



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Ανάπτυξη προγράμματος για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Η. ΒΑΛΒΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Ανάπτυξη προγράμματος για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Η. ΒΑΛΒΗΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2012

.....
Κ. Γ. Καραγιαννόπουλος

.....
Ν. Ι. Θεοδώρου

.....
Π. Δ. Μπούρκας

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....
Παναγιώτης Η. Βάλβης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Βάλβης, 2012

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.

Αφιερώνεται στους γονείς μου,
Ηρακλή και Μαριάνθη

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Κωνσταντίνου Καραγιαννόπουλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο για την τιμή που μου έκανε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές του όσο και την αμέριστη συμπαράστασή του. Επιπλέον, ευχαριστίες οφείλω στους Καθηγητές κ. Περικλή Μπούρκα και Νικόλαο Θεοδώρου καθώς και στη Δρ. Αικατερίνη Πολυκράτη για τη συνεργασία μας καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση και το ενδιαφέρον τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ηρακλή και Μαριάνθη που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξαν σε αυτή μου την προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	10
1. Εισαγωγή	11
1.1 Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	11
1.2 Γραμμές μεταφοράς του Ελληνικού δικτύου	15
1.2.1 Απλό κύκλωμα 150kV	16
1.2.2 Διπλό κύκλωμα 150kV	17
1.2.3 Απλό κύκλωμα 400kV	18
1.2.4 Διπλό κύκλωμα 400kV	19
1.3 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία γραμμών μεταφοράς	21
1.4 Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία	25
1.5 Τα όρια ασφαλείας της έκθεσης του ανθρώπου σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50Hz	28
2. Μοντελοποίηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και μετρήσεις	30
2.1 Ηλεκτρικό πεδίο	30
2.2 Μαγνητικό πεδίο	30
2.3 Αρμονικό περιεχόμενο	30
2.4 Μαγνητικό πεδίο από εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας.	31
2.4.1.1 Υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου από απείρου μήκους ευθύγραμμο, απομονωμένο αγωγό.	31
2.4.1.2 Παρουσία γης: Μέθοδος των ειδώλων	32
2.4.1.3 Υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου ενός ευθύγραμμου, απομονωμένου, απείρου μήκους ρευματοφόρου αγωγού λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση αγωγίμου εδάφους	33
2.4.1.4 Πειραματική τεκμηρίωση της μεθοδολογίας από τους Jordi-Roger Riba Ruiz και Antonio Garcia Espinosa	34
2.4.1.5 Μαγνητικό πεδίο εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψιν το βέλος κάμψης	36
2.4.1.6 Θεωρητικός υπολογισμός μαγνητικού πεδίου συνεστραμμένου τριφασικού καλωδίου.	40
2.5.1 Ο ακριβής τύπος	41
2.5.2 Έλικας ενός αγωγού	41
2.5.3 Έλικας δύο αγωγών	44
2.5.4 Έλικας τριών αγωγών	44
2.6 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου – γενική μέθοδος για γραμμές μεταφοράς	46
2.7 Οι αρχές πρόληψης και προφύλαξης δεν παραβιάζονται όταν τηρούνται τα όρια ασφαλείας	48
2.8 Τεχνητά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία	49
2.8.1 Μετρήσεις στον ελλαδικό χώρο	50
2.8.1.1 Μετρήσεις της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας στο Κρυονέρι	50
2.8.1.2 Μετρήσεις του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Ξάνθης	50

2.8.1.3 Μετρήσεις του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών	51
2.8.1.4 Μετρήσεις από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου	52
2.8.2 Μετρήσεις σε χώρες εκτός Ελλάδας	54
2.8.2.1 Μετρήσεις σε γραμμές μεταφοράς και κέντρα υψηλής τάσης (Κ.Υ.Τ)	54
2.8.2.2 Μετρήσεις σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις	60
3. Σκοπός της εργασίας	64
4. Ανάλυση του προγράμματος, τεκμηρίωσή του και δοκιμαστικές Μετρήσεις	65
4.1 Το πρόγραμμα	65
4.2 Δοκιμαστικές μετρήσεις	67
5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Ο κώδικας του προγράμματος και παρουσίασή του	78
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Οδηγίες χρήσεως	84
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή που υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο γύρω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης. Στην εισαγωγή περιγράφεται το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του προγράμματος και γίνεται μία γενική αναφορά στο μαγνητικό πεδίο γύρω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζονται μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί και γίνεται αναφορά στα όρια ασφαλείας για προστασία από το μαγνητικό πεδίο.

Στη συνέχεια δίνεται ο κώδικας του προγράμματος, η περιγραφή του, η τεκμηρίωσή του και παρουσίαση ενδεικτικών υπολογισμών του μαγνητικού πεδίου.

ABSTRACT

The objective of this dissertation project is the development of a computer program which calculates the strength of the magnetic field produced by electric power lines. In the introduction the model used for the development of the program is introduced. Furthermore, a general reference on the magnetic field around electric power lines as well as on the appropriate safety measures and regulations takes place.

Additionally, the source code of the program is given in the Matlab programming language some fundamental calculations using the program are introduced.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα βρίσκεται την τελευταία δεκαετία σε φάση σημαντικών αλλαγών. Η διείσδυση του φυσικού αερίου, η κατασκευή των διευρωπαϊκών δικτύων, η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της εξοικονόμησης ενέργειας και τέλος η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τα νέα δεδομένα του.

Σημαντικές είναι οι επιπτώσεις των νέων αυτών δεδομένων στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, στην μείωση της εξάρτησης της από το εισαγόμενο πετρέλαιο, με όλα τα συνεπαγόμενα οφέλη στην εθνική οικονομία, στην εξοικονόμηση μη ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων, στην αύξηση της αποδοτικότητας των διαδικασιών παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας, στην προστασία του περιβάλλοντος και τέλος στην βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών στους καταναλωτές.

Παρακάτω παρουσιάζονται με συντομία τα σημαντικότερα στοιχεία του ενεργειακού συστήματος της χώρας που σχετίζονται με την υποδομή του, το μέγεθος και τη σύνθεση των επιμέρους τομέων του καθώς και το είδος και τη χρήση των διαφόρων ενεργειακών μορφών σ' αυτό.

- Θερμικοί Σταθμοί όπου η ενέργεια αποδίδεται από την ύλη που χρησιμοποιείται για καύση (στερεά, υγρά ή αέρια), όπως λιγνίτες, τύρφη, λιθάνθρακες, φυσικό αέριο, μαζούτ, ντίζελ κτλ.
- Υδροηλεκτρικοί σταθμοί όπου η ενέργεια αποδίδεται από την δυναμική ενέργεια του νερού η οποία μετατρέπεται σε κινητική μέσω υδατόπτωσης (Εικόνα 1.1.1).
- Σταθμοί Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως :

> Ηλιακά - φωτοβολταϊκά συστήματα όπου η ενέργεια αποδίδεται από τον ήλιο

> Αιολικά πάρκα (εικόνα 1.1.2) όπου η ενέργεια αποδίδεται από τον άνεμο

- > Μικρά υδροηλεκτρικά συστήματα όπου η ενέργεια αποδίδεται από το νερό
- > Θερμικοί σταθμοί με καύσιμη ύλη τη βιομάζα
- > Γεωθερμικοί σταθμοί με χρήση ενεργειακής πηγής τα γεωθερμικά πεδία
- > Συστήματα που εκμεταλλεύονται την κινητική ενέργεια των κυμάτων και την παλιρροϊκή ενέργεια.

Στον ελλαδικό χώρο οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Π.Η.Ε.) που λειτουργούν είναι ποικίλων τεχνολογιών και χρησιμοποιούν σε μεγάλο βαθμό εκείνες τις ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν στη χώρα. Το συντριπτικό ποσοστό αυτών των σταθμών ανήκει στον διαχειριστή του ελληνικού δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε) ενώ τα τελευταία χρόνια με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας έχουν αρχίσει να γίνονται σημαντικά βήματα από ιδιωτικές πρωτοβουλίες στον τομέα αυτό.

Από το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος γύρω στο 85% βρίσκεται στην ηπειρωτική χώρα ενώ το υπόλοιπο 15% περίπου είναι διανεμημένο στα λεγόμενα μη διασυνδεδεμένα νησιά, στα οποία λειτουργούν αυτόνομα συστήματα μη συνδεδεμένα στο ηπειρωτικό δίκτυο.

Στην ηπειρωτική Ελλάδα οι θερμικοί σταθμοί παραγωγής που χρησιμοποιούν εγχώριο λιγνίτη, πετρέλαιο και φυσικό αέριο αποτελούν γύρω στο 70% της εγκατεστημένης ισχύος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα αποτελούν γύρω στο 25% ενώ γύρω στο 5% βασίζεται σε ΑΠΕ.



Εικόνα 1.1.1 Υδροηλεκτρικός σταθμός Πλατανόβρυσης Δ.Ε.Η.



Εικόνα 1.1.2 Αιολικό πάρκο Ρόδου

1.2 Γραμμές μεταφοράς του Ελληνικού δικτύου

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς και οι υποσταθμοί υψηλής τάσης (ΥΤ) και μέσης τάσης (ΜΤ) χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας εδώ και πάνω από 100 χρόνια. Οι γραμμές αυτές παραμένουν ακόμα και σήμερα ο αποτελεσματικότερος τρόπος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της απλότητας και του μικρού κόστους κατασκευής τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τυπικές διατάξεις και γεωμετρίες γραμμών του ελληνικού δικτύου μεταφοράς. Αυτές αποτελούν αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις γραμμών, καθώς στο ελληνικό δίκτυο υπάρχουν ποικίλες γεωμετρίες γραμμών με διαφορετική τοποθέτηση στο χώρο και διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των αγωγών.

Οι διαφορετικές αυτές γεωμετρίες προκύπτουν από το γεγονός ότι η χάραξη μιας γραμμής μεταφοράς είναι σύνθετο πρόβλημα, για τη λύση του οποίου απαιτείται να ληφθούν υπ' όψιν πολλές παράμετροι. Τα κυριότερα σημεία τα οποία πρέπει να προσεχθούν κατά τη χάραξη μιας νέας γραμμής είναι: η εύκολη προσπέλαση και η ευχέρεια συντήρησης της γραμμής καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, η ελαχιστοποίηση του μήκους και των σημείων κάμψεως, η όσο το δυνατό μικρότερη δαπάνη για απαλλοτριώσεις, η αποφυγή εμποδίων και παράλληλης όδευσης με άλλου είδους αγωγούς και σωληνώσεις.

Η επιλογή της κατάλληλης διάταξης καθορίζεται από οικονομοτεχνική μελέτη όπου λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες, όπως το φορτίο που προορίζεται να μεταφέρει η γραμμή, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, το επίπεδο τάσης, κλπ.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι πύργοι στήριξης επιλέγονται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται το μέγιστο δυνατό βέλος (βύθισμα) ανάμεσα στα ανοίγματα. Αυτό συμβαίνει διότι το μέγεθος και κατά συνέπεια το κόστος των πυλώνων εξαρτάται από το ύψος ανάρτησης των αγωγών οπότε μέγιστο βέλος (στο μέσο του ανοίγματος συνήθως) συνεπάγεται μικρότερο ύψος ανάρτησης και αυτό με τη σειρά του χαμηλότερο κόστος πυλώνων.

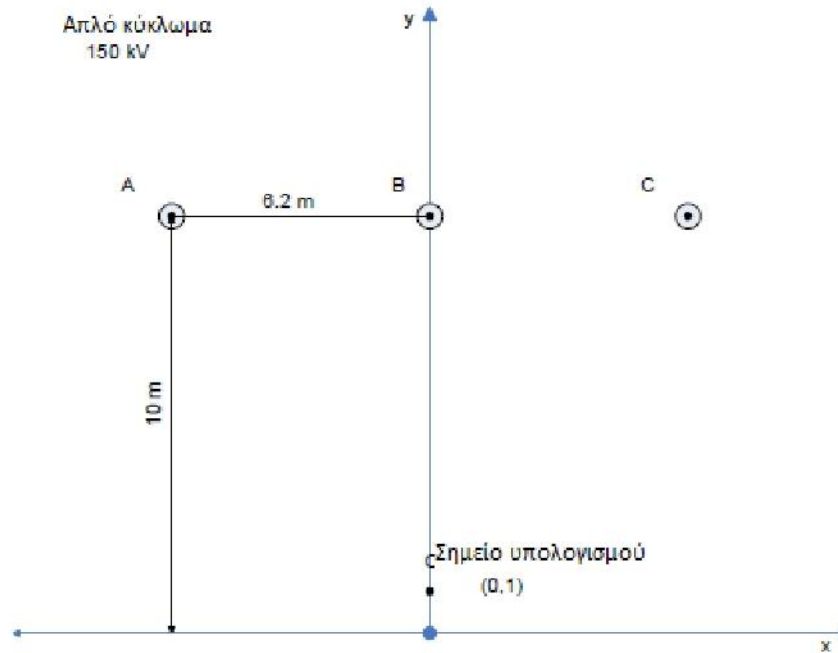
Οι διατάξεις των γραμμών που επελέγησαν:

- 150kV απλό κύκλωμα σε οριζόντια διάταξη
- 150kV διπλό κύκλωμα σε κάθετη διάταξη
- 400kV απλό κύκλωμα σε οριζόντια διάταξη
- 400kV διπλό κύκλωμα σε κάθετη διάταξη

Οι γραμμές αυτές είναι οι πλέον συνηθισμένες στο ελληνικό δίκτυο και απαντώνται πιο συχνά από άλλους τύπους γραμμών. Οι αγωγοί των εναέριων γραμμών είναι αγωγοί αλουμινίου με ενίσχυση χάλυβα, ACSR (Aluminum Conductor Steel-Reinforced cable). Το υλικό κατασκευής των αγωγών, η διατομή τους, το πλήθος τους ανά φάση καθώς επίσης και η γεωμετρία της διάταξης καθορίζουν τις ηλεκτρικές παραμέτρους της γραμμής, όπως αντίσταση ανά μήκος, αυτεπαγωγή ανά μήκος, μέγιστη θερμική φόρτιση, κυματική αντίσταση κ.λ.π.

1.2.1 Απλό κύκλωμα 150kV

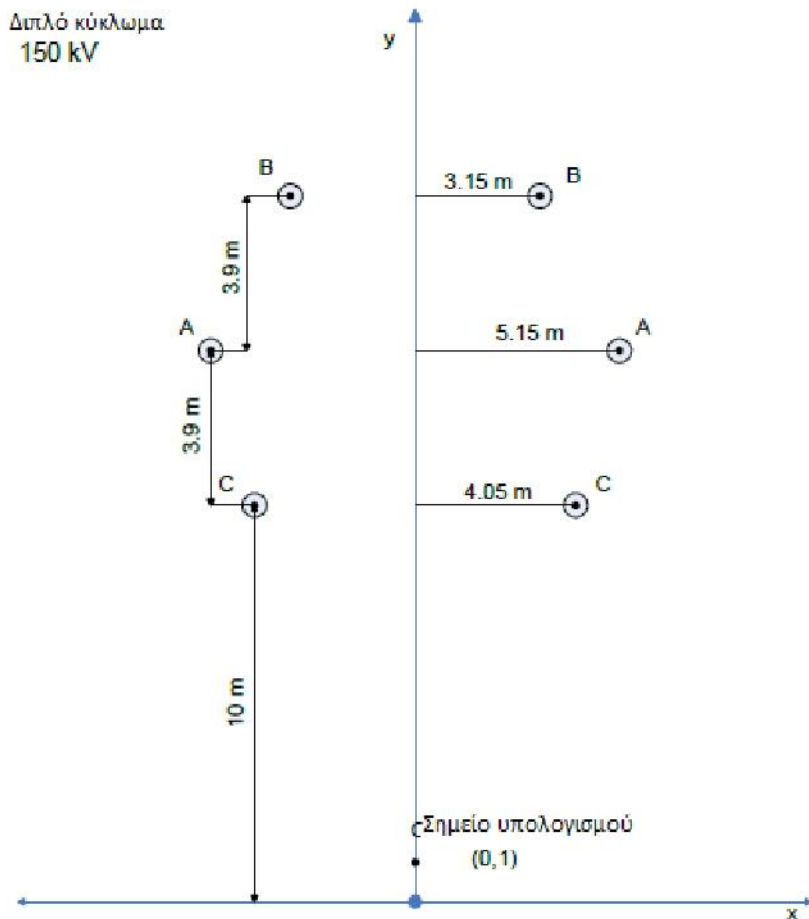
Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από 3 αγωγούς, έναν ανά φάση, με διατομή 636 MCM ($1\text{MCM}=5.067\times 10^{-3}\text{cm}^2$) ή 322 mm^2 . Το μέγιστο ρεύμα που θεωρείται ότι διαρρέει τους αγωγούς του είναι τα 500 A, τιμή μικρότερη της μέγιστης θερμικής φόρτισης (770 A). Η τιμή αυτή προκύπτει από το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα σε άλλες διατάξεις του συστήματος μεταφοράς. Οι αγωγοί απέχουν ίσες οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ τους (6,2 m). Επίσης θεωρείται ότι βρίσκονται σε ύψος 10m και οδεύουν παράλληλα χωρίς να επηρεάζει η φόρτιση τις μεταξύ τους αποστάσεις. Το ύψος αυτό είναι το σημείο με το μέγιστο βέλος. Οι αποστάσεις αυτές συμμορφώνονται απόλυτα με τους κανονισμούς που επιβάλλουν ως ελάχιστο ύψος τα 7,75m και ως ελάχιστη απόσταση μεταξύ των αγωγών το 1,5m για το επίπεδο τάσης των 150 kV. Στο σχήμα 1.1 παρατίθεται σχηματικά η γραμμή :



Σχήμα 1.1: Τυπική γεωμετρία γραμμής 150 kV

1.2.2 Διπλό Κύκλωμα 150 kV

Το διπλό κύκλωμα των 150 kV αποτελείται από 6 αγωγούς, έναν ανά φάση, με διατομή 636 MCM ή 322 mm². Το μέγιστο ρεύμα που θεωρείται ότι διαρρέει τους αγωγούς του είναι, όπως και στην περίπτωση του απλού κυκλώματος, τα 500 A. Οι κατώτεροι αγωγοί (φάση C) φτάνουν σε ύψος 10 m, όπως και στην περίπτωση του απλού κυκλώματος ενώ οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών φαίνονται στο σχήμα 1.2 και τηρούν την απαίτηση του 1,5 m γι' αυτό το επίπεδο τάσης:



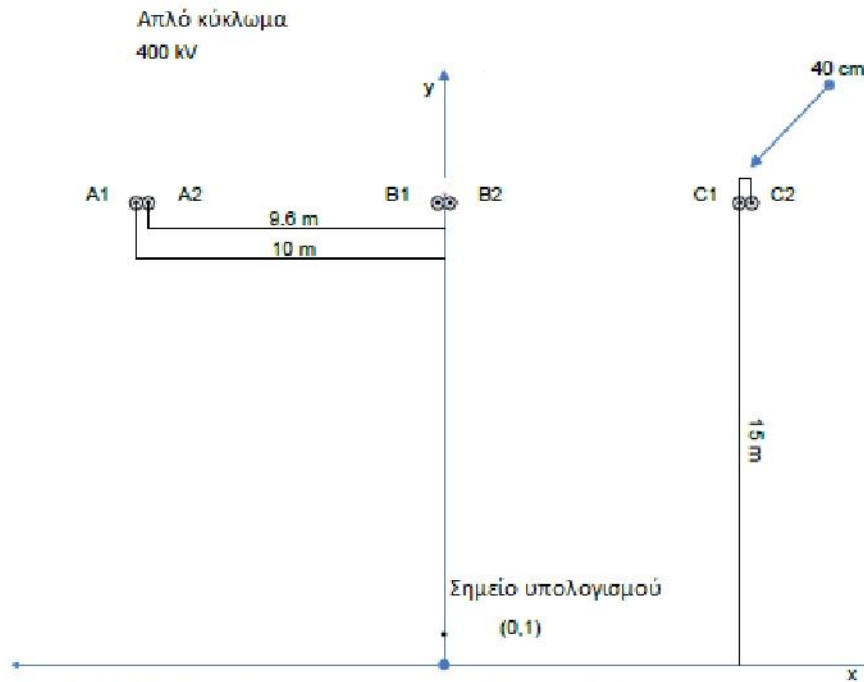
Σχήμα 1.2: Τυπική γεωμετρία γραμμής 150 kV διπλού κυκλώματος

1.2.3 Απλό Κύκλωμα 400 kV

Το απλό κύκλωμα των 400 kV αποτελείται από 6 αγωγούς, δύο ανά φάση, τοποθετημένους σε οριζόντια διάταξη. Η διατομή των αγωγών είναι 954 MCM ή 483 mm². Η διάταξη αυτή με δύο αγωγούς ανά φάση ή γενικότερα με πολλούς αγωγούς ανά φάση καλείται *superbundle*. Οι αγωγοί της ίδιας φάσης απέχουν μεταξύ τους 40 cm και η γραμμή χαρακτηρίζεται ως 2x954MCM ή 2x483mm². Η χρήση πολλών αγωγών ανά φάση είναι από μόνη της ένα μέτρο για μείωση και εξομάλυνση του πεδίου και μάλιστα πολύ αποτελεσματικό. Το μέγιστο ρεύμα που θεωρείται ότι διαρρέει τις φάσεις είναι τα 1000 A, δηλαδή κάθε αγωγός διαρρέεται από ρεύμα 500 A, όπως και στο κύκλωμα των 150 kV. Θεωρείται ότι η κατανομή του ρεύματος ανάμεσα στους δύο αγωγούς μίας φάσης είναι η ίδια και τυχόν διακυμάνσεις είναι αρκετά μικρές ούτως ώστε να μην επηρεάζουν το πεδίο.

Οι αγωγοί βρίσκονται σε σταθερό ύψος 15 m για όλο το άνοιγμα (σημείο μεγίστου βέλους) και οι φάσεις απέχουν μεταξύ τους οριζόντια απόσταση 9,8 m. Πρέπει να επισημανθεί ότι ως κεντρικό σημείο μιας φάσης θεωρήθηκε το μέσο ανάμεσα στους δύο αγωγούς της φάσης. Οι αποστάσεις αυτές συμμορφώνονται

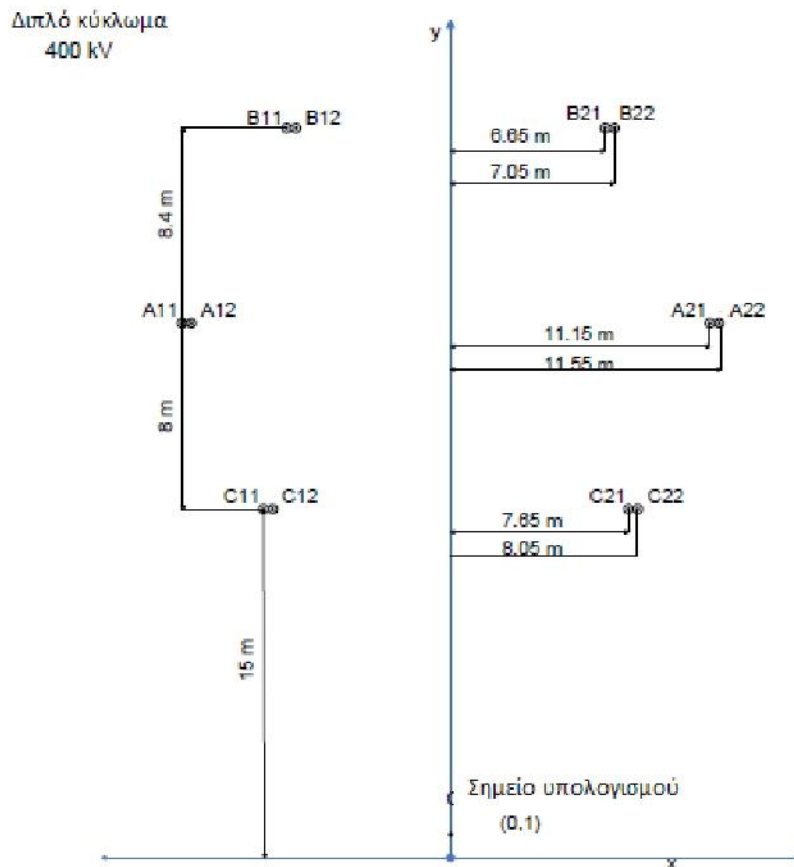
απόλυτα με τους κανονισμούς που επιβάλλουν ως ελάχιστο ύψος τα 10,25 m και ως ελάχιστη απόσταση μεταξύ των αγωγών διαφορετικής τάσης τα 3,6 m για το επίπεδο τάσης των 400 kV. Το κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 1.3 :



Σχήμα 1.3: Τυπική γεωμετρία γραμμής 400 kV

1.2.4 Διπλό Κύκλωμα 400 kV

Το διπλό κύκλωμα των 400 kV αποτελείται από 12 αγωγούς, δύο ανά φάση, διατομής 954 MCM ή 483 mm². Η διάταξη είναι και εδώ superbundle και οι αγωγοί της ίδιας φάσης απέχουν 40 cm. Η γραμμή χαρακτηρίζεται ως 2x954MCM ή 2x483mif. Το ρεύμα που διαρρέει τις φάσεις είναι τα 1000 A τα οποία θεωρούμε ότι κατανέμονται στους δύο αγωγούς έτσι ώστε ο καθένας να διαρρέεται από 500 A. Όπως και στο απλό κύκλωμα των 400 kV οι κατώτεροι αγωγοί (φάση C) θεωρείται ότι βρίσκονται σε ύψος 15 m. Οι υπόλοιπες αποστάσεις φαίνονται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 1.4: Τυπική γεωμετρία γραμμής 400 kV διπλού κυκλώματος

Επισημαίνεται ότι η ζώνη εδάφους που απαιτεί μια γραμμή μεταφοράς για την ασφαλή όδευση της λέγεται ζώνη διέλευσης ή ζώνη δουλείας και έχει πλάτος 40 m στα 150 kV και 50 m στα 400 kV. Τα στοιχεία των γραμμών αυτών προέρχονται από σχέδια της Δ.Ε.Η. για ήδη εγκατεστημένες γραμμές. Η επιλογή του ύψους των κατώτερων αγωγών έγινε ούτως ώστε οι αγωγοί να βρίσκονται ψηλότερα από το όριο που προβλέπει ο κανονισμός αλλά ταυτόχρονα να αντικατοπτρίζουν και πραγματικές καταστάσεις.

1.3 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία γραμμών μεταφοράς

Η ιστορία της ανθρωπότητας είναι ταυτόσημη με την προσπάθεια ελέγχου και αξιοποίησης των διαφόρων μορφών ενέργειας. Η χρήση του ηλεκτρισμού απετέλεσε κορυφαία στιγμή αυτής της προσπάθειας. Πράγματι, ενώ ηλεκτρικά φαινόμενα εκδηλώνονται στη φυσική πραγματικότητα και ορισμένα ήταν ήδη γνωστά από την ελληνική αρχαιότητα, η δυνατότητα μαζικής παραγωγής ηλεκτρισμού, υπό τη μορφή εναλλασσομένου ρεύματος, με μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας σε ηλεκτρική, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι μια καθαρή επινόηση του ανθρώπου που κατέστη δυνατή μόλις το 19ο αιώνα. Οι πολλαπλές εφαρμογές του ηλεκτρισμού συνέβαλαν όχι μόνο στην καθοριστική βελτίωση του επιπέδου της καθημερινής ζωής των ανθρώπων, αλλά και στην ραγδαία πρόοδο και την αύξηση της αποδοτικότητας της βιομηχανικής παραγωγής, των επικοινωνιών, των μεταφορών, της ιατρικής τεχνολογίας κλπ.

