	50	0,224	0,222	28,260	31,854	-0,698	12,717
18	55	0,140	0,146	21,090	24,907	4,288	18,097
19	60	0,103	0,095	19,850	19,626	-7,873	-1,129
20	65	0,079	0,062	18,600	15,609	-27,743	-16,079
21	70	0,060	0,041	20,520	12,539	-46,048	-38,896

Πίνακας 5.5: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα της γραμμής AA8-AA9.

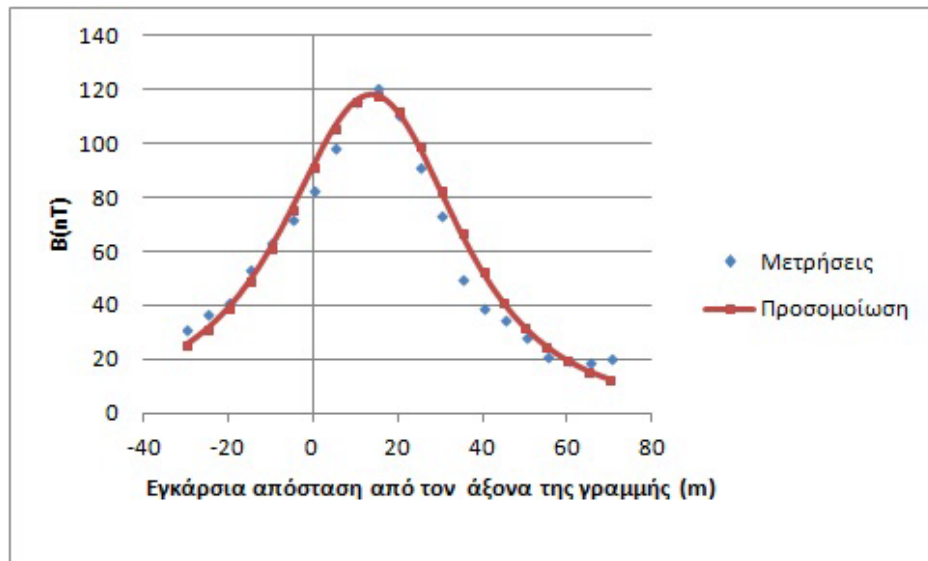
Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ο υπολογισμός και η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κάτω από γραμμή μεταφοράς 400 kV, καθώς και τα σχετικά σφάλματα.



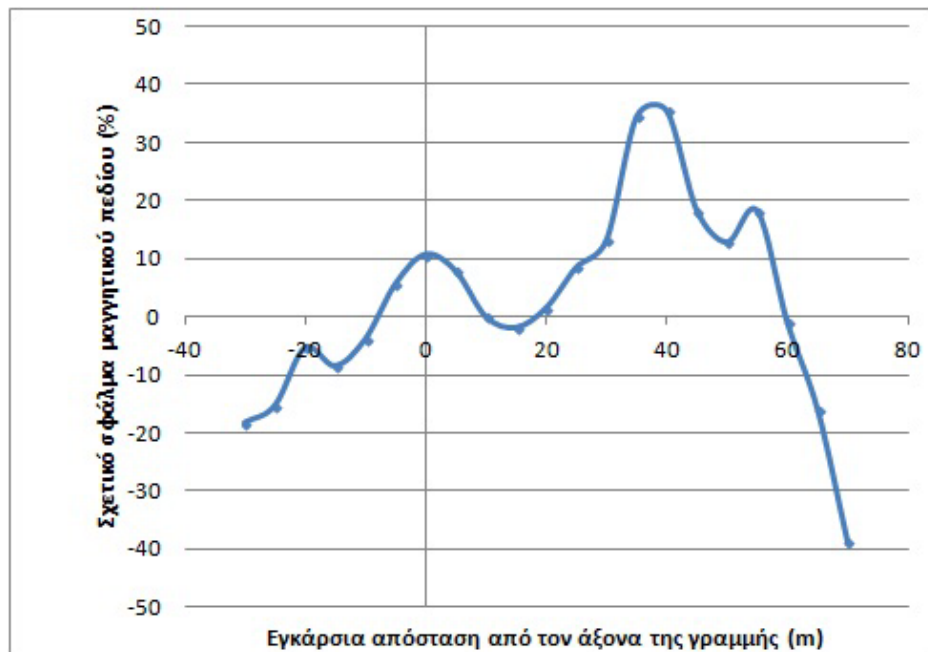
Σχήμα 5.13: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.14: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.15: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.16: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα, συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο της γραμμής δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα όσο αφορά στη σύγκλιση με τις

αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο. Υπάρχουν, όμως, αρκετά σημεία που δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια καθώς η διαφορά τους αγγίζει το 20%. Τα αίτια για αυτές τις μεταβολές είναι η αβεβαιότητα για το ύψος ανάρτησης των γραμμών, οι πολύ μικρές τιμές των πεδίων, οι διακυμάνσεις των φορτίων και η κατωφέρεια του εδάφους, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

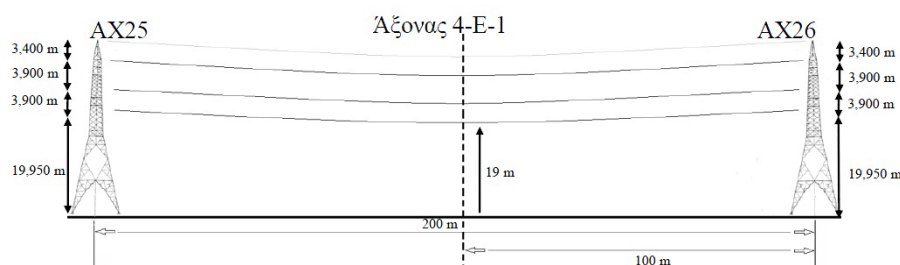
5.2.3 3^η Προσομοίωση

Τα στοιχεία της γραμμής μεταφοράς στην οποία έγινε η 3η μέτρηση έχουν συγκεντρωθεί στον πιο κάτω Πίνακα 5.6:

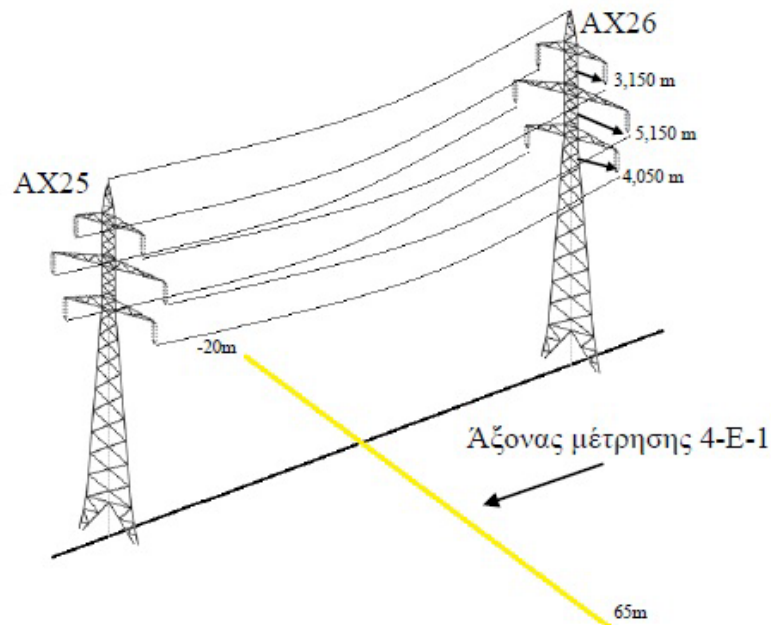
Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	150kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή διπλού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Συμμετρική	
Άνοιγμα της γραμμής	AX25-AX26	
Μήκος του ανοίγματος	200m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	19m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	116.8-120.3 A	69.3-70.9 A
Τύπος πυλώνα	Κωδικός AX25	Κωδικός AX26
	S4	S4

Πίνακας 5.6: Στοιχεία του προς μέτρηση τμήματος της γραμμής AX25-AX26.

Στη συνέχεια, στα παρακάτω σχήματα 5.17 και 5.18 δίνονται επιπρόσθετες πληροφορίες για το προς μέτρηση τμήμα της γραμμής, όπως τα ύψη των αγωγών στην περιοχή των πυλώνων, η ελάχιστη απόσταση αγωγού και γης και η θέση του άξονα μέτρησης.



Σχήμα 5.17: Πλευρική όψη του τμήματος της γραμμής AX25-AX26 (Πηγή: [1]).



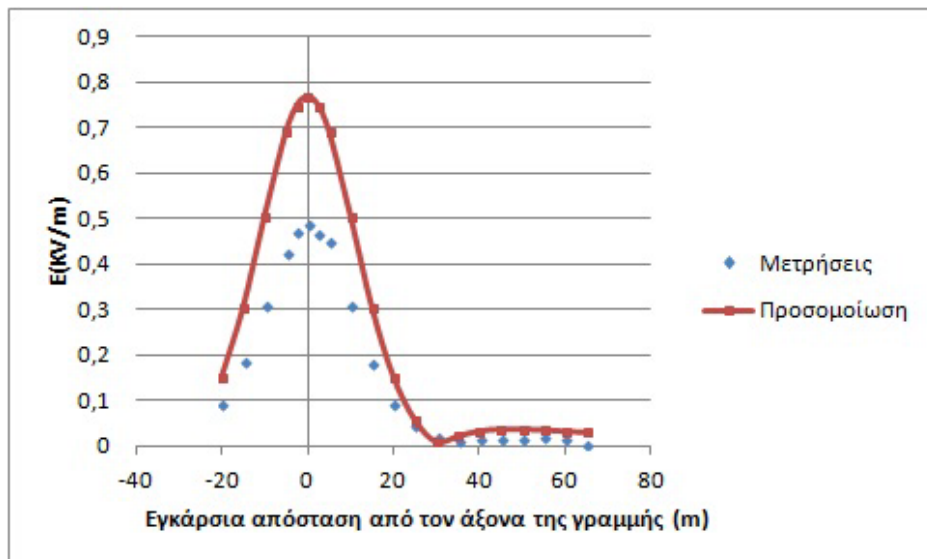
Σχήμα 5.18: Άξονας μέτρησης και θέσεις των αγωγών κατά μήκος της γραμμής AX25-AX26 (Πηγή: [1]).

Αφού έγινε η συγκεκριμένη προσομοίωση στο πρόγραμμα (εισάγοντας στις τυποποιημένες περιπτώσεις $L=200\text{m}$, $s=0.95\text{m}$, τύπο πυλώνα S4 καθώς και ρεύμα φορτίου και τάση κυκλώματος), τα αποτελέσματα παρατίθενται στον πιο κάτω Πίνακα 5.7, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.

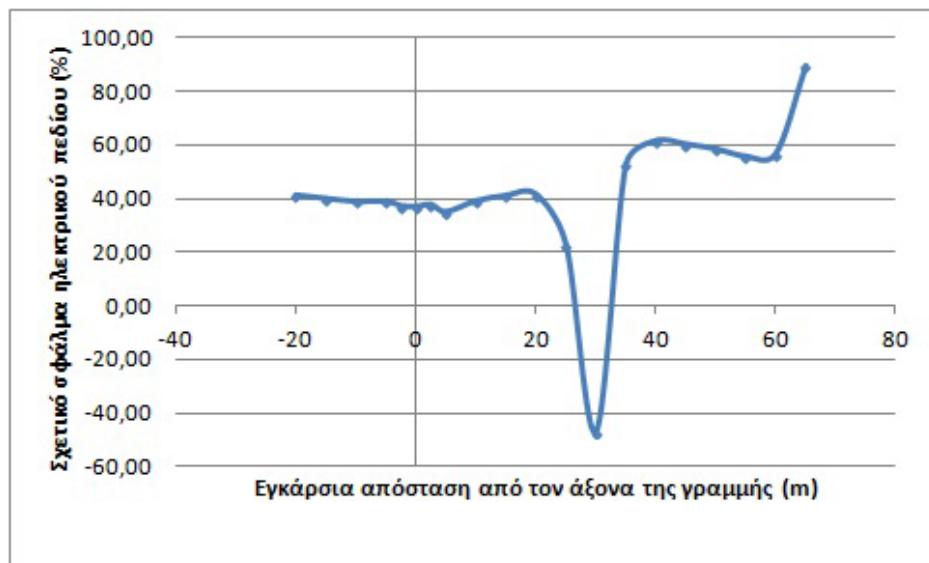
Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ο υπολογισμός και η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κάτω από γραμμή μεταφοράς 150 kV, καθώς και τα σχετικά σφάλματα.

