



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

---

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ  
ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ  
ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**Επιβλέπων:** Καραγιαννόπουλος Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ &  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

---

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ  
ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ  
ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΟΙΚΟΝΟΜΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**Επιβλέπων:** Καραγιαννόπουλος Κωνσταντίνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .....

.....  
Περικλή Μπούρκα  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κωνσταντίνος  
Καραγιαννόπουλος  
Ανα. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

.....  
Κωνσταντίνος Γ. Οικονομόπουλος

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

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.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία αφιερώνεται στους γονείς και τον αδερφό μου για την στήριξη και την αγάπη τους.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο υπολογισμός των χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων συχνότητας 50 Hz που αναπτύσσονται στο περιβάλλον γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο εδάφιο της εισαγωγής γίνεται αναφορά στο ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στις γραμμές μεταφοράς του ελληνικού δικτύου και αναλύονται οι ιδιότητες του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Ο υπολογισμός της τιμής της μαγνητικής επαγωγής και της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης πραγματοποιείται μαθηματικά στα επόμενα δύο κεφάλαια.

Στο σημείο αυτό, και με βάση την θεωρητική προσέγγιση που προηγήθηκε, ακολουθεί η υλοποίηση προγράμματος σε περιβάλλον java Netbeans IDE για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης. Συγκεκριμένα, δίνεται η ευκαιρία στο χρήστη του προγράμματος με την εισαγωγή δεδομένων του σημείου που επιθυμεί, να υπολογίσει την μαγνητική επαγωγή γρήγορα και χωρίς την μαθηματική πολυπλοκότητα των πράξεων. Για πιο ολοκληρωμένη εικόνα του θέματος παρατίθεται μία προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού της τιμής του μαγνητικού πεδίου, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Σημαντικά αποτελέσματα εξήχθησαν από την μελέτη που προηγήθηκε και καταγράφονται στο τελευταίο κεφάλαιο «Σχόλια-Συμπεράσματα». Αξιοσημείωτες είναι οι αναφορές σε μετρήσεις που εκπονήθηκαν και αναφέρονται σε σχετικές εργασίες.

Λέξεις κλειδιά: ηλεκτρικό πεδίο, μαγνητικό πεδίο, γραμμές μεταφοράς, υλοποίηση προγράμματος, όρια ασφαλείας





## Abstact

The objective of this thesis is the calculation of low frequency electric and magnetic fields 50 Hz developed at power transmission lines. In the introduction paragraph there is a reference to greek power system with emphasis on the lines of the greek network and properties of the electric and magnetic field are analyzed. The mathematical calculation of the magnetic induction and electric intensity take place in the next two chapters. At this point, based on the theoretical approach that preceded, the program implementation in java netbeans ide environment follows, for the calculation of the magnetic field created by medium voltage power lines.

Specifically, the user of the program gets the opportunity to measure the magnetic induction without the complexity of mathematical operations. For a more comprehensive view of the subject, an approximate method for calculating the value of the magnetic field is given, the finite element method.

Significant results were extracted and listed in the final chapter “Conclusions-Comments”. Noticeable are the references to measurements carried out and reported in this work.

**Keywords:** electric field, magnetic field, transmission lines, program implementation, safety levels



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή.....	13
1.1	Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας .....	13
1.2	Γραμμές μεταφοράς του Ελληνικού δικτύου .....	16
1.2.1	Απλό κύκλωμα 150kV .....	17
1.2.2	Διπλό Κύκλωμα 150 kV .....	18
1.2.3	Απλό Κύκλωμα 400 kV .....	19
1.2.4	Διπλό Κύκλωμα 400 kV .....	20
1.3	Ηλεκτρομαγνητικά πεδία γραμμών μεταφοράς .....	22
1.4	Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία .....	26
1.5	Τα όρια ασφαλείας της έκθεσης του ανθρώπου σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz.....	29
2	Σκοπός της εργασίας.....	31
3	Θεωρητικός υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου.....	33
3.1	Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου για ένα αγωγό .....	33
3.2	Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος των 150 kV.....	35
3.3	Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 150KV.....	36
3.4	Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 400 KV.....	39
4	Θεωρητικός υπολογισμός μαγνητικού πεδίου.....	43
4.1	Μεταβλητές που επιδρούν στο μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου.....	43
4.2	Επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών της γραμμής στο μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου.....	44
4.3	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για ένα αγωγό .....	47
4.4	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος των 150KV.....	48
4.5	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 150 KV.....	50
4.6	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 400 KV.....	52
5	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV .....	55
5.1	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για ένα αγωγό .....	56
5.2	Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για τρεις αγωγούς .....	58
5.3	Υλοποίηση εφαρμογής για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου σε γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV.....	60
5.4	Παραδείγματα εκτέλεσης του προγράμματος .....	69
6	Εύρεση μαγνητικής επαγωγής σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση FEMM 4.0 .....	71
6.1	Το πρόγραμμα FEMM 4.0 .....	71
6.2	Το αρχείο femm.exe. ....	72
6.3	Η γλώσσα LUA για την εύρεση της μαγνητικής επαγωγής και του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού.....	76

7	Σχόλια-Συμπεράσματα.....	79
7.1	Μετρήσεις στην Ελλάδα.....	79
7.1.1	Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο Κρυονέρι Αττικής και στο περιβάλλον του ΚΥΤ (κέντρο υψηλής τάσης) Αργυρούπολης-Ηλιούπολης.....	79
7.1.2	Πεδιακές εντάσεις από υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης (150kV/20kV).....	80
7.1.3	Αποτελέσματα μετρήσεων του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και μετρήσεων του ΕΜΠ.....	83
7.1.4	Μετρήσεις του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου, Θράκης.....	88
7.2	Μετρήσεις και υπολογισμοί του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου εκτός Ελλάδας.....	90
7.3	Σύγκριση των τιμών Β και Ε γραμμών υψηλών τάσεων και Κ.Υ.Τ. και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων της καθημερινής ζωής των ανθρώπων... Παράρτημα Α.....	91 95
8	Βιβλιογραφία.....	105

# 1 Εισαγωγή

## 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:

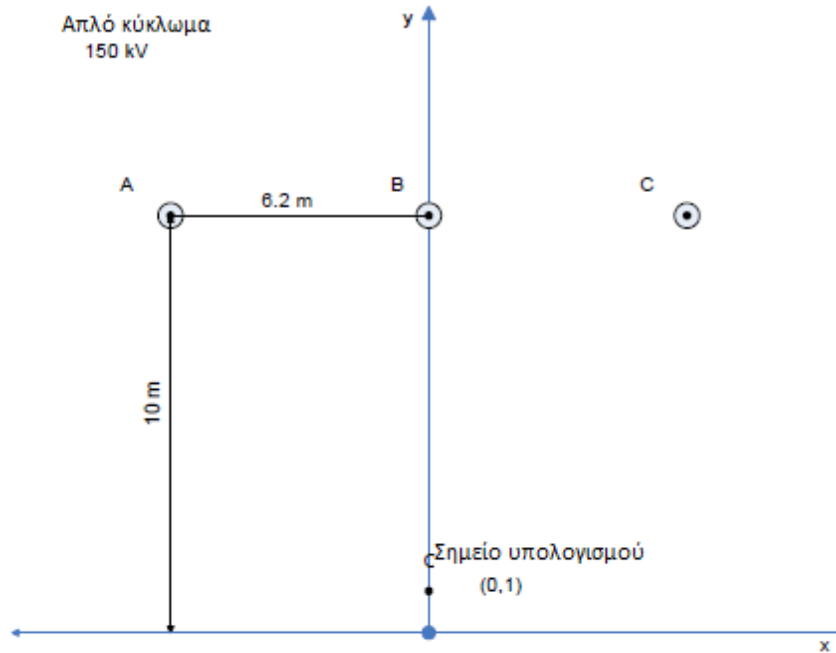
- 150kV απλό κύκλωμα σε οριζόντια διάταξη
- 150kV διπλό κύκλωμα σε κάθετη διάταξη
- 400kV απλό κύκλωμα σε οριζόντια διάταξη
- 400kV διπλό κύκλωμα σε κάθετη διάταξη