Η μοναδικότητα της ηλεκτρικής ενέργειας συνίσταται στο γεγονός ότι μπορεί να παράγεται σε μεγάλες ποσότητες σε συγκεκριμένες θέσεις (των σταθμών παραγωγής) και να χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων από τα σημεία παραγωγής. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη των δικτύων μεταφοράς (υψηλής τάσης) και διανομής (μέσης και χαμηλής τάσης) και των υποσταθμών που τα διασυνδέουν, που είναι τα σημεία στα οποία μετασχηματίζεται η ενέργεια (υποβιβασμός της τάσεως από υψηλή σε μέση ή από μέση σε χαμηλή τάση).

Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας γνωρίζει σταθερή αύξηση, ιδιαίτερα στο βιομηχανικό κόσμο, στη διάρκεια των τελευταίων πενήντα ετών, αύξηση που έχει ως φυσική συνέπεια την εξάπλωση των δικτύων μεταφοράς και διανομής που καλύπτουν ολοένα και ευρύτερες εκτάσεις σε όλο τον πλανήτη. Παράλληλα διευρύνεται και η χρήση του πάσης φύσεως ηλεκτρικού εξοπλισμού και συσκευών στην καθημερινή ζωή : οικιακές συσκευές διαφόρων ειδών, προσωπικοί υπολογιστές, κλιματιστικά μηχανήματα κλπ.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι ο ηλεκτρισμός συνιστά αδιαμφισβήτητα στοιχειώδες κοινωνικό αγαθό, άρρηκτα συνδεδεμένο με την ποιότητα της ζωής, υπάρχει σήμερα προβληματισμός σχετικά με ενδεχόμενες δυσμενείς επιπτώσεις από τη χρήση του στο ανθρωπογενές περιβάλλον, πέραν του γνωστού κινδύνου των ηλεκτροπληξιών. Ο προβληματισμός αυτός επικεντρώνεται στα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, η ύπαρξη των οποίων είναι συνυφασμένη με τη χρήση του

ηλεκτρισμού και ειδικότερα του εναλλασσομένου ρεύματος κατά τα τελευταία 100 χρόνια.

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας εδώ και πάνω από έναν αιώνα και παραμένουν ακόμα και σήμερα ο αποτελεσματικότερος τρόπος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χάρη στην απλότητα και στο μικρό κόστος κατασκευής τους. Ως φυσικό αποτέλεσμα της τάσης στην οποία λειτουργούν και του ρεύματος από το οποίο διαρρέονται, οι γραμμές μεταφοράς δημιουργούν στον περιβάλλοντα χώρο ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, η συχνότητα του οποίου για τις χώρες της Ευρώπης είναι τα 50 Hz. Το παραγόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο ανήκει στην κατηγορία των *ηλεκτρομαγνητικών πεδίων εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας* - *EXΣ (extremely low frequency electromagnetic fields - ELF)*. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας που παράγονται από μια γραμμή μεταφοράς, μαζί με τα ραδιοκύματα, την υπέρυθη, την ορατή και την υπεριώδη ακτινοβολία, συνθέτουν το φάσμα των *μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών (non ionizing radiation - NIR)*.

Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα οι μη ιοντιζουσες ακτινοβολίες είναι οι ακτινοβολίες με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 100 nm. Τα μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας, τα οποία στη συχνότητα των 50 Hz έχουν μήκος κύματος 6000km, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σαφώς και ανήκουν στην κατηγορία των μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών. Φυσικές πηγές μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι ο ήλιος, η θερμική ακτινοβολία της γης και των διαφόρων αντικειμένων, το γήινο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο και οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις. Τεχνητές πηγές μη ιοντιζουσών ακτινοβολιών είναι οι γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, οι ηλεκτρικές συσκευές και τα καλώδια που διαρρέονται από ηλεκτρικά ρεύματα, οι κεραίες των διαφόρων πομπών, τα ηλεκτρικά τόξα, οι συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης και οξυγονοκόλλησης, τα αντικείμενα που βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες, τα φωτιστικά σώματα και λυχνίες και οι ακτίνες Laser. Αντίθετα με τις ιοντιζουσες ακτινοβολίες (ραδιενεργές ακτινοβολίες), στις οποίες ανήκουν οι ακτίνες *X* (ακτίνες Rontgen), οι ακτίνες *γ*, τα σωμάτια *α* κ.λπ., οι μη ιοντιζουσες ακτινοβολίες δεν προκαλούν ιοντισμό της ύλης, δεν οδηγούν δηλαδή στη διάσπαση των χημικών δεσμών σε έναν οργανισμό με την απόσπαση ηλεκτρονίων από άτομα ή μόρια.

Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας δημιουργούνται εν γένει από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή τις

εναέριες γραμμές και τους υποσταθμούς υψηλής τάσης, από το δίκτυο διανομής μέσης και χαμηλής τάσης που χρησιμοποιείται για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και από τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τις καλωδιώσεις και τις συσκευές που λειτουργούν σε σπίτια και χώρους εργασίας. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία αυτά περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\nabla \times H = \sigma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.2)$$

όπου:

- E η ηλεκτρική πεδιακή ένταση H η μαγνητική πεδιακή ένταση
 μ η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου
 ε η διηλεκτρική σταθερά του μέσου
 σ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου

Εν προκειμένω, για τη μελέτη των μεγεθών του πεδίου στον ατμοσφαιρικό αέρα που περιβάλλει τις γραμμές, ισχύει για τις σταθερές ε, μ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{F/m} \quad (1.3)$$

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

ενώ και η ηλεκτρική αγωγιμότητα σ του αέρα είναι πρακτικά μηδενική, οπότε και μηδενίζεται ο αντίστοιχος όρος στην 2^η εξίσωση του Maxwell εξ.(1-2) Για τη συχνότητα των 50Hz οι μεταβολές της ηλεκτρικής και της μαγνητικής πεδιακής έντασης με το χρόνο αποκτούν εξαιρετικά χαμηλές τιμές και μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές. Οι δύο λοιπόν παραπάνω εξισώσεις του Maxwell εξ.(1-1) και εξ.(1-2) καταλήγουν στις εξής απλοποιημένες εκφράσεις:

$$\nabla \times E \cong 0 \quad (1.5)$$

$$\nabla \times H \cong 0 \quad (1.6)$$

Προκύπτει έτσι ότι στις χαμηλές συχνότητες, όπως αυτή των 50 Hz στην οποία λειτουργούν οι γραμμές μεταφοράς, δεν υπάρχει ζεύξη μεταξύ των δύο πεδριακών εντάσεων, της ηλεκτρικής και της μαγνητικής. Στη συχνότητα, λοιπόν, των 50Hz πρακτικά δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αλλά δύο ανεξάρτητα πεδία, το ηλεκτρικό, το οποίο εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής, και το μαγνητικό, το οποίο εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή. Είναι δυνατή επομένως η μελέτη των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων μιας γραμμής μεταφοράς θεωρώντας τα ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Ως προς τη φύση και την επίδρασή τους βέβαια τα δύο αυτά πεδία παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά και ιδιότητες. Μπορούν ωστόσο να θεωρηθούν ως ομογενή στα σημεία πρακτικού ενδιαφέροντος κοντά στη γραμμή μεταφοράς και επομένως να μελετηθούν ευκολότερα. Το ηλεκτρικό πεδίο υφίσταται παραμόρφωση από κάθε είδους αγωγίμο υλικό το οποίο εισέρχεται σε αυτό. Η ιδιότητά του αυτή καθιστά εύκολη τη θωράκιση από αυτό, όμως δυσχεραίνει πολύ τη μέτρησή του. Επιπλέον, η εξάρτησή του από την τάση της γραμμής διευκολύνει τον υπολογισμό του με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων, δεδομένου ότι η τάση αυτή διατηρείται σχετικά σταθερή τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς στα σημεία στα οποία επιχειρείται η μέτρηση.

Αντίθετα, το μαγνητικό πεδίο δεν υφίσταται παραμόρφωση από μη μαγνητικά υλικά και η θωράκιση από αυτό επιτυγχάνεται δύσκολα με τη χρήση ειδικών κραμάτων σε κατάλληλη διάταξη κελύφους ή κλωβού (πλέγματος). Το γεγονός αυτό διευκολύνει σημαντικά την απευθείας μέτρησή του από ειδικές συσκευές. Φυσικά, το μαγνητικό πεδίο σε ένα δεδομένο σημείο εξασθενεί με την αύξηση της απόστασης του σημείου αυτού από την πηγή του μαγνητικού πεδίου, στην προκειμένη περίπτωση από τους ρευματοφόρους αγωγούς της γραμμής μεταφοράς, και κατά αυτό τον τρόπο η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται ακριβώς κάτω από τη γραμμή μεταφοράς. Επίσης, η εξάρτησή του από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή, η οποία παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου, οδηγεί στην απαίτηση αναγωγής των μετρήσεων και των υπολογισμών στη μέγιστη φόρτιση των αγωγών, ώστε να υπάρχει μια σαφής εικόνα του μέγιστου μαγνητικού πεδίου που μπορεί να παραχθεί κατά τη λειτουργία της συγκεκριμένης γραμμής μεταφοράς.

1.4 Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία

Τα εξαιρετικά χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (50/60 Hz) είναι τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που καλύπτει το αχανές σύνολο των συχνοτήτων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που παράγονται από τη φύση ή την ανθρώπινη δραστηριότητα. Τα πεδία αυτά χαρακτηρίζονται από τη συχνότητα ή το μήκος κύματος και από τη συχνότητά τους (ή το μήκος κύματος) εξαρτάται και η επίδρασή τους στα έμβια όντα ή τα αντικείμενα αλλά και ο τρόπος που γίνονται αντιληπτά από τον άνθρωπο.

Η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος άνω των 2×10^{15} Hz (υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X κλπ) καλείται ιονίζουσα, διότι η ενέργεια που αποδεδεσμεύεται όταν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία των συχνοτήτων αυτών συναντούν τον ανθρώπινο οργανισμό είναι ικανή να διαρρήξει χημικούς δεσμούς και να προκαλέσει ιονισμό. Οι άμεσες βλαπτικές επιδράσεις και οι κίνδυνοι από την ιονίζουσα ακτινοβολία είναι από πολλών ετών γνωστοί και καλά θεμελιωμένοι. Αντίθετα, για τη μη ιονίζουσα περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος διερευνώνται, χωρίς να έχουν θεμελιωθεί άλλες βιολογικές επιδράσεις, πέραν των θερμικών επιδράσεων στις υψηλές συχνότητες (άνω του 1 MHz).

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία διέπονται γενικά από τις εξισώσεις του Maxwell, στις οποίες και εμφανίζονται ως αλληλένδετα μεγέθη. Στις πολύ χαμηλές συχνότητες των 50/60 Hz τα πεδία είναι πρακτικά αποζευγμένα, δηλ. δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά δύο ανεξάρτητα πεδία, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Έτσι και η μέτρηση των δύο πεδίων γίνεται ανεξάρτητα.

Το ηλεκτρικό πεδίο

Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από τις τάσεις των αγωγών μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης (δηλαδή από την παρουσία ηλεκτρικών φορτίων), ανεξάρτητα από το εάν διαρρέονται από ρεύμα ή όχι. Οι τιμές του εξαρτώνται :

- από την τάση των αγωγών
- από τη γεωμετρία της γραμμής (διάταξη αγωγών)
- από την απόσταση από τους αγωγούς

Δεδομένου ότι η τάση μιας γραμμής διακυμαίνεται μεταξύ στενών ορίων ρύθμισης, οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι κατ' ουσία σταθερές σε κάθε θέση. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μετριέται σε V/m ή kV/m.

Το ηλεκτρικό πεδίο παραμορφώνεται από την παρουσία αγωγίμων διατάξεων και έτσι είναι δυνατή η θωράκιση ενός χώρου έναντι ηλεκτρικού πεδίου. Τα συνήθη οικοδομικά υλικά έχουν επαρκή αγωγιμότητα ώστε να παρέχεται ικανοποιητική προστασία (δραστική μείωση της έντασης του πεδίου) σε εσωτερικούς χώρους από έξωθεν πηγές. Επίσης το ηλεκτρικό πεδίο διαταράσσεται από την παρουσία του ανθρώπινου σώματος και σχεδόν περιορίζεται στην εξωτερική επιφάνειά του.

Το μαγνητικό πεδίο

Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τις εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τους αγωγούς μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης (δηλ. από την κίνηση ηλεκτρικών φορτίων). Οι τιμές του εξαρτώνται :

- από τις εντάσεις των αγωγών
- από τη γεωμετρία της γραμμής (διάταξη αγωγών)
- από την απόσταση από τους αγωγούς

Δεδομένου ότι το ρεύμα μιας γραμμής υπόκειται στη χρονική διακύμανση των φορτίων που εξυπηρετεί, η τιμή του μαγνητικού πεδίου δεν είναι σταθερή σε κάθε θέση, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο στη διάρκεια της ημέρας και μεταξύ των ημερών. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου (μαγνητική επαγωγή) μετριέται σε T (τέσλα) συνήθως με το υποπολλαπλάσιο μT (μικροτέσλα=1 εκατομμυριοστό του T). Επίσης χρησιμοποιείται και η μονάδα G (γκάους), συνήθως με το υποπολλαπλάσιο mG (μιλιγκάους= 1 χιλιοστό του G). Οι δύο μονάδες συνδέονται με τη σχέση $1 \text{ T} = 10000 \text{ G}$ ($1 \mu\text{T} = 10 \text{ mG}$).

Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο διαπερνά και τα οικοδομικά υλικά και το ανθρώπινο σώμα, ενώ η θωράκιση έναντι μαγνητικού πεδίου είναι κατά κανόνα δύσκολη και απαιτεί τη χρήση ειδικών υλικών σε κατάλληλη διάταξη.

Η ευρέως διαδεδομένη στο κοινό αντίληψη ότι η υψηλή τάση συνεπάγεται και υψηλή έκθεση σε μαγνητικό πεδίο δεν ευσταθεί. Στην πραγματικότητα, όπως

προαναφέρθηκε, μόνον το ηλεκτρικό πεδίο εξαρτάται από την τάση των αγωγών, ενώ το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς και μόνον. Αυτό που τελικά ενδιαφέρει είναι το ύψος της έκθεσης, δηλαδή η τιμή του μαγνητικού πεδίου και όχι η φύση της πηγής που το προκαλεί. Ο ανθρώπινος οργανισμός δεν διακρίνει κατά πόσον το μαγνητικό πεδίο στο οποίο εκτίθεται δημιουργείται από μία γραμμή υψηλής τάσεως ή από άλλη πηγή.

Βασικό κοινό χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων είναι, ότι οι τιμές των πεδιακών εντάσεων αποσβέννονται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή που τα δημιουργεί και κατά συνέπεια οπτική επαφή με πάσης φύσεως ηλεκτρικές εγκαταστάσεις δεν συνεπάγεται και έκθεση σε πεδία. Η απόσβεση αυτή δεν είναι ανάλογη προς την απόσταση, αλλά ακολουθεί εκθετικό νόμο (ταχύτερες μειώσεις πλησίον της πηγής και ασυμπτωτική εξασθένηση μέχρι το μηδενισμό).

Η ηλεκτρική και μαγνητική «εμβέλεια» μιας γραμμής ή άλλης ηλεκτρικής εγκατάστασης, δηλαδή η έκταση της ζώνης γύρω από αυτή στην οποία ανιχνεύεται το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, εξαρτάται, για δεδομένες τάσεις και εντάσεις, από τις συνθήκες εγκατάστασης (ύψος, βάθος), τη διάταξη των αγωγών και τις μεταξύ τους αποστάσεις. Ως γενική αρχή ισχύει ότι με τη μείωση των αποστάσεων μεταξύ αγωγών, επιτυγχάνεται μείωση της «εμβέλειας» της γραμμής αλλά και των πεδιακών εντάσεων.

Αν και συχνά τίθενται στο στόχαστρο, ως πηγές πεδίων, οι διακριτές εγκαταστάσεις υψηλής τάσης, κυρίως οι γραμμές μεταφοράς αλλά σε μερικές περιπτώσεις και οι υποσταθμοί υποβιβασμού της υψηλής τάσης, εν τούτοις ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο καταγράφεται σε κάθε θέση στο αστικό περιβάλλον, αλλά και εντός κάθε σύγχρονης κατοικίας ή χώρου εργασίας. Λόγω της απανταχού παρουσίας του εντός των αστικών ζωνών, το δίκτυο διανομής που εκ των πραγμάτων γειτνιάζει προς τα κτίσματα που εξυπηρετεί στα οποία και διεισδύει, συντελεί καθοριστικά στη διαμόρφωση του «μαγνητικού υποβάθρου», δηλαδή των μέσων τιμών μαγνητικού πεδίου που συναντώνται κατά μήκος των πεζοδρομίων και των δρόμων στο αστικό περιβάλλον. Αντίθετα, εντός των κατοικιών και των εργασιακών χώρων το μαγνητικό περιβάλλον βασικά διαμορφώνεται από την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση και τη χρήση ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού.

1.5 Τα όρια ασφαλείας της έκθεσης του ανθρώπου σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz

Σε δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει, λόγω του πολύ μεγάλου μήκους κύματος (πολύ χαμηλή συχνότητα) εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτό που συμβαίνει είναι η δημιουργία δύο ανεξάρτητων πεδίων: το *ηλεκτρικό πεδίο* και το *μαγνητικό πεδίο*.

Η έκθεση του ανθρώπου στα χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50 και 60 Hz των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχει απασχολήσει το ενδιαφέρον του κοινού για πολλά χρόνια. Για το λόγο αυτό έχουν θεσπιστεί από όργανα της διεθνούς πανεπιστημιακής κοινότητας μέτρα προστασίας έναντι των πεδίων αυτών. Διεθνείς οργανισμοί όπως ο ICNIRP (International Commission on Non- Ionizing Radiation Protection) NRPB (National Radiological Protection Board) στο Ηνωμένο Βασίλειο και το IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) στις Η.Π.Α έχουν θεσπίσει και έχουν προτείνει όρια ασφαλείας για την έκθεση του ανθρώπου από τα πεδία αυτά. Ο οργανισμός ICNIRP είναι αναγνωρισμένος επίσημα από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας και το Διεθνές Γραφείο Εργασίας ως μη κυβερνητικός οργανισμός, για την προστασία έναντι της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας. Τα όρια που προτείνονται από τον ICNIRP συνιστώνται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας World Health Organization (WHO) και είναι τα πιο διαδεδομένα διεθνώς. Τα όρια που προτείνονται από τον ICNIRP έχουν υιοθετηθεί και στην Ελλάδα. Υστερα και από κοινή υπουργική απόφαση του έτους 2002 περί προφύλαξης του κοινού από την λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων, οι τιμές B και E για συνεχή έκθεση σε πεδία συχνότητας 50 Hz (συχνότητα λειτουργίας των ευρωπαϊκών ενεργειακών δικτύων και των συνήθων συσκευών των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων) είναι:

- 1) $B=100 \mu T$
- 2) $E=5 \text{ kV/m}$

Για την επαγγελματική απασχόληση οι τιμές B και E είναι κατά οδηγία της I.C.N.I.R.P. μεγαλύτερες:

1) $B=500 \mu\text{T}$

2) $E=10 \text{ kV}$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές αυτές (επίπεδα αναφοράς) δεν αποτελούν όρια επικινδυνότητας, διότι εμπεριέχουν μεγάλους συντελεστές ασφαλείας, ώστε να καλύπτονται αφενός αβεβαιότητες που υπάρχουν σχετικά με την επίδραση των πεδίων στην ανθρώπινη υγεία και αφετέρου παράγοντες που σχετίζονται με την ατομική ευαισθησία, την ηλικία και την κατάσταση της ηλικίας του «γενικού κοινού».

2. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

2.1 Ηλεκτρικό πεδίο

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ένα διανυσματικό πεδίο που ορίζεται από τις χωρικές συνιστώσες του σε τρεις ορθογωνίους άξονες. Για μόνιμης κατάστασης ημιτονικά πεδία κάθε συνιστώσα είναι ένας φασιθέτης που μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την ενεργό τιμή του σε V/m ως

$$\vec{E} = e_x(t)\vec{u}_x + e_y(t)\vec{u}_y + e_z(t)\vec{u}_z \quad (2.1)$$

Για τη x-συνιστώσα και αντίστοιχα για τις y και z ισχύει :

$$e_x = E_x \cos(\omega t + \varphi_x) = E_{x,r} \cos \omega t + E_{x,i} \sin \omega t \quad (2.2)$$

όπου E_x είναι το πλάτος και φ_x η φάση του $e_x(t)$ και $E_{x,r}$ και $E_{x,i}$ είναι το πραγματικό και το φανταστικό μέρος αντίστοιχα. Είναι χρήσιμο να απεικονιστεί το διάνυσμα E ως ένα διάνυσμα που κινείται στο χώρο. Μπορεί να δείχτεί ότι το διάνυσμα αυτό περιστρέφεται σε μια διάσταση και περιγράφει μια έλλειψη.

2.2 Μαγνητικό πεδίο

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής, B σε αντιστοιχία με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, $H=B/\mu$, χρησιμοποιείται για να περιγράψει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από γενικά από κινούμενα στο χώρο ηλεκτρικά φορτία και. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα κινούμενα φορτία του ρεύματος των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, το μαγνητικό πεδίο ορίζεται ως ένα διανυσματικό πεδίο της πυκνότητας μαγνητικής ροής (B-πεδίο). Οι διανυσματικές ιδιότητες του B-πεδίου είναι οι ίδιες που περιγράφηκαν για το ηλεκτρικό πεδίο. Τα πλάτη των συνιστωσών εκφράζονται στις ενεργές τιμές τους. Η διεθνής μονάδα μέτρησης στο SI είναι το tesla (T), το οποίο είναι ένα weber ανά τετραγωνικό μέτρο Wb/m^2 . Το Gauss (G) είναι μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησης. Ένα Tesla είναι ίσο με 10^4 G.

2.3 Αρμονικό περιεχόμενο

Αρμονικό περιεχόμενο είναι η διαταραχή της ημιτονικής κυματομορφής που χαρακτηρίζει το πλάτος της και περιγράφεται από τις σειρές Fourier στις οποίες αναπτύσσεται το κύμα. Το αρμονικό περιεχόμενο του ηλεκτρικού πεδίου αντιστοιχεί με το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης γραμμής ενώ το αρμονικό περιεχόμενο του μαγνητικού πεδίου αντιστοιχεί με αυτό του ρεύματος γραμμής για μονοφασικά συστήματα. Για γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος το αρμονικό περιεχόμενο είναι μικρό εκτός από τις περιπτώσεις μεταβατικών καταστάσεων και απασχολεί λίγο, όσον αφορά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου γύρω από γραμμές μεταφοράς, εκτός από τα σημεία που βρίσκονται πολύ κοντά σε μεγάλα βιομηχανικά φορτία όπως εργοστάσια αλουμινίου όπου το αρμονικό

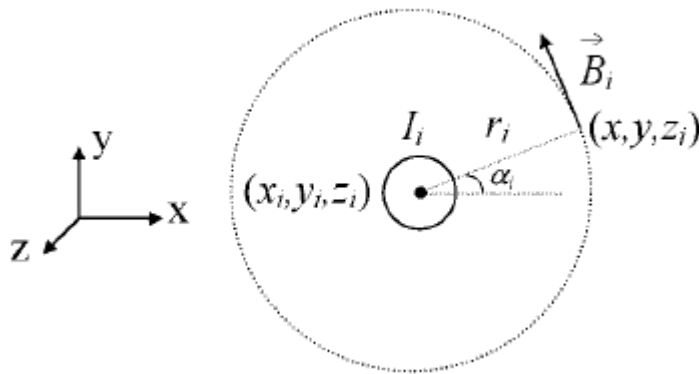
περιεχόμενο μπορεί και να φτάσει το 10% της τάσης γραμμής. Εργαστηριακές εγκαταστάσεις μπορούν να έχουν επίσης πηγές τάσης και ρεύματος με σημαντικό αρμονικό περιεχόμενο.

2.4 Μαγνητικό πεδίο από εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι γραμμές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν τριφασικό σύστημα για τη μεταφορά-διανομή. Αυτό σημαίνει ότι αποτελούνται από τρεις αγωγούς με εναλλασσόμενες ημιτονοειδείς τάσεις των 50Hz ίσου πλάτους αλλά με διαφορά φάσης ανά δύο 120° . Επομένως αυτή η γωνία πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου.

2.4.1.1 Υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου από απείρου μήκους ευθύγραμμο, απομονωμένο αγωγό.

Σε αυτήν την παράγραφο αναπτύσσεται μια σχέση υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από έναν ευθύγραμμο αγωγό απείρου μήκους. Στο σχήμα 1 φαίνεται ένας ευθύγραμμος αγωγός ο οποίος διαρρέεται από ένα ρεύμα I_i το οποίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο B_i στο χώρο που το περιβάλλει.



Σχήμα 2.4.1: Διανυσματικό μαγνητικό πεδίο από ευθύγραμμο αγωγό.

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ευθύγραμμο αγωγό απείρου μήκους τοποθετημένο στο σημείο (x_i, y_i, z_i) μπορεί να υπολογιστεί με την εφαρμογή του νόμου των Biot-Savart ,

$$d\vec{B}_i = \frac{\mu_0 I_i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (2.3)$$

όπου $\vec{r} = (x - x_i)\hat{i} + (y - y_i)\hat{j} + 0\hat{k}$,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N / A}^2$ και

$d\vec{l} = dz\hat{k}$, έχει την ίδια διεύθυνση με το I_i

Συνεπώς προκύπτει ότι είναι:

$$B_i = \frac{\mu_0 I_i}{2\pi r_i} \quad (2.4)$$

Από το σχήμα 2.4.1 και από τη σχέση 2.4 μπορεί να προκύψει για την έκφραση του μαγνητικού πεδίου ότι δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

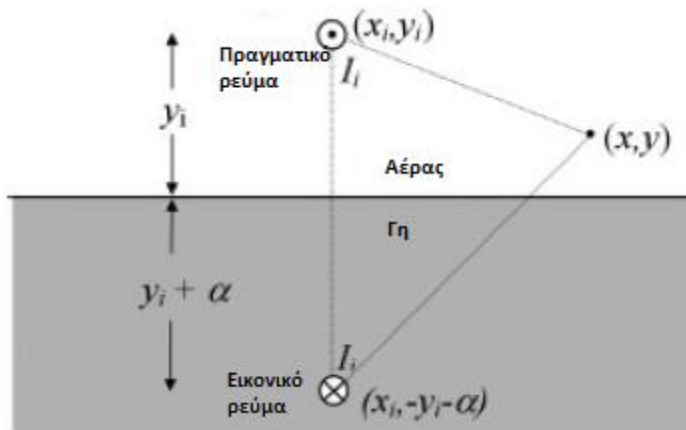
$$\vec{B}_i = \frac{\mu_0 I_i \varphi}{2\pi} \left(-\frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, 0 \right) \quad (2.5)$$

όπου φ είναι η γωνία του ρεύματος. Είναι σημαντικό να λάβουμε υπόψιν μας ότι τα I_i , B_i είναι ημιτονοειδείς εναλλασσόμενες φυσικές μεταβλητές και επομένως είναι χρήσιμο να εκφραστούν με τις ενεργές τιμές τους.

2.4.1.2 Παρουσία γης: Μέθοδος των ειδώλων

Η μέθοδος των ειδώλων είναι χρήσιμη όταν λαμβάνουμε υπόψιν τις επιπτώσεις από την παρουσία ενός αγωγίμου εδάφους. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η γραμμή επάγει ρεύματα επιστροφής στο έδαφος, τα οποία με την σειρά τους δημιουργούν ταυτόχρονα ένα άλλο μαγνητικό πεδίο το οποίο υπερτίθεται σε αυτό της γραμμής.