α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-20	0,091	0,154	304,000	304,908	41,285	0,299
2	-15	0,184	0,307	371,800	377,719	40,000	1,592
3	-10	0,310	0,507	454,700	448,282	38,903	-1,411
4	-5	0,423	0,693	492,800	495,054	38,977	0,457
5	-2,5	0,470	0,750	488,100	503,655	37,307	3,187
6	0	0,485	0,770	478,400	501,598	37,030	4,849
7	2,5	0,467	0,750	459,900	489,747	37,747	6,490
8	5	0,450	0,693	438,300	469,431	35,081	7,103
9	10	0,309	0,507	372,700	410,231	39,100	10,070
10	15	0,181	0,307	329,400	339,862	41,109	3,176
11	20	0,090	0,154	259,700	272,926	41,564	5,093
12	25	0,046	0,059	193,300	216,703	22,885	12,107
13	30	0,017	0,011	161,900	172,250	-46,992	6,393
14	35	0,011	0,024	127,100	137,930	52,684	8,521
15	40	0,013	0,035	98,320	111,557	61,562	13,463
16	45	0,016	0,039	88,210	91,193	60,288	3,382
17	50	0,016	0,039	78,190	75,328	58,509	-3,660
18	55	0,017	0,037	67,600	62,837	55,687	-7,046
19	60	0,015	0,035	57,510	52,893	56,680	-8,029
20	65	0,003	0,032	49,500	44,893	89,330	-9,308

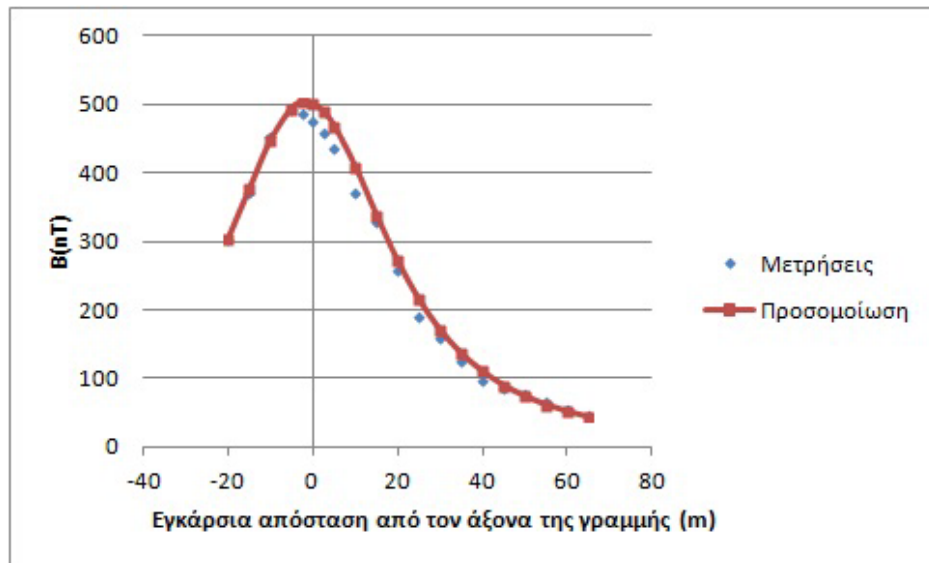
Πίνακας 5.7: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα της γραμμής AX25-AX26.



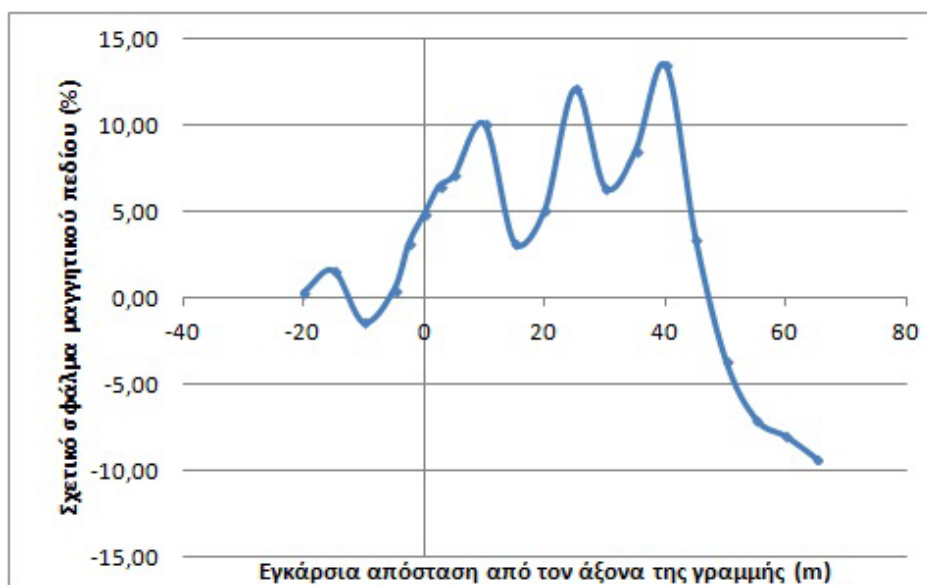
Σχήμα 5.19: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.20: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.21: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.22: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Όπως παρατηρούμε, υπάρχουν αρκετά μεγάλες αποκλίσεις όσο αφορά το ηλεκτρικό πεδίο και αυτές οφείλονται φυσικά στην ύπαρξη αρκετών εμποδίων στο χώρο μέτρησης (ψηλά δέντρα και οι στύλοι φωτισμού στις μετρούμενες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου). Αντίθετα, για το μαγνητικό πεδίο δεν παρατηρείται επίδραση του πεδίου από τα προαναφερθέντα αντικείμενα της περιοχής μέτρησης για αυτό το λόγω οι μετρήσεις είναι πολύ κοντά σε σχέση με τις υπολογισμένες τιμές και κατ'επέκταση τα σχετικά σφάλματα είναι πολύ μικρά ($< 10\%$), με εξαίρεση μεμονωμένων τιμών (συγκεκριμένα για $z=10\text{m}$, 25m και 40m) όπου τα σφάλματα ξεπερνούν λίγο το 10% . Αυτά ίσως να οφείλονται στις διακυμάνσεις του φορτίου κατά τη διαδικασία μέτρησης. Τέλος κάποια σφάλματα οφείλονται και στο μικρό σχετικά άνοιγμα της γραμμής. Όπως συμπεράναμε από το προηγούμενο κεφάλαιο τα αποτελέσματά μας είναι πιο ακριβή όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα της γραμμής.

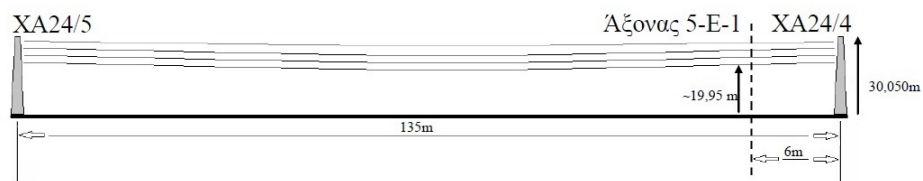
5.2.4 4^η Προσομοίωση

Τα στοιχεία της γραμμής μεταφοράς στην οποία έγινε η 4η μέτρηση έχουν συγκεντρωθεί στον πιο κάτω Πίνακα 5.8:

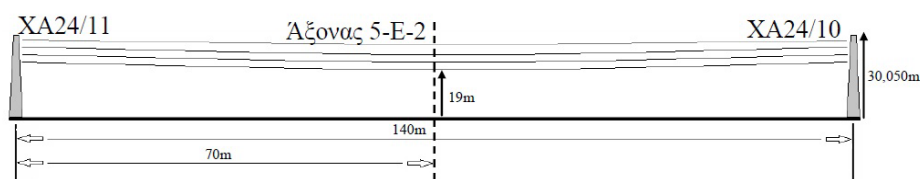
Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	150kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή διπλού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Συμμετρική	
Περιοχή Α		
Άνοιγμα της γραμμής	XA24/4-XA24/5	
Μήκος του ανοίγματος	135m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	19m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	120.2-125.6 A	74.5-80.6 A
Τύπος πυλώνα	Κωδικός XA24/4	Κωδικός XA24/5
	Συμπαγής	Συμπαγής
Περιοχή Β		
Άνοιγμα της γραμμής	XA24/10-XA24/5	
Μήκος του ανοίγματος	140m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	19m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	100.1-105.6 A	63.9-69.0 A
Τύπος πυλώνα	Κωδικός XA24/10	XA24/11
	Συμπαγής	Συμπαγής

Πίνακας 5.8: Στοιχεία των προς μέτρηση τμημάτων των γραμμών μεταφοράς XA24/4-XA24/5 και XA24/10-XA24/11.

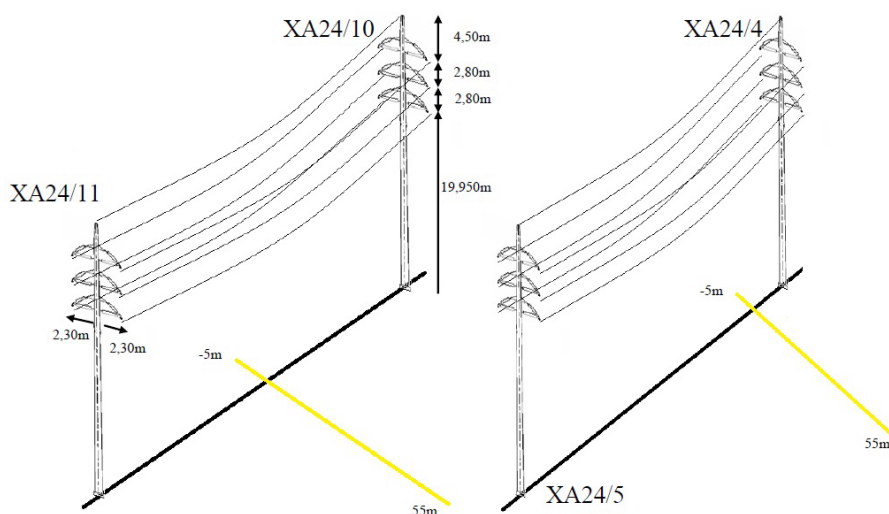
Στη συνέχεια, στα παρακάτω σχήματα 5.23-5.25 δίνονται επιπρόσθετες πληροφορίες για τα προς μέτρηση τμήματα των γραμμών μεταφοράς, όπως τα ύψη των αγωγών στην περιοχή των πυλώνων, η ελάχιστη απόσταση αγωγών και γης και η θέση των αξόνων μέτρησης.



Σχήμα 5.23: Πλευρική όψη του τμήματος της γραμμής XA24/4-XA24/5 (Πηγή: [1]).



Σχήμα 5.24: Πλευρική όψη του τμήματος της γραμμής XA24/10-XA24/11 (Πηγή: [1]).



Σχήμα 5.25: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών κατά μήκος των γραμμών XA24/4-XA24/5 και XA24/10-XA24/11 (Πηγή: [1]).