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**

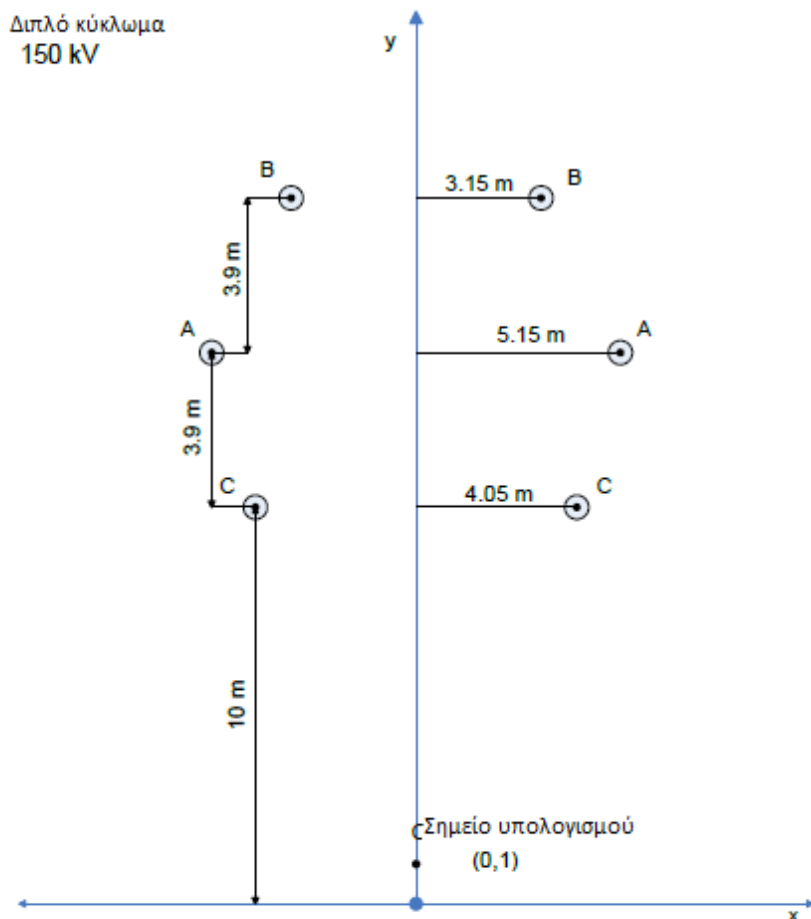
Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από 3 αγωγούς, έναν ανά φάση, με διατομή 636 MCM ( $1\text{MCM}=5.067\times 10^{-3}\text{cm}^2$ ) ή  $322\text{ mm}^2$ . Το μέγιστο ρεύμα που θεωρείται ότι διαρρέει τους αγωγούς του είναι τα 500 A, τιμή μικρότερη της μέγιστης θερμικής φόρτισης (770 A). Η τιμή αυτή προκύπτει 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  $322 \text{ mm}^2$ . 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:



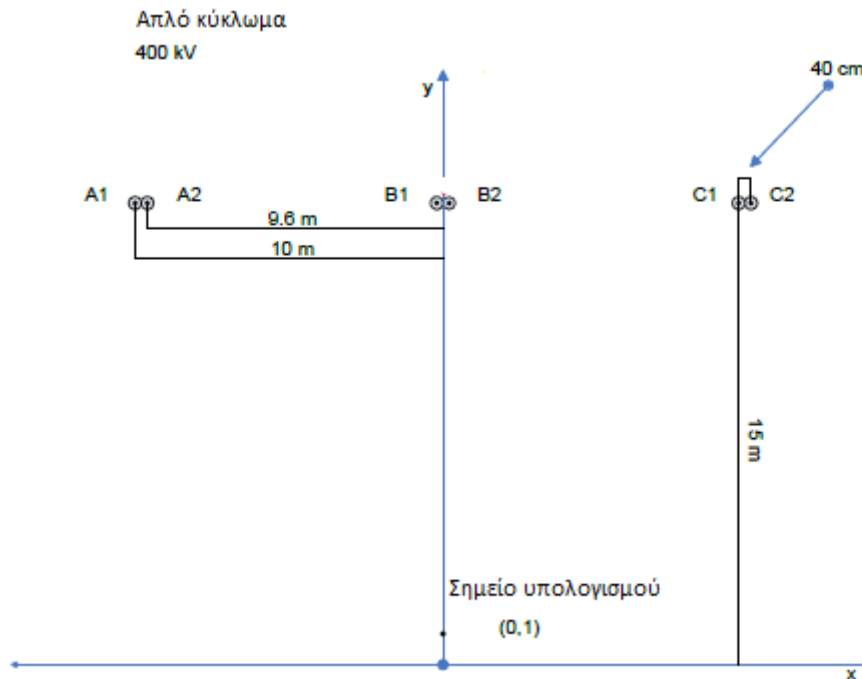
Σχήμα 1.2: Τυπική γεωμετρία γραμμής 150 kV διπλού κυκλώματος

### 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 mm<sup>2</sup>. 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 2x483mm<sup>2</sup>. 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 επισημάνθει ότι ως κεντρικό σημείο μιας φάσης θεωρήθηκε το μέσο ανάμεσα στους δύο αγωγούς της φάσης. Οι αποστάσεις αυτές συμμορφώνονται

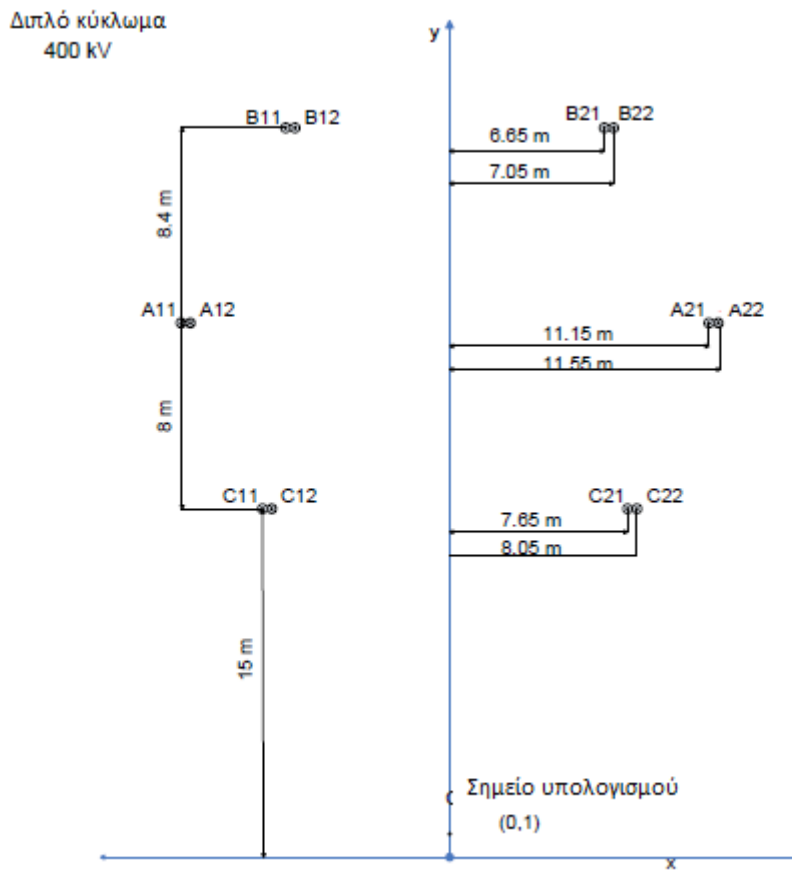
απόλυτα με τους κανονισμούς που επιβάλλουν ως ελάχιστο ύψος τα 10,25 m και ως ελάχιστη απόσταση μεταξύ των αγωγών διαφορετικής τάσης τα 3,6 m για το επίπεδο τάσης των 400 kV. Το κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα 1.3 :



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 mm<sup>2</sup>. 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 υπέρυθρη, 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 κεραιές 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 σώματα 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

ενάεριες 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

$\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου

$\varepsilon$  η διηλεκτρική σταθερά του μέσου

$\sigma$  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  $\varepsilon, \mu$ :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{F/m} \quad (1-3)$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m} \quad (1-4)$$