Με βάση την θεωρία των ειδώλων το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα ρευματοφόρο αγωγό τοποθετημένο σε ύψος y_i πάνω από τέλεια αγωγίμο έδαφος μπορεί να παρασταθεί από τα συνδυασμένα μαγνητικά πεδία αυτού και του ειδώλου του. Όταν το πεπερασμένο αγωγίμο έδαφος αντικατασταθεί από τέλεια αγωγίμο έδαφος η κλασσική μέθοδος των ειδώλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εντοπιστεί το βάθος του ειδώλου του αγωγού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.1,



Σχήμα 2.4.1: Πραγματικό και εικονικό ρεύμα

το είδωλο του αγωγού βρίσκεται σε βάθος $y_i + \alpha$, όπου α ένας μιγαδικός αριθμός που η τιμή του εξαρτάται από την ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδάφους και δίνεται από την σχέση 2.6:

$$\alpha = \sqrt{2} \delta^{-45^\circ} \quad (2.6)$$

όπου δ το βάθος διείσδυσης που προκύπτει :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}} \quad (2.7)$$

όπου ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του μέσου εκφρασμένη σε Ωm ,
 μ η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου εκφρασμένη σε N/A^2 και
 f η συχνότητα ταλάντωσης του μαγνητικού πεδίου σε Hz .

Στην περίπτωση ενός τέλεια αγώγιμου εδάφους προκύπτει $\delta = 0$ και συνεπώς $\alpha = 0$. Από την άλλη πλευρά για εδάφη με χαμηλή αγωγιμότητα προκύπτει πολύ μεγάλο βάθος διείσδυσης δ και συνεπώς και το α είναι πολύ μεγάλο. Στην περίπτωση ενός τέλει μονωτή το αποτέλεσμα είναι $\alpha = \infty$.

Οι συνηθισμένες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους κυμαίνονται μεταξύ $\rho < 50 \Omega\text{m}$ για ιδιαίτερα αγώγιμο έδαφος και $\rho > 3000 \Omega\text{m}$ για έδαφος πολύ χαμηλής αγωγιμότητας. Προκειμένου να υπολογιστεί η αντίσταση του εδάφους έχει χρησιμοποιηθεί η τιμή $\rho = 100 \Omega\text{m}$. Με αντικατάσταση στη σχέση 2.7 $f = 50 \text{ Hz}$, $\rho = 100 \Omega\text{m}$, και $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ προκύπτει $\delta \approx 711.76 \text{ m}$. Η τιμή αυτή είναι πάρα πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση του ρευματοφόρου αγωγού από το έδαφος.

2.4.1.3 Υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου ενός ευθύγραμμου, απομονωμένου, απείρου μήκους ρευματοφόρου αγωγού λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση αγώγιμου εδάφους

Γίνεται η υπόθεση ότι το έδαφος είναι επίπεδο και ομοιογενές, δηλαδή έχει σταθερή ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως και δείχτηκε στο σχήμα 2.4.1, η επίδραση του αγώγιμου εδάφους προσομοιώνεται με ένα άλλο ρεύμα ίδιας έντασης και αντίθετης κατεύθυνσης το οποίο ρέει σε βάθος $y_i + a$ κάτω από το έδαφος.

Συνεπώς η διανυσματική έκφραση του συνολικού μαγνητικού πεδίου είναι:

$$B_{i,x} = \frac{\mu_0 I_i^{\varphi_0}}{2\pi} \left(-\frac{(y - y_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} + \frac{y + y_i + a}{(x - x_i)^2 + (y + y_i + a)^2} \right) \quad (2.8)$$

$$B_{i,y} = \frac{\mu_0 I_i^{\varphi_0}}{2\pi} \left(\frac{(x - x_i)}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i + a)^2} \right)$$

$$B_{i,z} = 0$$

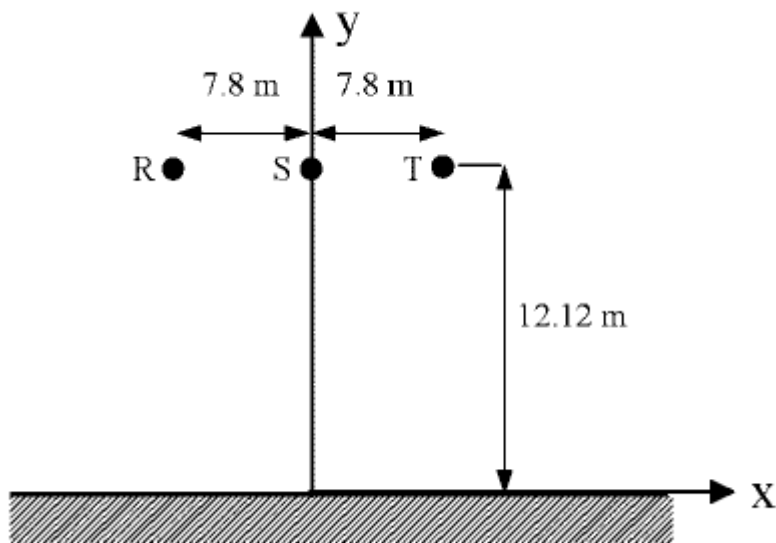
Οι όροι $[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]$ της παραπάνω έκφρασης οφείλονται στο ρευματοφόρο αγωγό ενώ οι όροι $[(x - x_i)^2 + (y + y_i + a)^2]$ στον αγωγό είδωλο.

Όταν έχουμε n παράλληλους ευθύγραμμους αγωγούς (όπως συμβαίνει στις περισσότερες γραμμές) το συνολικό μαγνητικό πεδίο προκύπτει εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας:

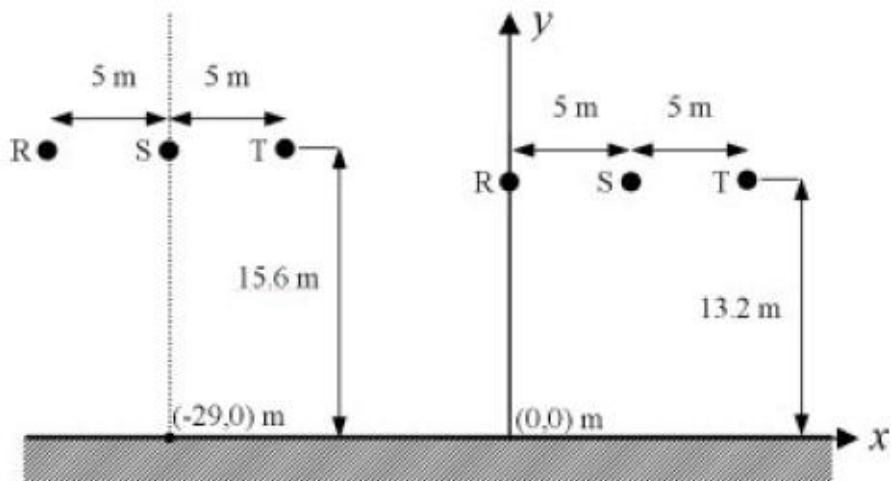
$$\vec{B}_{res} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \quad (2.9)$$

2.4.1.4 Πειραματική τεκμηρίωση της μεθοδολογίας από τους Jordi-Roger Riba Ruiz και Antonio Garcia Espinosa

Τα αποτελέσματα της μεθόδου που περιγράφηκε έχουν τεκμηριωθεί με πειραματικά δεδομένα και επίσης συγκριθεί με αποτελέσματα προσομοίωσης. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.4.1.3 δίνεται μελέτη της κατανομής του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει από δύο διαφορετικές γεωμετρίες εναέριων γραμμών.



Σχήμα 2.4.2: Γεωμετρική διάταξη για την περίπτωση 1



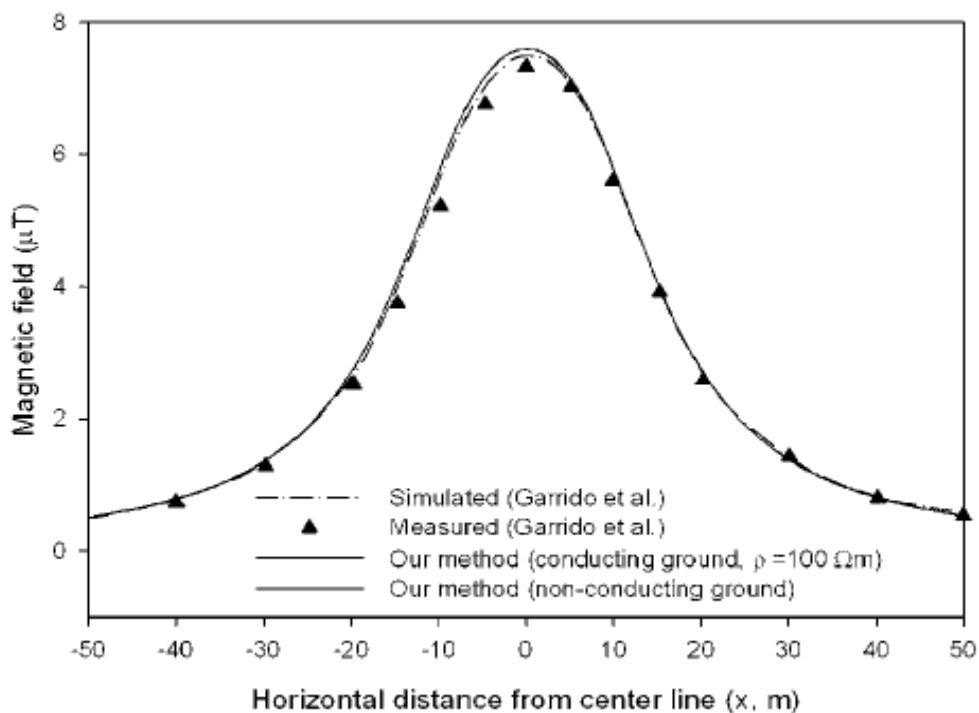
Σχήμα 2.4.3: Γεωμετρική διάταξη για την περίπτωση 2

Το σχήμα 2.4.3 δείχνει δύο γραμμές η μία δίπλα στην άλλη, στις οποίες οι αγωγοί είναι όλοι σε οριζόντια διάταξη.

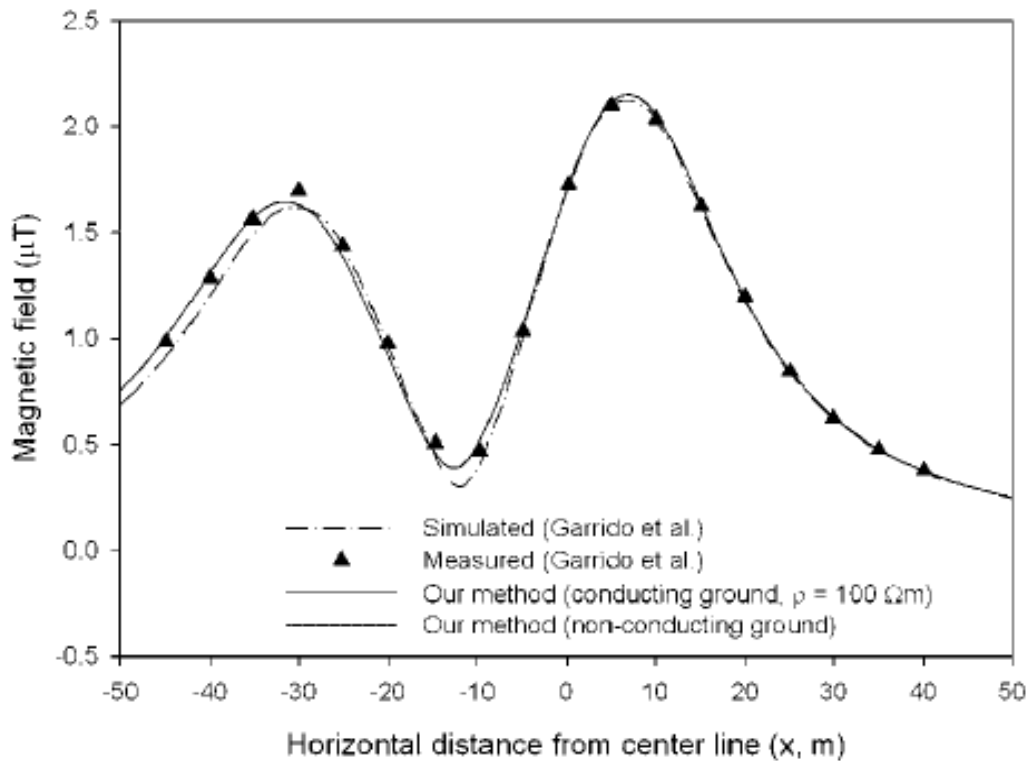
Το σχήμα 2.4.4 δείχνει την εγκάρσια κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε ύψος 1 m για μία οριζόντια γραμμή 132 kV απλού κυκλώματος με τρεις αγωγούς (περίπτωση 1 σχήμα 2.4.2). Το μέσο ρεύμα στους αγωγούς είναι 482 A με μια μικρή ανομοιομορφία μεταξύ των φάσεων (485, 475 και 488 για τις φάσεις R, S και T αντίστοιχα).

Το σχήμα 2.4.5 δείχνει την εγκάρσια κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε ύψος 1m για δύο οριζόντιες γραμμές η μία δίπλα στην άλλη (σχήμα 2.4.3). Το ρεύμα της αριστερής γραμμής είναι 246 A ενώ της δεξιάς 226 A.

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 2.4.4, 2.4.5 τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι σε συμφωνία με μετρήσεις της βιβλιογραφίας. Επίσης οι δύο μέθοδοι προσομοίωσης (αγώγιμο και μη αγώγιμο έδαφος) διαφέρουν κατά μέσο όρο μόνο 0.0628% για την περίπτωση 1 και 0.0164% για την περίπτωση 2. Συνεπώς για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές η επίδραση της αγωγιμότητας του εδάφους μπορεί να αγνοηθεί.



Σχήμα 2.4.4: Μαγνητικό πεδίο σε ύψος $y=1\text{m}$ για την περίπτωση 1 που έχει προκύψει από μέτρηση και θεωρητικό υπολογισμό. Οι ρευματοφόροι αγωγοί είναι τοποθετημένοι σε ύψος 12.12m από το έδαφος.



Σχήμα 2.4.5 : Μαγνητικό πεδίο σε ύψος $y=1$ m για την περίπτωση 2 που προέκυψε από μετρήσεις.

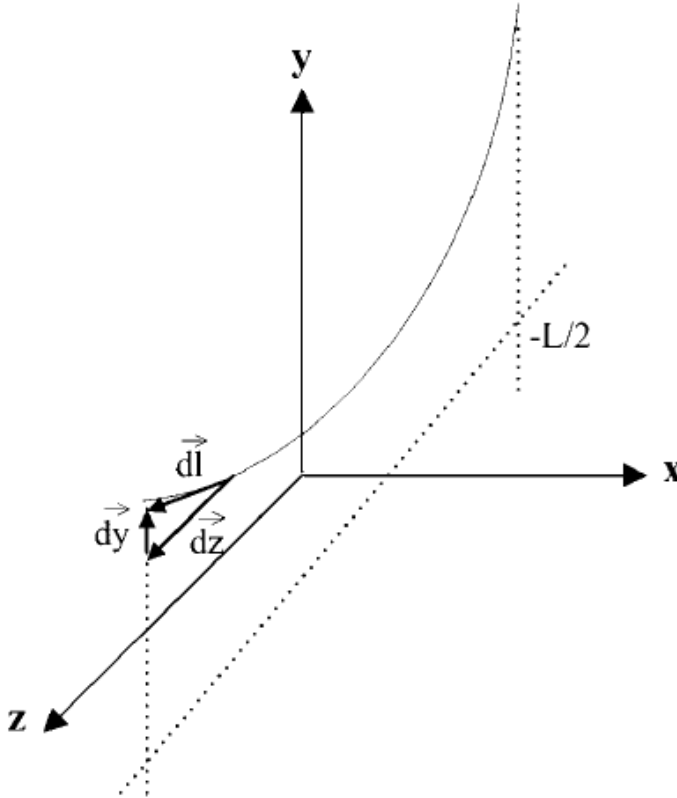
2.4.1.5 Μαγνητικό πεδίο εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψιν το βέλος κάμψης

Στην πραγματικότητα οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν λόγω του βάρους τους αλυσοειδές (κοίλο) σχήμα. Οι εκφράσεις του μαγνητικού πεδίου που προέκυψαν στη παράγραφο 2.4.1.3 δεν το λαμβάνουν αυτό υπόψιν τους. Σε αυτή την παράγραφο υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από εναέριους αγωγούς λαμβάνοντας υπόψιν το βέλος κάμψης.

Το αλυσοειδές σχήμα ενός αγωγού i τοποθετημένου στο επίπεδο $y-z$ δίνεται από τη σχέση:

$$y_i = a \cosh\left(\frac{z_i}{a}\right) + C \quad (2.10)$$

Όπου a και C σταθερές που προσδιορίζονται από τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται σε κάθε αγωγό.



Σχημα 2.4.6: Αγωγός εναέριας γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας με βέλος κάμψης και άνοιγμα L .

Το μαγνητικό πεδίο από έναν εναέριο αγωγό που έχει βέλος κάμψης μπορεί να υπολογιστεί όμοια με τη παράγραφο 2.4.1.3. Το σχήμα 2.4.6 δείχνει σε πλάγια όψη την αλυσοειδή καμπύλη ενός ατάνυστου εναέριου αγωγού.

Από την γεωμετρία του σχήματος 2.4.6 προκύπτει:

$$\vec{dl} = dy_i \hat{j} + dz_i \hat{k} = \sinh\left(\frac{z_i}{a}\right) dz_i \hat{j} + dz_i \hat{k} \quad (2.11)$$

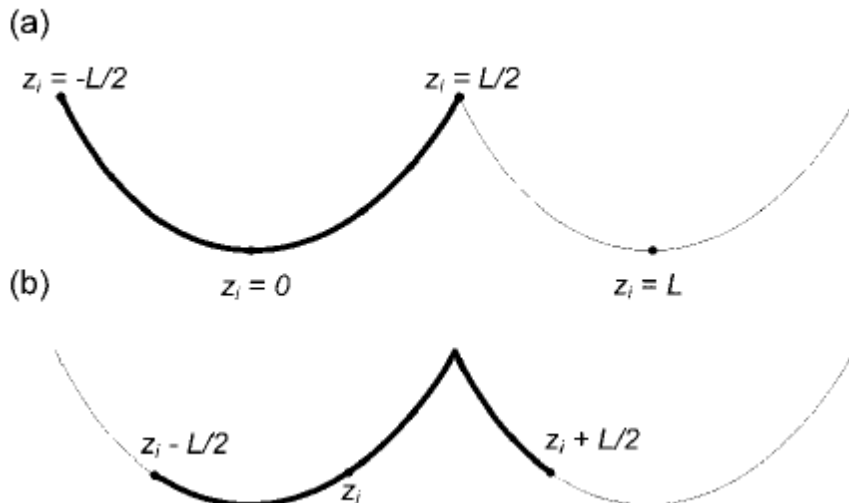
Με εφαρμογή του νόμου των Biot-Savart που περιγράφηκε στη σχέση 2.3 το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από έναν ατάνυστο αγωγό στο επίπεδο του μεσαίου ανοίγματος (το σημείο μεσαίου ανοίγματος του αγωγού έχει το μικρότερο ύψος από το έδαφος) δίνεται από τις σχέσεις:

$$B_{i,x} = \frac{\mu_0 I_i \varphi^\circ}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\sinh(z_i/a)(z - z_i) - (y - y_i)}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{3/2}} dz_i$$

$$B_{i,y} = \frac{\mu_0 I_i \varphi^\circ}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{(x - x_i)}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{3/2}} dz_i \quad (2.12)$$

$$B_{i,z} = \frac{\mu_0 I_i \varphi^\circ}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{-\sinh(z_i/a)(x - x_i)}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{3/2}} dz_i$$

όπου (x_i, y_i, z_i) οι συντεταγμένες του αγωγού και L η απόσταση μεταξύ δύο στύλων (άνοιγμα).

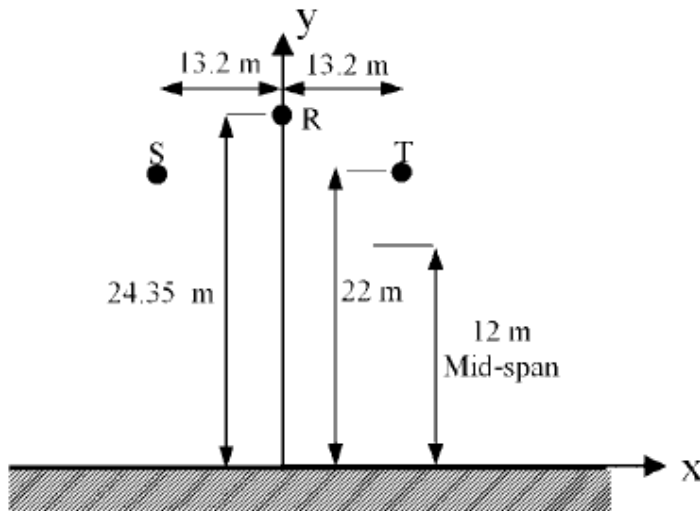


Σχήμα 2.4.7: Ατάνυστος αγωγός ενάριας γραμμής. Η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο στύλων είναι L .

Τα ολοκληρώματα της σχέσης 2.12 προκύπτουν με βάση το σχήμα 2.4.7a και υπολογίζονται αριθμητικά. Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο εκτός αυτό του μεσαίου ανοίγματος υπολογίζεται η επίδραση από τον αγωγό όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.7b, όπου η καμπύλη της δεξιάς πλευράς είναι ίδια με αυτή που περιγράφεται από τη σχέση 2.10 ολισθημένη κατά απόσταση L .

Όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 2.4.1.3 στην περίπτωση που έχουμε n παράλληλους αγωγούς με βέλος κάμψης το μαγνητικό πεδίο θα προκύψει εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας. Επιπλέον η επίδραση ενός αγωγίμου εδάφους μπορεί να μοντελοποιηθεί προσθέτοντας στη σχέση (2.12) το μαγνητικό πεδίο που οφείλεται στον αγωγό είδωλο, όπως παρουσιάστηκε στη παράγραφο 2.4.1.3.

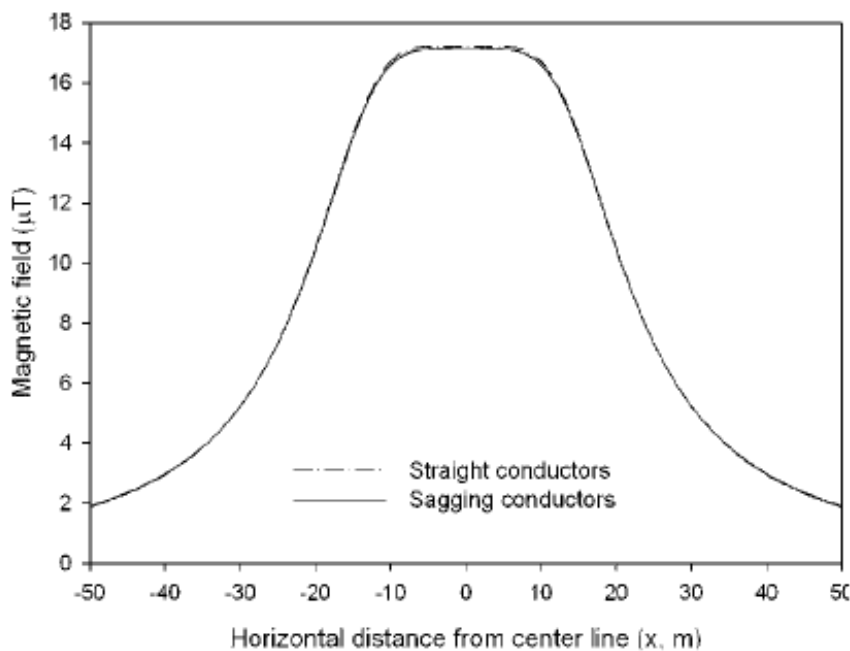
Προκειμένου να συγκριθούν οι δύο μέθοδοι (με και χωρίς βέλος κάμψης) γίνεται εφαρμογή σε μία γραμμή 500 kV, η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.4.8.



Σχήμα 2.4.8: Γεωμετρική διάταξη για την περίπτωση 3

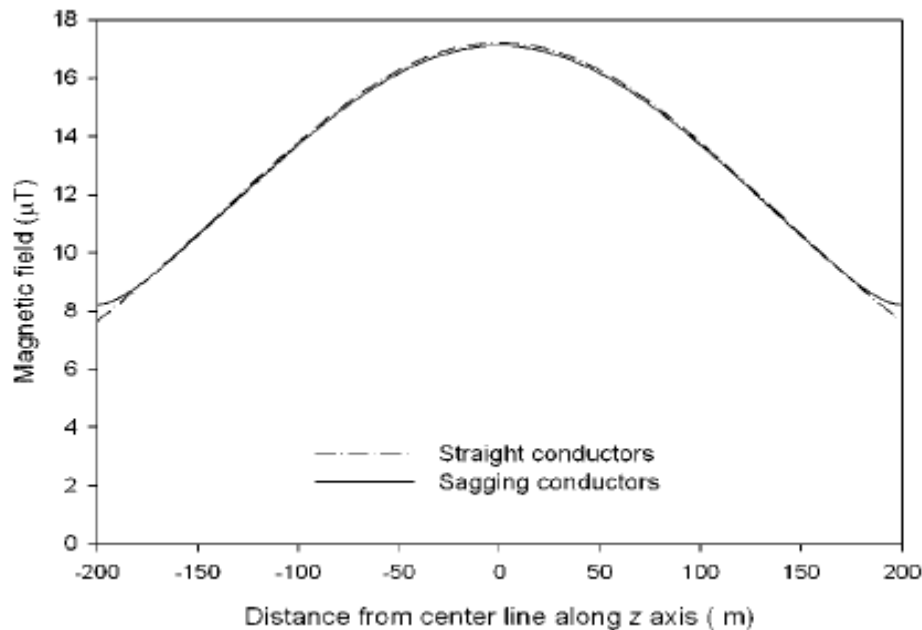
Το ρεύμα ανά φάση είναι 1000 A και το άνοιγμα-απόσταση ανάμεσα σε δύο στύλους-400 m. Για την περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 2.4.8 προκύπτει: $\alpha=2001.66$ m και $C=h_i-\alpha$, όπου h_i το χαμηλότερο ύψος του i -οστού αγωγού πάνω από το έδαφος (ύψος στο μέσο άνοιγμα).

Το σχήμα 2.4.10 δείχνει την πλευρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του x-άξονα για το σημείο του μέσου ανοίγματος για την γραμμή της περίπτωσης 3.



Σχήμα 2.4.9: Πλευρική κατανομή του συνολικού μαγνητικού πεδίου για το σημείο του μέσου ανοίγματος για ύψος $y=1$ m για την περίπτωση 3.

Το σχήμα 2.4.10 δείχνει την διαμήκη κατανομή του συνολικού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα z για ύψος $y=1$ m για την περίπτωση 3 του σχήματος 2.4.9.



Σχήμα 2.4.10: Διαμήκης κατανομή του συνολικού μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του z-άξονα ($x=0\text{m}$) για ύψος $y=1\text{m}$ για την περίπτωση 3

Όπως προκύπτει από τα σχήματα 2.4.9 και 2.4.10 η επίδραση του αλυσοειδούς (κοίλου) σχήματος των αγωγών (βέλος κάμψης) είναι παρα πολύ μικρή. Το μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από τις δύο μεθόδους υπολογισμού, με και χωρίς βέλος κάμψης αγωγού, είναι σχεδόν το ίδιο. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στα σημεία ενδιαφέροντος στις περισσότερες γραμμές τα πειραματικά σφάλματα των μετρήσεων μπορεί να είναι μεγαλύτερα από τις διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων.

2.4.1.6 Θεωρητικός υπολογισμός μαγνητικού πεδίου συνεστραμμένου τριφασικού καλωδίου.