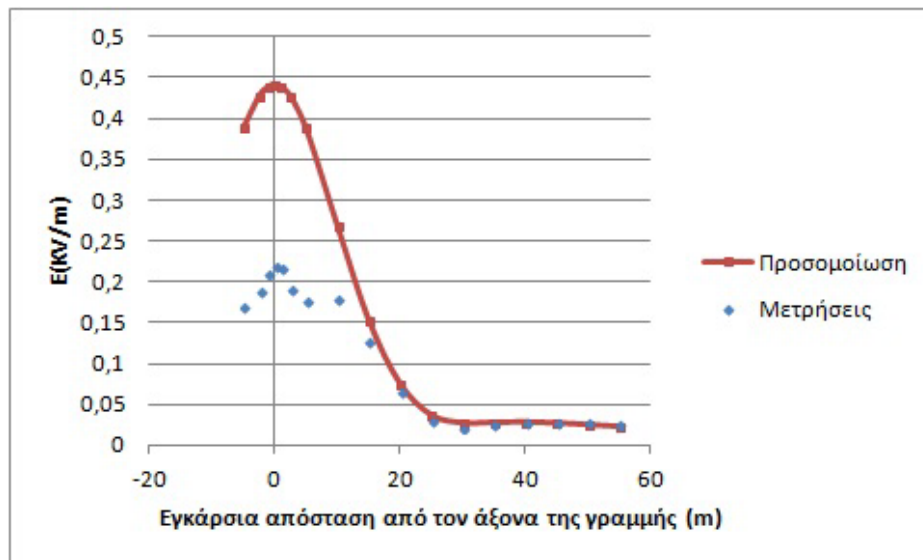
Περιοχή Α

Αφού έγινε η συγκεκριμένη προσομοίωση στο πρόγραμμα (εισάγοντας τα απαραίτητα δεδομένα στις τυποποιημένες περιπτώσεις πυλώνων), τα αποτελέσματα για την περιοχή Α παρατίθενται στον Πίνακα 5.9, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.

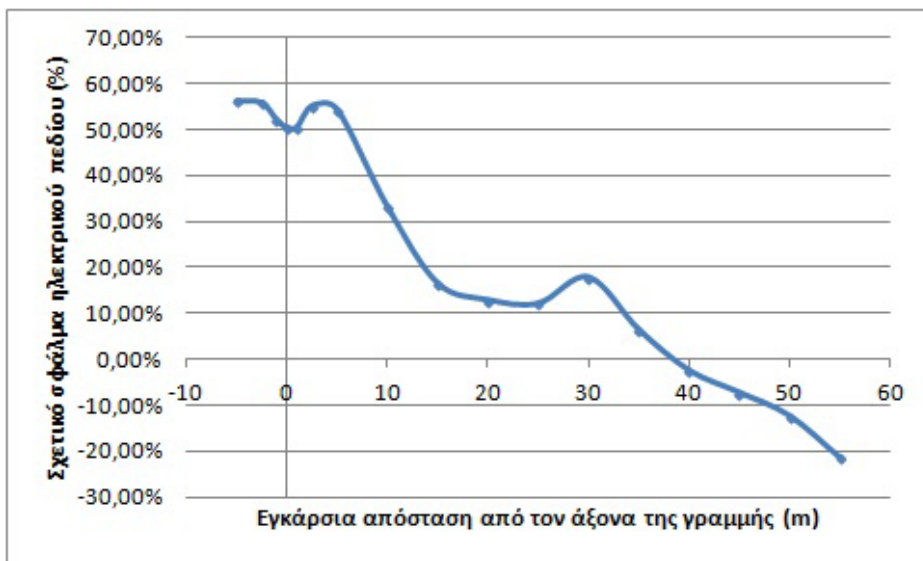
Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ο υπολογισμός και η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κάτω από γραμμή μεταφοράς 150 kV, καθώς και τα σχετικά σφάλματα.

α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-5	0,170	0,388	386,600	395,471	56,16	2,29
2	-2,5	0,189	0,428	410,400	408,011	55,77	-0,58
3	-1	0,211	0,439	405,600	410,848	52,04	1,29
4	0	0,219	0,442	396,400	410,680	50,34	3,60
5	1	0,218	0,439	394,800	408,870	50,47	3,56
6	2,5	0,192	0,428	385,000	403,180	55,07	4,72
7	5	0,177	0,388	367,200	386,566	54,38	5,27
8	10	0,180	0,269	299,800	334,814	33,24	11,68
9	15	0,128	0,154	248,300	274,599	16,51	10,59
10	20	0,066	0,076	205,900	219,412	12,90	6,56
11	25	0,032	0,037	172,300	174,249	12,11	1,13
12	30	0,022	0,027	138,440	139,089	17,85	0,47
13	35	0,026	0,028	112,210	112,177	6,46	-0,03
14	40	0,029	0,028	94,970	91,582	-2,43	-3,57
15	45	0,029	0,027	89,050	75,699	-7,25	-14,99
16	50	0,028	0,025	84,150	63,310	-12,30	-24,76
17	55	0,028	0,023	73,420	53,526	-21,41	-27,10

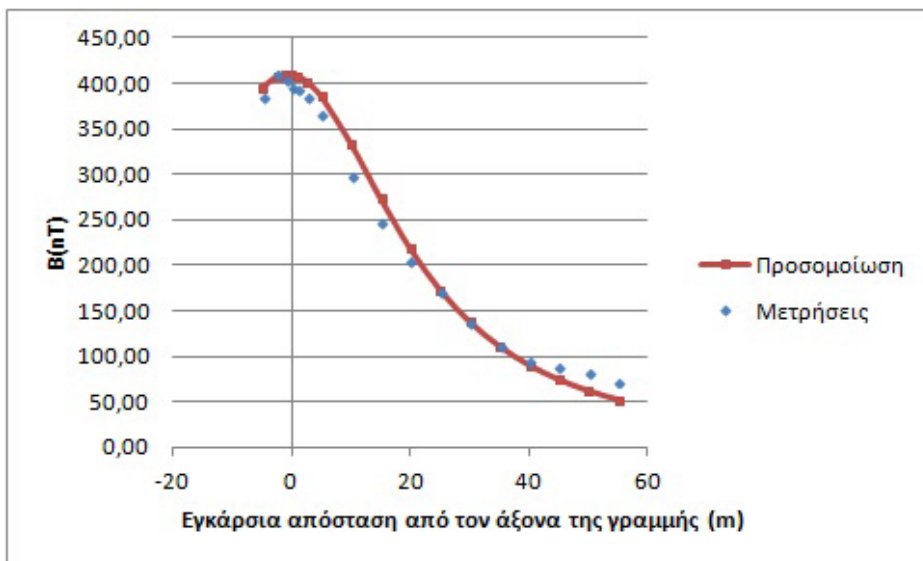
Πίνακας 5.9: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα της γραμμής ΧΑ24/4-ΧΑ24/5.



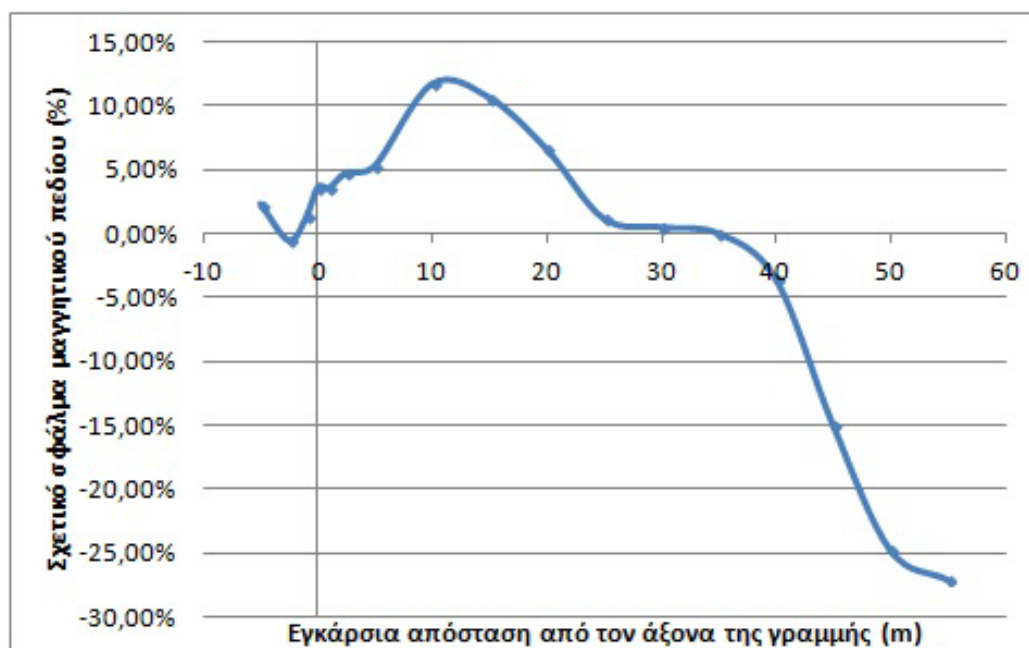
Σχήμα 5.26: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.27: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.28: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.29: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Το σχήμα 5.26 δείχνει μια γενική τάση των μετρούμενων τιμών να είναι αρκετά μικρότερες από το θεωρητικό ηλεκτρικό πεδίο. Οι συγκεκριμένες αποκλίσεις οφείλονται στις επιδράσεις των μετρήσεων έντασης ηλεκτρικού πεδίου λόγω των αντικειμένων και της βλάστησης. Επίσης, η παρουσία του αγωγίμου πύργου στήριξης επηρεάζει σημαντικά την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Συνεπώς, το ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμών που έγιναν στο πρόγραμμα είναι αυξημένο (Σχήμα 5.27). Επιπρόσθετα, το μικρό άνοιγμα των γραμμών ίσως να προκαλεί αυξημένα σφάλματα όπως συμπεράναμε από το προηγούμενο κεφάλαιο.

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου έγινε το εξής τέχνασμα. Λόγω του ότι ο άξονας μέτρησης βρίσκεται πολύ κοντά στον πυλώνα στήριξης, τα σφάλματα που θα προέκυπταν εφαρμόζοντας την ακριβή προσομοίωση στο πρόγραμμα θα ήταν αυξημένα, λόγω του ότι κοντά στους πυλώνες το μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται και από το διπλανό κύκλωμα της επόμενης συστοιχίας πυλώνων, η οποία αγνοείται από το πρόγραμμα. Έτσι θεωρήθηκε μια γραμμή με τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτής των μετρήσεων η οποία όμως έχει μεγαλύτερο άνοιγμα (συγκεκριμένα 400m) με τον άξονα μέτρησης στο κέντρο της. Επίσης, λόγω του ότι το βύθισμα στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι αμελητέο κοντά στον πυλώνα, ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου έγινε με θεώρηση ευθύγραμμου αγωγού οι οποίοι αναρτώνται ακριβώς στο ύψος ανάρτησης των πυλώνων. Πράγματι, στο Σχήμα 5.28 βλέπουμε πως οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί βρίσκονται σε συμφωνία. Το ποσοστιαίο σφάλμα είναι μικρότερο από

10% αλλά μετά τα 40m αυξάνεται καθώς ότι οι τιμές είναι μικρές και συνεπώς οι μικρές διαφορές μεταξύ υπολογισμών και πραγματικών τιμών οδηγούν σε μεγάλες τιμές σχετικού σφάλματος.