ενώ και η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  του αέρα είναι πρακτικά μηδενική, οπότε και μηδενίζεται ο αντίστοιχος όρος στην 2<sup>η</sup> 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 πεδιακών 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  $2 \times 10^{15}$  Hz (υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X κλπ) καλείται ιονίζουσα, διότι η ενέργεια που αποδεδμεύεται 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  $\mu\text{T}$  (μικροτέσλα=1 εκατομμυριοστό του T). Επίσης χρησιμοποιείται και η μονάδα G (γκάους), συνήθως με το υποπολλαπλάσιο mG (μιλγκάους= 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:

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

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

- $B=500 \mu\text{T}$
- $E=10 \text{ kV}$

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 Σκοπός της εργασίας

Η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας γνωρίζει σταθερή αύξηση, ιδιαίτερα στον βιομηχανικό κόσμο, φυσική συνέπεια της οποίας είναι η εξάπλωση των δικτύων μεταφοράς και διανομής σε ολοένα και ευρύτερες εκτάσεις. Καθημερινά πολλαπλασιάζονται οι απαιτήσεις για ταχύτερη, αποτελεσματικότερη και σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι ο ηλεκτρισμός συνιστά αδιαμφισβήτητα στοιχειώδες κοινωνικό αγαθό, άρρηκτα συνδεδεμένο με τις ανάγκες και την ποιότητα ζωής των ανθρώπων, υπάρχει σήμερα προβληματισμός σχετικά με ενδεχόμενες δυσμενείς επιπτώσεις πέραν του γνωστού κινδύνου των ηλεκτροπληξιών. Ο προβληματισμός επικεντρώνεται στα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, η ύπαρξη των οποίων είναι συνυφασμένη με τη χρήση του ηλεκτρισμού και ειδικότερα των πεδίων που αναπτύσσονται στις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Κρίθηκε αναγκαία η εκπόνηση μίας ολοκληρωμένης εργασίας για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Ο υπολογισμός των πεδίων πραγματοποιήθηκε αφενός με την μορφή εξισώσεων και αφετέρου με την υλοποίηση προγράμματος για γρηγορότερη και πιο αποτελεσματική εικόνα. Στόχος του προγράμματος είναι να λειτουργήσει σαν εργαλείο και επικουρικά στον μηχανικό.

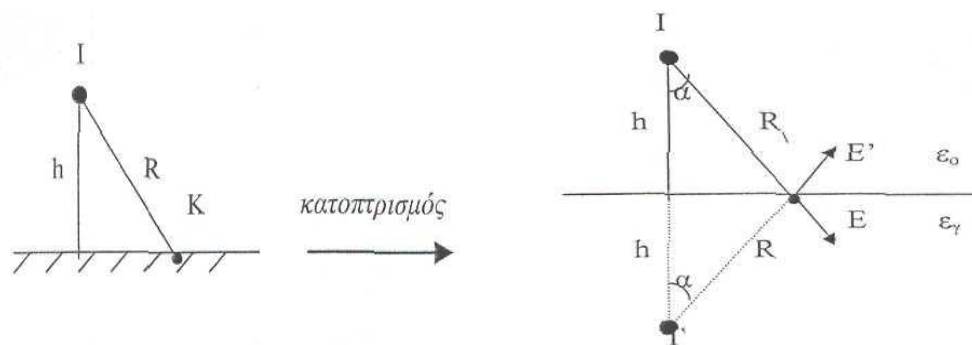




### 3 Θεωρητικός υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου

#### 3.1 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου για ένα αγωγό

Θεωρούμε αγωγό γραμμικής πυκνότητας  $\lambda$  ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα έντασεως  $I$  σε ύψος  $h$  πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Έστω σημείο  $K$  στην επιφάνεια το οποίο απέχει απόσταση  $R$  από τον αγωγό (Σχήμα 2.1). Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του κατοπτρισμού θα υπολογίσουμε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός.



**Σχήμα 3.1:** Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου με την μέθοδο του κατοπτρισμού

Από την επίδραση του αγωγού 1 πυκνότητας  $\lambda$ , προκύπτει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου :

$$\vec{E}_1 = \lambda / (2\pi\epsilon_0 R)$$

Ομοίως από τον αγωγό 2 προκύπτει :

$$\vec{E}_2 = \lambda' / (2\pi\epsilon_0 R)$$

$$\text{Όπου : } \lambda' = (\epsilon_0 - \epsilon_\gamma) \lambda / (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)$$

Σύμφωνα με την επαλληλία η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου θα ισούται με:

$$\vec{E}_{ολ} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

Αναλύοντας τα  $\vec{E}_1$  και  $\vec{E}_2$  στους άξονες  $x$  και  $y$  προκύπτει

Για τον άξονα  $x$ :

$$\begin{aligned}\vec{E}_{ολx} &= \vec{E}_{1x} + \vec{E}_{2x} = [\lambda\eta\mu\alpha / (2\pi\epsilon_0 R)]\vec{x} + [\lambda'\eta\mu\alpha / (2\pi\epsilon_0 R)]\vec{x} = \\ &= \{\eta\mu\alpha[\lambda + \lambda(\epsilon_o - \epsilon_\gamma) / (\epsilon_o + \epsilon_\gamma)] / (2\pi\epsilon_0 R)\}\vec{x} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \vec{E}_{ολx} = [\lambda\eta\mu\alpha / \pi R(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)]\vec{x}\end{aligned}$$

όμως  $R = h / \sigma\nu\alpha$  οπότε έχουμε :

$$\vec{E}_{ολx} = [\lambda\eta\mu\alpha\sigma\nu\alpha / \pi h(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)]\vec{x}$$

Για τον άξονα  $y$ :

$$\begin{aligned}\vec{E}_{ολy} &= \vec{E}_{1y} - \vec{E}_{2y} = [\lambda\sigma\nu\alpha / (2\pi\epsilon_0 R)]\vec{y} + [\lambda'\sigma\nu\alpha / (2\pi\epsilon_0 R)]\vec{y} = \\ &= \{\sigma\nu\alpha[\lambda - \lambda(\epsilon_o - \epsilon_\gamma) / (\epsilon_o + \epsilon_\gamma)] / (2\pi\epsilon_0 R)\}\vec{y} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \vec{E}_{ολy} = [\lambda\sigma\nu\alpha\epsilon_\gamma / \pi R(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)\epsilon_o]\vec{y}\end{aligned}$$

Όμως  $R = h / \sigma\nu\alpha$  οπότε:  $\Rightarrow \vec{E}_{ολy} = [\lambda\sigma\nu\alpha^2\epsilon_\gamma / \pi h(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)\epsilon_o]\vec{y}$

Άρα το ολικό ηλεκτρικό πεδίο του αγωγού θα είναι :

$$\vec{E}_{ολ} = \vec{E}_{ολx} + \vec{E}_{ολy} = [\lambda\eta\mu\alpha\sigma\nu\alpha / \pi h(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)]\vec{x} + [\lambda\sigma\nu\alpha^2\epsilon_\gamma / \pi h(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)\epsilon_o]\vec{y}$$

Όμως  $\lambda = I / c$  όπου  $c$  ταχύτητα του φωτός οπότε:

$$\vec{E}_{ολ} = [I\eta\mu\alpha\sigma\nu\alpha / c\pi h(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)]\vec{x} + [I\sigma\nu\alpha^2\epsilon_\gamma / c\pi h(\epsilon_o + \epsilon_\gamma)\epsilon_o]\vec{y}$$

### 3.2 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος των 150 kV.

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος των 150 kV σε ύψος  $h$  από την επιφάνεια του εδάφους. Έστω τυχαίο σημείο  $K$  στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο απέχει απόσταση  $R_1, R_2, R_3$  αντίστοιχα από τους τρεις αγωγούς. Θεωρούμε ότι οι τρεις αγωγοί διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα  $I_1, I_2, I_3$ .

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της ανάλυσης του ηλεκτρικού πεδίου για έναν αγωγό και βάσει της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των τριών αγωγών.

Ο πυλώνας των 150 kV και η σχηματική αναπαράσταση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2.1.