Η συστροφή των αγωγών-φάσεων χρησιμοποιείται συχνά στη μέση και στη χαμηλή τάση. Για παράδειγμα συνεστραμμένα καλώδια χρησιμοποιούνται πολλές φορές στις εισόδους/εξόδους μετασχηματιστών χαμηλής τάσης και για τη σύνδεση ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών σταθμών με το δίκτυο διανομής.

Ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου από συνεστραμμένο καλώδιο τριών αγωγών στους οποίους ρέει τριφασικό ρεύμα είναι απαραίτητος για την εκτίμηση της επίδρασης του σε σημεία ενδιαφέροντος και επίσης για τον υπολογισμό της απόστασης που αντιστοιχεί στο μέγιστο όριο της ενεργού τιμής της μαγνητικής επαγωγής. Για αυτό το σκοπό δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ο απλός υπολογισμός που βασίζεται στην υπόθεση των ευθύγραμμων, παράλληλων και απείρου μήκους αγωγούς. Ο ακριβής τύπος περιλαμβάνει μία σειρά απείρων όρων από τροποποιημένες Bessel συναρτήσεις πρώτου και δευτέρου είδους και των παραγώγων τους σε σύστημα αναφοράς με κυλινδρικές συντεταγμένες. Στην βιβλιογραφία δίνεται επίσης ένας προσεγγιστικός τύπος για αποστάσεις συγκρίσιμες με το βήμα του έλικα και δίνει αποτελέσματα σχετικά κοντά με τον ακριβή τύπο για αποστάσεις μεγαλύτερες του 1 m από τον άξονα του έλικα και χρησιμοποιείται στην πραγματικότητα συχνά σε αυτές τις αποστάσεις. Από την άλλη πλευρά όσο το σημείο του πεδίου πλησιάζει την συνεστραμμένη τριφασική διάταξη, ο προσεγγιστικός τύπος

οδηγεί σε απότομα αυξανόμενα σφάλματα και έτσι εκεί ενδείκνυται ο ακριβής τύπος. Να σημειωθεί ότι αποστάσεις κοντά στους αγωγούς είναι ιδιαίτερης σημασίας σε περιπτώσεις καλωδίων χαμηλής και μέσης τάσης καθότι τέτοια καλώδια, είτε σε εναέριες είτε σε υπόγειες γραμμές, συχνά διασχίζουν πυκνοκατοικημένες περιοχές και κάποιες φορές είναι αγκιστρωμένα πάνω σε κατοικημένα κτίρια. Επιπλέον όταν η ενεργός τιμή του ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή τότε το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο περιορίζεται μόνο σε περιοχές κοντά στους αγωγούς.

Στην συνέχεια θα εξεταστούν πρώτα οι καθιερωμένες, αναλυτικές μεθοδολογίες που είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από μία συνεστραμμένη διάταξη αγωγών, χρησιμοποιώντας τις φράσεις “ακριβής έκφραση” και “προσεγγιστική έκφραση”. Κατόπιν θα παρουσιαστεί ένας προσεγγιστικός τύπος για τον υπολογισμό της ενεργού τιμής της μαγνητικής επαγωγής που είναι πολύ απλούστερος από τον αναλυτικό-σχολαστικό. Παρά την έντονη απλοποίηση, ο προτεινόμενος τύπος αποδεικνύεται ότι είναι μία καλή προσέγγιση για την ενεργό τιμή της μαγνητικής επαγωγής, όπως φαίνεται και από την εφαρμογή του σε ένα συνεστραμμένο καλώδιο.

2.5.1 Ο ακριβής τύπος

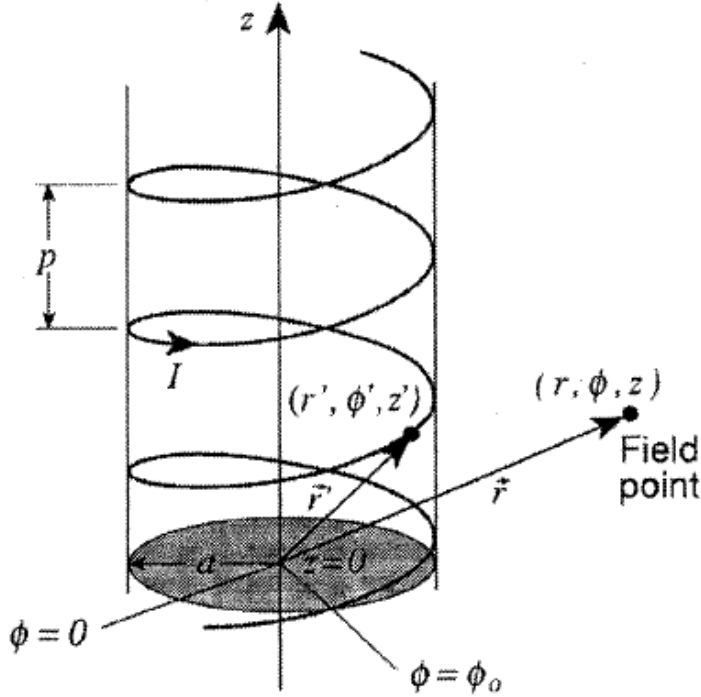
Θα δοθούν ακριβείς εκφράσεις για το στατικό και μερικώς-στατικό πεδίο που δημιουργείται από έλικες ενός, δύο και τριών αγωγών. Το ρεύμα θεωρείται νηματοειδές και η διάταξη απείρως εκτεινόμενη προς τις δύο κατευθύνσεις. Όπως θα δειχτεί οι περιπτώσεις δύο και τριών αγωγών μπορούν να προκύψουν αμέσως και γενικά με τον ίδιο τρόπο από την περίπτωση του ενός αγωγού όταν η λύση αυτή είναι γνωστή.

2.5.2 Έλικας ενός αγωγού.

Με βάση τον νόμο των Biot-Savart το διάνυσμα της πυκνότητας της μαγνητικής ροής από μία πηγή που είναι ελικοειδής γραμμή και διαρρέεται από ρεύμα I δίνεται από το γραμμικό ολοκλήρωμα:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{r}' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad (2.13)$$

κατά μήκος του έλικα,
όπου \vec{r} το μεταβλητό διάνυσμα του πεδίου και \vec{r}' το μεταβλητό διάνυσμα της πηγής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5.1. Στο σχήμα, a είναι η ακτίνα του κυλίνδρου γύρω από τον οποίο θεωρητικά είναι τυλιγμένος ο αγωγός και p είναι το βήμα του έλικα. Χρησιμοποιούνται μονάδες MKSA ούτως ώστε το B να προκύπτει σε Tesla. Η σταθερά μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi \times 10^{-7}$). Το ολοκλήρωμα αυτό δεν μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με έναν άμεσο τρόπο. Παρ' όλα αυτά η συνάρτηση προς ολοκλήρωση μπορεί να εκφραστεί σε σειρές όρων συναρτήσεων Bessel.



Σχήμα 2.5.1: Ελικοειδής γραμμή ρεύματος.

Σε κυλινδρικές συντεταγμένες r, φ, z (βλ. Σχήμα 2.5.2) τα ακτινικά, αζιμουθιακά και αξονικά μέρη B_r, B_φ, B_z αντιστοίχως είναι:

$$B_r = \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} (kr)^2 \sum_{n=1}^{\infty} n I'_n(nka) K'_n(nkr) \sin[n(\varphi - \varphi_0 - kz)]$$

$$B_\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} + \frac{\mu_0 I \alpha}{\pi r^2} (kr) \sum_{n=1}^{\infty} n I'_n(nka) K_n(nkr) \cos[n(\varphi - \varphi_0 - kz)] \quad (2.14)$$

$$B_z = -\frac{\mu_0 I \alpha}{\pi r^2} (kr)^2 \sum_{n=1}^{\infty} n I'_n(nka) K_n(nkr) \cos[n(\varphi - \varphi_0 - kz)]$$

$$\text{με } k = \frac{2\pi}{p}$$

Εδώ τα $I_n(z)$ και $K_n(z)$ είναι οι τροποποιημένες Bessel συναρτήσεις πρώτου και δευτέρου είδους και τάξης n και $I'_n(z)$ και $K'_n(z)$ οι παράγωγοί τους. Η ελικοειδής μορφή του πεδίου είναι προφανής αφού το πεδίο είναι σταθερό σε έλικες όπου το $(\varphi - kz)$ είναι σταθερό.

Η σχέση 2.14 ισχύει για $r > a$. Μια ανάλογη σχέση εφαρμόζεται για $r < a$.

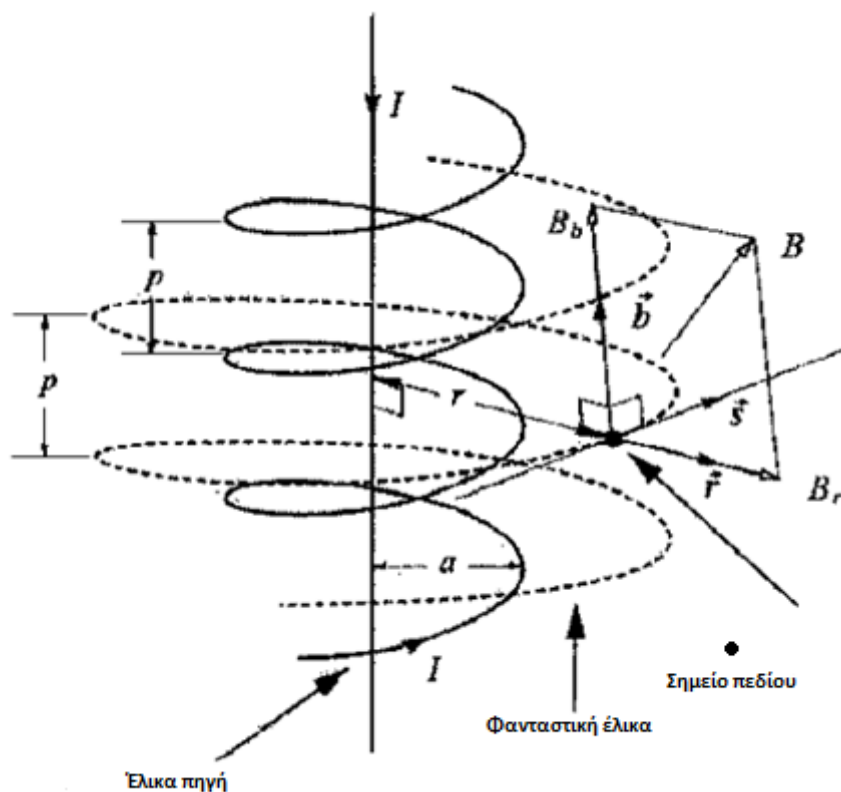
Ορισμένοι περιορισμοί της λύσης αξίζει να σημειωθούν. Για πολύ μεγάλες αποστάσεις τα αθροίσματα των Bessel συναρτήσεων τείνουν προς το μηδέν πολύ πιο γρήγορα από τον πρώτο όρο της σχέσης του B_φ . Έτσι το μοναδικό μέρος πεδίου που απομένει εν τέλει είναι το $B_\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ που είναι το πεδίο ενός απείρου μήκους

ευθύγραμμου αγωγού που διαρρέεται από ρεύμα I . Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να

μειωθεί το πεδίο από έναν μονό αγωγό συστρέφοντάς τον. Το ίδιο πεδίο προκύπτει αν το p τείνει προς το άπειρο εκφυλίζοντας έτσι τον έλικα σε ευθεία γραμμή.

Μια άλλη ακραία περίπτωση είναι όταν το p τείνει στο μηδέν. Εάν θεωρηθεί ότι το I τείνει ταυτόχρονα προς το 0 διατηρώντας το λόγο I/p σταθερό, η κατανομή του ρεύματος θα προσεγγίζει ένα καθαρά αξιμουθιακό επιφανειακό ρεύμα στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Σε αυτή την περίπτωση και τα τρία μέρη του πεδίου εξαφανίζονται, όπως άλλωστε αναμενόταν από την θεωρία των σωληνοειδών πηνίων όπου το πεδίο είναι συγκεντρωμένο στο εσωτερικό του πηνίου.

Αν θεωρήσουμε τώρα ένα φανταστικό έλικα βήματος p μέσα από το σημείο του πεδίου (βλ. Σχήμα 2.5.2) και χρησιμοποιώντας τις ελικοειδείς συντεταγμένες r (ακτινική), s (εφαπτομενική) και b (κάθετη) το πεδίο μπορεί να περιγραφεί μόνο από δύο μέρη, το ακτινικό μέρος B_r και το κάθετο μέρος B_b εφόσον το εφαπτομενικό μέρος B_s είναι μηδέν.



Σχήμα 2.5.2: Οι συνιστώσες του πεδίου που παράγεται από έναν έλικα ενός αγωγού εκφρασμένες σε ελικοειδείς συντεταγμένες.

Τώρα, ακυρώνοντας τον όρο $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ του B_ϕ με την εφαρμογή ενός φανταστικού ρεύματος επιστροφής στον άξονα του κυλίνδρου τα χρονικά εξαρτώμενα μέρη του διανυσματικού πεδίου μπορούν να γραφτούν ως ακολούθως:

$$B_r = B_0 \gamma^2 \sum_{n=1}^{\infty} n I'_n(n\eta) K'_n(n\gamma) \sin[n\Phi] \quad (2.15)$$

$$B_b = -B_0 \gamma \sqrt{1 + \gamma^2} \sum_{n=1}^{\infty} n I'_n(n\eta) K_n(n\gamma) \times \cos(n\Phi) \sin(\omega t) \quad (2.16)$$

όπου $B_0 = \mu_0 I_p a / \pi r^2$, $\eta = ka$, $\gamma = kr$, $\Phi = \varphi - \varphi_0 - kz$

και I_p είναι η μέγιστη τιμή του ημιτονοειδούς ρεύματος $i(t) = I_p \sin \omega t$, γωνιακής συχνότητας ω .

2.5.3 Έλικας δύο αγωγών.

Χωρίς περιορισμό της γενικότητας μπορεί να τεθεί $\varphi_0 = 0$ για τον αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα I και $\varphi_0 = \pi$ για τον αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα $-I$. Το πεδίο για κάθε έναν από τους έλικες δίνεται από την σχέση (2.14) και το συνολικό πεδίο προκύπτει από άθροιση. Έτσι καθώς τα άρτια μέρη θα αυτοακυρωθούν ενώ τα περιττά θα διπλασιαστούν προκύπτει ότι:

$$B_r = 2 \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \gamma^2 \sum_n^{\infty} n I'_n(n\eta) K'_n(n\gamma) \sin[n(\varphi - kz)]$$

$$B_\varphi = 2 \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \gamma \sum_n^{\infty} n I'_n(n\eta) K_n(n\gamma) \cos[n(\varphi - kz)] \quad (2.17)$$

$$B_z = -2 \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \gamma^2 \sum_n^{\infty} n I'_n(n\eta) K_n(n\gamma) \cos[n(\varphi - kz)]$$

$$\text{με } \eta = \frac{2\pi a}{p} \quad \text{και} \quad \gamma = \frac{2\pi r}{p}$$

όπου οι αθροίσεις ισχύουν για $n = 1, 3, 5$. Για ημιτονοειδές ρεύμα, γωνιακής συχνότητας ω , το I αντικαθίσταται με $\hat{I} \sin(\omega t)$ όπου \hat{I} είναι η μέγιστη τιμή.

2.5.4 Έλικας τριών αγωγών.

Οι αγωγοί ονομάζονται με $i=1, 2, 3$ και οι θέσεις τους ορίζονται με φ_i , όπου $\varphi_i = (i-1)2\pi/3$ και την φάση των ρευμάτων με α_i , όπου $\alpha_i = (i-1)2\pi/3$. Τα ρεύματα τότε είναι $I_i = \hat{I} \sin(\omega t + \alpha_i)$. Άθροιση των όρων των τριών πεδίων έχει ως αποτέλεσμα τους συντελεστές μέσα στα αθροίσματα της 2.17.

$$\sum_{i=1}^3 \sin(\omega t + \alpha_i) \sin[n(\varphi - \varphi_i - kz)] = \mp \frac{3}{2} \cos(\omega t \pm n\Phi) \quad (2.18)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sin(\omega t + \alpha_i) \cos[n(\varphi - \varphi_i - kz)] = \frac{3}{2} \sin(\omega t \pm n\Phi)$$

με $\Phi = \varphi - kz$ για $n=1, 2, 4, 5, \dots$ και μηδέν για $n=3, 6, 9, \dots$,

όπου το πάνω πρόσημο εφαρμόζεται για $n=2,5,8,\dots$ και το κάτω για $n=1,4,7,\dots$
Συνεπώς:

$$B_r = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 \hat{I} a}{\pi r^2} \gamma^2 \sum_n (\mp n) I'_n(n\eta) K'_n(n\gamma) \cos(\omega t \pm n\Phi)$$

$$B_\phi = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 \hat{I} a}{\pi r^2} \gamma \sum_n n I'_n(n\eta) K_n(n\gamma) \sin(\omega t \pm n\Phi) \quad (2.19)$$

$$B_z = -\frac{3}{2} \frac{\mu_0 \hat{I} a}{\pi r^2} \gamma^2 \sum_n n I'_n(n\eta) K_n(n\gamma) \sin(\omega t \pm n\Phi)$$

με την προηγούμενη σύμβαση δεικτών και προσήμων. Οι συνιστώσες του πεδίου και το συνολικό δίνονται από τις σχέσεις:

$$B_r = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \gamma^2 \left[\sum_n \sum_m (\mp n)(\mp m) I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) K'_n(n\gamma) K'_m(m\gamma) \cos(\pm n \mp m)\Phi \right]^{1/2}$$

$$B_\phi = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \gamma \left[\sum_n \sum_m n m I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) K_n(n\gamma) K_m(m\gamma) \cos(\pm n \mp m)\Phi \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

$$B_z = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I a}{\pi r^2} \gamma^2 \left[\sum_n \sum_m n m I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) K_n(n\gamma) K_m(m\gamma) \cos(\pm n \mp m)\Phi \right]^{1/2}$$

Όσον αφορά τώρα στις ελικοειδείς συντεταγμένες και χρησιμοποιώντας δευτερεύουσες, βοηθητικές εκφράσεις, μπορούν να προκύψουν, προσθέτοντας τα πεδία, τα ακόλουθα αποτελέσματα για τα χρονικά εξαρτώμενα μέρη των μαγνητικών πεδίων:

$$B_r = \frac{3}{2} \frac{\mu_0 I_p a}{\pi r^2} \gamma^2 \sum_{n=1} (\mp n) I'_n(n\eta) K'_n(n\gamma) \cos(\omega t \pm n\Phi) \quad (2.21)$$

$$B_b = -\frac{3}{2} \frac{\mu_0 I_p a}{\pi r^2} \gamma \sqrt{1+\gamma^2} \sum_{n=1} n I'_n(n\eta) K_n(n\gamma) \sin(\omega t \pm n\Phi) \quad (2.22)$$

με $\Phi = \phi - kz$.

Τα αθροίσματα ισχύουν για $n=1, 2, 4, 5, 7, \dots$, δηλαδή για όλους τους θετικούς ακέραιους εκτός από τους $n=3, 6, 9, \dots$

Τα πάνω πρόσημα ισχύουν για $n=2, 5, 8, \dots$ και τα κάτω για $n=1, 4, 7, \dots$

Οι ενεργές τιμές των επί μέρους πεδίων και του συνολικού δίνονται από τις σχέσεις:

$$B_r = \frac{3}{2} B_0 \gamma^2 \times \left[\sum_n \sum_m (\mp n)(\mp m) I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) K'_n(n\gamma) K'_m(m\gamma) \cos(\pm n \mp m)\Phi \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

$$B_b = \frac{3}{2} B_0 \gamma \sqrt{1 + \gamma^2} \times \left[\sum_n \sum_m nm I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) K_n(n\gamma) K_m(m\gamma) \cos(\pm n \mp m) \Phi \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

$$B = \frac{3}{2} B_0 \gamma^2 \left\{ \sum_n \sum_m nm I'_n(n\eta) I'_m(m\eta) \times \left[(\mp 1)(\mp 1) K'_n(n\gamma) K'_m(m\gamma) + \frac{1 + \gamma^2}{\gamma^2} \right. \right. \\ \left. \left. \times K_n(n\gamma) K_m(m\gamma) \right] \cos(\pm n \mp m) \Phi \right\}^{1/2} \quad (2.25)$$

Οι σχέσεις 2.23-2.25 μπορούν να εφαρμοστούν και στην ειδική περίπτωση της μη συνεστραμμένης διάταξης (με $\eta \rightarrow 0$, $\gamma \rightarrow 0$, $p \rightarrow \infty$) χρησιμοποιώντας την προσέγγιση μικρού ορίσματος για τις συναρτήσεις Bessel

$$I_n(n) = \frac{(n/2)^n}{n!}, \quad K_n(\gamma) = \frac{1}{2} \frac{(n-1)!}{(\gamma/2)^n} \quad (2.26)$$

με $\eta, \gamma \ll 1$

Τελικά:

$$B_r = \frac{3}{2} B_0 \left\{ \sum_n \sum_m \left(\frac{a}{r} \right)^{n+m-2} \frac{1}{4} (\mp 1)(\mp 1) \cos(\pm n \mp m) \Phi \right\}^{1/2} \quad (2.27)$$

$$B_b = \frac{3}{2} B_0 \left\{ \sum_n \sum_m \left(\frac{a}{r} \right)^{n+m-2} \frac{1}{4} \cos(\pm n \mp m) \Phi \right\}^{1/2} \quad (2.28)$$

$$B_b = \frac{3}{2} B_0 \left\{ \sum_n \sum_m \left(\frac{a}{r} \right)^{n+m-2} \frac{1}{4} [(\mp 1)(\mp 1) + 1] \cos(\pm n \mp m) \Phi \right\}^{1/2} \quad (2.29)$$

2.6 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου – γενική μέθοδος για γραμμές μεταφοράς

Το μαγνητικό πεδίο γύρω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ανάλυση δύο διαστάσεων και υποθέτοντας παράλληλες γραμμές μεταφοράς που βρίσκονται πάνω από μια επίπεδη γη. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα συντεταγμένων που βρίσκεται στο σχήμα 1 όπου ο άξονας z είναι παράλληλος με τη γραμμή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου $H_{j,i}$ στο σημείο (x_i, y_i) που βρίσκεται σε απόσταση $r_{i,j}$ από έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα I_i έχει πλάτος

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \quad (2.3)$$

Σε διανυσματική έκφραση

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{\vec{I}_i \times \vec{r}_{j,i}}{2\pi r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\varphi}_{i,j} \quad (2.4)$$

όπου $\varphi_{i,j}$ είναι το διάνυσμα της κατεύθυνσης του γινομένου του διανύσματος ρεύματος γραμμής και του διανύσματος θέσης $r_{i,j}$. Το διάνυσμα αυτό είναι ίσο με

$$\vec{\varphi}_{i,j} = -\frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} \vec{u}_x + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \vec{u}_y \quad (2.5)$$

όπου u_x και u_y είναι τα διανύσματα της κατεύθυνσης του οριζώντιου και κάθετου άξονα αντίστοιχα.

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται μέσω της σχέσης (1.4) αθροίζοντας όλα τα αίτια δημιουργίας του, στην περίπτωσή μας τα ρεύματα των γραμμών μεταφοράς :

$$\vec{H}_j = \sum \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\varphi}_{i,j} \quad (2.6)$$

Για τριφασικές γραμμές μεταφοράς το άθροισμα αυτό έχει προφανώς τρεις όρους. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής ή μαγνητική επαγωγή είναι

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

όπου $\mu=4\pi 10^{-7}$ H/m τόσο για τον αέρα όσο και για τη γη. Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις το μαγνητικό πεδίο κοντά στην περιοχή μιας συμμετρικής τριφασικής γραμμής μεταφοράς υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα ρεύματα των γραμμών μεταφοράς και των γραμμών γης και παραλείποντας τα ρεύματα εδάφους. Αυτά τα ρεύματα διανέμονται στο έδαφος από συμμετρικά τριφασικά συστήματα. Λαμβάνοντας υπόψη και αυτά τα ρεύματα η παραπάνω εξίσωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου γίνεται

$$\vec{H}_j = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\varphi}_{i,j} - \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{2}{\gamma r_{i,j}} \right)^4 \right] \vec{\varphi}_{i,j} \quad (2.8)$$

Ο πρώτος όρος είναι ο ίδιος με την παραπάνω εξίσωση υπολογισμού της έντασης του μαγνητικού πεδίου και είναι αρκετός για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στην περιοχή κοντά στις γραμμές μεταφοράς, περίπου έως απόσταση 100 m. Ο δεύτερος όρος αναπαριστά τον διορθωτικό παράγοντα που λαμβάνει υπόψη τα ρεύματα εδάφους, όπου

$$\gamma = [j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)]^{1/2} \quad (2.9)$$

όπου σ είναι η αγωγιμότητα εδάφους ($\sigma=0,001$ έως $0,02\text{S/m}$ και ϵ είναι η επιτρεπτότητα εδάφους ($\epsilon=8,85 \cdot 10^{-12}$, όμοια με την επιτρεπτότητα αέρα). Τα παραπάνω σημαίνουν ότι και το $r_{i,j}$ είναι μιγαδικός αριθμός :

$$r_{i,j} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j + \frac{2}{\gamma})^2]^{1/2} \quad (2.10)$$

Ο μιγαδικός συντελεστής $\varphi_{i,j}$ δίνεται από την εξίσωση

$$\vec{\varphi}_{i,j} = \left[\frac{y_i + y_j + 2/\gamma}{r_{i,j}} \right] \vec{u}_x + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \vec{u}_y \quad (2.11)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι όταν ληφθεί υπόψη το ρεύμα εδάφους η ένταση του μαγνητικού πεδίου έχει τιμή που δεν είναι πραγματικός αριθμός αλλά μιγαδικός. Αυτό συμβαίνει διότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου H δε βρίσκεται σε φάση με το ρεύμα γραμμής όταν η αντίδραση εδάφους λαμβάνεται υπόψη.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις το συνολικό μαγνητικό πεδίο υπολογίζονται αθροίζοντας όλες τις φάσεις συμπεριλαμβανομένων και των γειώσεων. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας μιγαδικός αριθμός που μπορεί να χαρακτηριστεί από τις συνιστώσες του κατά τους x και y άξονες :

$$H_x = H_{x,r} + jH_{x,i} \quad (2.12)$$

$$H_y = H_{y,r} + jH_{y,i} \quad (2.13)$$

Η αλλιώς ο αριθμός μπορεί να παρασταθεί από το πραγματικό και φανταστικό του μέρος :

$$\vec{H}_r = H_{x,r} \vec{u}_x + H_{y,r} \vec{u}_y \quad (2.14)$$

$$\vec{H}_i = H_{x,i} \vec{u}_x + H_{y,i} \vec{u}_y \quad (2.15)$$

2.7 Οι αρχές πρόληψης και προφύλαξης δεν παραβιάζονται όταν τηρούνται τα όρια ασφαλείας

Η μη υπέρβαση των ορίων ασφαλείας ικανοποιεί τις αρχές προφύλαξης και πρόληψης της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης . Σε σχετική εργασία «Σχέδιο πλαισίου για την ανάπτυξη μέτρων πρόληψης σε περιοχές επιστημονικής αβεβαιότητας» της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας

αναφέρεται ότι «Οι οδηγίες που καθορίζουν τα ποσοτικά όρια για την έκθεση του ανθρώπου σε περιβαλλοντικούς παράγοντες θεσπίζονται μόνο βάσει συνεπών, αναπαραγωγικών δεδομένων, τα οποία έχουν επιβεβαιωθεί από διαφορετικά εργαστήρια και καθορίζουν σαφώς τα επίπεδα έκθεσης σε φυσικούς, βιολογικούς ή χημικούς παράγοντες που θεωρούνται επιβλαβείς για τον άνθρωπο. Επιπρόσθετα, τα όρια έκθεσης γενικώς εμπεριέχουν συντελεστές ασφάλειας, με τους οποίους λαμβάνονται προληπτικά μέτρα έναντι της αβεβαιότητας αναγνωρισμένων κατωφλίων για εξακριβωμένες επιδράσεις. Τέτοιες προσεγγίσεις είναι καθοριστικής σημασίας για το πλαίσιο πρόληψης της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας. Οι οδηγίες δεν θα πρέπει να υπονομεύονται από επιπρόσθετες αυθαίρετες μειώσεις των ορίων της έκθεσης στο όνομα της «πρόληψης», καθώς αυτό θα υποτιμούσε την επιστημονική τους αξιοπιστία».