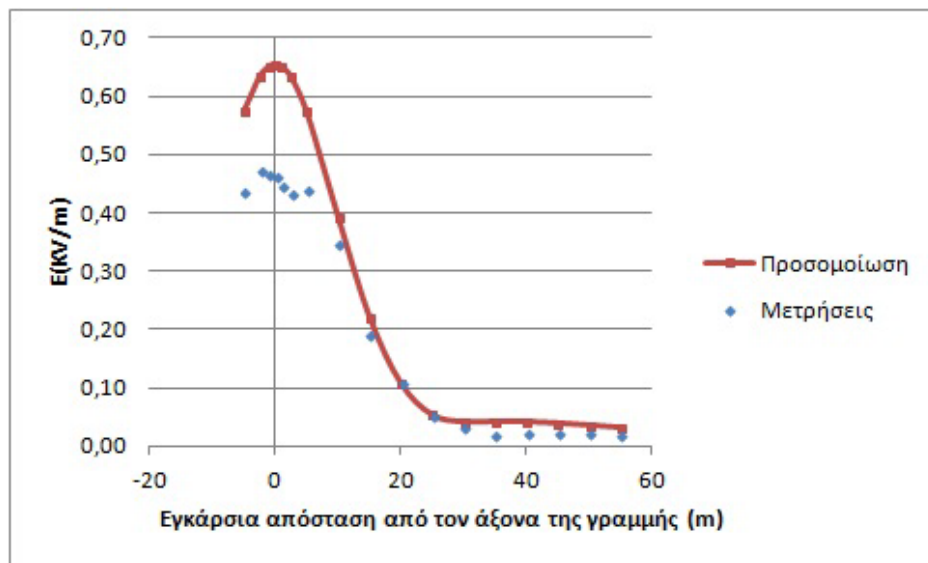
Περιοχή Β

Τα αποτελέσματα για την περιοχή Β παρατίθενται στον Πίνακα 5.10, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους. Το ηλεκτρικό και

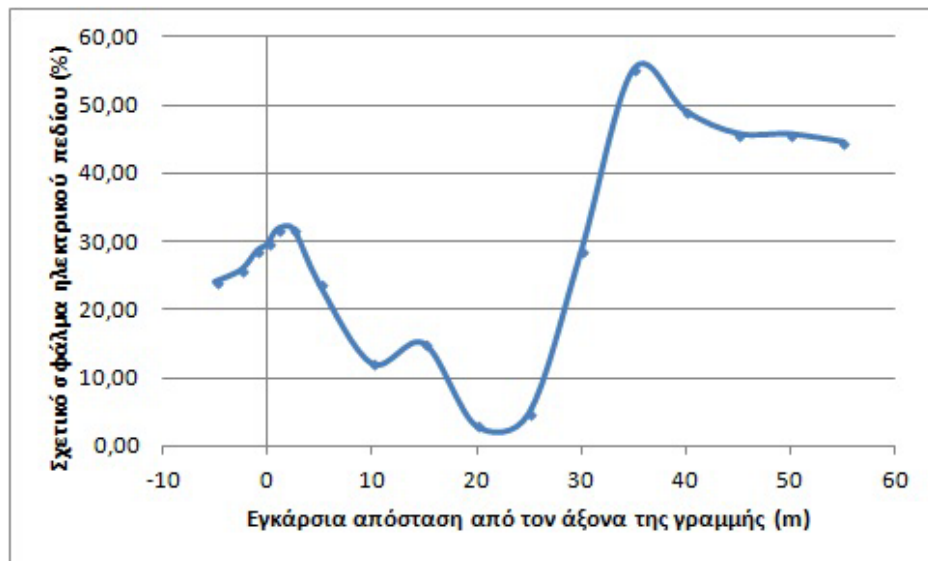
α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-5	0,437	0,575	331,700	368,586	24,11	11,12
2	-2,5	0,470	0,634	365,600	381,847	25,85	4,44
3	-1	0,466	0,652	367,900	384,902	28,62	4,62
4	0	0,462	0,656	368,300	384,774	29,63	4,47
5	1	0,445	0,652	365,500	382,920	31,84	4,77
6	2,5	0,433	0,634	360,700	377,019	31,81	4,52
7	5	0,439	0,575	328,900	359,758	23,70	9,38
8	10	0,348	0,396	280,800	306,446	12,17	9,13
9	15	0,190	0,224	237,300	245,645	15,06	3,52
10	20	0,107	0,110	194,100	191,247	3,02	-1,47
11	25	0,053	0,055	152,400	147,765	4,84	-3,04
12	30	0,031	0,043	126,000	114,637	28,53	-9,02
13	35	0,020	0,044	123,200	89,783	55,14	-27,12
14	40	0,022	0,044	102,250	71,128	49,05	-30,44
15	45	0,022	0,041	92,320	57,017	45,77	-38,24
16	50	0,020	0,038	90,390	46,228	45,70	-48,86
17	55	0,019	0,034	88,630	37,883	44,59	-57,26

Πίνακας 5.10: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα της γραμμής ΧΑ24/10-ΧΑ24/11.

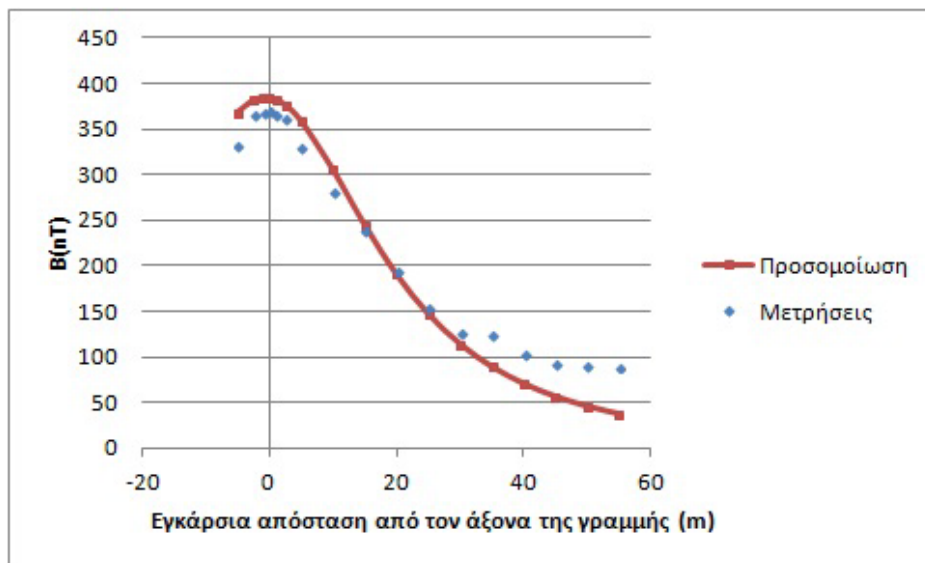
το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ο υπολογισμός και η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κάτω από γραμμή μεταφοράς 150 kV, καθώς και τα σχετικά σφάλματα.



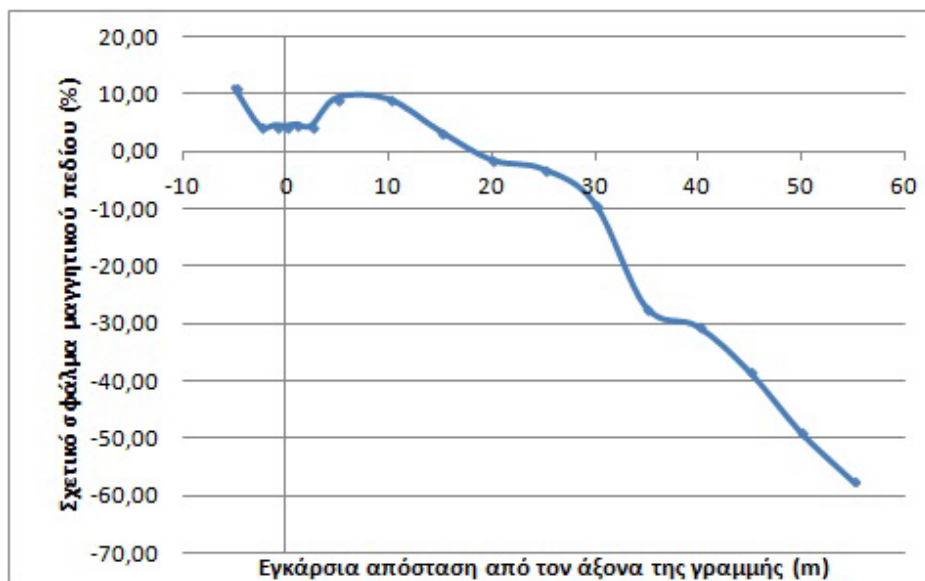
Σχήμα 5.30: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.31: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.32: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.33: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Παρατηρώντας τα σχήματα 5.30-5.31, βλέπουμε ότι και πάλι τα σφάλματα για το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετά αυξημένα και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη εμποδίων στον χώρο των μετρήσεων. Αντίθετα οι υπολογισμένες τιμές για το μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά κοντά στις θεωρητικές τιμές (Σχήμα 5.32-5.33)

με σφάλμα μικρότερο του 10%, τα οποία αυξάνονται περισσότερο όταν απομακρυνόμαστε από τις γραμμές μεταφοράς κυρίως λόγω των μικρών τιμών του μαγνητικού πεδίου αλλά και από την ύπαρξη άλλων γραμμών διανομής απομακρυνόμενοι από την μετρούμενη γραμμή μεταφοράς. Τέλος το μικρό άνοιγμα της γραμμής ίσως να προκαλεί περισσότερα σφάλματα, σύμφωνα με το συμπέρασμα που προήλθε στο προηγούμενο κεφάλαιο στον έλεγχο της ορθότητας του προγράμματος.

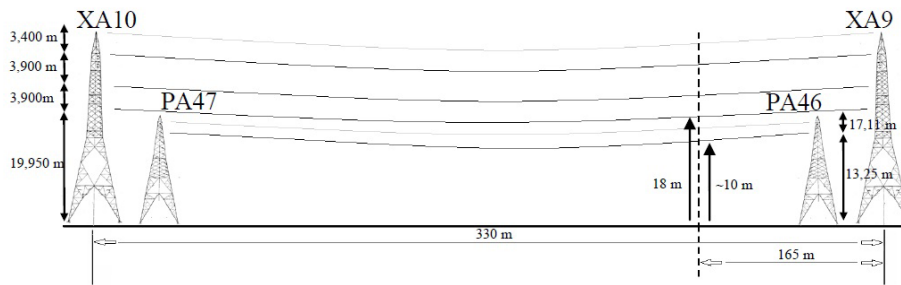
5.2.5 5^η Προσομοίωση

Τα στοιχεία της γραμμής μεταφοράς στην οποία έγινε η 5η μέτρηση έχουν συγκεντρωθεί στον πιο κάτω Πίνακα 5.11:

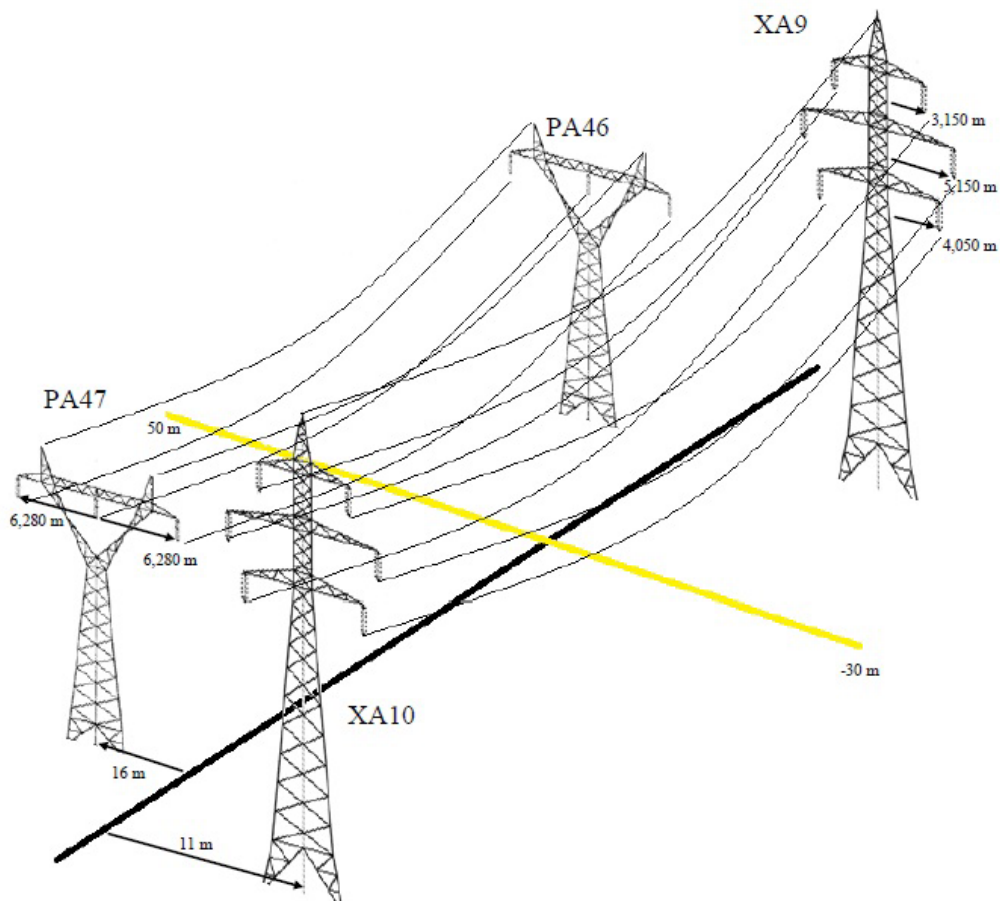
1η γραμμή λειτουργίας		
Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	150kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή διπλού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Συμμετρική	
Άνοιγμα της γραμμής	XA9-XA10	
Μήκος του ανοίγματος	330m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	18m	
Ρεύμα φορτίου	1 ^ο κύκλωμα	2 ^ο κύκλωμα
	150.4-154.4 A	230.6-235.1 A
Τύπος πυλώνα	Κωδικός XA9	Κωδικός XA10
	S4	S4
2η γραμμή λειτουργίας		
Τάση/Συχνότητα λειτουργίας	150kV/50Hz	
Αριθμός τριφασικών κυκλωμάτων	Γραμμή μονού κυκλώματος	
Διάταξη των φάσεων	Οριζόντια	
Άνοιγμα της γραμμής	PA46-PA47	
Μήκος του ανοίγματος	305m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	10m	
Ρεύμα φορτίου	114.6-119.9	
Τύπος πυλώνα	Κωδικός PA46	PA47
	S3	S3

Πίνακας 5.11: Στοιχεία των προς μέτρηση τμημάτων των γραμμών PA46-PA47 και XA9-XA10.

Στη συνέχεια, στα παρακάτω σχήματα 5.34 και 5.35 δίνονται επιπρόσθετες πληροφορίες για τα προς μέτρηση τμήματα των γραμμών, όπως τα ύψη των αγωγών στην περιοχή των πυλώνων, η ελάχιστη απόσταση αγωγών και γης και η θέση του άξονα μέτρησης.



Σχήμα 5.34: Πλευρική όψη των τμημάτων των γραμμών XA9-XA10 και PA46-PA47 (Πηγή: [1]).



Σχήμα 5.35: Άξονας μέτρησης και θέσεις των αγωγών κατά μήκος των γραμμών XA9-XA10 και PA46-PA47 (Πηγή: [1]).

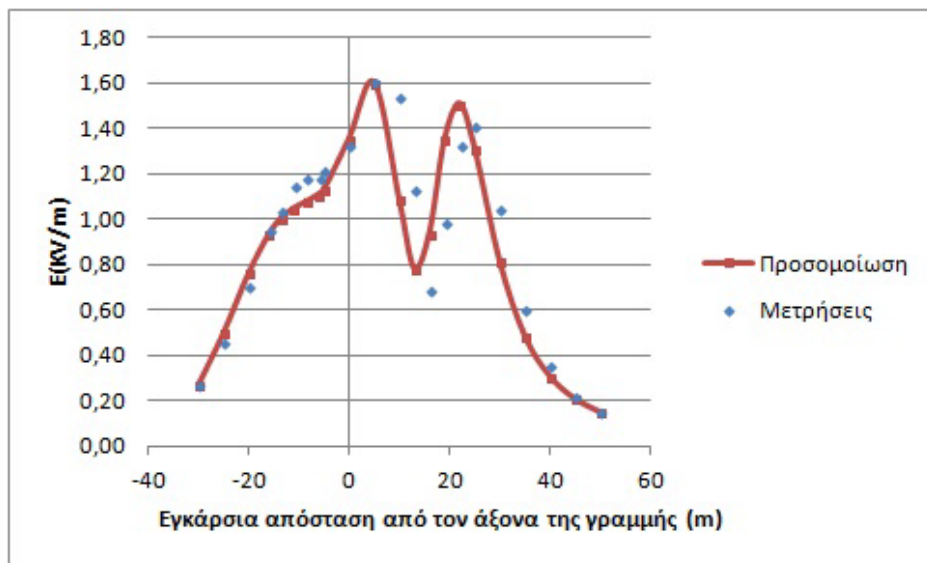
Αφού έγινε η συγκεκριμένη προσομοίωση στο πρόγραμμα (ακολουθώντας πανομοιότυπη διαδικασία με την 2^η Προσομοίωση), τα αποτελέσματα παρατί-

θενται στον Πίνακα 5.12, μέσα από τον οποίο φαίνονται τόσο οι πραγματικές μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όσο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα σφάλματα που προκύπτουν συγκρίνοντας τα μεταξύ τους.

α/α	Θέση Μέτρησης	Εμετρ. (kV/m)	Επροσ. (kV/m)	Βμετρ. (nT)	Βπροσ. (nT)	Εσχ.σφ (%)	Βσχ.σφ (%)
1	-30	0,270	0,272	621,400	627,417	0,98	0,97
2	-25	0,462	0,500	766,700	767,228	7,71	0,07
3	-20	0,704	0,763	890,500	888,904	7,67	-0,18
4	-16	0,949	0,934	985,500	952,601	-1,56	-3,34
5	-13,5	1,034	1,005	1016,100	977,475	-2,91	-3,80
6	-11	1,151	1,049	1035,000	996,133	-9,63	-3,76
7	-8,5	1,181	1,078	1011,000	1015,120	-9,58	0,41
8	-6	1,185	1,111	1002,100	1042,738	-6,60	4,06
9	-5	1,213	1,132	1010,200	1058,540	-7,16	4,79
10	0	1,325	1,355	1138,900	1213,556	2,26	6,56
11	5	1,602	1,601	1410,800	1536,013	-0,09	8,88
12	10	1,538	1,087	1783,800	1845,846	-41,54	3,48
13	13	1,134	0,782	1924,000	1914,276	-44,93	-0,51
14	16	0,685	0,941	1979,000	1878,570	27,18	-5,07
15	19	0,982	1,354	1856,000	1726,235	27,45	-6,99
16	22	1,328	1,510	1613,000	1463,111	12,04	-9,29
17	25	1,410	1,313	1449,100	1163,652	-7,40	-19,70
18	30	1,044	0,814	953,300	768,799	-28,23	-19,35
19	35	0,599	0,487	617,300	529,964	-23,13	-14,15
20	40	0,359	0,309	449,500	386,587	-15,94	-14,00
21	45	0,223	0,211	314,700	295,343	-5,84	-6,15
22	50	0,150	0,152	244,200	233,711	1,35	-4,30

Πίνακας 5.12: Μετρήσεις και αποτελέσματα προσομοίωσης στο εγκάρσιο τμήμα των γραμμών ΧΑ9-ΧΑ10 και ΡΑ46-ΡΑ47.

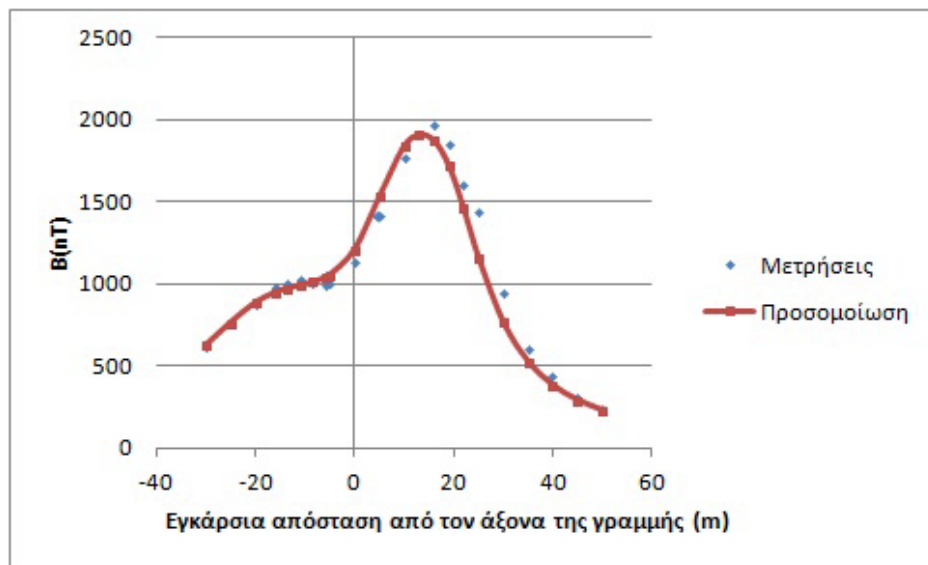
Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κάθετα στην γραμμή υπολογίστηκε στο ύψος του 1m πάνω από το έδαφος. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ο υπολογισμός και η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής κάτω από γραμμή μεταφοράς 150 kV, καθώς και τα σχετικά σφάλματα.



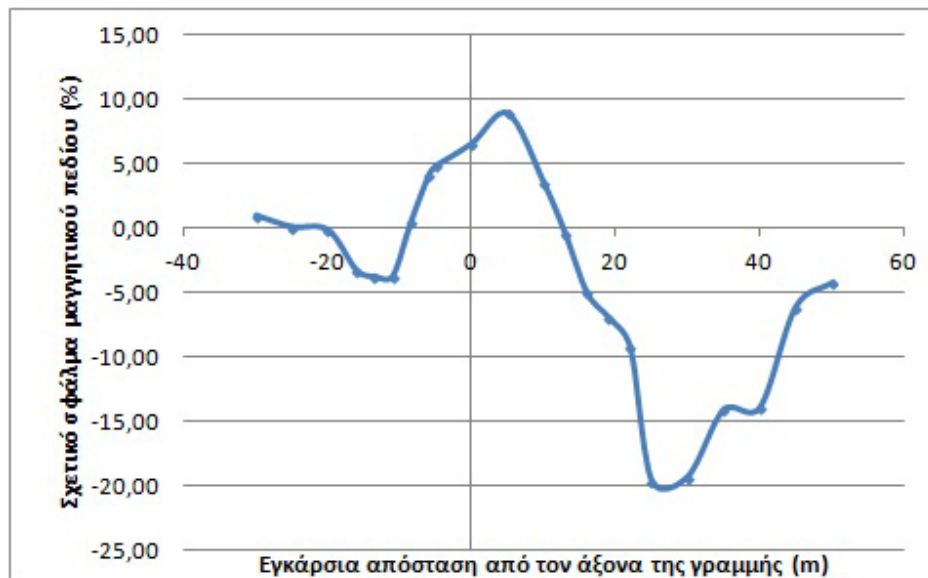
Σχήμα 5.36: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.37: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 5.38: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής.



Σχήμα 5.39: Σχετικό σφάλμα (%) μεταξύ μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών μαγνητικού πεδίου.