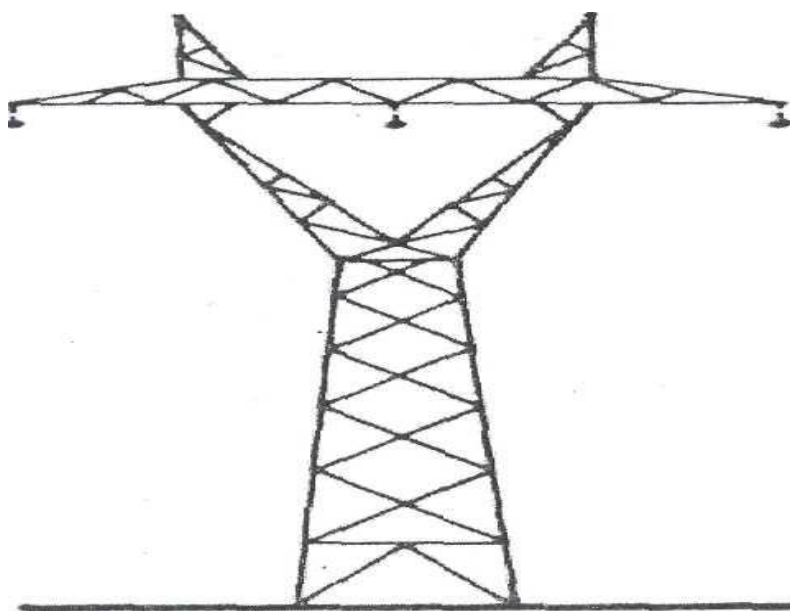
Άρα για το ηλεκτρικό πεδίο ισχύουν τα παρακάτω:

Το ηλεκτρικό πεδίο του πρώτου αγωγού είναι:

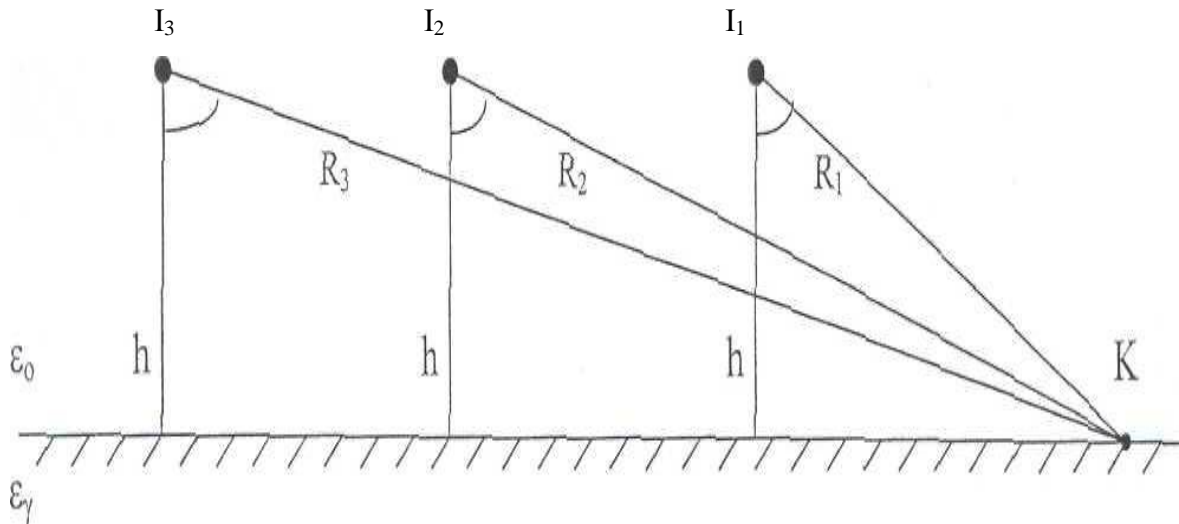
$$\vec{E}_1 = [I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 \epsilon_\gamma / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Το ηλεκτρικό για τον δεύτερο αγωγό είναι:

$$\vec{E}_2 = [I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 \epsilon_\gamma / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$



Σχήμα 3.2.1: Πυλώνας 150 kV απλού κυκλώματος.



**Σχήμα 3.2.2:** Σχηματική παράσταση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου.

Το ηλεκτρικό πεδίο του τρίτου αγωγού είναι:

$$\vec{E}_3 = [I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3 \epsilon_\gamma / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$\vec{E}_{\sigma\lambda} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \Rightarrow$$

$$\vec{E}_{\sigma\lambda} = [(I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 + I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 + I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3) / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [\epsilon_\gamma (I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 + I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 + I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3) / c \pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

### 3.3 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 150KV

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 150KV. Πάνω στο πυλώνα υπάρχουν έξι αγωγοί οι οποίοι απέχουν ύψος  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$  αντίστοιχα από την επιφάνεια του εδάφους (με  $h_1=h_6, h_2=h_5, h_3=h_4$ ). Έστω τυχαίο σημείο K στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο απέχει απόσταση  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  αντίστοιχα από τους έξι αγωγούς. Θεωρού με ότι οι έξι αγωγοί διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ .

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της ανάλυσης του ηλεκτρικού πεδίου για έναν αγωγό και βάσει της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των έξι αγωγών. Ο πυλώνας

διπλού κυκλώματος των 150 kV και η σχηματική παράσταση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.1.

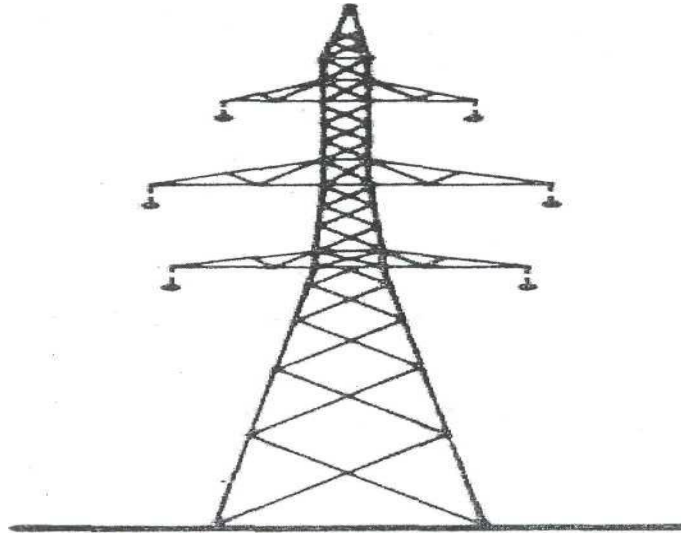
Άρα για το ηλεκτρικό πεδίο ισχύουν τα παρακάτω:

Ηλεκτρικό πεδίο του πρώτου αγωγού:

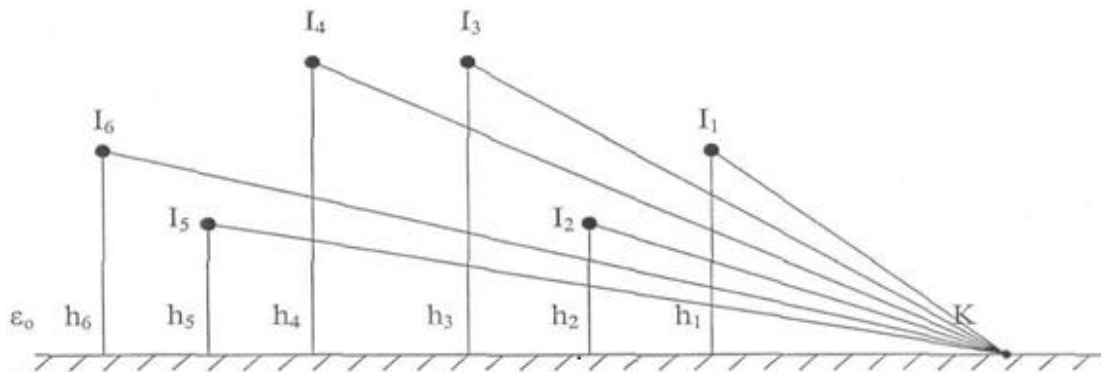
$$\vec{E}_1 = [I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / c \pi h_1 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 \epsilon_\gamma / c \pi h_1 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Ηλεκτρικό πεδίο του δεύτερου αγωγού :

$$\vec{E}_2 = [I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / c \pi h_2 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 \epsilon_\gamma / c \pi h_2 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$



Σχήμα 3.3.1: Πυλώνας 150 kV διπλού κυκλώματος.