Συνεπώς, επειδή οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δίνονται γενικά από υπολογισμούς και μετρούνται είναι μικρότερες των ορίων ασφαλείας, δεν υπάρχει καμία παράβαση των αρχών πρόληψης και προφύλαξης.

Πέραν των ανωτέρω αναφερόμενων, στη Σύσταση του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης του έτους 1999 υιοθετούνται τα όρια κατά I.C.N.I.R.P. μετά την επικύρωσή τους από την Επιστημονική Συντονιστική Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Στη Σύσταση αναφέρεται: «Οι βασικοί αυτοί περιορισμοί και τα επίπεδα αυτά αναφοράς για τον περιορισμό της έκθεσης καταρτίστηκαν ύστερα από διεξοδική ανασκόπηση όλης της δημοσιευμένης επιστημονικής βιβλιογραφίας». Μεμονωμένες μελέτες είναι ανεπαρκείς για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Απαιτείται η στάθμιση όλων των σχετικών με την ενδεχόμενη επίδραση των πεδίων στην υγεία μελετών (εργαστηριακών, δοσιμετρικών, επιδημιολογικών), βάσει διεθνώς ποιοτικών κριτηρίων, από ειδικούς επιστημονικούς φορείς με διεπιστημονική σύνθεση, όπως είναι η I.C.N.I.R.P.. Η τελευταία αξιολόγηση όλων των σχετικών επιστημονικών εργασιών από την ICNIRP ολοκληρώθηκε και δημοσιεύτηκε το 2003 σε ένα τόμο εκτάσεως 500 περίπου σελίδων. Από την αξιολόγηση αυτή δεν προέκυψαν επιπτώσεις στην υγεία βάσει των οποίων θα έπρεπε να αναθεωρηθούν τα όρια ασφαλείας του 1998.

2.8 Τεχνητά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία

Τα τεχνητά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία δημιουργούνται από τον άνθρωπο και εμφανίστηκαν εδώ και περίπου έναν αιώνα, σε αντίθεση με τα φυσικά και βιολογικά πεδία τα οποία υπήρχαν από καταβολής κόσμου. Στις επόμενες υποπαραγράφους, δίνονται μετρήσεις τεχνητών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που έχουν διεξαχθεί τόσο στην Ελλάδα όσο και σε άλλες χώρες. Οι μετρήσεις αυτές είναι χρήσιμες προκειμένου να έχει κανείς μια γενική εικόνα για την τάξη μεγέθους των τεχνητών και ηλεκτρικών πεδίων στην πράξη.

2.8.1 Μετρήσεις στον ελλαδικό χώρο

2.8.1.1 Μετρήσεις της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας στο Κρυονέρι

Από το Κρυονέρι, στο νομό Αττικής, διέρχονται γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου κοινής ωφελείας (δημόσιος πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας) των 150 kV και των 400 kV. Μετρήσεις της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας έδειξαν ότι :

Η μαγνητική επαγωγή B είναι από 19,5 έως 106 φορές μικρότερη τιμή από το όριο ασφαλείας των 100 μ T.

Η ηλεκτρική πεδιακή ένταση E είναι από 2,7 έως 42,8 φορές μικρότερη τιμή από το όριο ασφαλείας των 5 kV/m.

2.8.1.2 Μετρήσεις του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Ξάνθης

Μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής B και της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης E έγιναν εντός υποσταθμών (ΥΣ) μέσης τάσης (20/0,4 kV), όπου έχει πρόσβαση μόνο το τεχνικό προσωπικό της ΔΕΗ, και όλες οι τιμές βρέθηκαν μικρότερες των ορίων για επαγγελματική απασχόληση. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι για το ηλεκτρικό πεδίο στο χώρο των Μετασχηματιστών (ΜΣ), η τιμή δεν υπερβαίνει τα 3 V/m , ενώ η αντίστοιχη τιμή στο χώρο των πινάκων δεν υπερβαίνει τα 2 V/m. Οι τιμές αυτές είναι αμελητέες σε σχέση με τα 5 και 10 kV/m που είναι τα όρια κατά ICNIRP. Σε ότι αφορά το μαγνητικό πεδίο, έγιναν οι μετρήσεις από τις οποίες οι μέγιστες που καταγράφηκαν για κάθε υποσταθμό, παρουσιάζονται στον πίνακα 1.7.1

Ονομαστική ισχύς Υποσταθμού (kVA)	B (μ T)
250	24
400	81
630	466
2×400	255
2×630	429

Πίνακας 2.8.1 : Τιμές μαγνητικής επαγωγής (οι μέγιστες που καταγράφηκαν κάθε φορά) σε διάφορους Υποσταθμούς της ΔΕΗ στην Ξάνθη.

Από τις παραπάνω μετρήσεις δεν προκύπτει σε καμία περίπτωση, για κανέναν ΥΣ υπέρβαση των ορίων για επαγγελματικά απασχολούμενους και συνεπώς δεν προκύπτει παράβαση των αρχών πρόληψης και προφύλαξης. Ωστόσο επειδή η καταγραφή των μετρήσεων δεν έγινε σε συνθήκες ονομαστικής φόρτισης, θεωρήθηκε σκόπιμη μια υπολογιστική εκτίμηση του μαγνητικού πεδίου και για τις συνθήκες αυτές. Η ονομαστική ισχύς του ΥΣ είναι ίση με την ονομαστική ισχύ των ΜΣ ισχύος. Ακόμη όμως και με μια τέτοια εκτίμηση δεν θα προέκυπταν παρεκκλίσεις από το επαγγελματικό όριο κατά ICNIRP. Σύμφωνα με την εργασία αυτή, μόνο για τον ΥΣ 630kVA θα μπορούσε να προκύψει σημαντική υπέρβαση του επαγγελματικού ορίου, αλλά και αυτό σε συνθήκες πλήρους

φορτίου, γεγονός που μπορεί να θεωρηθεί σπάνιο και χωρίς διάρκεια. Γι' αυτό ακόμη και μια τέτοια εκτίμηση (όχι μέτρηση σε πραγματικές συνθήκες) δεν συνιστά ουσιαστικά υπέρβαση των ορίων.

Κάτι που πιθανόν χρειάζεται διευκρίνιση στα στοιχεία του πίνακα είναι ότι η μαγνητική επαγωγή B στους ΥΣ με δύο ΜΣ (2x400kVA και 2x630kVA), μετρήθηκε κοντά στον έναν από τους δύο ΜΣ αφού αυτοί δεν βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Για το λόγο αυτό, ενώ η ονομαστική ισχύς του ΥΣ π.χ 2x400kVA είναι μεγαλύτερη συνολικά από την ονομαστική ισχύ του ΥΣ 630kVA, το μέγιστο μαγνητικό πεδίο που μετρήθηκε στον ΥΣ με τους δύο παράλληλους ΜΣ είναι μικρότερο από το αντίστοιχο στον ΥΣ με τον έναν ΜΣ.

2.8.1.3 Μετρήσεις του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών

1) Υπολογιστικές διερευνήσεις και μετρήσεις στην περιοχή Κρουονερίου

Στην περιοχή Κρουονερίου, όπου διέρχονται οι προϋπάρχουσες γραμμές των 150 kV και 400 kV καθώς και η νέα γραμμή των 400 kV, έχουν γίνει εκτενέστερες υπολογιστικές διερευνήσεις. Έγιναν επίσης μετρήσεις από ομάδα με τη σύμπραξη ειδικών επιστημών υγείας. Οι υπολογισμοί από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών έγιναν σε ύψος:

1,7 m από το έδαφος (ύψος ανθρώπου),

5,2 m από το έδαφος (εξώστης ύψους 3,5 m + άνθρωπος 1,7 m), και

9,7 m από το έδαφος (ύψος κτίσματος 8,0 m + άνθρωπος 1,7 m).

Με την ισχύουσα σήμερα διάταξη των αγωγών οι μέγιστες δυνατές τιμές (κατά την ταυτόχρονη λειτουργία όλων των γραμμών με το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας) έχουν ως ακολούθως:

Για ύψος 1,7 m από το έδαφος: $B=4,2 \mu\text{T}$ και $E=1,4 \text{ kV/m}$.

Για ύψος 5,2 m από το έδαφος: $B=6,0 \mu\text{T}$ και $E=1,9 \text{ kV/m}$.

Για ύψος 9,7 m από το έδαφος: $B=11,0 \mu\text{T}$ και $E=3,5 \text{ kV/m}$.

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής είναι πολύ μικρότερες από το όριο ασφαλείας των 100 μT . Επίσης, οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρότερες από το όριο ασφαλείας των 5 kV/m.

Οι τιμές που μετρήθηκαν (από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών (με σύμπραξη ειδικών επιστημόνων υγείας) είναι πολύ μικρότερες από τις παραπάνω μέγιστες τιμές, δεδομένου ότι οι υπολογισμοί έγιναν με δυσμενέστερες παραδοχές.

2) Υπολογιστικές διερευνήσεις στο περιβάλλον του Κ.Υ.Τ. (Κέντρο Υψηλής Τάσης) Αργυρούπολης-Ηλιούπολης

Οι υπολογισμοί έγιναν στα πλαίσια της μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος λειτουργίας ανά φάση κάθε κυκλώματος (1000 A). Τα αποτελέσματα δίνονται περιληπτικά στον πίνακα 2.8.2.

Θέση υπολογισμού	B [μT]	E [kV/m]
Στο όριο περιφραξής του σχολείου	0,23	0,016
Στο όριο περιφραξής του Κ.Υ.Τ.	0,27	0,020
Κάτω από τις γραμμές, στο όριο περιφραξής του ΚΥΤ Αργυρούπολης (περιοχή εκτός σχεδίου)	10,2	2,570

Πίνακας 2.8.2 : Υπολογιστικές διερευνήσεις στο περιβάλλον κέντρου υψηλής τάσης (ΚΥΤ) Αργυρούπολης-Ηλιούπολης (κατά τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων). Οι B και E είναι οι μεγαλύτερες τιμές της μαγνητικής επαγωγής και της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης

Από τα αποτελέσματα του πίνακα προκύπτει ότι οι υπολογιζόμενες τιμές είναι πολύ μικρότερες των ορίων ασφαλείας που είναι 100 μT και 5 kV/m και συνεπώς δεν υπάρχει καμία παράβαση των αρχών πρόληψης και προφύλαξης.

2.8.1.4 Μετρήσεις από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

1) Εκτίμηση των πεδιακών εντάσεων στο Κ.Υ.Τ. Αμαρουσίου (κατά την κατασκευή του)

Η μαγνητική επαγωγή είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, όπως στο παρόμοιο Κ.Υ.Τ. Παγκρατίου δηλ. μερικά μόνο μT .

2) Υπολογιστική διερεύνηση για το υπόγειο καλώδιο των 150 kV στο Ολυμπιακό Χωριό

Οι τιμές που υπολογίστηκαν για λειτουργία υπό ονομαστικό ρεύμα (μέγιστο ρεύμα λειτουργίας) των αγωγών είναι: B = 12 μT και E \approx 0 kV/m.

3) Μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορες εγκαταστάσεις της Δ.Ε.Η που δίνονται στον πίνακα 1.7.3.

Περιοχή μέτρησης	B [μ T]
Κάτω από εναέριες γραμμές μέσης τάσης (20 kV)	0,2 -1,1
Κάτω από εναέριες γραμμές χαμηλής τάσης (400 V, 230 V)	0,2 -2,4
Γραμμές χαμηλής ή μέσης τάσης στο έδαφος	0,15 -1,7
ΚΥΤ Παγκρατίου 150 kV/20 kV	2,0-5,2
Κάτω από γραμμές υψηλών τάσεων (400 kV 150 kV)	1-2

Πίνακας 2.8.3: Μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορες εγκαταστάσεις της ΔΕΗ

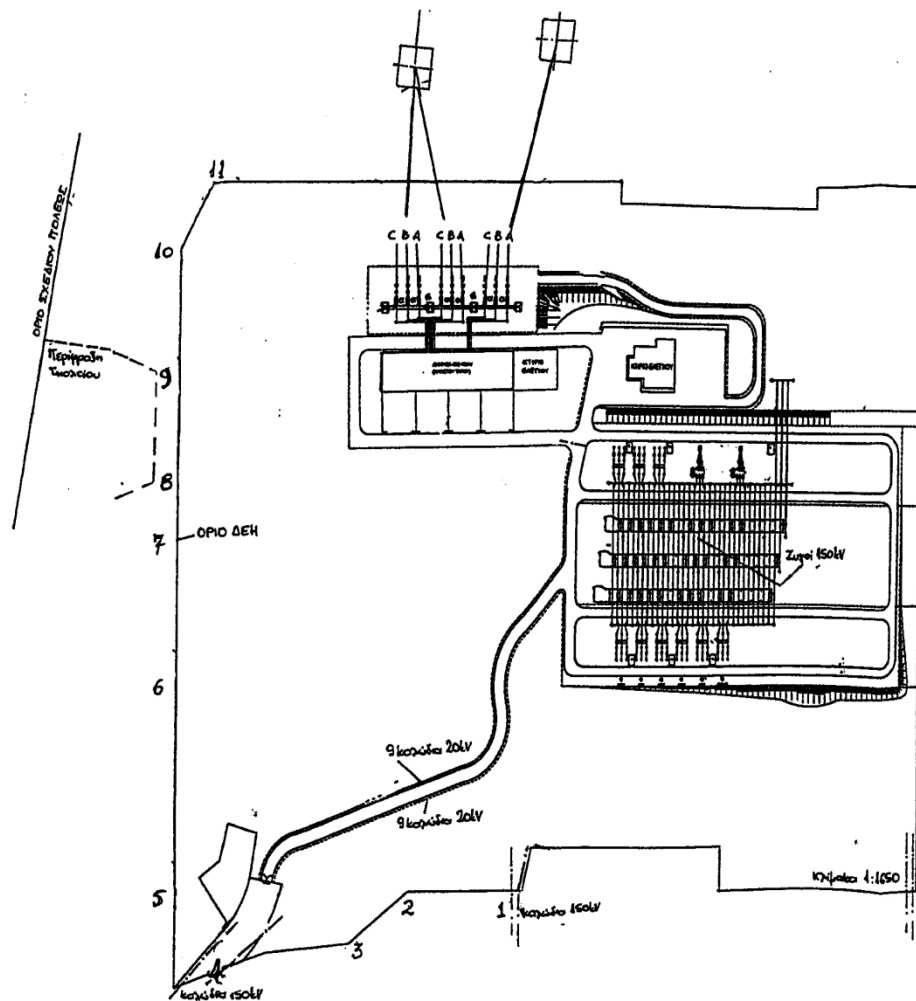
4) Μετρήσεις στο περιβάλλον του Κ.Υ.Τ. Αργυρούπολης-Ηλιούπολης

Οι μετρήσεις έγιναν σε ύψος $y=1,7$ m (ύψος μέσου ανθρώπου από το έδαφος). Οι θέσεις μέτρησης επελέγησαν στις πιο κοντινές προσιτές θέσεις του κοινού στην επίμαχη εγκατάσταση. Οι θέσεις αυτές σημειώνονται στο απλοποιημένο σχέδιο του σχήματος με αριθμούς (από 1 έως 11). Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 1.7.4) αφορούν την μέση τιμή ανά θέση μέτρησης για την μαγνητική επαγωγή (\bar{B}) και την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (\bar{E}). Οι μετρήσεις έγιναν επί 7 ημέρες την ίδια περίπου ώρα 3 φορές την ημέρα (ώρα 08.00, 13.00 και 20.00)

Σημείο μέτρησης	\bar{B} [μ T]	\bar{E} [kV/m]
1	5,500	μικρότερο από 0,001
2	8,500	μικρότερο από 0,001
3	9,500	μικρότερο από 0,001
4	7,500	μικρότερο από 0,001
5	0,000	0,000
6	0,000	0,000
7	0,000	0,000
8	0,000	0,000
9	0,000	0,000
10	0,000	0,000
11	0,000	0,000

Πίνακας 2.7.4: Μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής (\bar{B}) και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (\bar{E}) στις πιο κοντινές προσιτές θέσεις του κοινού στο κέντρο υψηλής τάσης (Κ.Υ.Τ). Αργυρούπολης- Ηλιούπολης

Από όλα τα ανωτέρω αποτελέσματα των υπολογιστικών διερευνήσεων και μετρήσεων διαπιστώνεται ότι οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής είναι εξαιρετικά χαμηλές συγκριτικά με το όριο ασφαλείας των 100 μ T. Επίσης, οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ μικρότερη από το όριο ασφαλείας των 5 kV/m. Συνεπώς, σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην §1.2 η λειτουργία γραμμών και Κ.Υ.Τ. των 400 kV και 150 kV δεν έχει επιδράσεις στην υγεία των κατοίκων.



Σχήμα 2.8.5: Απλοποιημένο σχέδιο της περιοχής του κέντρου υψηλής τάσης (Κ.Υ.Τ) Αργυρούπολης-Ηλιούπολης. 1 έως 11: Θέσεις μέτρησης. Οι θέσεις 5 έως 11 αφορούν την κατοικημένη περιοχή.

2.8.2 Μετρήσεις σε χώρες εκτός Ελλάδας

2.8.2.1 Μετρήσεις σε γραμμές μεταφοράς και κέντρα υψηλής τάσης (Κ.Υ.Τ)

1) Μετρήσεις ηλεκτρικού πεδίου

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι πηγές ηλεκτρικών πεδίων στο περιβάλλον. Γενικά η πεδιακή ένταση E εξαρτάται κυρίως από την τάση λειτουργίας και αυξάνεται όταν η τάση αυξάνεται. Επίσης εξαρτάται από την απόσταση από τη γραμμή, την διάταξη, το μέγεθος και τον αριθμό των αγωγών. Τιμές μερικών kV/m μπορεί να εμφανιστούν κάτω από γραμμές μεταφοράς που λειτουργούν σε τάση μεγαλύτερη των $100kV$. Παρόλα αυτά, στην πράξη στις περισσότερες θέσεις κοντά στις γραμμές, το πεδίο είναι χαμηλότερο. Τα πεδία πέφτουν ραγδαία με την απόσταση και για παράδειγμα ένα πεδίο μερικών εκατοντάδων V/m σε απόσταση δεκάδων μέτρων από έναν πυλώνα, γίνεται πεδίο μερικών δεκάδων V/m σε απόσταση περίπου $100m$. Στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης το ηλεκτρικό πεδίο δεν ξεπερνά συνήθως μερικές εκατοντάδες V/m .

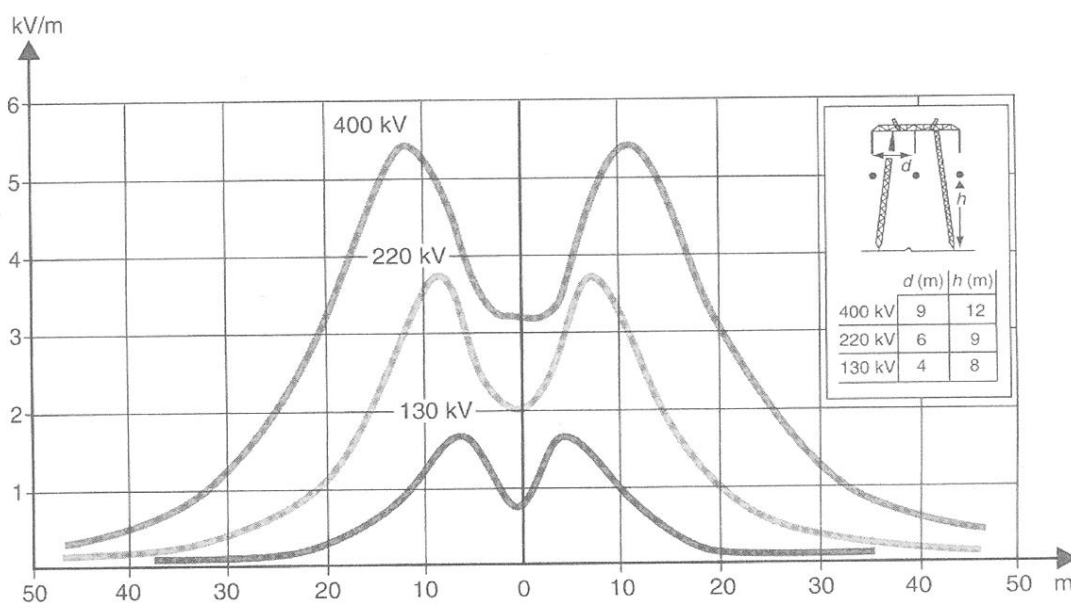
Πηγή	E [kV/m]
Γραμμές μεταφοράς 400kV στη Μεγάλη Βρετανία	11 (1)
Γραμμές μεταφοράς 275kV στη Μεγάλη Βρετανία	6 (0,2)
Γραμμές μεταφοράς 132kV στη Μεγάλη Βρετανία	2 (0,05)
Γραμμές μεταφοράς 500kV (ΗΠΑ)	7 (1)
Γραμμές μεταφοράς 130kV (ΗΠΑ)	2 (0,3)
Γραμμές μεταφοράς 115kV (ΗΠΑ)	1 (0,07)

Πίνακας 2.8.6: Μετρήσεις ηλεκτρικής πεδιακής έντασης E σε γραμμές μεταφοράς της Μεγάλης Βρετανίας (50Hz) και των ΗΠΑ (60Hz). Οι τιμές στην παρένθεση είναι σε απόσταση 25-30m από τη γραμμή

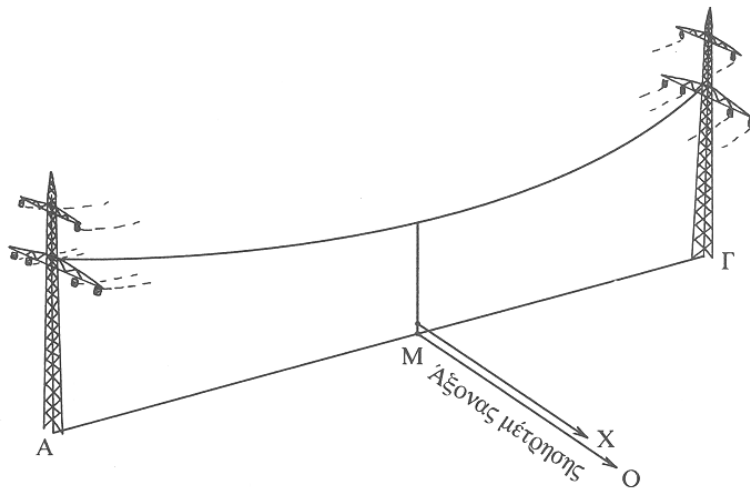
Τα παραπάνω στοιχεία από γραμμές υψηλής τάσης στη Βρετανία και στις ΗΠΑ, έχουν προκύψει αντίστοιχα από τον εθνικό φορέα ραδιοπροστασίας στη Βρετανία (National Radiological Protection Board/NRPB) και από το εθνικό ίδρυμα περιβαλλοντικών επιστημών υγείας στις ΗΠΑ (National Institute of Environmental Health Sciences/ NIEHS).

Σε άλλη εργασία που έγινε σε KYT 380/130 kV στην Ιταλία οι περισσότερες μετρήσεις ήταν μικρότερες από το όριο των 10 kV/m και μάλιστα κάποιες φορές ήταν αμελητέες. Μόνο σε μια μικρή περιοχή πλησίον του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (π.χ ΜΣ, πίνακες) μετρήθηκαν τιμές άνω των 10kV/m.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από εργασία που παρουσιάστηκε σε σεμινάριο που οργάνωσαν από κοινού στη Γερμανία ο WHO, ο ICNIRP και ο αντίστοιχος γερμανικός φορέας BfS (Bundesamt für Strahlungsschutz). Οι μετρήσεις φαίνονται στην γραφική παράσταση του σχήματος 1.7.7, ενώ επίσης δίνονται τα ύψη των αγωγών από το έδαφος και οι αποστάσεις μεταξύ τους για γραμμές 400 kV, 220 kV και 130 kV. Στο σχήμα φαίνεται ο άξονας μέτρησης.



Σχήμα 2.8.7: Ηλεκτρικό πεδίο σε τρεις διαφορετικές τάσεις γραμμών μεταφοράς, ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο της γραμμής



Σχήμα 2.8.8: Άξονας μέτρησης. Η θέση $x=0$ είναι στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο πυλώνων

Από όλες τις παραπάνω εργασίες φαίνεται ότι στην πράξη οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου δεν υπερβαίνουν τα όρια ασφαλείας κατά ICNIRP. Ακόμη και αν συμβαίνει κάτι τέτοιο, εντοπίζεται σε περιορισμένο χώρο. Σε κάθε περίπτωση η αύξηση της απόστασης επιφέρει σημαντική μείωση στο πεδίο.

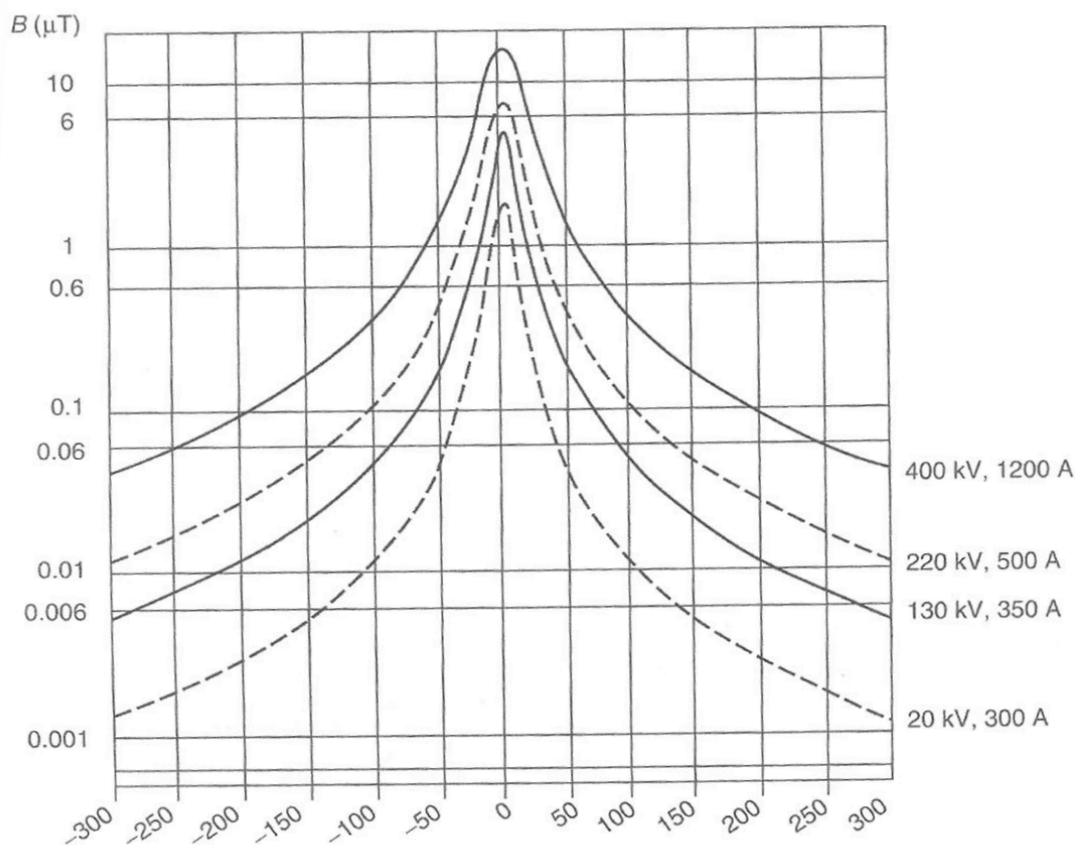
2) Μετρήσεις μαγνητικού πεδίου

Γενικά οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν πηγές μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον. Η μαγνητική επαγωγή (B) είναι ανάλογη του ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από τον αγωγό. (νόμος Ampere). Επίσης είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ των αγωγών (όσο πιο κοντά είναι οι αγωγοί, τόσο πιο μικρό είναι το σκεδαζόμενο μαγνητικό πεδίο, όσο πιο μακριά είναι οι αγωγοί τόσο μεγαλώνει το σκεδαζόμενο μαγνητικό πεδίο). Στην πράξη κάτω από γραμμές μεταφοράς η μαγνητική επαγωγή είναι από μερικά μT μέχρι μερικές δεκάδες μT . Στον επόμενο πίνακα 1.7.9 δίνονται ενδεικτικές τιμές μαγνητικού πεδίου σε γραμμές μεταφοράς της Μεγάλης Βρετανίας και των ΗΠΑ που έγιναν αντίστοιχα από τους φορείς NRPB, UK Electricity Association και NIEHS.