Από τις πιο πάνω καμπύλες μπορεί να γίνει η παρατήρηση ότι οι υπολογισμοί που έγιναν με το μοντέλο των γραμμών, δίνουν σχετικά καλά αποτελέσματα όσον αφορά τη σύγκλιση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές. Συγκεκριμένα, από τα αποτελέσματα των Σχημάτων 5.36-5.37, παρατηρείται ικα-

νοποιητική σύγκλιση (σχετικά σφάλματα $<10\%$) μεταξύ των υπολογισμών και των πραγματικών τιμών έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων, οι οποίες μπορούν να οφείλονται σε σφάλματα μέτρησης όπως για παράδειγμα την μεταξύ απόσταση των δύο κυκλωμάτων αλλά και στο γεγονός τα δύο κυκλώματα στην πραγματικότητα να μην είναι ακριβώς παράλληλα. Το ίδιο συμπεραίνουμε και από τα Σχήματα 5.38-5.39 για τη μαγνητική επαγωγή στην οποία όμως τα σφάλματα είναι σαφώς μικρότερα και οφείλονται στους ίδιους παράγοντες με του ηλεκτρικού πεδίου αλλά επίσης και στην διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Βιβλιογραφία

- [1] Ζτούπης Ιωάννης, “Μέτρηση και προσομοίωση χαμηλόσυχνων πεδίων από γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων”, Μεταπτυχιακή εργασία στο ΔΠΜΣ “Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα/Επόμενη ημέρα

Στο σύντομο αυτό κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την ανάπτυξη του λογισμικού υπολογισμού χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και ιδιαίτερα μέσω της σύγκρισης του με το εμπορικό λογισμικό CDEGS αλλά και με πραγματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν. Στη συνέχεια θα προτείνουμε κάποιες τροποποιήσεις ή βελτιώσεις οι οποίες είναι υλοποιήσιμες και ως εκ τούτου είναι ικανές να αυξήσουν την ακρίβεια των υπολογισμών μειώνοντας έτσι αισθητά τα σφάλματα.

Από την παρούσα εργασία είναι εμφανές ότι η χρήση του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Matlab μπορεί να εφαρμοστεί για την επίλυση των παιδικών προβλημάτων (υπολογισμό ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου) δίνοντας πολύ καλά αποτελέσματα. Η εφαρμογή του λογισμικού αυτού στα συγκεκριμένα προβλήματα υπολογισμού του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στους άξονες μέτρησης έδωσε αποτελέσματα που συγκλίνουν ικανοποιητικά με αυτά των μετρήσεων και κυρίως με αυτά του εμπορικού λογισμικού CDEGS. Στις περισσότερες περιπτώσεις είχαμε ικανοποιητικά αποτελέσματα τόσο στο ηλεκτρικό όσο και στο μαγνητικό πεδίο για τις διαφορετικές διατάξεις γραμμών μεταφοράς (μονού κυκλώματος, διπλού κυκλώματος, παράλληλα οδούουσες γραμμές, πυλώνες διαφορετικού τύπου και σε διαφορετικά ύψη κλπ). Τα μεγαλύτερα σφάλματα εμφανίστηκαν στον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε όποιες περιπτώσεις είχαμε κοντά στο χώρο μετρήσεων εμπόδια και κυρίως μεταλλικά αντικείμενα. Όπως είναι γνωστό η ύπαρξη των εμποδίων αυτών επηρεάζει πολύ τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένα σφάλματα συγκριτικά με το λογισμικό στο Matlab. Τα αποτελέσματα ήταν σαφώς καλύτερα όταν είχαμε απουσία αυτών των εμποδίων όπου οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σύγκλιναν πολύ περισσότερο με τις πραγματικές. Στα ίδια αποτελέσματα καταλήξαμε και μέσα από τη σύγκριση με το εμπορικό πρόγραμμα CDEGS όπου είχαμε ακριβή αναπαράσταση των προβλημάτων και στο Matlab και τα αποτελέσματα ήταν σαφώς καλύτερα. Από την άλλη τα αποτελέσματα για το μαγνητικό πεδίο ήταν στην πλειοψηφία τους πολύ κοντά τόσο στις μετρήσεις όσο και στις συγκριτικές προσομοιώσεις που έγιναν

στο CDEGS. Σε ελάχιστες περιπτώσεις είχαμε κάποια μεγαλύτερη απόκλιση των τιμών και αυτό οφειλόταν κυρίως στην ύπαρξη δευτερευουσών γραμμών διανομής στο χώρο των μετρήσεων οι οποίες αγνοούνταν από το πρόγραμμα υπολογισμού. Επίσης πολλές φορές είχαμε διακύμανση φορτίου με αποτέλεσμα να διαφέρουν κάποια μεμονωμένα σημεία με τις πραγματικές μετρήσεις. Επιπρόσθετα η ανωμαλία του εδάφους σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν η αιτία να παρουσιαστούν μεγαλύτερα σφάλματα και στα δύο πεδία αφού στο λογισμικό γινόταν θεώρηση επίπεδου εδάφους, με αποτέλεσμα σε ορισμένα σημεία λόγω αυτής της ανωμαλίας του εδάφους να διαφέρει το ύψος μέτρησης. Ακόμη, λόγω ανακρίβειας κάποιων χαρακτηριστικών της γραμμής όπως για παράδειγμα το μήκος ανοίγματος, το βύθισμα καθώς επίσης και η απόσταση του άξονα μέτρησης ήταν αιτίες ύπαρξης των μικρών αποκλίσεων των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις. Τέλος στις μετρήσεις οι οποίες γίνονταν κοντά στους πυλώνες είχαμε κάποια απόκλιση λόγω της μεγαλύτερης συμβολής των εκατέρωθεν γραμμών μεταφοράς στις επόμενες συστοιχίες πυλώνων οι οποίες στο συγκεκριμένο πρόγραμμα αμελούνταν.

Έχοντας όλα αυτά υπόψη καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα αξιόπιστο, εύκολο και γρήγορο εργαλείο για να υπολογίσουμε τα χαμηλόσυχνα πεδία σε ένα χώρο και να αποφανθούμε αν είμαστε εντός των αποδεκτών ορίων και αν η ασφάλεια του ανθρώπου εξασφαλίζεται. Επίσης είναι πολύ χρήσιμο για την περαιτέρω μελέτη των διατάξεων μέσω παραμετρικής ανάλυσης στις διάφορες διατάξεις των γραμμών μεταφοράς (αντιμετάθεση φάσεων, μείωση της μεταξύ απόστασης των αγωγών, μεταβολή ύψους ανάρτησης ή και βυθίσματος αγωγών), μέσω τις οποίες θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τα χαμηλόσυχνα πεδία αλλά και για την εξεύρεση των βέλτιστων διατάξεων οι οποίες εξασφαλίζουν τις χαμηλότερες δυνατές τιμές. Μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του προγράμματος όλες αυτές οι διαδικασίες γίνονται εύκολα και μέσω των διάφορων διευκρινιστικών σχημάτων αποφεύγονται τα όποια προβλήματα. Τέλος συγκριτικά με το εμπορικό πρόγραμμα CDEGS μπορούμε να πούμε ότι το πρόγραμμα στο Matlab είναι αρκετά γρήγορο στους υπολογισμούς αφού σε όλες τις περιπτώσεις περιμέναμε αρκετή ώρα μέχρι την ολοκλήρωση των υπολογισμών από το CDEGS, σε αντίθεση με το λογισμικό στο Matlab το οποίο ολοκλήρωνε τους υπολογισμούς ταχύτατα.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην “Επόμενη Ημέρα” του προγράμματος αναφέροντας υλοποιήσιμες προτάσεις οι οποίες θα το βελτιώσουν και θα αναπτύξουν κατά πολύ τις δυνατότητες του. Καταρχήν, όπως γίνεται αντιληπτό από το περιβάλλον καλωσορίσματος του προγράμματος φαίνεται ότι έχει γίνει μια πρόνοια για την εισαγωγή διαφορετικών μεθόδων (κυρίως αριθμητικών) ή και υβριδικών μεθόδων στο υπολογισμό των πεδίων αποκτώντας έτσι ένα ευρύ φάσμα επιλογών για τον υπολογισμό των πεδίων. Για παράδειγμα μπορεί να αναπτυχθεί και να εισαχθεί στο πρόγραμμα η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (F.E.M), η μέθοδος οριακών συνθηκών (B.E.M), η μέθοδος των ρο-

πών (M.O.M) αλλά και η υβριδική μέθοδος FEM/BEM εκμεταλλεύοντας έτσι τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου στις διαφορετικές περιπτώσεις υπολογισμών των χαμηλόσυχνων πεδίων. Επιπρόσθετα μια πολύ εύκολη βελτίωση είναι ο συνυπολογισμός των εκατέρωθεν γραμμών μεταφορών των επόμενων συστοιχιών των πυλώνων, η οποία ουσιαστικά είναι μια πολύ απλή τροποποίηση στον κώδικα του προγράμματος. Μέσω αυτής της τροποποίησης θα βελτιωθούν σαφέστατα τα αποτελέσματα στους άξονες μέτρησης κοντά στους πυλώνες αφού θα συνυπολογίζεται και η προσφορά των διπλανών κυκλωμάτων. Ακόμα μια άλλη πρόταση θα ήταν ο συνυπολογισμός του αγωγού γης αλλά και του ρεύματος στον αγωγό προστασίας τα οποία αμελήθηκαν στο πρόγραμμα με αποτέλεσμα πολύ μικρών σφαλμάτων στις μετρήσεις. Επίσης στις περιπτώσεις μεγάλων ανωμαλιών στο έδαφος θα μπορούσε με κάποιο τρόπο να προσεγγίζουμε το έδαφος με κάποια διαφορετική συνάρτηση και όχι θεωρώντας το ως επίπεδο με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται το σφάλμα λόγω διαφορετικού ύψους μέτρησης. Τέλος, μια σαφώς πιο δύσκολη υλοποίηση, η οποία όμως πιστεύω ότι μπορεί να είναι εφικτή σε κάποιο βαθμό, είναι μια έξυπνη αναπαράσταση στο πρόγραμμα των κυριότερων εμποδίων στο χώρο των μετρήσεων αλλά και των ίδιων των πυλώνων οι οποίοι επηρεάζουν τα αποτελέσματα σε σημεία κοντά στο χώρο ύπαρξής τους. Ως αποτέλεσμα οι υπολογισμοί για το ηλεκτρικό πεδίο οι οποίοι είχαν και τα μεγαλύτερα σφάλματα θα βελτιωθούν σημαντικά, μειώνοντας αισθητά τα σχετικά σφάλματα του ηλεκτρικού πεδίου και αποκτώντας έτσι μεγαλύτερη αξιοπιστία αφού θα ανταποκρίνονται καλύτερα στις πραγματικές συνθήκες.

Παράρτημα Α΄

Στοιχεία εναερίων γραμμών μεταφοράς

Για την μέτρηση και τον υπολογισμό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου απαιτείται η γνώση αρκετών στοιχείων της γραμμής μεταφοράς και κυρίως αυτής των πυλώνων και των αγωγών της γραμμής. Στο παρόν παράρτημα περιγράφονται οι γραμμές μεταφοράς οι οποίες κατηγοριοποιούνται με βάση την τάση της γραμμής, τον αριθμό των κυκλωμάτων, την διάταξη των αγωγών κτλ. Συγχρόνως δίνονται τα εξής στοιχεία:

- Διαστάσεις των πυλώνων
- Θέσεις των αγωγών φάσης και γης
- Χαρακτηριστικά των αγωγών (είδος, διατομές, διάμετροι)
- Αποστάσεις ασφαλείας (ζώνη διέλευσης, απόσταση αγωγού με το έδαφος κτλ).

Α΄.1 Εναέριες γραμμές μεταφοράς

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τις οποίες θα περιγράψουμε στην συνέχεια, είναι αυτές των 150 kV και 400 kV που συναντώνται στον ελλαδικό χώρο[1]. Οι παραπάνω γραμμές διακρίνονται σε γραμμές απλού ή διπλού κυκλώματος ανάλογα με το αν φέρουν ένα ή δύο τριφασικά κυκλώματα. Η διάταξη των αγωγών είναι οριζόντια, κάθετη ή τριγωνική για τις γραμμές απλού κυκλώματος, ενώ στις γραμμές διπλού κυκλώματος οι αγωγοί είναι κάθετα τοποθετημένοι με τα κυκλώματα εκατέρωθεν του πυλώνα. Επίσης, στις γραμμές 150 kV του συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιούνται απλοί αγωγοί, ενώ στις γραμμές 400 kV δύο αγωγοί ανά φάση.