Σχήμα 3.3.2: Σχηματική παράσταση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου.

Ηλεκτρικό πεδίο αγωγού 3:

$$\vec{E}_3 = [I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / c \pi h_3 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3 \epsilon_\gamma / c \pi h_3 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Ηλεκτρικό πεδίο αγωγού 4:

$$\vec{E}_4 = [I_4 \eta \mu \alpha_4 \sigma \nu \alpha_4 / c \pi h_4 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_4 \sigma \nu^2 \alpha_4 \epsilon_\gamma / c \pi h_4 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Ηλεκτρικό πεδίο αγωγού 5:

$$\vec{E}_5 = [I_5 \eta \mu \alpha_5 \sigma \nu \alpha_5 / c \pi h_5 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_5 \sigma \nu^2 \alpha_5 \epsilon_\gamma / c \pi h_5 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Ηλεκτρικό πεδίο αγωγού 6:

$$\vec{E}_6 = [I_6 \eta \mu \alpha_6 \sigma \nu \alpha_6 / c \pi h_6 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [I_6 \sigma \nu^2 \alpha_6 \epsilon_\gamma / c \pi h_6 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$\vec{E}_{ολ} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 + \vec{E}_5 + \vec{E}_6 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ολ} = & \{ [ (I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / h_1) + (I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / h_2) + (I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / h_3) + (I_4 \eta \mu \alpha_4 \sigma \nu \alpha_4 / h_4) + \\ & (I_5 \eta \mu \alpha_5 \sigma \nu \alpha_5 / h_5) + (I_6 \eta \mu \alpha_6 \sigma \nu \alpha_6 / h_6) ] / c \pi (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \} \vec{\chi} + \\ & \{ \epsilon_\gamma [ (I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 / h_1) + (I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 / h_2) + (I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3 / h_3) + \\ & (I_4 \sigma \nu^2 \alpha_4 / h_4) + (I_5 \sigma \nu^2 \alpha_5 / h_5) + (I_6 \sigma \nu^2 \alpha_6 / h_6) ] / c \pi (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0 \} \vec{y} \end{aligned}$$

### 3.4 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 400 KV

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 400KV. Πάνω στο πυλώνα υπάρχουν έξι ζεύγη αγωγών τα οποία απέχουν ύψος  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$  αντίστοιχα από την επιφάνεια του εδάφους (με  $h_1=h_6, h_2=h_5, h_3=h_4$ ).

Έστω τυχαίο σημείο K στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο απέχει απόσταση  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  αντίστοιχα από τα έξι ζεύγη αγωγών. Αναλύοντας το κάθε ζεύγος αγωγών (οι οποίοι είναι όμοιοι και διαρρέονται από ίσες εντάσεις ρευμάτων I) προκύπτει ένας ισοδύναμος αγωγός ο οποίος θα διαρρέεται από ρεύμα  $I' = 2I$ . Άρα οι έξι ισοδύναμοι αγωγοί που προκύπτουν από τα αντίστοιχα έξι ζεύγη θα διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα:

$$I_1' = 2I_1, I_2' = 2I_2, I_3' = 2I_3, I_4' = 2I_4, I_5' = 2I_5, I_6' = 2I_6$$

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της ανάλυσης του ηλεκτρικού πεδίου για έναν αγωγό και βάσει της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των έξι ισοδύναμων αγωγών. Ο πυλώνας διπλού κυκλώματος των 400kV και η σχηματική αναπαράσταση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.1.

Άρα για το ηλεκτρικό πεδίο ισχύουν τα παρακάτω:

Το ηλεκτρικό πεδίο στον ισοδύναμο αγωγό 1 είναι:

$$\vec{E}_1 = [2I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / c \pi h_1 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [2I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 \epsilon_\gamma / c \pi h_1 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Το ηλεκτρικό πεδίο στον ισοδύναμο αγωγό 2 είναι:

$$\vec{E}_2 = [2I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / c \pi h_2 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [2I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 \epsilon_\gamma / c \pi h_2 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

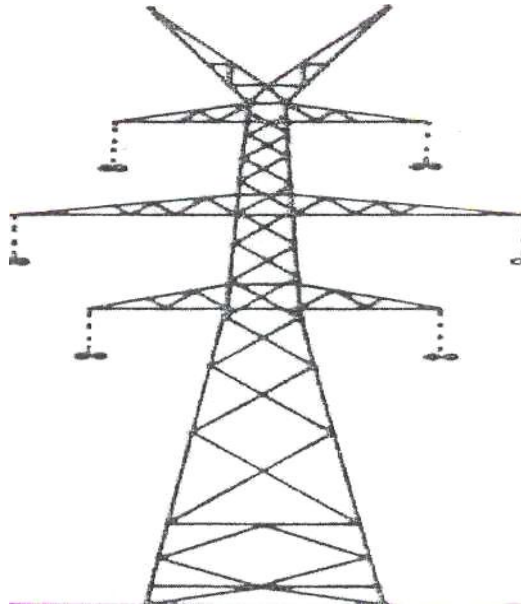
Το ηλεκτρικό πεδίο στον ισοδύναμο αγωγό 3 είναι:

$$\vec{E}_3 = [2I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / c \pi h_3 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [2I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3 \epsilon_\gamma / c \pi h_3 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

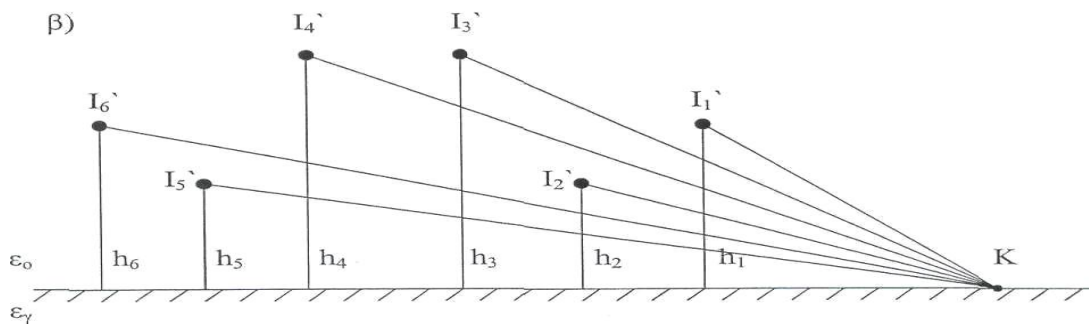
Το ηλεκτρικό πεδίο στον ισοδύναμο αγωγό 4 είναι:

$$\vec{E}_4 = [2I_4 \eta \mu \alpha_4 \sigma \nu \alpha_4 / c \pi h_4 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [2I_4 \sigma \nu^2 \alpha_4 \epsilon_\gamma / c \pi h_4 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

α)



β)



**Σχήμα 3.4-1:** α) Πυλώνας 400kV διπλού κυκλώματος.

β) Σχηματική παράσταση για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου.