Πηγή	B [μ T]
Γραμμές μεταφοράς 400kV στη Μεγάλη Βρετανία (Ρεύμα 2kA)	40 (8)
Γραμμές μεταφοράς 275kV στη Μεγάλη Βρετανία (Ρεύμα 1kA)	22 (4)
Γραμμές μεταφοράς 132kV στη Μεγάλη Βρετανία	7
Γραμμές διανομής 33kV στη Μεγάλη Βρετανία	7
Γραμμές διανομής 11kV στη Μεγάλη Βρετανία	7
Γραμμές διανομής 415V στη Μεγάλη Βρετανία	1
Υπόγειο Καλώδιο 400kV στη Μεγάλη Βρετανία	200 (στο έδαφος) 10 (σε απόσταση 5m)
KYT στη Μεγάλη Βρετανία 400/275 kV	10
Γραμμές μεταφοράς 500kV (ΗΠΑ)	9 (3)
Γραμμές μεταφοράς 130kV (ΗΠΑ)	6 (2)
Γραμμές μεταφοράς 115kV (ΗΠΑ)	3 (0,7)

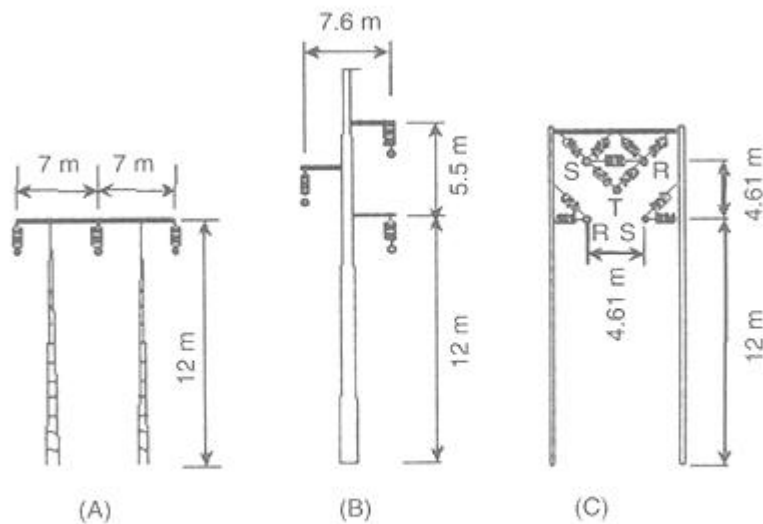
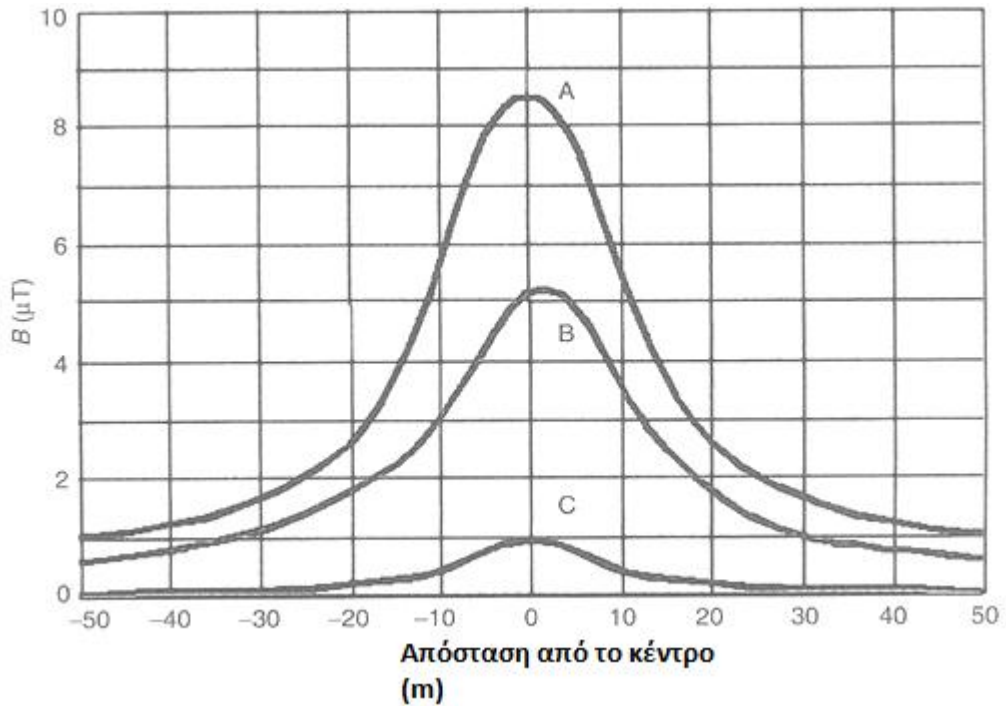
Πίνακας 2.8.9: Μετρήσεις μαγνητικής πυκνότητας ροής B σε γραμμές μεταφοράς της Μεγάλης Βρετανίας (50Hz) και των ΗΠΑ (60Hz). Οι τιμές στην παρένθεση είναι σε απόσταση 25-30m από τη γραμμή

Από τον πίνακα 1.3.6 φαίνεται ότι με τη μοναδική εξαίρεση το υπόγειο καλώδιο των 400 kV, όλες οι άλλες τιμές μαγνητικής επαγωγής B είναι πολύ χαμηλότερες από τα 100 μ T. Ακόμη όμως και η τιμή των 200 μ T στο υπόγειο καλώδιο, είναι αρκετά μικρότερη από το όριο για τους επαγγελματικά απασχολούμενους (500 μ T) και επιπλέον αφορά τη θέση ακριβώς πάνω από το καλώδιο (που προφανώς βρίσκεται εντός του υποσταθμού). Σε απόσταση μόλις 5 m παραπλεύρως, η μαγνητική επαγωγή B γίνεται 20 φορές μικρότερη.



Σχήμα 2.8.10: Μαγνητική επαγωγή B σε διάφορα εναέρια δίκτυα και σε απόσταση (σε m) από το κέντρο της γραμμής. Το ρεύμα που δίνεται σε κάθε χαρακτηριστική είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο

Σε άλλη εργασία που έγινε από το Σουηδικό εθνικό ίδρυμα εργασίας (Swedish National Institute for Working Life/ Arbetslivsinstitutet Sverige) μετρήθηκε η μαγνητική επαγωγή σε διάφορες εναέρια γραμμές 400 kV, 220 kV, 130kV και 20kV. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο παρακάτω σχήμα. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι το μαγνητικό πεδίο εμφανιζόταν μεγαλύτερο εκεί όπου το ρεύμα γραμμής ήταν μεγαλύτερο, ενώ σε κάθε περίπτωση η αύξηση της απόστασης συνεπαγόταν πτώση του πεδίου, κάτι που είναι σε πλήρη συμφωνία με το νόμο του Ampere. Επιπλέον όπως φαίνεται από το σχήμα, σε καμία περίπτωση δεν υπήρχε υπέρβαση των ορίων και συνεπώς τηρούνται οι αρχές πρόληψης και προφύλαξης. Στην ίδια εργασία εξετάστηκε η διάταξη των αγωγών και το πώς αυτή επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο. Βρέθηκε λοιπόν ότι αντί να αναρτώνται οι γραμμές στο ίδιο ύψος και παράλληλα, μπορούν να τίθενται σε τριγωνική διάταξη οπότε προκύπτει σημαντική μείωση (σχεδόν στο 50%) του μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον μείωση προκύπτει με την επονομαζόμενη διάταξη διαιρούμενων φάσεων. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται 5 αγωγοί, όπου μια φάση τίθεται στο κέντρο και οι άλλες δύο διαιρούνται σε δύο γραμμές η καθεμία, οι οποίες τοποθετούνται διαγώνια.



Σχήμα 2.8.11: Παραδείγματα μείωσης της μαγνητικής επαγωγής μιας τριφασικής γραμμής 220kV με μέγιστο ρεύμα φόρτισης τα 500A. Η διάταξη (A) έχει και τους τρεις αγωγούς παράλληλα και στο ίδιο ύψος. Η διάταξη (B) ονομάζεται και διάταξη «Δέλτα». Η διάταξη (C) των διαιρούμενων φάσεων περιλαμβάνει συνολικά 5 αγωγούς.

Έτσι η μείωση του μαγνητικού πεδίου που προκύπτει είναι σχεδόν δεκαπλάσια. Συγκριτικά οι τρεις διατάξεις φαίνονται στο σχήμα, όπου για μια γραμμή 220kV έγιναν μετρήσεις. Στην παράλληλη διάταξη μετρήθηκε μαγνητική επαγωγή περίπου 8μT. Στην διάταξη «Δέλτα» (όχι συμμετρική τριγωνική), η μέτρηση έδωσε περίπου 5μT. Στην περίπτωση των διαιρούμενων φάσεων η

μείωση είναι τόσο σημαντική που το μέγιστο πεδίο είναι μόλις 1μΤ. Σε απόσταση 20m είναι πλέον ουσιαστικά μηδέν.

Μια άλλη επίσης ενδιαφέρουσα εργασία που έγινε στην Αμερική εξέτασε τη συνύπαρξη ενός κέντρου υψηλής τάσης (KYT) και μιας εναέριας γραμμής. Το KYT ήταν 230/23kV και η γραμμή 230kV διπλού κυκλώματος. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν εκτός του ορίου περίφραξης του KYT και συγκρίθηκαν με μετρήσεις που ελήφθησαν στο περιβάλλον της εναέριας γραμμής μακριά από το KYT. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μαγνητική επαγωγή της γραμμής δεν αυξήθηκε με την ταυτόχρονη παρουσία του KYT στην περιοχή που σημαίνει ότι ο εξοπλισμός του KYT (π.χ μετασχηματιστές, πίνακες, διακόπτες) δεν αύξησε το ήδη υπάρχον μαγνητικό πεδίο. Επιπλέον οι τιμές μαγνητικού πεδίου ήταν της τάξης των 3μΤ, δηλαδή πολύ χαμηλότερες από τα όρια ασφαλείας.

2.8.2.2 Μετρήσεις σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις

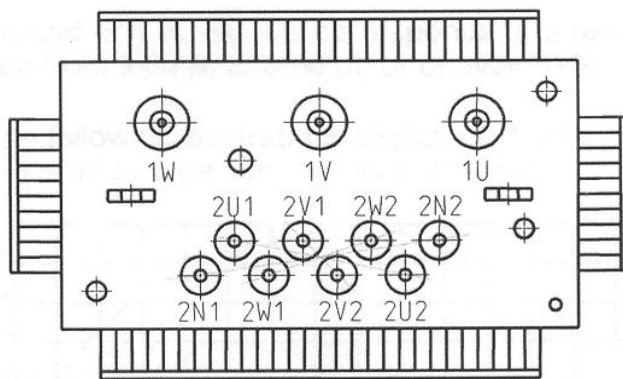
Οι άνθρωποι εκτίθενται σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz σχεδόν σε όλους τους χώρους εργασίας τους. Η συχνότητα του δικτύου πόλεως (ή βιομηχανική συχνότητα όπως αλλιώς λέγεται) απαντάται στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις και στις κτιριακές εγκαταστάσεις. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μετρήσεις πεδίων σε χώρους που περιλαμβάνουν συσκευές είτε υψηλής τάσης είτε υψηλού ρεύματος. Τα περισσότερα δεδομένα αναφέρονται σε μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου παρά του ηλεκτρικού πεδίου, γιατί το ηλεκτρικό πεδίο θωρακίζεται και παραμορφώνεται σχετικά εύκολα από διάφορα αντικείμενα, ενώ το μαγνητικό πεδίο διαπερνά όλα τα μη μαγνητικά υλικά (σίδηρος) μεταξύ των οποίων και τον ίδιο τον άνθρωπο. Βιομηχανικές εγκαταστάσεις στις οποίες θα έχει ενδιαφέρον η μέτρηση μαγνητικού πεδίου (λόγω της εκεί παρουσίας σχετικά υψηλών ρευμάτων) είναι μεταξύ άλλων οι επιχειρήσεις ηλεκτροδότησης, τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς, οι υποσταθμοί, τα πάσης φύσεως μηχανοστάσια και οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις επαγωγικής θέρμανσης και ηλεκτροσυγκόλλησης. Πολλές ωστόσο από τις βιομηχανικές αυτές διατάξεις δεν λειτουργούν στα 50Hz αλλά στην ευρύτερη περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων (μέχρι 100kHz). Για παράδειγμα τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς είναι είτε με συνεχές ρεύμα DC, είτε με συχνότητα 16 2/3 Hz ή 25 Hz στην Ευρώπη, είτε με 25 Hz ή 60 Hz στην Αμερική. Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται μόνο η περίπτωση της βιομηχανικής συχνότητας των 50 Hz. Στοιχεία για την ευρύτερη περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων θα πρέπει να αναζητηθούν σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία.

Σε υποσταθμούς υπάρχουν πολλές διατάξεις όπως μετασχηματιστές, διακόπτες, καλώδια, ζυγοί, γεννήτριες (ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη), τα οποία δημιουργούν πλησίον τους ηλεκτρικά πεδία από μερικές δεκάδες V/m μέχρι μερικές εκατοντάδες V/m. Σε ότι αφορά τα μαγνητικά πεδία αυτά μπορεί να ποικίλουν από μερικές δεκάδες ως μερικές εκατοντάδες μΤ. Ωστόσο είναι δυνατόν πολύ κοντά σε ζυγούς και ροηφόρους αγωγούς γενικά, να υπάρξουν πεδία μεγαλύτερα από 1 mT δηλαδή 10 φορές μεγαλύτερα από τα 100μΤ που είναι το όριο για τον γενικό πληθυσμό και 2 φορές το όριο για τον επαγγελματικό πληθυσμό. Όμως τέτοιες περιπτώσεις υπάρχουν σε χώρους που η ολόσωμη έκθεση ή η μακροχρόνια παραμονή να αποκλείονται.

Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα με κατάλληλη διάταξη των αγωγών το μαγνητικό πεδίο να ελαχιστοποιηθεί. Για παράδειγμα, σε μετρήσεις που έγιναν για λογαριασμό κατασκευάστριας εταιρίας στο Εργαστήριο FKH-Däniken Ελβετίας, βρέθηκε ότι με κατάλληλη κατασκευή του μετασχηματιστή το

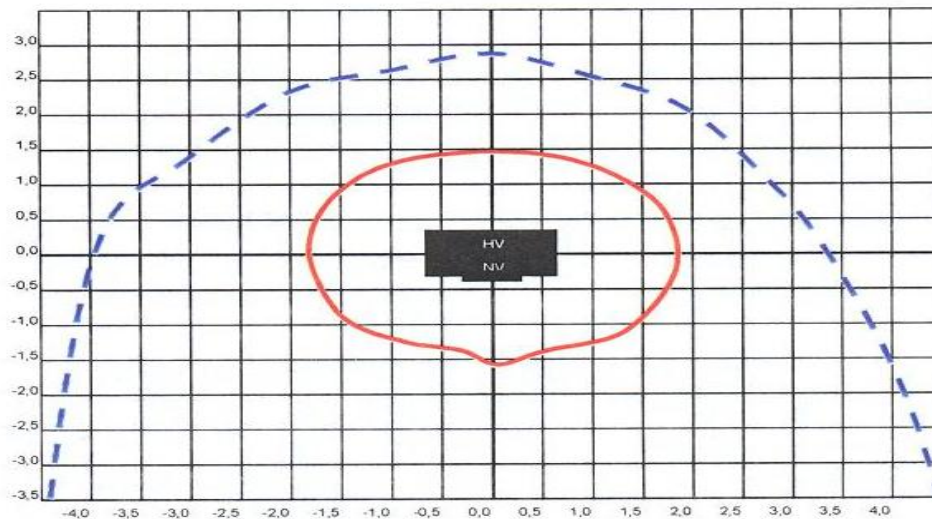
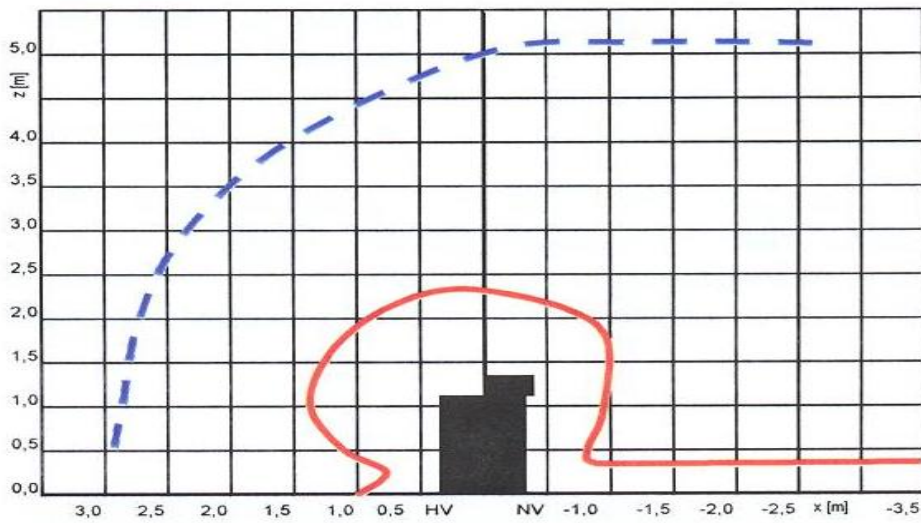
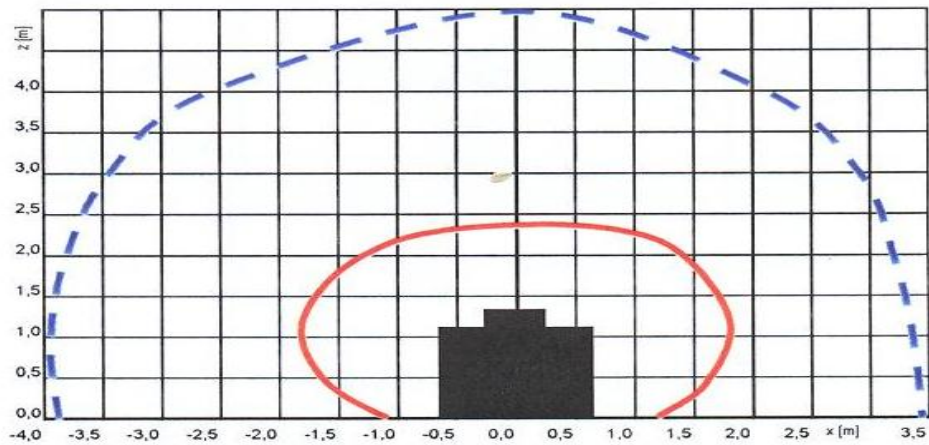
μαγνητικό πεδίο μπορεί να είναι μόλις $1\mu\text{T}$ σε απόσταση περίπου 1.5m περιμετρικά του μετασχηματιστή. Οι μετρήσεις αφορούσαν τριφασικό μετασχηματιστή διανομής 630kVA , $20/0,4\text{kV}$. Το βασικό χαρακτηριστικό ενός τέτοιου μετασχηματιστή είναι ο τρόπος διάταξης της χαμηλής τάσης (βλ. σχήμα 1.3.6).

Στο σχήμα γίνεται σύγκριση ενός συνήθους μετασχηματιστή διανομής 630kVA με έναν μετασχηματιστή «χαμηλού μαγνητικού πεδίου» δηλ. με αντισταθμιστική σύνδεση στη χαμηλή τάση. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι για τους συνήθεις μετασχηματιστές, η μαγνητική επαγωγή γίνεται $1\mu\text{T}$ σε μια απόσταση περίπου $3\text{-}4\text{m}$. Αντίθετα στον μετασχηματιστή «χαμηλού μαγνητικού πεδίου» αυτό επιτυγχάνεται ήδη σχεδόν στο 1m . Ο ιδιαίτερος σχεδιασμός στη χαμηλή τάση έχει το ίδιο αποτέλεσμα με τη διάταξη διαιρούμενων φάσεων στις γραμμές μεταφοράς. Κάθε φάση δηλαδή διαιρείται σε δύο και διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει το ελάχιστο δυνατό μαγνητικό πεδίο. Οι μετρήσεις αυτές δείχνουν ότι ακόμη και ένα εξαιρετικά χαμηλό μαγνητικό πεδίο είναι τεχνικά εφικτό και εναρμονίζεται ακόμη και με κάποια ειδικά πρότυπα αυστηρότερα του ICNIRP.



Σχήμα 2.8.12: Μετασχηματιστής διανομής με «αντισταθμιστική» σύνδεση ακροδεκτών στη Χαμηλή Τάση

Άλλες περιπτώσεις όπου εμφανίζονται σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις υπολογίσιμα μαγνητικά πεδία είναι οι συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης οι φούρνοι ηλεκτρικής αντίστασης και οι επαγωγικοί φούρνοι. Σε ότι αφορά τις συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης, από μετρήσεις που έχουν γίνει, το μαγνητικό πεδίο κυμαίνεται από $100\mu\text{T}$ (κοντά στην πηγή ρεύματος) μέχρι και πάνω από 1mT στην επιφάνεια του ηλεκτρόδιου. Ένα επίσης χαρακτηριστικό αυτών των συσκευών είναι ότι το ηλεκτρόδιο είναι σχεδόν σε επαφή με το χέρι του χειριστή, και ότι από το καλώδιο περνούν εκατοντάδες amperes, τα οποία δημιουργούν αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο. Επίσης μεγάλα μαγνητικά πεδία εμφανίζονται σε φούρνους αντίστασης και σε επαγωγικούς φούρνους.



Συνήθης ΜΣ

ΜΣ χαμηλού Μαγνητικού πεδίου

Σχήμα 2.8.13: Χαρακτηριστικές ισομαγνητικές καμπύλες για $B=1\mu T$ σε μετασχηματιστή διανομής 630kVA. Με διακεκομμένη γραμμή ο συνήθης μετασχηματιστής (ΜΣ), με συνεχή γραμμή ο μετασχηματιστής (ΜΣ) χαμηλού μαγνητικού πεδίου.

Συγκεκριμένα σε φούρνους ηλεκτρικής αντίστασης η μαγνητική επαγωγή κυμαίνεται από 600-1400 μT , σύμφωνα με μετρήσεις του Εθνικού Ιδρύματος για επαγγελματική ασφάλεια και υγεία του υπουργείου υγείας των ΗΠΑ (National Institute for Occupational Safety and Health/NIOSH). Ένα άλλο είδος φούρνων, οι επαγωγικοί, λειτουργούν σε μία ευρεία κλίμακα συχνοτήτων, από 50Hz μέχρι τα 10kHz. Σε επαγωγικούς φούρνους των 50Hz έχουν μετρηθεί τιμές ελαφρώς μεγαλύτερες (540 μT) από το επαγγελματικό όριο ασφαλείας. Οι υψηλές τιμές αυτών των συσκευών είναι σε μικρή απόσταση (1m) από την εστία. Στη θέση όπου γίνονται οι χειρισμοί το μαγνητικό πεδίο είναι κάτω από 10 μT που είναι αρκετά χαμηλότερο και από το όριο για τον γενικό πληθυσμό.

Άλλες περιπτώσεις όπου ένα σχετικά μεγάλο μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται αλλά σε μικρή απόσταση μειώνεται αρκετά είναι οι ηλεκτρικοί κινητήρες. Μετρήσεις σε κινητήρες έδειξαν πεδία ως και μερικά mT στην επιφάνεια της μηχανής, τα οποία όμως σε απόσταση μερικών εκατοστών γίνονταν μερικά μT .

3. Σκοπός της εργασίας

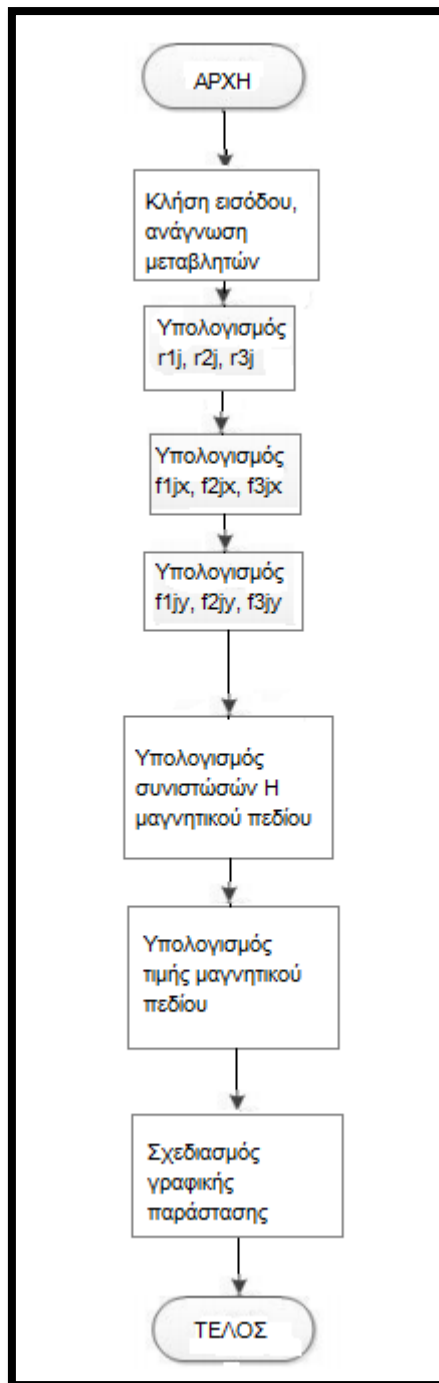
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός προγράμματος ηλεκτρονικού υπολογιστή που θα υπολογίζει το μαγνητικό πεδίο γύρω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης. Η ανάπτυξη του προγράμματος έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab με τη βοήθεια του εργαλείου GUIDE του Matlab. Το τελικό προϊόν της εργασίας είναι ένα γραφικό περιβάλλον φιλικό προς το χρήστη για τη χρήση του οποίου απαιτείται είτε η εγκατάσταση του Matlab στον υπολογιστή είτε η εγκατάσταση του MCR (Matlab Compiler Runtime) το οποίο επιτρέπει την εκτέλεση προγραμμάτων Matlab χωρίς να προϋποθέτει την ύπαρξη της Matlab στον εκάστοτε υπολογιστή.