Τα ανοίγματα των γραμμών μεταφοράς σε τυπικές περιπτώσεις ποικίλλουν από 150 περίπου μέτρα έως και 500 μέτρα, ενώ σε ασυνήθεις περιπτώσεις

διαβάσεως ποταμών ή μεγάλων κοιλάδων έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς και ανοίγματα μεγαλύτερα από ένα χιλιόμετρο. Επίσης, η ζώνη εδάφους (ζώνη διέλευσης ή ζώνη δουλείας), που απαιτεί μια γραμμή μεταφοράς στα 150 kV, έχει πλάτος 40m και στα 400 kV έχει πλάτος 50m. Οι πυλώνες των γραμμών μεταφοράς είναι δικτυωτές χαλύβδινες δομές αν και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συμπαγείς χαλύβδινοι στύλοι. Οι δικτυωτοί χαλύβδινοι πύργοι διακρίνονται σε πυλώνες “εύθυγραμμίας” (τύπος S), “γωνίας” (τύποι R, T, Z) και “τέρματος” (τύπος Z) ανάλογα με τις διαμήκεις και εγκάρσιες μηχανικές τάσεις, τις οποίες μεταφέρουν επάνω τους οι αγωγοί.

Το ύψος ανάρτησης των αγωγών φάσεως από το έδαφος για πύργο κανονικού ύψους παρουσιάζεται σε παρακάτω πίνακες. Για διαφοροποίηση του ύψους ανάρτησης των αγωγών και/ή για χρήση σε ανώμαλο έδαφος διατίθενται εν γένει για κάθε τύπο πύργου ανεξάρτητα σκέλη (π.χ ±1,5 M, ±2,0M, ±3,0M κ.τ.λ.). Το χαρακτηριστικό μήκος κάθε επιμήκυνσης κορμού ή σκέλους αναφέρεται στην αντίστοιχη διαφοροποίηση του βασικού ύψους ανάρτησης. Επίσης, οι ελάχιστες αποστάσεις αγωγών-εδάφους, οι οποίες καθορίζονται για λόγους ασφαλείας από τους «Κανονισμούς Εγκατάστασης και Συντήρησης Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας» σύμφωνα με την ΥΑ υπ'αρ. 70261 (ΦΕΚ Β' 608/6-10-1967, περί «Εγκρίσεως Κανονισμού για την Εγκατάσταση και Συντήρηση Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας»), ποικίλλουν σημαντικά, αρχίζοντας από 7 περίπου μέτρα σε ελεύθερα εδάφη έως και 12 ή 15 μέτρα σε αγροτικές περιοχές.

Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς, λόγω της ικανοποιητικής τους συμπεριφοράς σε αγωγιμότητα και μηχανική αντοχή, χρησιμοποιούνται αγωγοί αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα (ACSR) και συγκεκριμένα αυτοί των διατομών 336 MCM, 636 MCM και 954 MCM. Οι τιμές των διατομών, οι οποίες χαρακτηρίζουν τους αγωγούς ACSR, καθώς και η διάμετρος των κλώνων αλουμινίου και χάλυβα δίνονται στον σχετικό Πίνακα Α'.1.

Είδος Αγωγού Ονομαστική τάση Γ.Μ	ACSR		
	66/150 kV	150 kV	400 kV
Κωδική ονομασία αγωγού	LINNET	GROSBEAK	GARDINAL
Εξωτερική Διάμετρος (mm)	18.31	25.15	30.42
Διατομή αγωγού (mm ²)	198.19	374.77	546.06
Διατομή αλουμινίου (cm)	336.400	636.000	954.000
Διατομή αλουμινίου (mm ²)	170.45	322.26	483.42
Διάμετρος συρματιδίων (mm)	2.89	3.97	3.38
Διάμετρος χάλυβα (mm)	6.75	9.27	10.13
Διατομή χάλυβα (mm ²)	27.74	52.51	62.64

Πίνακας Α'.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγών ACSR των γραμμών μεταφοράς.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν κατά κανόνα ένας ή δύο αγωγοί γης εγκατεστημένοι υψηλότερα από τους αγωγούς των φάσεων, για να τους προστατεύουν από τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα. Οι αγωγοί γης, που δεν διαρρέονται από ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες, είναι συνήθως χαλύβδινοι και αποτελούνται από συνεστραμμένους κλώνους.

Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι αγωγοί γης διαμέτρου 9,4mm στις γραμμές 150 kV, και 12,6mm στις γραμμές 400 kV. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς του ελληνικού συστήματος λαμβάνοντας τα στοιχεία από την ΔΕΗ[2].

Α'.1.1 Γραμμή μεταφοράς 150 kV – Δικτυωτοί πυλώνες

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Υπάρχουν τέσσερις χαλύβδινοι δικτυωτοί τύποι πύργων για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες γραμμών μεταφοράς, όπως διακρίνονται στον Πίνακα Α'.2.

Τύπος πύργου	Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 150 kV		
	Απλό κύκλωμα ελαφρού τύπου (E)	Απλό κύκλωμα βαρέος τύπου (B)	Διπλό κύκλωμα βαρέος τύπου (2B)
Ευθυγραμμίας	S2	S3	S4
Μικρής γωνίας	R2	R3	R4
Γωνίας 45°	T2	T3	T4
Γωνίας 75° ή τέρματος	Z2	Z3	Z4

Πίνακας Α'.2: Χαλύβδινοι δικτυωτοί τύποι πύργων γραμμών μεταφοράς 150 KV

Τα γενικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς για δικτυωτούς πύργους είναι:

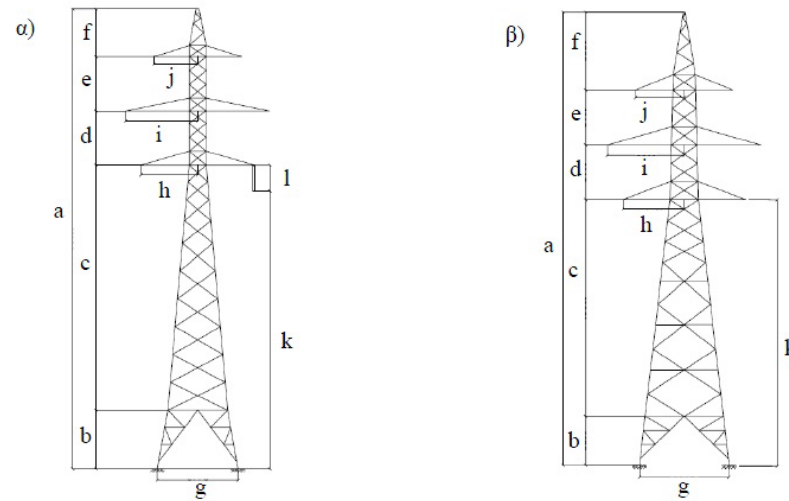
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ Οι διαστάσεις και η μορφή των πύργων διπλού κυκλώματος παρατίθενται στον πίνακα Α'.4 και στο Σχήμα Α'.1

Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 150 kV			
	Απλό κύκλωμα ελαφρού τύπου (E)	Απλό κύκλωμα βαρέος τύπου (B)	Διπλό κύκλωμα βαρέος τύπου (2B)
Τριφασικά κυκλώματα			
Αριθμός	Ένα κύκλωμα	Ένα κύκλωμα	Δύο κυκλώματα
Διάταξη	Οριζόντια	Οριζόντια	Κατακόρυφη (σχεδόν)
Αγωγοί φάσεων	ACSR LINNET 336 MCM	ACSR GROSBEAK 636 MCM	
Αγωγοί προστασίας			
Αριθμός	Δύο αγωγοί	Δύο αγωγοί	Ένας αγωγός
Διάταξη	Συμμετρικά ως προς τον άξονα της Γ.Μ		Στον άξονα της Γ.Μ
Αγωγοί γης	Επτάκλωνοι χαλύβδινοι επιψευδαργυρωμένοι		

Πίνακας Α'.3: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς 150 KV για δικτυωτούς πύργους.

Τύπος πύργου	Διαστάσεις												Σχήμα
	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	g (m)	h (m)	i (m)	j (m)	k (m)	l (m)	
S4	33.010	4.210	17.600	3.900	3.900	3.400	5.775	4.0507	5.150	3.150	19.950	1.860	Σχήμα Α'1.α
R4	34.265	4.300	17.915	4.250	4.250	3.550	6.0615	4.550	5.650	3.650	19.950	2.265	Σχήμα Α'1.α
T4	32.350	3.500	15.500	3.900	3.900	5.550	6.392	4.400	5.500	3.500	19.00	-	Σχήμα Α'1.β
Z4	33.900	3.500	15.500	3.900	3.900	7.100	6.961	5.100	6.350	4.000	19.00	-	Σχήμα Α'1.β

Πίνακας Α'.4: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 150kV διπλού κυκλώματος.

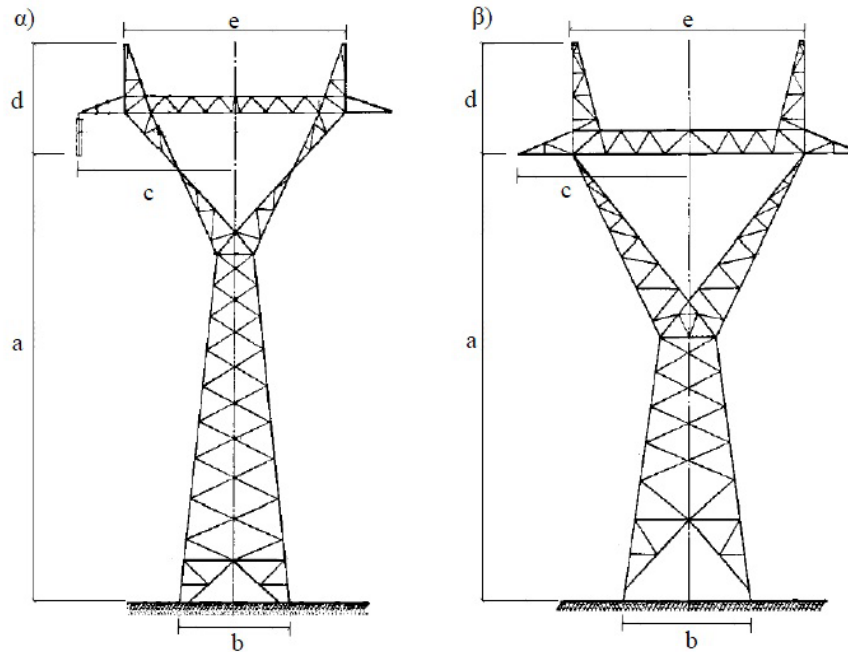


Σχήμα Α'.1: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 150 kV διπλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.

Στην συνέχεια, ακολουθούν οι διαστάσεις και η μορφή των πύργων απλού κυκλώματος, όπως φαίνονται στους πίνακες Α'.5 και το Σχήμα Α'.2, αντίστοιχα.

Τύπος πύργου	Διαστάσεις					Σχήμα
	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	
S2	19.95	5.00	6.60	4.75	9.30	Σχήμα Α'.2α
R2	19.95	4.99	7.10	4.75	9.60	Σχήμα Α'.2α
T2	19.00	5.78	7.67	4.80	10.40	Σχήμα Α'.2β
Z2	19.00	5.14	8.95	4.75	12.10	Σχήμα Α'.2β
S3	19.95	5.24	6.28	3.86	8.50	Σχήμα Α'.2α
R3	19.95	5.24	6.82	3.82	9.30	Σχήμα Α'.2α
T3	19.00	5.78	6.70	3.75	9.20	Σχήμα Α'.2β
Z3	19.00	5.78	7.78	4.25	10.60	Σχήμα Α'.2β

Πίνακας Α'.5: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV απλού κυκλώματος.



Σχήμα Α'.2: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 150 kV απλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.