Το ηλεκτρικό πεδίο στον ισοδύναμο αγωγό 5 είναι:

$$\vec{E}_5 = [2I_5 \eta \mu \alpha_5 \sigma \nu \alpha_5 / c \pi h_5 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [2I_5 \sigma \nu \alpha_5 \epsilon_\gamma / c \pi h_5 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$

Το ηλεκτρικό πεδίο στον ισοδύναμο αγωγό 6 είναι:

$$\vec{E}_6 = [2I_6 \eta \mu \alpha_6 \sigma \nu \alpha_6 / c \pi h_6 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \vec{\chi} + [2I_6 \sigma \nu \alpha_6 \epsilon_\gamma / c \pi h_6 (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \vec{y}$$



Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{ολ} &= \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 + \vec{E}_5 + \vec{E}_6 \Rightarrow \\ \vec{E}_{ολ} &= \{2[(I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / h_1) + (I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / h_2) + (I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / h_3) + \\ &(I_4 \eta \mu \alpha_4 \sigma \nu \alpha_4 / h_4) + (I_5 \eta \mu \alpha_5 \sigma \nu \alpha_5 / h_5) + (I_6 \eta \mu \alpha_6 \sigma \nu \alpha_6 / h_6)] / c \pi (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)\} \vec{\chi} + \\ &\{2 \epsilon_\gamma [(I_1 \sigma \nu \alpha_1 / h_1) + (I_2 \sigma \nu \alpha_2 / h_2) + (I_3 \sigma \nu \alpha_3 / h_3) + (I_4 \sigma \nu \alpha_4 / h_4) + \\ &(I_5 \sigma \nu \alpha_5 / h_5) + (I_6 \sigma \nu \alpha_6 / h_6)] / c \pi (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0\} \vec{y} \end{aligned}$$



## 4 Θεωρητικός υπολογισμός μαγνητικού πεδίου

### 4.1 *Μεταβλητές που επιδρούν στο μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου*

Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μία γραμμή μεταφοράς εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων που περιλαμβάνουν τη φόρτιση της γραμμής, το σχεδιασμό και τη δομή της γραμμής, τις καιρικές συνθήκες και τη μορφολογία και δομή του εδάφους. Οι παράγοντες αυτοί είναι καθοριστικοί στο μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου και λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας νέας γραμμής.

Η φόρτιση της γραμμής μεταβάλλεται διαρκώς κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η φόρτιση εμφανίζει ημερήσιους, εβδομαδιαίους και ετήσιους κύκλους, προκαλώντας αντίστοιχη διακύμανση στο δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι συνθήκες φόρτισης εξαρτώνται από το είδος των καταναλωτών που τροφοδοτούνται από τη γραμμή, ενώ μπορεί να υπάρχουν και παροδικές υπερφορτίσεις που οδηγούν σε δημιουργία τιμών μαγνητικού πεδίου πολύ μεγαλύτερων από αυτές της κανονικής λειτουργίας της γραμμής. Έτσι, για μία υφιστάμενη γραμμή μεταφοράς συνήθως μπορεί να προκύπτουν διαφορετικές καμπύλες μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της γραμμής, που να αναφέρονται στην τυπική ημερήσια κανονική λειτουργία, στη μέγιστη φόρτιση που παρουσιάστηκε μία ημέρα του έτους, σε μία παροδική υπερφόρτιση που προέκυψε μετά από σφάλμα κ.λπ. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά στην έκθεση στο πεδίο μιας γραμμής αρκεί θεωρητικά η καμπύλη μέγιστης φόρτισης.

Ο σχεδιασμός της γραμμής είναι επίσης καθοριστικής σημασίας για το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου. Οι λεπτομέρειες που επηρεάζουν την τιμή του τελικού παραγόμενου μαγνητικού πεδίου είναι η δομή, το υλικό και η γεωμετρία του αγωγού γης και των αγωγών φάσεων, οι ηλεκτρικές παράμετροι και ο τύπος των αγωγών γης και φάσεων, τα δεδομένα ανάρτησης των αγωγών, η ελάχιστη απόσταση αυτών από το έδαφος, το πραγματικό και το ισοδύναμο άνοιγμα της γραμμής και τέλος η ειδική αντίσταση και η μορφολογία του εδάφους. Η επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών της γραμμής αναλύεται στην επόμενη παράγραφο. Όσον αφορά στην επίδραση του εδάφους, αυτή είναι σύνθετη, αν ληφθεί υπόψη ότι σε μια πραγματική περίπτωση η μορφολογία του εδάφους κάτω από μια γραμμή μεταβάλλεται τόσο κατά μήκος αυτής όσο και εγκάρσια σε αυτή, ενώ παράλληλα η

τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταβάλλεται και κατά τη διάρκεια του έτους.

#### **4.2 Επίδραση των τεχνικών χαρακτηριστικών της γραμμής στο μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου**

Το μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου στον περιβάλλοντα χώρο της γραμμής, εκτός από την τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς, εξαρτάται και από τα ιδιαίτερα τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευής της γραμμής.

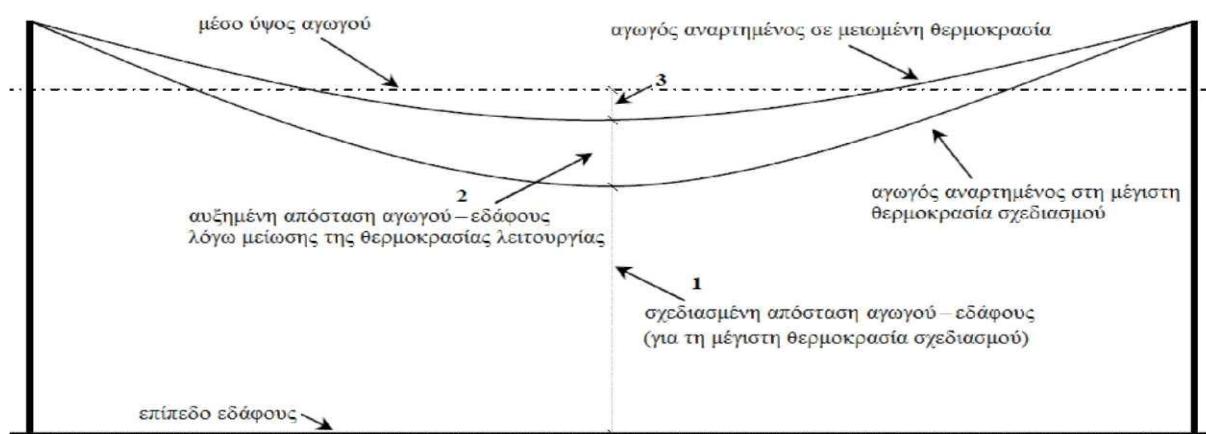
Η απόσταση των αγωγών από το έδαφος (ground clearance) είναι ένας καθοριστικός παράγοντας. Όσο μικραίνει η απόσταση αυτή, δηλαδή το ύψος ανάρτησης των αγωγών των φάσεων, τόσο μεγαλύτερο είναι το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο στα σημεία που βρίσκονται κοντά στο έδαφος. Καθώς οι αγωγοί της γραμμής αναρτώνται στους πυλώνες στήριξης, ασκούνται πάνω στους αγωγούς κατακόρυφα φορτία σταθερά ανά μονάδα μήκους, που είναι το ίδιο βάρος των αγωγών και πιθανώς ένα επιπρόσθετο βάρος λόγω επικάθησης πάγου. Σαν αποτέλεσμα αυτών των κατακόρυφων φορτίων, οι αγωγοί κάμπτονται και κατά συνέπεια η ελάχιστη απόσταση των αγωγών από το έδαφος εμφανίζεται συνήθως στο ενδιάμεσο του ανοίγματος μεταξύ δύο γειτονικών πυλώνων (*midspan*). Αντίθετα, σε σημεία κοντά στους πυλώνες, η απόσταση των αγωγών από το έδαφος είναι η μέγιστη δυνατή. Λόγω της τάσης λειτουργίας της γραμμής, υπάρχει μια ελάχιστη απόσταση που πρέπει να διασφαλίζεται μεταξύ των αγωγών φάσεων της γραμμής και του εδάφους ή και οροφών κτιρίων, έτσι ώστε να πληρούται η συνθήκη ελάχιστης απόστασης για την αποφυγή της ηλεκτρικής διάσπασης του αέρα (1 m ανά 150 kV).

Σε μια πρακτική περίπτωση, η απόσταση των αγωγών των φάσεων από το έδαφος διαφέρει από άνοιγμα σε άνοιγμα σε διαδοχικούς πυλώνες και από σημείο σε σημείο στο άνοιγμα μεταξύ δύο πυλώνων. Η διάταξη των αγωγών των φάσεων (*conductor phasing*) στη γραμμή διπλού κυκλώματος είναι ακόμη ένας καθοριστικός παράγοντας επηρεασμού του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου. Ανάλογα με τη διάταξη, υπάρχει δυνατότητα μείωσης του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον της γραμμής. Η συνήθης διάταξη των αγωγών στο χώρο, η οποία καλείται και συμμετρική, περιλαμβάνει δύο κυκλώματα τοποθετημένα κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο με συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ των αγωγών τους, στα οποία οι φάσεις



διαστάσεων στην περίπτωση γραμμών απλού κυκλώματος, αλλά και στην περίπτωση γραμμών διπλού κυκλώματος, ακόμη και όταν οι τελευταίες είναι κατασκευασμένες με τη βέλτιστη διάταξη φάσεων .