4. Ανάλυση του προγράμματος, τεκμηρίωσή του και δοκιμαστικές μετρήσεις

4.1 Το πρόγραμμα

Για την ανάπτυξη του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Matlab και το εργαλείο guide του Matlab. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει τέσσερα πεδία εισαγωγής μεταβλητών. Οι μεταβλητές εισαγωγής αυτές είναι με τη σειρά που εμφανίζονται στο πρόγραμμα: I, Το ρεύμα γραμμής μιας φάσης της τριφασική γραμμής μεταφοράς, x, η απόσταση από την οποία γίνεται η μέτρηση που εμφανίζεται στο πεδίο αποτελέσματος, d, η απόσταση μεταξύ των αγωγών (συνήθως 5-6 m περίπου για γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης) και y το ύψος των γραμμών μεταφοράς από το έδαφος. Στη συνέχεια δίνεται διάγραμμα ροής που εξηγεί τη συμπεριφορά των προσωρινών μεταβλητών του προγράμματος κατά την κλήση των υπορουτίνων του (σχήμα 3.1).

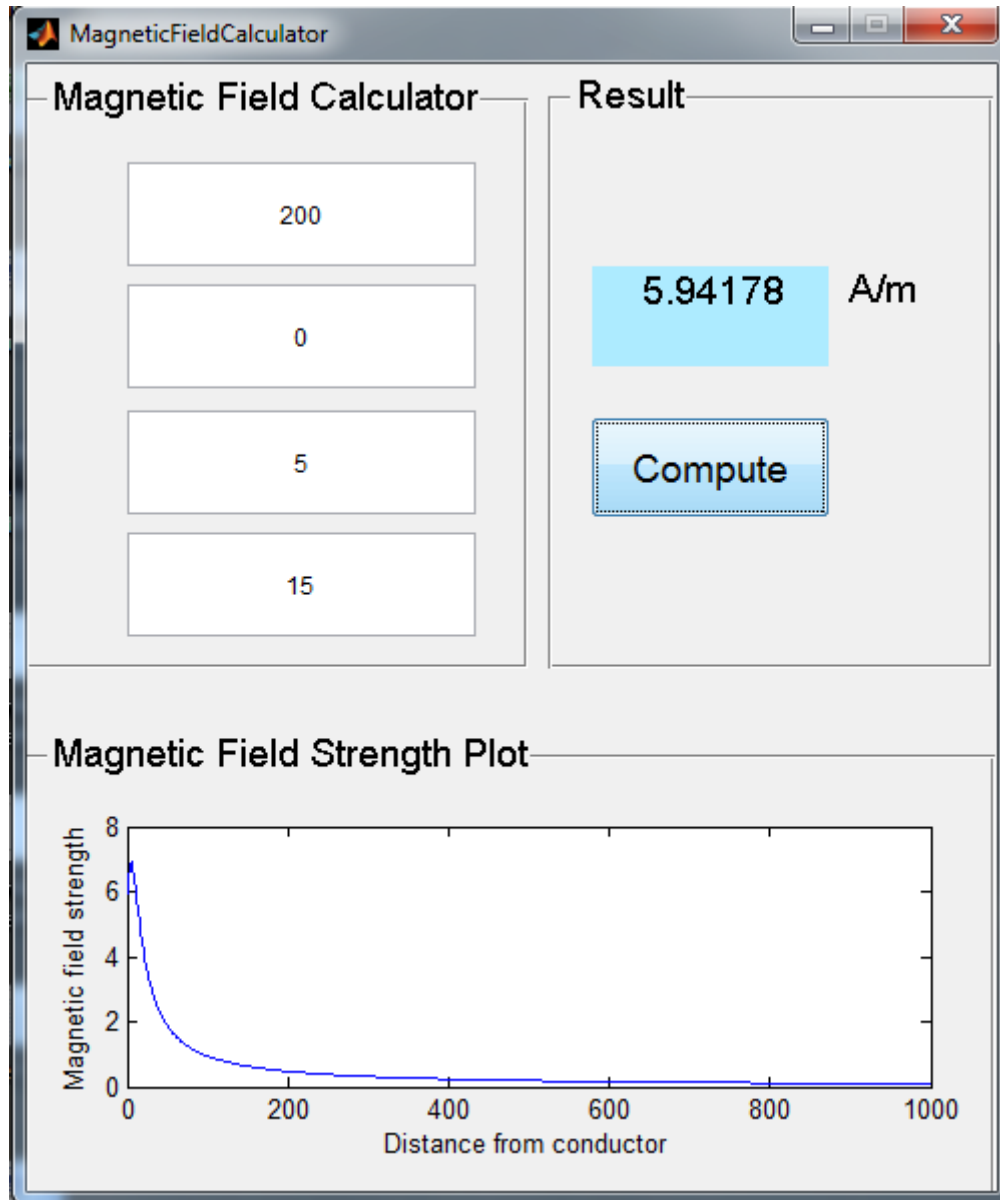
Κατά την εκκίνηση του προγράμματος εισάγονται τα δεδομένα στα πεδία εισόδου. Στη συνέχεια όταν πατιέται το κουμπί Compute ενεργοποιείται η συνάρτηση Callback του με αποτέλεσμα την εξής αντίδραση : Οι συναρτήσεις str2num αναγινώσκουν τα δεδομένα εισόδου και τα περνούν στις μεταβλητές I, x, d και y. Στη συνέχεια γίνονται οι κατάλληλοι αριθμητικοί υπολογισμοί μέσα στο πρόγραμμα σύμφωνα με το μοντέλο της παραγράφου 1.4. Στη συνέχεια καλείται η συνάρτηση plot για να σχεδιάσει μια γραφική παράσταση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την απόσταση x.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής προγράμματος

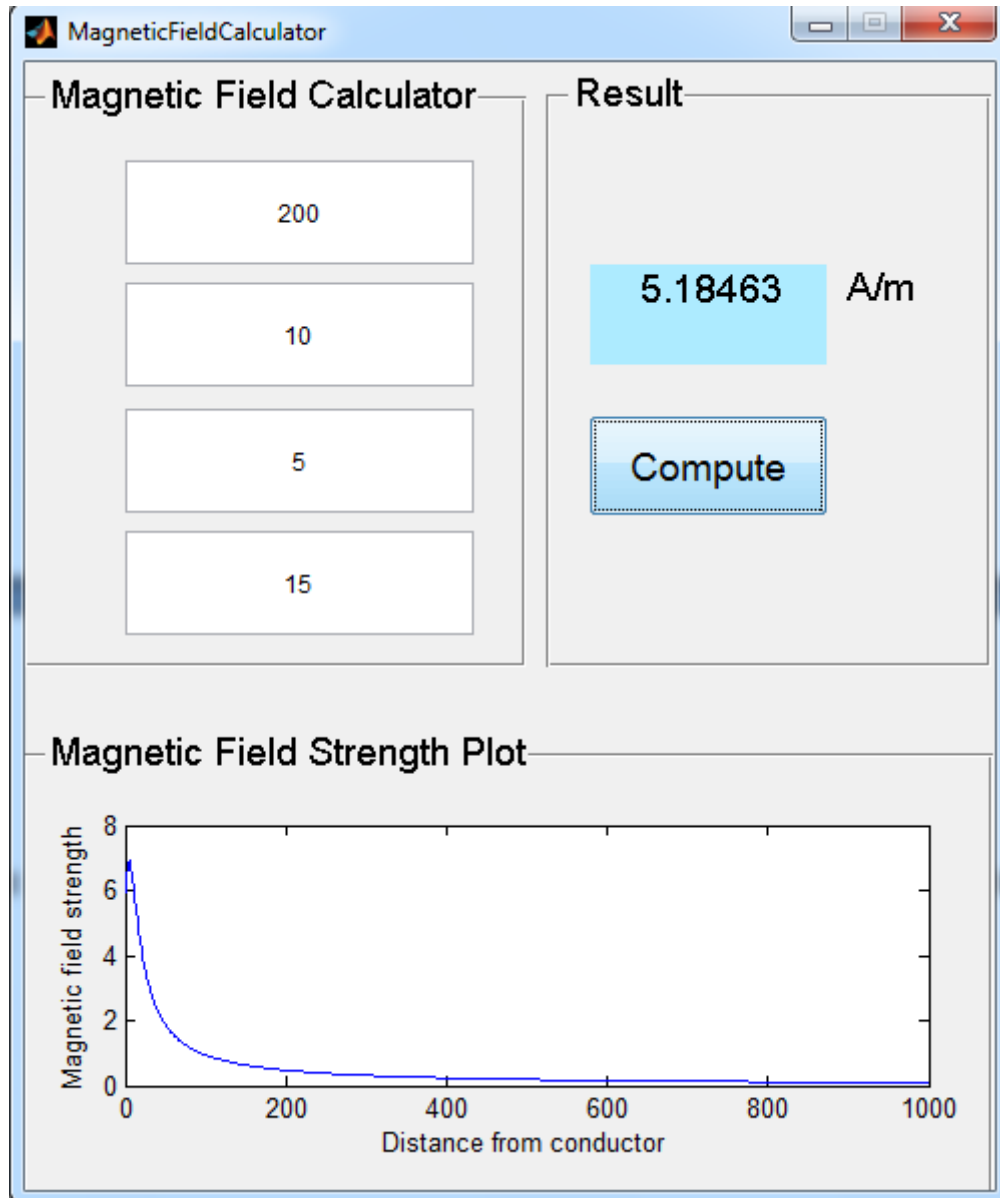
4.2 Δοκιμαστικές μετρήσεις

Αρχικά λαμβάνεται η μέτρηση για απόσταση $x=0$ για να εξεταστεί ποιο είναι το μαγνητικό πεδίο πάνω στη γραμμή μεταφοράς. Κάτι τέτοιο ενδιαφέρει σε περίπτωση που για παράδειγμα γίνονται έργα επισκευής στους πυλώνες :

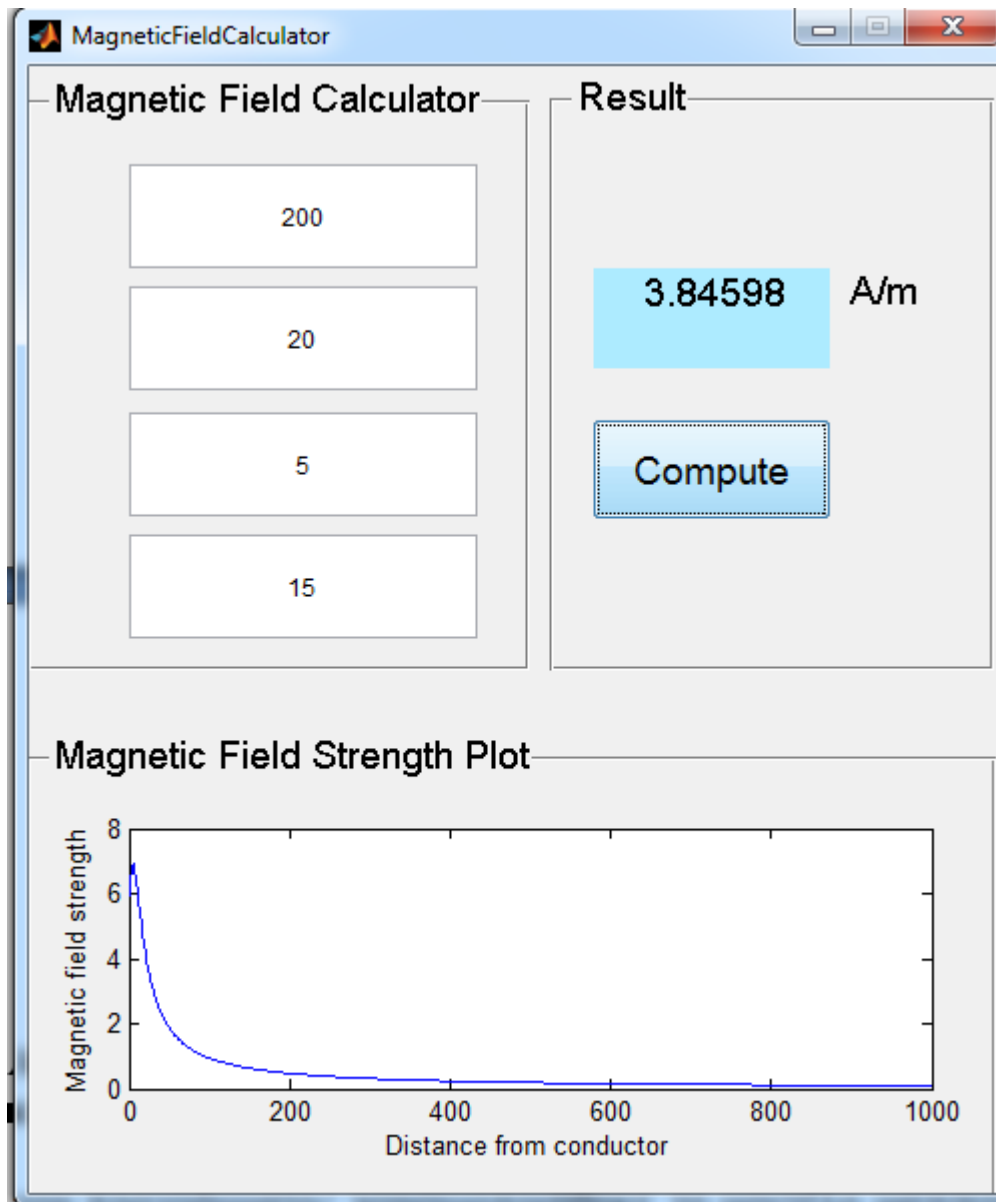


Σχήμα 4.2 Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση $x=0$ m από τις γραμμές μεταφοράς

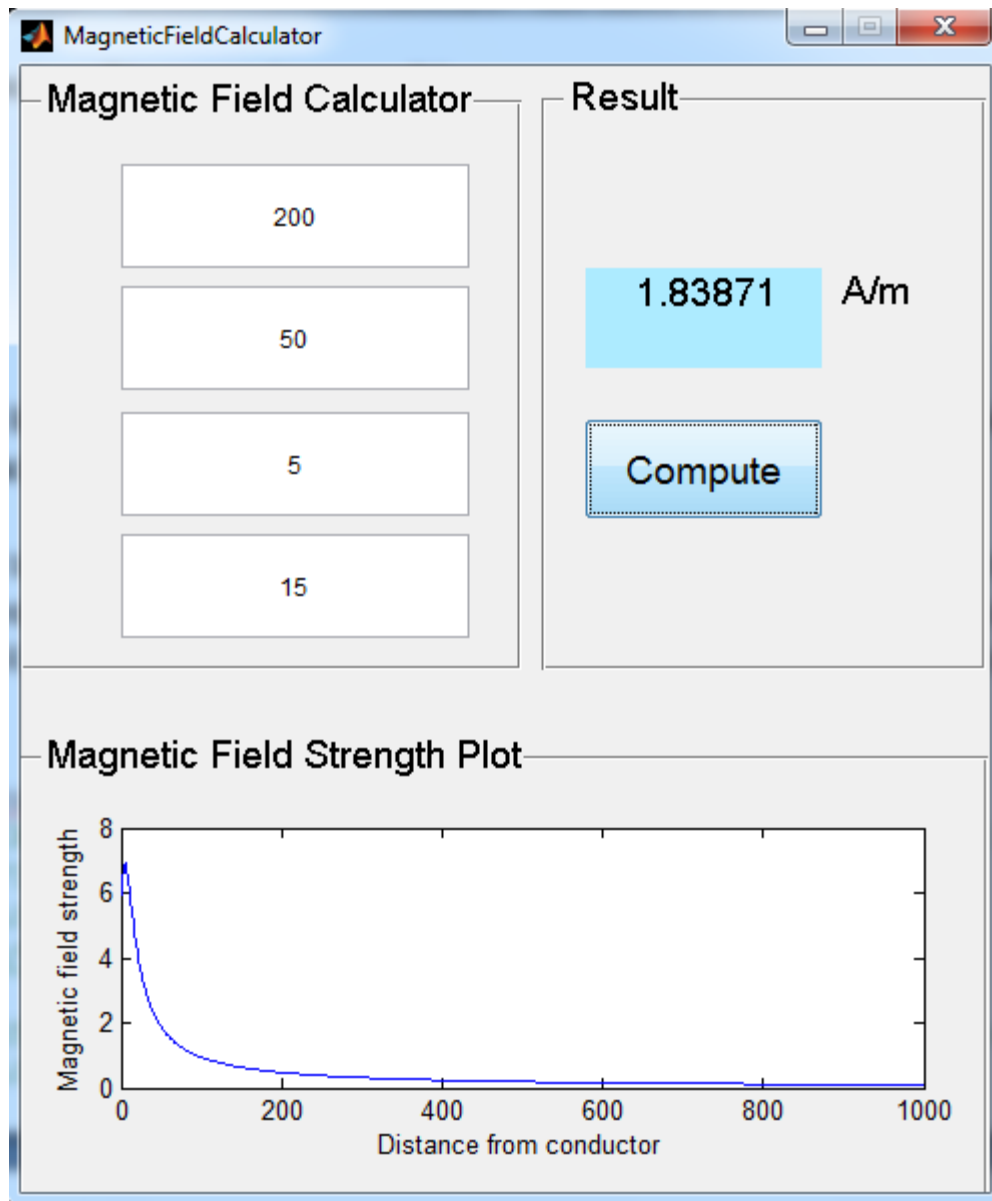
Στη συνέχεια λαμβάνονται οι υπόλοιπες μετρήσεις για διάφορες αποστάσεις: 10m : σχήμα 4.3, 20m : σχήμα 4.4, 50m : σχήμα 4.5, 100m σχήμα 4.6, 200m : σχήμα 4.7, 500m : σχήμα 4.8, 1000m : σχήμα 4.9, 2000m : σχήμα 4.10, 5000m : σχήμα 4.11, 10000m : σχήμα 4.12.



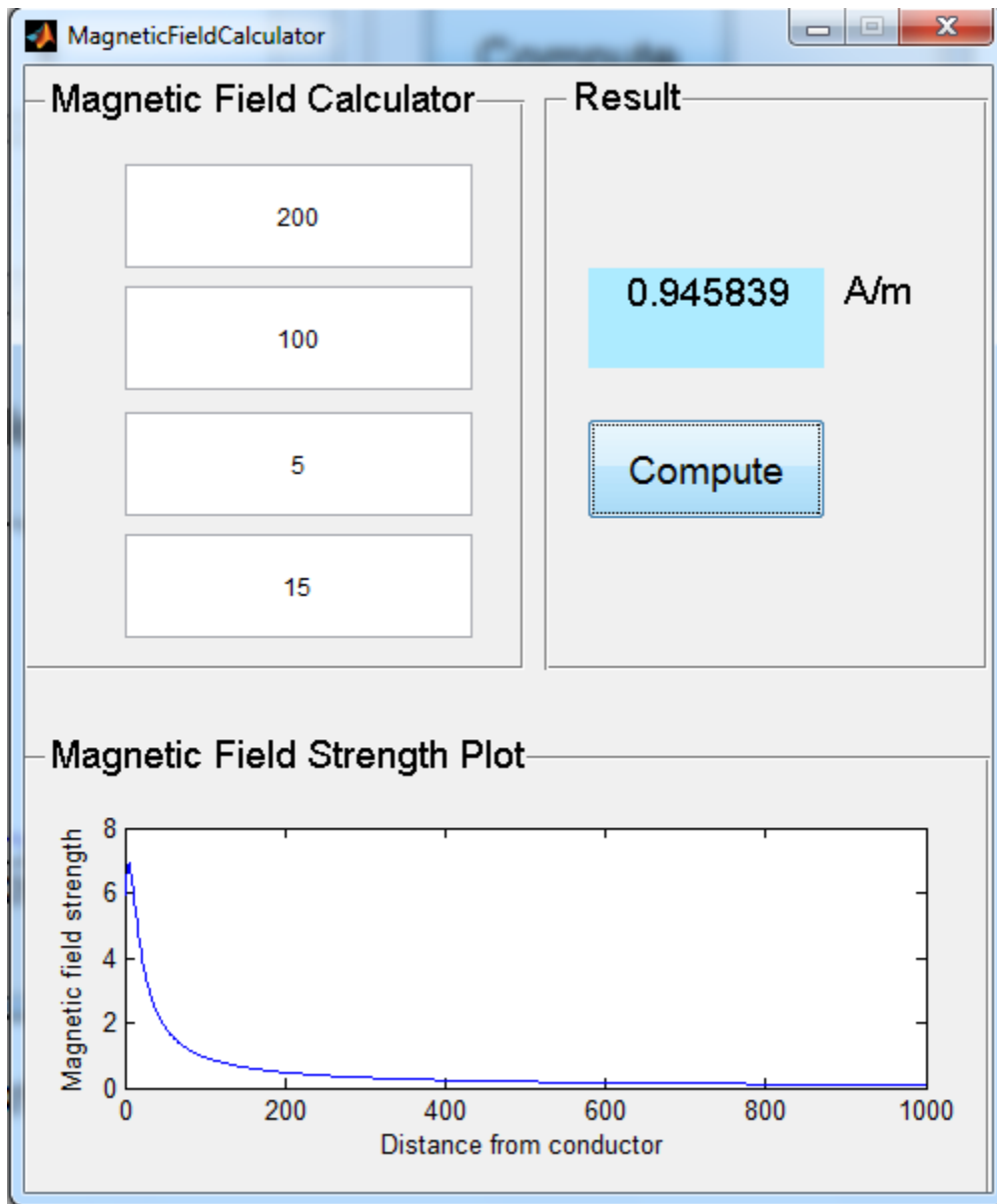
Σχήμα 4.3: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 10m



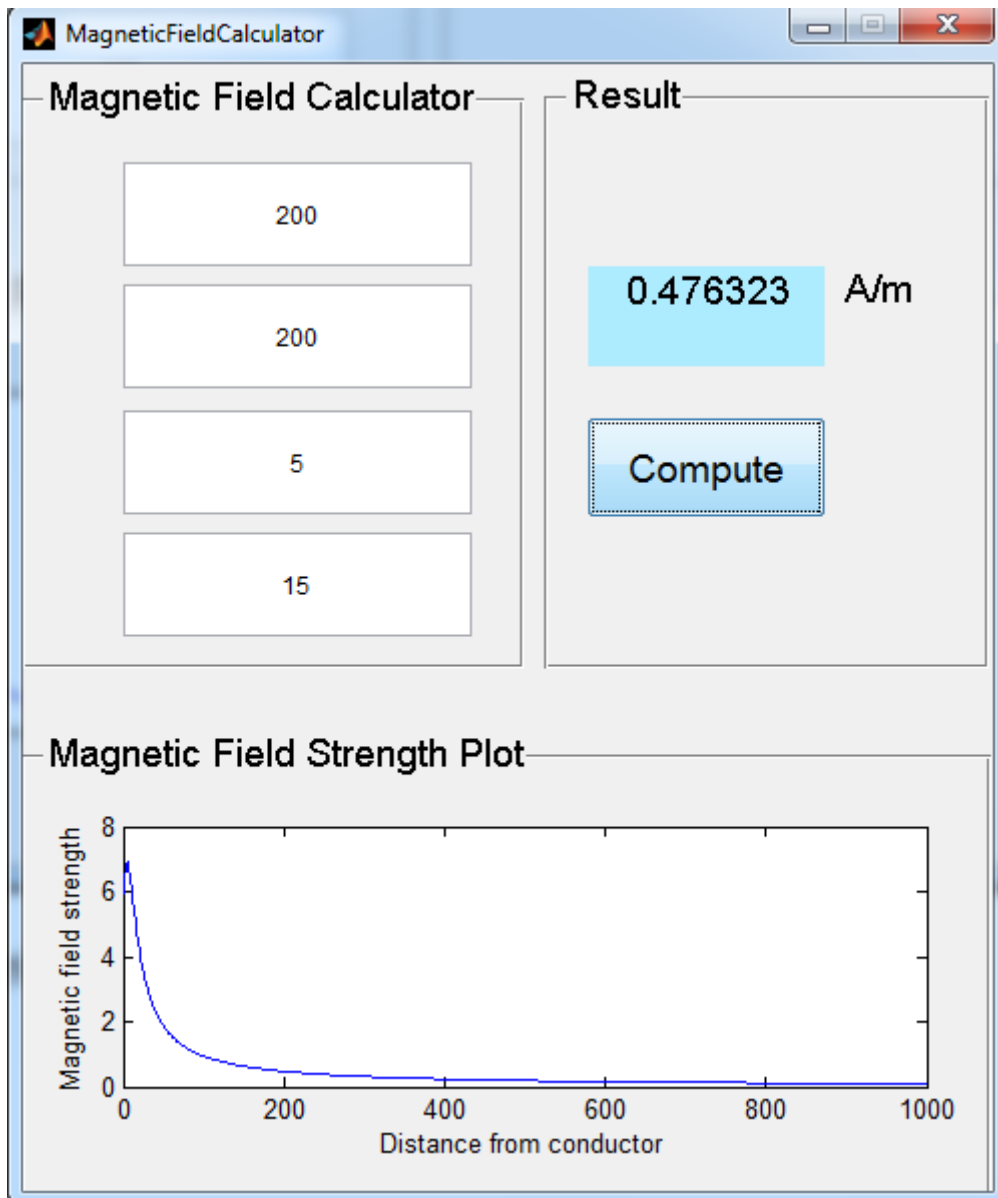
Σχήμα 4.4: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 20m



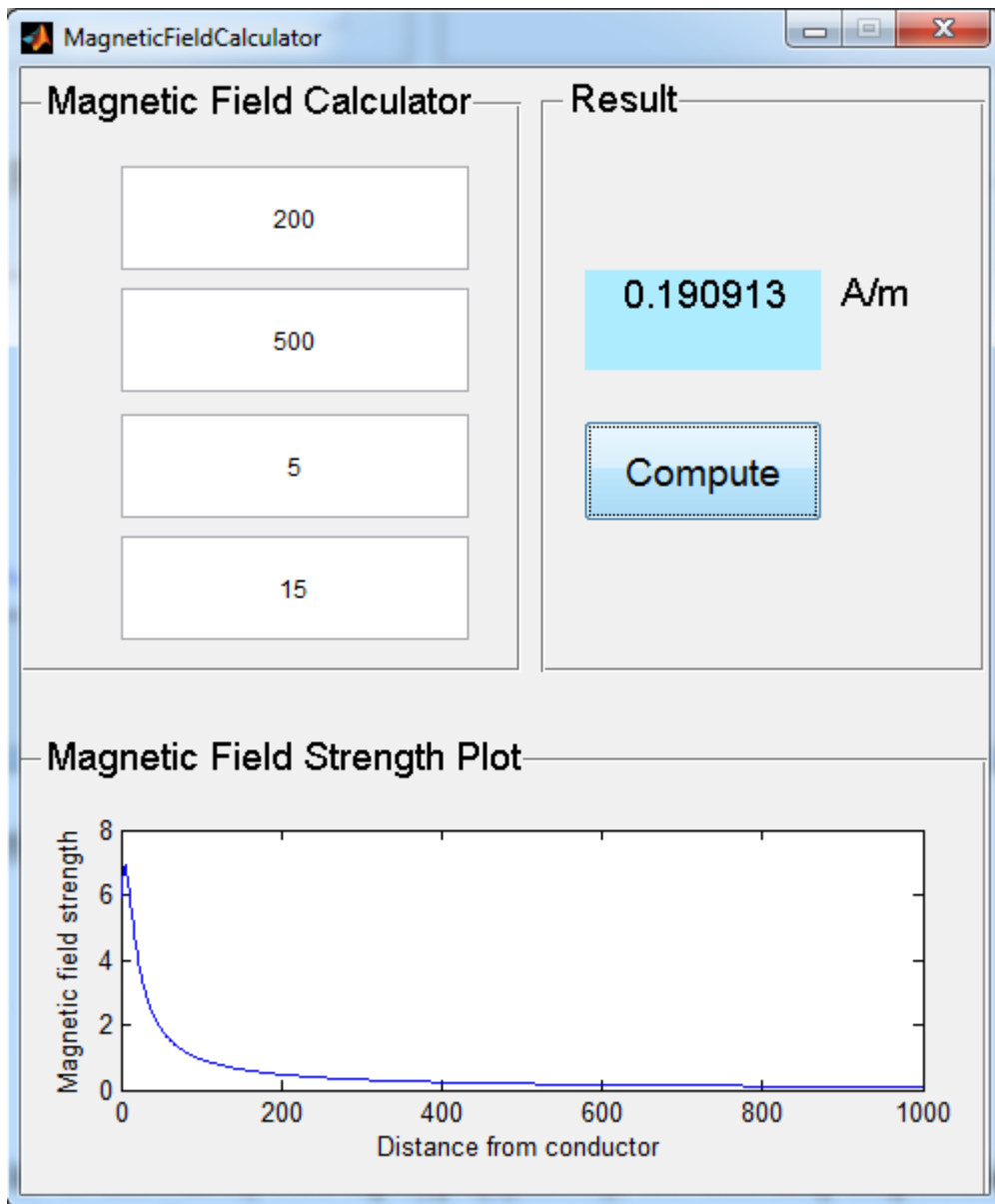
Σχήμα 4.5: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 50m