Α'.1.2 Γραμμή μεταφοράς 150 kV – Συμπαγείς πυλώνες

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ακόμη, υπάρχουν οι συμπαγείς πυλώνες απλού και διπλού κυκλώματος, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην θέση των πύργων ευθυγραμμίας. Τα βασικά τους χαρακτηριστικά δίνονται στον πίνακα Α'.6.

Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 150 kV			
	Απλό κύκλωμα (Vertical)	Απλό κύκλωμα (Triangular)	Διπλό κύκλωμα
Τριφασικά κυκλώματα			
Αριθμός	Ένα κύκλωμα	Ένα κύκλωμα	Δύο κυκλώματα
Διάταξη	Οριζόντια	Οριζόντια	Κατακόρυφη
Αγωγοί φάσεων	ACSR GROSBEAK 636 MCM		
Αγωγοί προστασίας			
Αριθμός	Ένας αγωγός		
Διάταξη	2 m από τον άξονα της Γ.Μ	Στον άξονα της Γ.Μ	
Αγωγοί γης	Επτάκλωνος χαλύβδινος επιψευδαργυρωμένος		

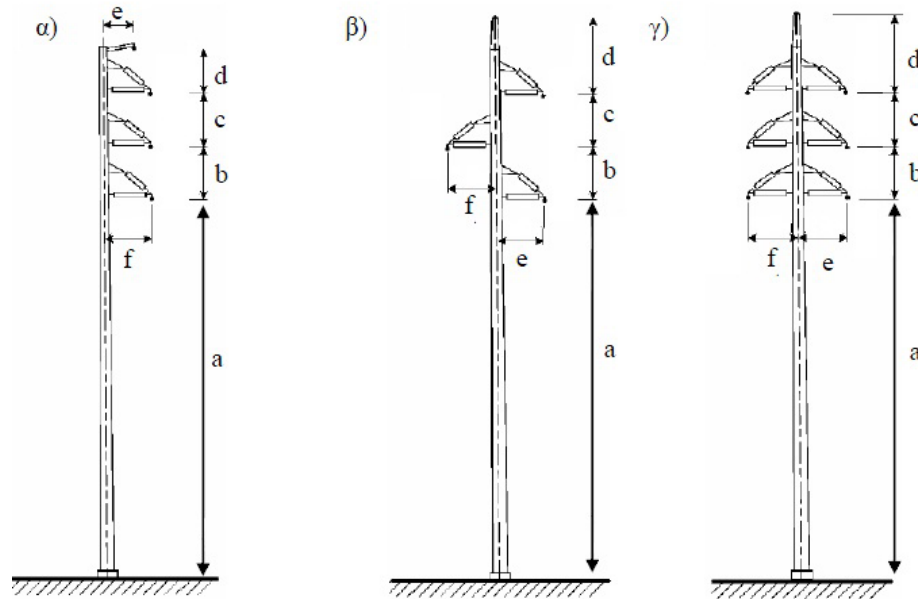
Πίνακας Α'.6: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς 150 kV για συμπαγείς πύργους.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι διαστάσεις και η μορφή των συμπαγών πύργων απλού και διπλού κυκλώματος παρατίθενται στον Πίνακα Α'.7 και στο Σχήμα Α'.3.

Τύπος πύργου	Διαστάσεις						Σχήμα
	a(m)	b(m)	c(m)	d(m)	e(m)	f(m)	
Απλό κύκλωμα (Vertical)	19.95	5.00	6.60	4.75	9.30	2.30	Σχήμα Α'.3α
Απλό κύκλωμα (Triangular)	19.95	4.99	7.10	4.75	9.60	2.30	Σχήμα Α'.3β
Διπλό κύκλωμα	19.00	5.78	7.67	4.80	10.40	2.30	Σχήμα Α'.3γ

Πίνακας Α'.7: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV απλού κυκλώματος.



Σχήμα Α'.3: Συμπαγείς πύργοι γραμμών μεταφοράς 150 kV ελληνικού δικτύου.

Α'.1.3 Γραμμή μεταφοράς 400 kV

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για τις κατηγορίες γραμμών μεταφοράς 150kV υπάρχουν οι τύποι πύργων¹ που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος πύργου	Κατηγορία Γ.Μ 400 kV	
	Απλό κύκλωμα	Διπλό κύκλωμα
Ευθυγραμμίας	S6	S15
Μεγάλων ανοιγμάτων	-	G5
Μικρής γωνίας	R6	R5
Γωνίας 45°	T6	T5
Γωνίας 75° ή τέρματος	Z6	Z5

Πίνακας Α'.8: Χαλύβδινοι δικτυωτοί τύποι πύργων γραμμών μεταφοράς 400 KV

¹Παράλληλα, υπάρχουν χαλύβδινοι δικτυωτοί πύργοι απλού κυκλώματος με τρί-δυμο αγωγό (S7, G7, R7, T7 και Z7) για γραμμές μεταφοράς 400 kV. Λόγω της σπάνιας εφαρμογής τους οι βασικές διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στην[2]

Επίσης, τα γενικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς απλού και διπλού κυκλώματος με δίδυμο αγωγό ανά φάση είναι:

Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 400 kV		
	Απλό κύκλωμα	Διπλό κύκλωμα
Τριφασικά κυκλώματα		
Αριθμός κυκλωμάτων	Ένα κύκλωμα	Δύο κυκλώματα
Διάταξη	Οριζόντια	Κατακόρυφη (σχεδόν)
Αριθμός αγωγών	Δύο ανά φάση	Δύο ανά φάση
Αγωγοί φάσεων	ACSR CARDINAL 954 MCM (2x954 MCM)	
Αγωγοί προστασίας		
Αριθμός	Δύο αγωγοί	Ένας αγωγός
Διάταξη	Συμμετρικά ως προς τον άξονα της Γ.Μ	
Αγωγοί γης	Επτάκλωνοι χαλύβδινοι επιψευδαργυρωμένοι	

Πίνακας Α'.9: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς 400 KV για δικτυωτούς πύργους.

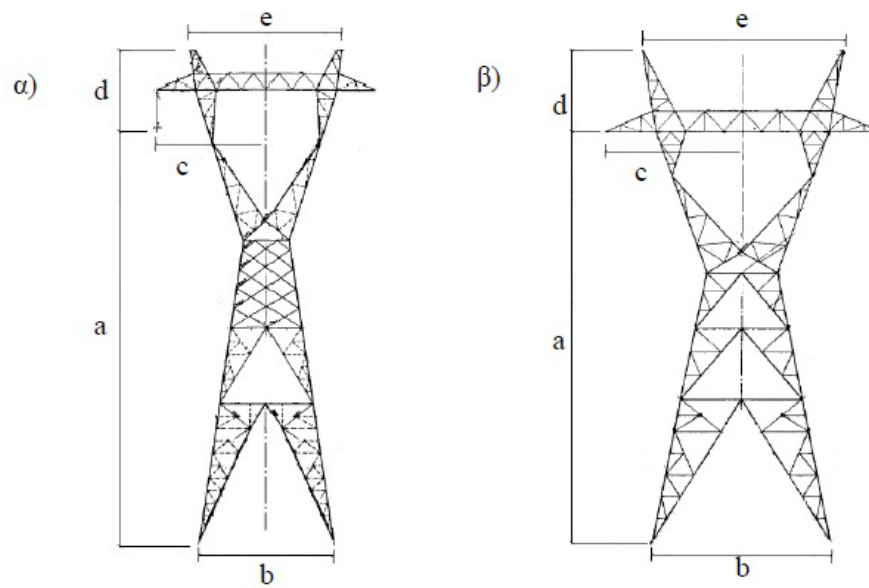
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Οι διαστάσεις² των πύργων απλού κυκλώματος παρατίθενται στον Πίνακα Α'.10. Επίσης, στο Σχήμα Α'.4 εικονίζονται οι χρησιμοποιούμενοι από την Δημοσία Επιχείρηση Ηλεκτρισμού τύποι πυλώνων γραμμών μεταφοράς 400 KV.

Τύπος πύργου	Διαστάσεις					Σχήμα
	a(m)	b(m)	c(m)	d(m)	e(m)	
S6	20	6.80	8.60	7.15	12.20	Σχήμα Α'.4α
R6	20	7.20	9.80	7.15	13.60	Σχήμα Α'.4α
T6	20	8.10	8.20	5.90	14.80	Σχήμα Α'.4β
Z6	20	8.50	10.10	6.40	14.80	Σχήμα Α'.4β

Πίνακας Α'.10: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 400 kV απλού κυκλώματος.

²Οι θέσεις των αγωγών φάσεων δίνονται ως η μέση απόσταση μεταξύ των 2 αγωγών που έχει κάθε φάση.

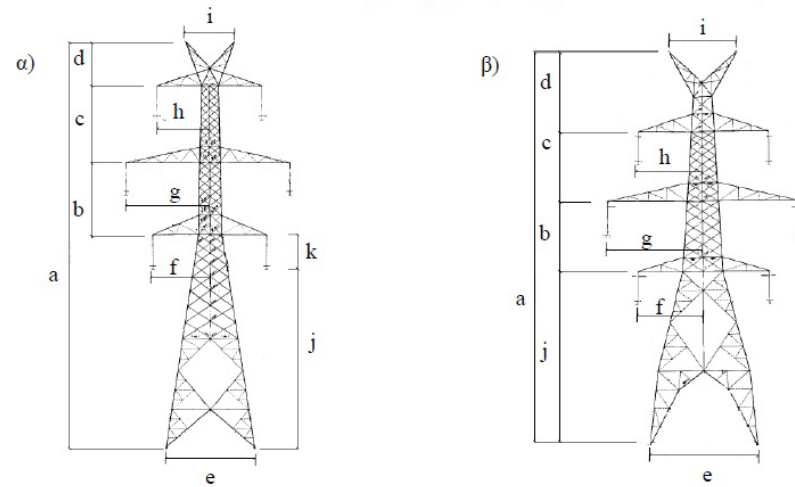


Σχήμα Α'.4: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 400 kV απλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.

Έπειτα, ακολουθούν οι διαστάσεις και η μορφή των πύργων διπλού κυκλώματος, όπως φαίνονται στον Πίνακα Α'.11 και το Σχήμα Α'.5, αντίστοιχα.

Τύπος πύργου	Διαστάσεις											Σχήμα
	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	g (m)	h (m)	i (m)	j (m)	k (m)	
S15	45.195	8.00	8.50	4.80	9.20	6.4	9.4	5.8	5.6	20.00	3.895	Σχήμα Α'.5α
G5	45.195	8.00	8.50	4.80	9.20	6.4	9.4	5.8	5.6	20.00	3.895	Σχήμα Α'.5α
R5	47.210	8.00	8.40	6.30	10.80	7.85	11.35	6.85	6.7	20.00	4.51	Σχήμα Α'.5β
T5	45.000	8.00	8.00	9.00	11.30	7	10.5	7	7.00	20.00	-	Σχήμα Α'.5β
Z5	45.300	8.00	8.00	9.30	11.70	7.7	11.2	7.7	8.40	20.00	-	Σχήμα Α'.5α

Πίνακας Α'.11: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 400kV διπλού κυκλώματος.



Σχήμα Α'.5: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.

Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής τάσης – Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας”, Αθήνα 1999.
- [2] ΔΕΗ, Διεύθυνση Μελετών Κατασκευών Έργων Μεταφοράς (Τομέας Μελετών Εξοπλισμού Γραμμών Μεταφοράς), “ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΔΕΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑ”, Δεκέμβριος 1997.
http : //trans.dei.gr/dypm/401705/401705_EL_4.pdf Δημήτριος Τσανάκας, “Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία γραμμών, υποσταθμών και συσκευών ηλεκτρικής ενεργείας ως περιβαλλοντικοί παράγοντες”, Πρακτικά Ημερίδας: «Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία: Μύθοι και πραγματικότητα», Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών 2005.
- [3] Ζτούπης Ιωάννης, “Μέτρηση και προσομοίωση χαμηλόσυχνων πεδίων από γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων”, Μεταπτυχιακή εργασία στο ΔΠΜΣ “Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012.