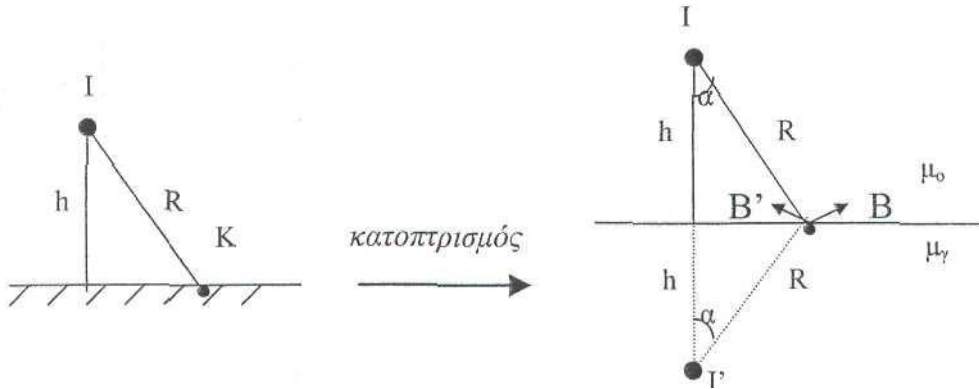
Μία ακόμη κρίσιμη παράμετρος που έχει αντίκτυπο στην τιμή του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου είναι το βάρος του αγωγού ανά μονάδα μήκους αυτού. Η κατακόρυφη θέση των αγωγών των φάσεων της γραμμής μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία του αγωγού, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων όπως η φόρτιση της γραμμής, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και η ταχύτητα του ανέμου, καθώς και ο σχεδιασμός - διάταξη της γραμμής. Έτσι, κατά το σχεδιασμό της γραμμής λαμβάνεται υπόψη η διαστολή του αγωγού κατά τη λειτουργία της γραμμής, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερο βέλος ανάρτησης και ισοδύναμα σε μικρότερη απόσταση του αγωγού από το έδαφος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2.1.2. Αν το έδαφος θεωρηθεί επίπεδο, μπορεί ναδειχθεί χρησιμοποιώντας παραβολικές εξισώσεις ότι το μέσο ύψος ανάρτησης του αγωγού σε μια θεωρούμενη θερμοκρασία λειτουργίας ισούται με την ελάχιστη απόσταση αγωγού -εδάφους (που αντιστοιχεί στη μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού), προσαυξημένη με το ύψος που προκύπτει λόγω της λειτουργίας σε θερμοκρασία μικρότερη από τη μέγιστη θερμοκρασία σχεδιασμού, συν το 1/3 του βέλους ανάρτησης στη θεωρούμενη θερμοκρασία λειτουργίας.



**Σχήμα 4.2.1.2:** Μεταβολή του βέλους ανάρτησης του αγωγού με την θερμοκρασία

### 4.3 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για ένα αγωγό

Θεωρούμε αγωγό γραμμικής πυκνότητας  $\lambda$  ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως  $I$  σε ύψος  $h$  πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 4.3.1). Έστω σημείο  $K$  στην επιφάνεια το οποίο απέχει απόσταση  $R$  από τον αγωγό. Με βάση την μέθοδο του κατοπτρισμού ισχύει:



**Σχήμα 4.3.1 :** Διανυσματική ανάλυση μαγνητικού πεδίου με την μέθοδο του κατοπτρισμού

Από την επίδραση του αγωγού 1 ρεύματος  $I$ , προκύπτει η μαγνητική επαγωγή :

$$\vec{B}_1 = \mu_0 I / (2\pi R)$$

Ομοίως από τον αγωγό 2 προκύπτει :

$$\vec{B}_2 = \mu_0 \Gamma / (2\pi R)$$

όπου  $\Gamma = I(\mu_\gamma - \mu_0) / (\mu_\gamma + \mu_0)$

Σύμφωνα με την επαλληλία η ολική μαγνητική επαγωγή θα ισούται με

$$\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

Αναλύοντας τα  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$  στους άξονες  $x$  και  $y$  προκύπτει άξονας  $x$ :

$$\begin{aligned} \vec{B}_{ολx} &= \vec{B}_{1x} - \vec{B}_{2x} = [\mu_0 I \sigma \nu \alpha / (2\pi R)] \vec{\chi} - [\mu_0 \Gamma \sigma \nu \alpha / (2\pi R)] \vec{\chi} = \\ &= [\mu_0 \sigma \nu \alpha (I - \Gamma) / (2\pi R)] \vec{\chi} = \{ \mu_0 \sigma \nu \alpha [I - I(\mu_\gamma - \mu_0) / (\mu_\gamma + \mu_0)] / 2\pi R \} \vec{\chi} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\vec{B}_{ολx} = [I \mu_0^2 \sigma \nu \alpha / \pi R (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{\chi}$$

όμως  $R = h / \sigma \nu \alpha$  οπότε έχουμε :  $\vec{B}_{ολx} = [I \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{\chi}$

άξονας y:

$$\begin{aligned}\vec{B}_{ολ,y} &= \vec{B}_{1,y} + \vec{B}_{2,y} = [\mu_0 I \eta \mu \alpha / (2\pi R)] \vec{y} + [\mu_0 \Gamma \eta \mu \alpha / (2\pi R)] \vec{y} = \\ &= [\mu_0 \eta \mu \alpha (I + \Gamma) / (2\pi R)] \vec{y} = \{ \mu_0 \eta \mu \alpha [I + I(\mu_\gamma - \mu_0) / (\mu_\gamma + \mu_0)] / 2\pi R \} \vec{y} \\ \vec{B}_{ολ,y} &= [I \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha / \pi R (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y}\end{aligned}$$

όμως  $R = h / \sigma \nu \alpha$  οπότε:  $\vec{B}_{ολ,y} = [I \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha \sigma \nu \alpha / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y}$

Άρα η ολική μαγνητική επαγωγή του αγωγού θα είναι:

$$\begin{aligned}\vec{B}_{ολ} &= \vec{B}_{ολ,x} + \vec{B}_{ολ,y} = [I \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha / \pi R (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{x} \\ &+ [I \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha \sigma \nu \alpha / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y}\end{aligned}$$

#### 4.4 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος των 150KV

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος των 150 kV σε ύψος H από την επιφάνεια του εδάφους. Έστω τυχαίο σημείο K στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο απέχει απόσταση R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> αντίστοιχα από τους τρεις αγωγούς. Θεωρούμε ότι οι τρεις αγωγοί διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>.

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για έναν αγωγό και βάσει της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των τριών αγωγών. Ο πυλώνας των 150 kV και η σχηματική αναπαράσταση για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4.1.

Άρα για το πεδίο ισχύει:

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 1:

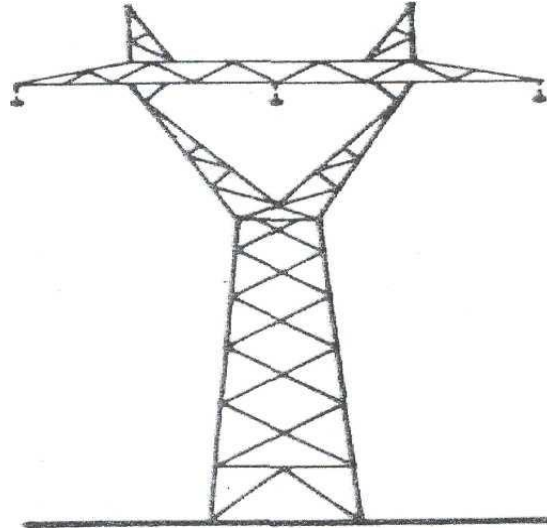
$$\vec{B}_1 = [I_1 \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha_1 / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{x} + [I_1 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{y}$$

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 2:

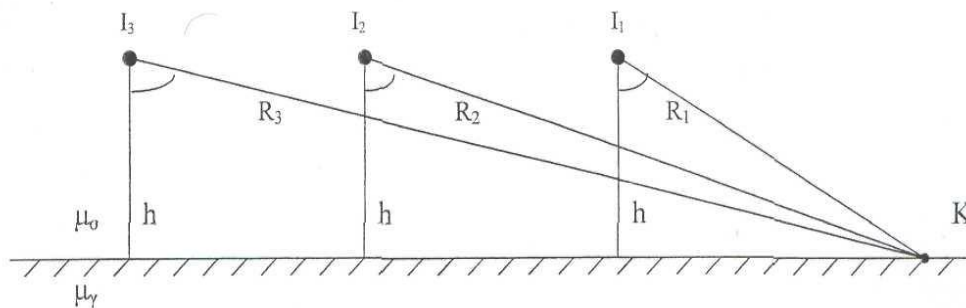


$$\vec{B}_2 = [I_2 \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha_2 / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{\chi} + [I_2 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{y}$$

α)



β)



**Σχήμα:4.4.1:** α) Πυλώνας 150 kV απλού κυκλώματος.

β) Σχηματική παράσταση για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου.