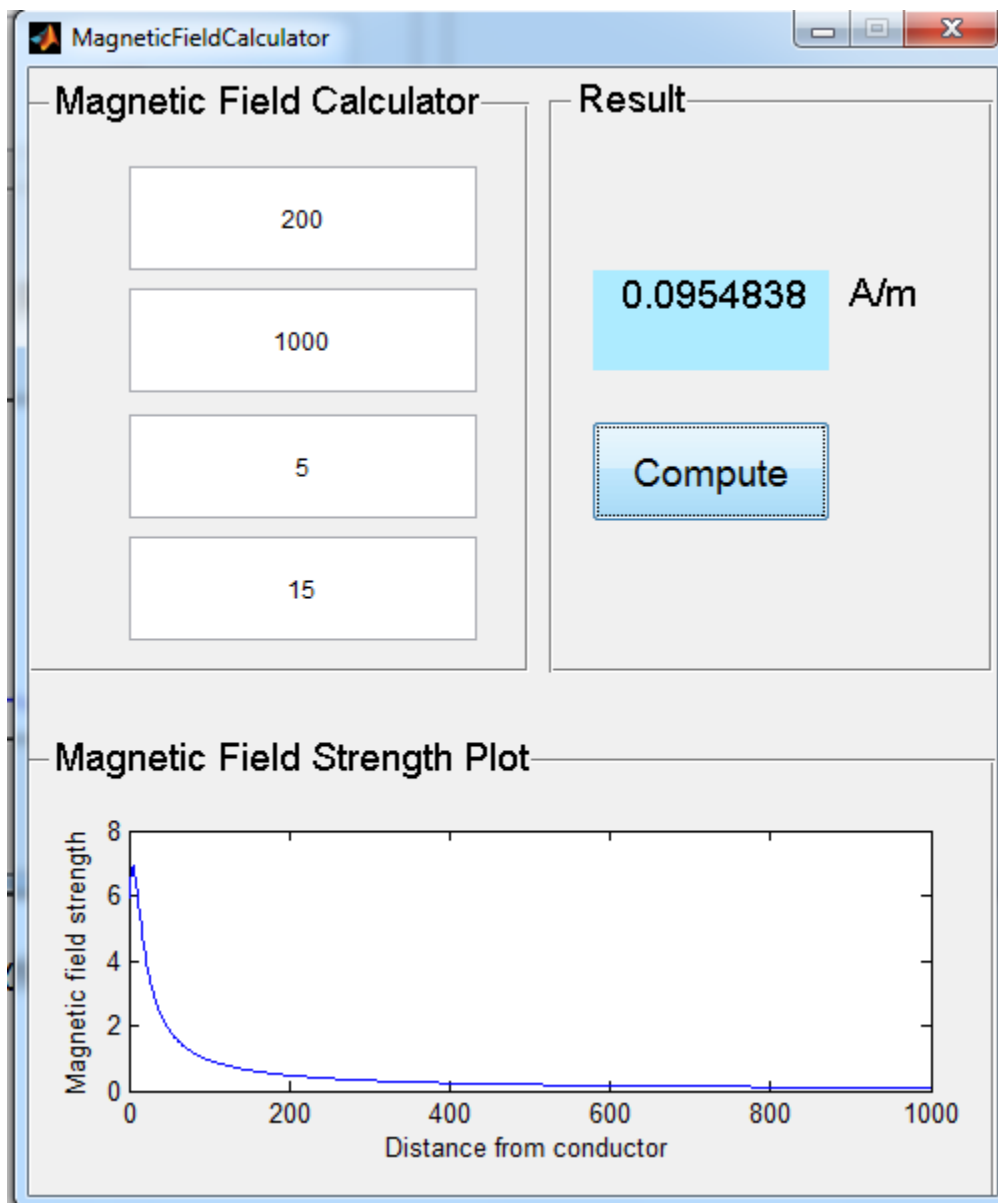
Σχήμα 4.6: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 100m



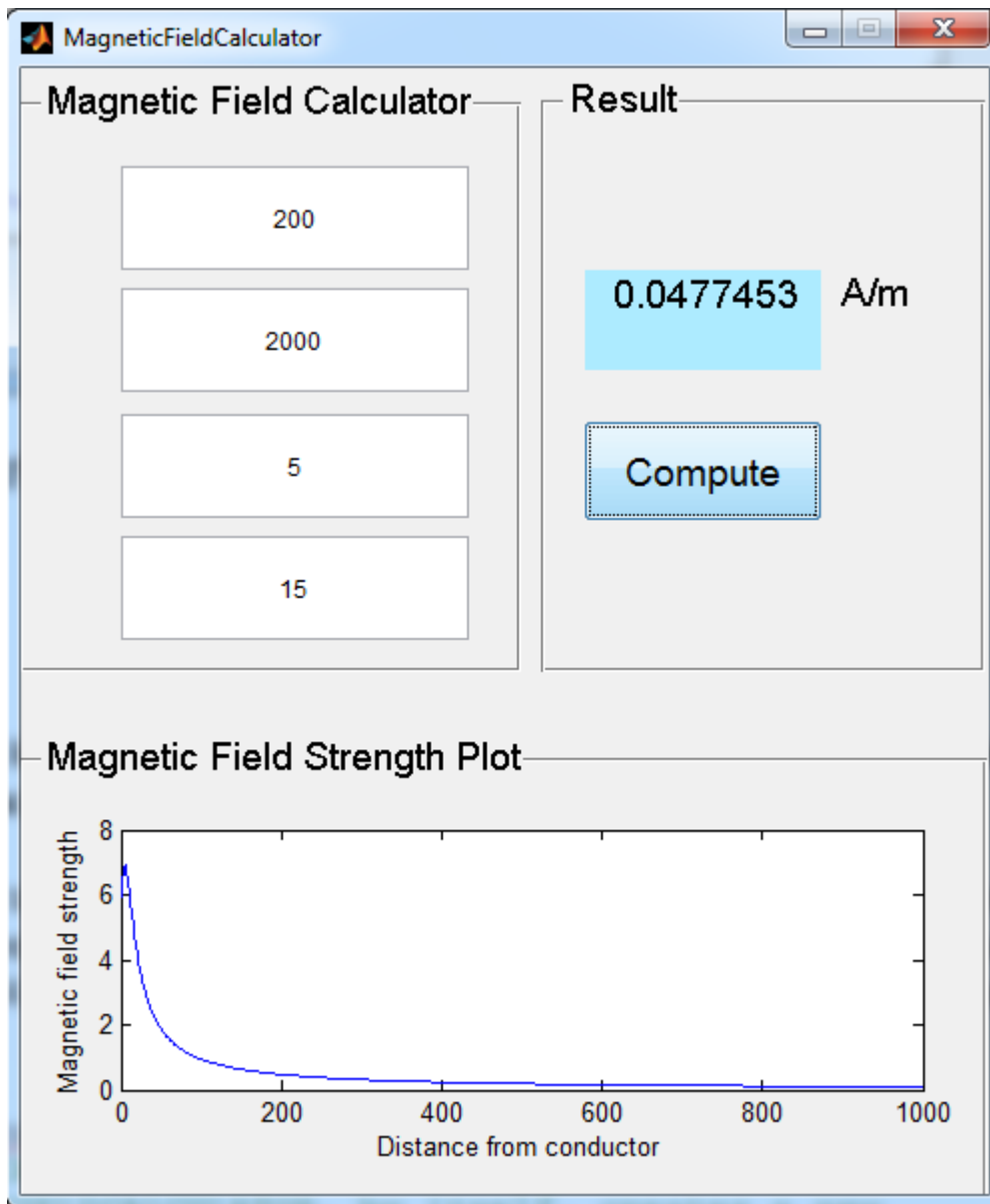
Σχήμα 4.7: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 200m



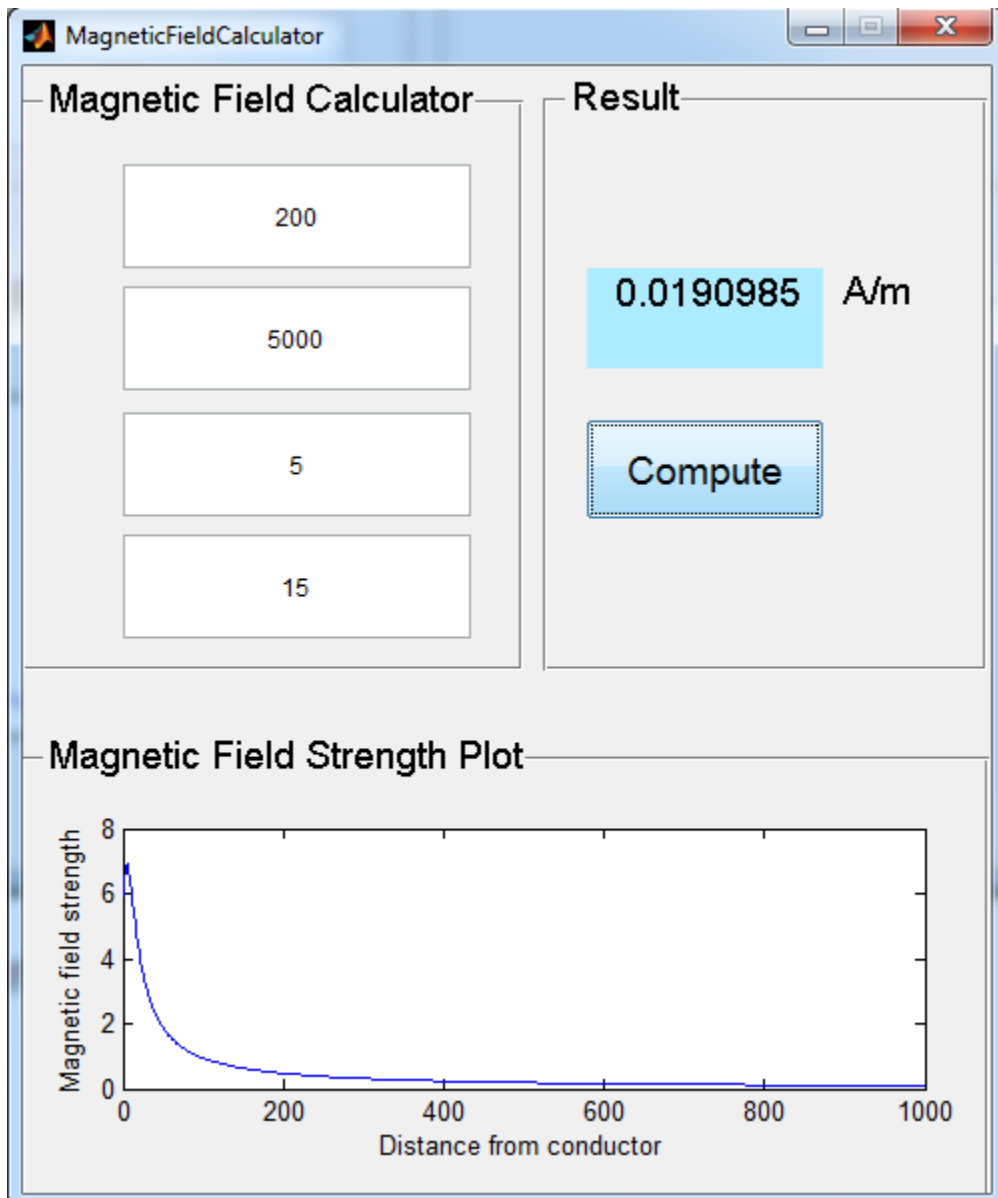
Σχήμα 4.8: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 500m



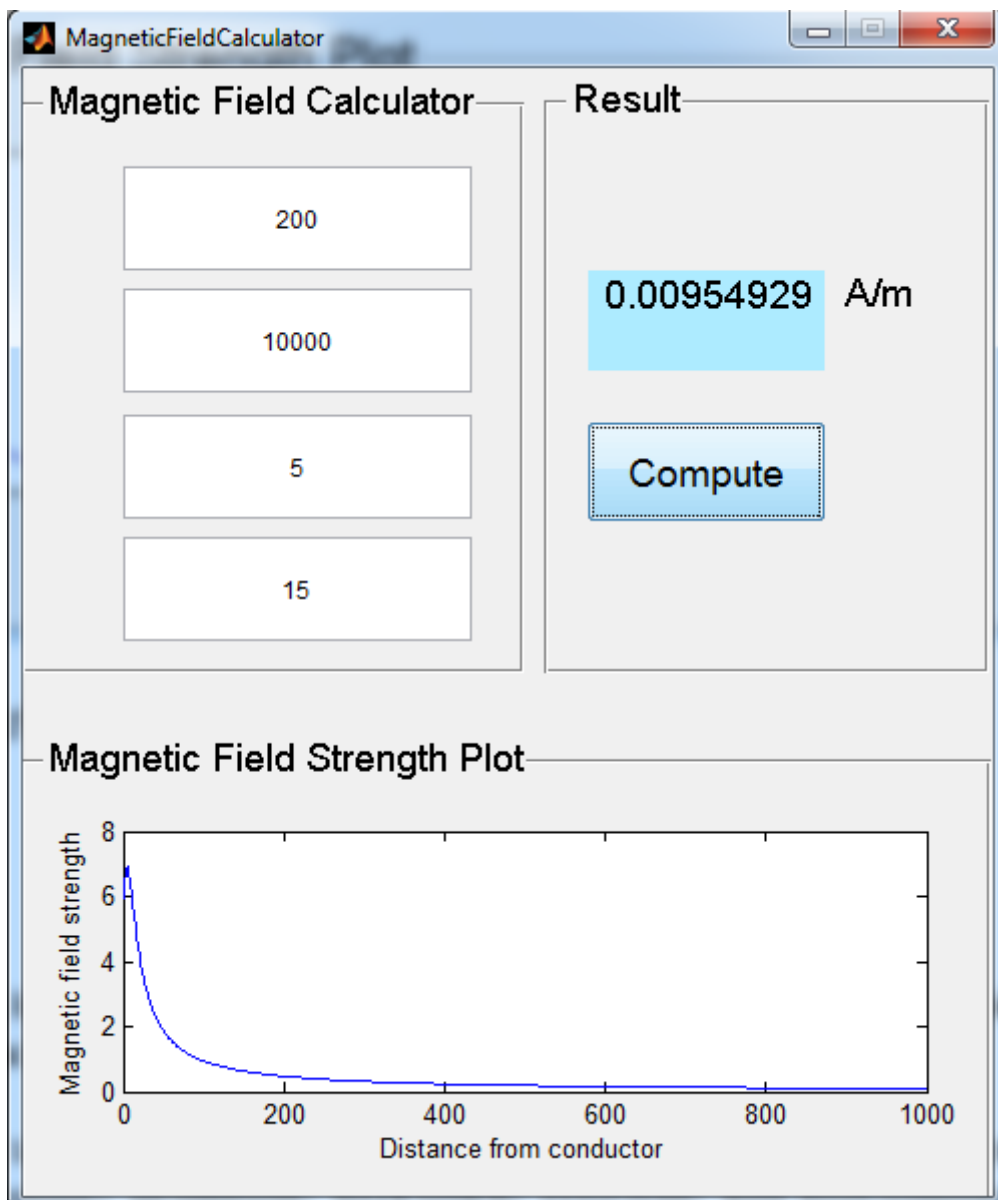
Σχήμα 4.9: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 1km



Σχήμα 4.10: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 2km



Σχήμα 4.11: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 5km



Σχήμα 4.12: Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 10km

Σχόλια/παρατηρήσεις :

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις γίνεται φανερό πως το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις γραμμές μεταφοράς βρίσκεται μέσα στα όρια εκπομπής που έχουν τεθεί ακόμα και για αποστάσεις πολύ κοντά στις ίδιες γραμμές μεταφοράς και άρα δεν παραβιάζονται τα όρια ασφαλείας.

Επιπροσθέτως, γίνεται φανερό πως όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από την πηγή του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή τις γραμμές μεταφοράς, τόσο πιο ασθενές καθίσταται το πεδίο, πράγμα που φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις στο κάτω μέρος της επιφάνειας εργασίας του προγράμματος.

5. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Ο κώδικας του προγράμματος και παρουσίασή του

Για την υλοποίηση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μαγνητικού πεδίου γύρω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.4. Ο κώδικας του προγράμματος σε γλώσσα Matlab είναι ο εξής :

```
function varargout = MagneticFieldCalculator(varargin)
% MAGNETICFIELD CALCULATOR M-file for MagneticFieldCalculator.fig
%     MAGNETICFIELD CALCULATOR, by itself, creates a new
MAGNETICFIELD CALCULATOR or raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = MAGNETICFIELD CALCULATOR returns the handle to a new
MAGNETICFIELD CALCULATOR or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%
MAGNETICFIELD CALCULATOR('CALLBACK', hObject, eventData, handles,...)
calls the local
%     function named CALLBACK in MAGNETICFIELD CALCULATOR.M with
the given input arguments.
%
%     MAGNETICFIELD CALCULATOR('Property','Value',...) creates a
new MAGNETICFIELD CALCULATOR or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property
value pairs are
%     applied to the GUI before
MagneticFieldCalculator_OpeningFcn gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to
MagneticFieldCalculator_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows
only one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
MagneticFieldCalculator

% Last Modified by GUIDE v2.5 07-Aug-2012 17:39:44

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @MagneticFieldCalculator_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @MagneticFieldCalculator_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
```

```

    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before MagneticFieldCalculator is made
visible.
function MagneticFieldCalculator_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to MagneticFieldCalculator
(see VARARGIN)

% Choose default command line output for MagneticFieldCalculator
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes MagneticFieldCalculator wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = MagneticFieldCalculator_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
I = str2num(get(handles.edit2, 'String'));
x = str2num(get(handles.edit6, 'String'));
d = str2num(get(handles.edit7, 'String'));
y = str2num(get(handles.edit8, 'String'));

r1j = sqrt(x^2+y^2);
r2j = sqrt((x+d)^2+y^2);
r3j = sqrt((x-d)^2+y^2);
f1jx = y/r1j;
f2jx = y/r2j;
f3jx = y/r3j;

```

```

f1jy = -1*x/r1j;
f2jy = -1*(x+d)/r2j;
f3jy = -1*(x-d)/r3j;
H1jx = I*f1jx/(2*pi*r1j);
H2jx = I*f2jx/(2*pi*r2j);
H3jx = I*f3jx/(2*pi*r3j);
H1jy = I*f1jy/(2*pi*r1j);
H2jy = I*f2jy/(2*pi*r2j);
H3jy = I*f3jy/(2*pi*r3j);
Hx = H1jx+H2jx+H3jx;
Hy = H1jy+H2jy+H3jy;
absH=sqrt(Hy^2+Hx^2);
set(handles.text1, 'String', absH);
a=0:1000;
b=sqrt((I*y/(2*pi))^2*(1./(a.^2+y^2)+1./((a+d).^2+y^2)+1./((a-
d).^2+y^2)).^2+(I/(2*pi))^2*(a./(a.^2+d^2)+(a+d)./((a+d).^2+y^2)+(
a-d)./((a-d).^2+y^2)).^2);
axes(handles.axes1);
plot(a,b);
xlabel('Distance from conductor')
ylabel('Magnetic field strength');
guidata(hObject,handles);

```

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit2 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text

```



```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of
edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes during object creation, after setting all
properties.
function axes1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to axes1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all
CreateFcns called

% Hint: place code in OpeningFcn to populate axes1

```

Στις παρακάτω γραμμές του προγράμματος φαίνεται η χρήση του μοντέλου της παραγράφου 2.4 :

```

I = str2num(get(handles.edit2, 'String'));
x = str2num(get(handles.edit6, 'String'));
d = str2num(get(handles.edit7, 'String'));
y = str2num(get(handles.edit8, 'String'));

r1j = sqrt(x^2+y^2);
r2j = sqrt((x+d)^2+y^2);
r3j = sqrt((x-d)^2+y^2);
f1jx = y/r1j;
f2jx = y/r2j;
f3jx = y/r3j;
f1jy = -1*x/r1j;
f2jy = -1*(x+d)/r2j;
f3jy = -1*(x-d)/r3j;
H1jx = I*f1jx/(2*pi*r1j);
H2jx = I*f2jx/(2*pi*r2j);
H3jx = I*f3jx/(2*pi*r3j);
H1jy = I*f1jy/(2*pi*r1j);
H2jy = I*f2jy/(2*pi*r2j);
H3jy = I*f3jy/(2*pi*r3j);
Hx = H1jx+H2jx+H3jx;
Hy = H1jy+H2jy+H3jy;
absH=sqrt(Hy^2+Hx^2);
set(handles.text1, 'String', absH);
a=0:1000;

```

```

b=sqrt((I*y/(2*pi))^2*(1./(a.^2+y^2)+1./((a+d).^2+y^2)+1./((a-
d).^2+y^2)).^2+(I/(2*pi))^2*(a./(a.^2+d^2)+(a+d)./((a+d).^2+y^2)+(
a-d)./((a-d).^2+y^2)).^2);
axes(handles.axes1);
plot(a,b);
xlabel('Distance from conductor')
ylabel('Magnetic field strength');
guidata(hObject,handles);

```

Στις πρώτες τέσσερις γραμμές διαβάζονται τα δεδομένα από τα πεδία εισόδου δεδομένων, στις επόμενες 18 γίνονται οι απαραίτητες πράξεις για την επεξεργασία των δεδομένων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων ενώ στις υπόλοιπες δημιουργείται μια γραφική παράσταση της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή. Ως πηγή θεωρείται η κεντρική φάση από τις τρεις του τριφασικού συστήματος μέσης τάσης.

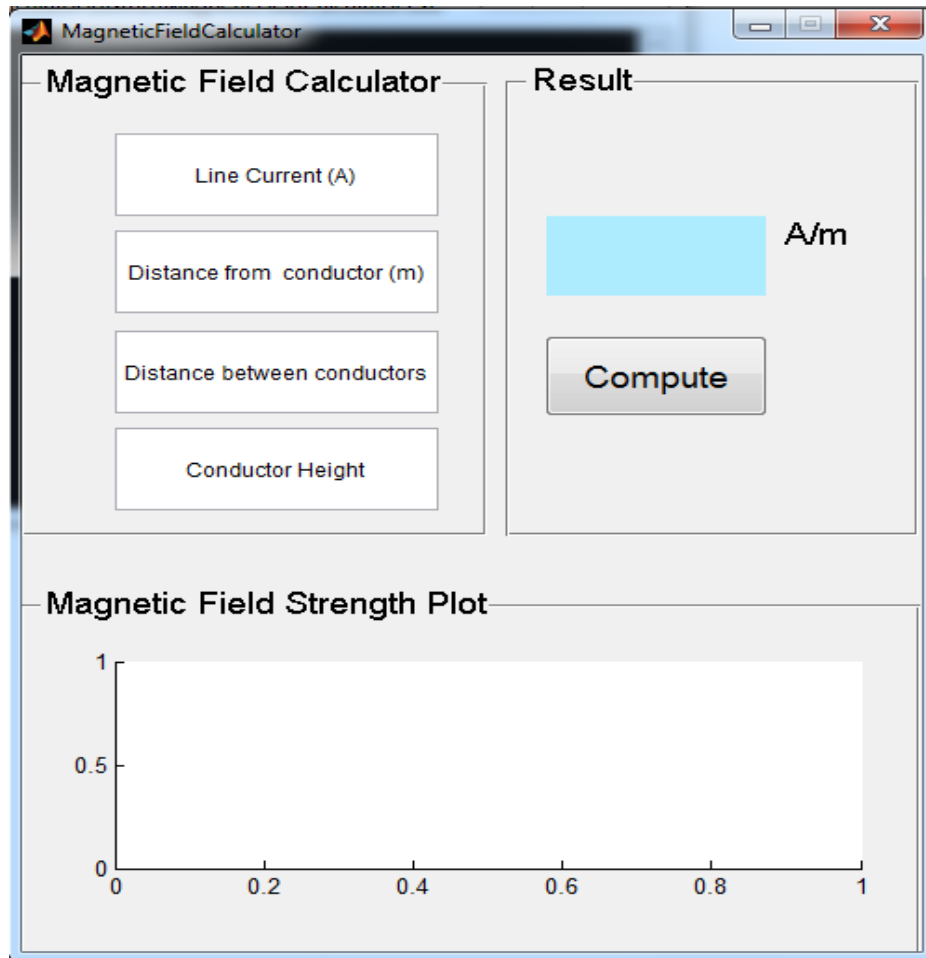
6. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Οδηγίες χρήσεως

Βήμα 1 : Εγκαταστήστε το Matlab Compiler Runtime MCR που δίνεται στο CD

Βήμα 2 : Ανοίξτε το εκτελέσιμο πρόγραμμα MFC

Βήμα 3 : Τοποθετήστε τα δεδομένα εισόδου στα κατάλληλα πεδία

Βήμα 4 : Πατήστε το κουμπί Compute



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Πρώιος, Αχιλλέας “Το μαγνητικό πεδίο στο περιβάλλον των υποσταθμών διανομής (20kV/400V) και μέσα περιορισμού του”, διδακτορική διατριβή, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2011
- [2] Παρασκευόπουλος, Απόστολος – Απόλλων “Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο σε δίκτυα και εγκαταστάσεις ως παράγων περιβαλλοντικών επιπτώσεων”, διδακτορική διατριβή, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2009
- [3] Μπούρκας, Περικλής Δ. “Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων”, εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998
- [4] Ρουμελιώτης, Ι, Τσαλαμέγκας Ι. Ηλεκτρομαγνητικά πεδία, εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα 2011
- [5] Transmission Line Reference Book 345kV and above/Second Edition, Electric Power Research Institute
- [6] Αγγελίδης, Π. Ανδρέας, “Μέση ημερήσια έκθεση σε μαγνητικό πεδίο 50Hz αναλόγως της δομής του δικτύου”
- [7] Β.Κ.Παπαδιάς, “Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Συμμετρία, Αθήνα 1999
- [8] John J. Grainer, William D. Stevenson, Jr. " Power Systems Analysis ", International editions, 1994
- [9] Ι.Τσαλαμέγκας, Ι.Ρουμελιώτης, “Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία τόμος Α”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- [10] R.B.Adler, L.J. Chu, and R.M. Fano, " Electromagnetic Energy Transmission and Radiation, Wiley ", New York 1965
- [11] P.S.Maruvada, A.Turgeon, D.L.Goulet, C.U.Cardinal, " A Statistical Model To Evaluate The Influence Of Proximity to Transmission Lines on Residential Magnetic Fields ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol3, No.4, October 1998
- [12] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, “Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία”, 2005
- [13] R.Mertens, R.Belmans, N. Van Dessel, S.Van Haute, W.Geysen, " Calculation of the electric and magnetic field surrounding a high voltage line using the finite element method "
- [14] Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξή, “Εισαγωγή στα ΣΗΕ”, ΕΜΠ, 2001
- [15] Π.Δ. Μπούρκας, “Εφαρμογές εγκαταστάσεων σε Νοσοκομεία” , ΕΜΠ, 1999

[16] IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, IEEE Std C95.6-2002, 0-3 kHz, October 2002

[17] Int. Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", Health Phys., vol. 74, pp. 495-523, April 1998

[18] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, "Έκθεση μετρήσεων των επιπέδων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούνται από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή της κοινότητας Κρυονερίου του Νομού Αττικής", Φεβρουάριος 2005