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 3:

$$\vec{B}_3 = [I_3 \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha_3 / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{\chi} + [I_3 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{y}$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο είναι:

$$\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 \Rightarrow$$

$$\vec{B}_{ολ} = [\mu_0^2 (I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 + I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 + I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3) / \pi h (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{\chi} +$$

$$[\mu_0\mu_\gamma(I_1\eta\mu\alpha_1\sigma\nu\alpha_1 + I_2\eta\mu\alpha_2\sigma\nu\alpha_2 + I_3\eta\mu\alpha_3\sigma\nu\alpha_3) / \pi h(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

#### 4.5 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 150 KV

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 150 kV. Πάνω στο πυλώνα υπάρχουν έξι αγωγοί οι οποίοι απέχουν ύψος  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$  αντίστοιχα από την επιφάνεια του εδάφους (με  $h_1=h_6, h_2=h_5, h_3=h_4$ ). Έστω τυχαίο σημείο K στην επιφάνεια του εδάφους σε αποστάσεις  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  αντίστοιχα από τους έξι αγωγούς. Θεωρούμε ότι οι έξι αγωγοί διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ .

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για έναν αγωγό και βάσει της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των έξι αγωγών. Ο πυλώνας των 150 kV διπλού κυκλώματος και η σχηματική αναπαράσταση για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5.1

Άρα για το πεδίο ισχύει:

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 1:

$$\vec{B}_1 = [I_1\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_1 / \pi h_1(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_1\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_1\sigma\nu\alpha_1 / \pi h_1(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

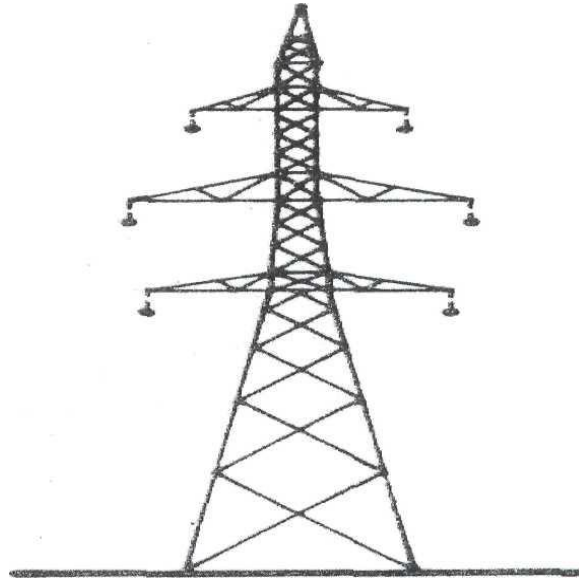
Μαγνητικό πεδίο αγωγού 2:

$$\vec{B}_2 = [I_2\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_2 / \pi h_2(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_2\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_2\sigma\nu\alpha_2 / \pi h_2(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

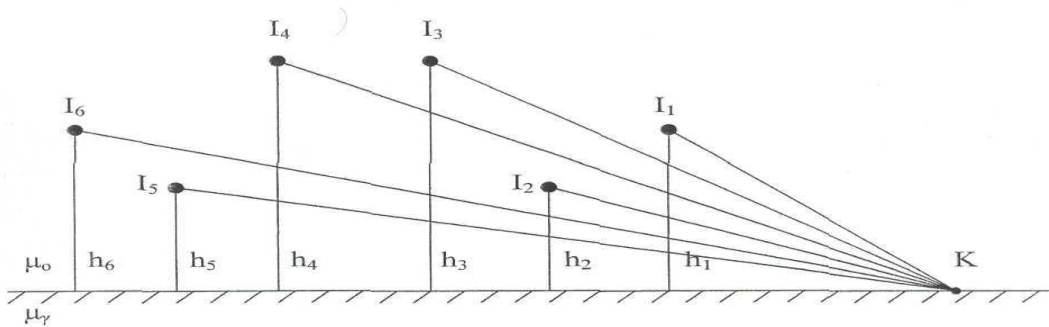
Μαγνητικό πεδίο αγωγού 3:

$$\vec{B}_3 = [I_3\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_3 / \pi h_3(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_3\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_3\sigma\nu\alpha_3 / \pi h_3(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

α)



β)



**Σχήμα:4.5.1:** α) Πυλώνας 150 kV διπλού κυκλώματος.  
β) Σχηματική παράσταση για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου.

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 4:

$$\vec{B}_4 = [I_4 \mu_0^2 \sigma \nu \alpha_4 / \pi h_4 (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{\chi} + [I_4 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_4 \sigma \nu \alpha_4 / \pi h_4 (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{y}$$

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 5:

$$\vec{B}_5 = [I_5 \mu_0^2 \sigma \nu \alpha_5 / \pi h_5 (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{\chi} + [I_5 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_5 \sigma \nu \alpha_5 / \pi h_5 (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{y}$$

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 6:

$$\vec{B}_6 = [I_6 \mu_0^2 \sigma \nu \alpha_6 / \pi h_6 (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{\chi} + [I_6 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_6 \sigma \nu \alpha_6 / \pi h_6 (\mu_0 + \mu_\gamma)] \vec{y}$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο είναι:

$$\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 + \vec{B}_5 + \vec{B}_6 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_{ολ} = & \{ \mu_0^2 [(I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 / h_1) + (I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 / h_2) + (I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3 / h_3) + (I_4 \sigma \nu^2 \alpha_4 / h_4) + \\ & (I_5 \sigma \nu^2 \alpha_5 / h_5) + (I_6 \sigma \nu^2 \alpha_6 / h_6)] / \pi (\mu_0 + \mu_\gamma) \} \vec{\chi} + \\ & \{ \mu_0 \mu_\gamma [(I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 / h_1) + (I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / h_2) + (I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / h_3) + \\ & (I_4 \eta \mu \alpha_4 \sigma \nu \alpha_4 / h_4) + (I_5 \eta \mu \alpha_5 \sigma \nu \alpha_5 / h_5) + (I_6 \eta \mu \alpha_6 \sigma \nu \alpha_6 / h_6)] / \pi (\mu_0 + \mu_\gamma) \} \vec{y} \end{aligned}$$

#### 4.6 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε πυλώνα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 400 KV

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος των 400 kV. Πάνω στο πυλώνα υπάρχουν έξι ζεύγη αγωγών τα οποία απέχουν ύψος  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$  αντίστοιχα από την επιφάνεια του εδάφους (με  $h_1=h_6, h_2=h_5, h_3=h_4$ ). Έστω τυχαίο σημείο K στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο απέχει απόσταση  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  αντίστοιχα από τα έξι ζεύγη αγωγών.

Αναλύοντας το κάθε ζεύγος αγωγών (οι οποίοι είναι όμοιοι και διαρρέονται από ίσες εντάσεις ρευμάτων I) προκύπτει ένας ισοδύναμος αγωγός ο οποίος θα διαρρέεται από ρεύμα  $I=2I$ . Άρα οι έξι ισοδύναμοι αγωγοί που προκύπτουν από τα αντίστοιχα έξι ζεύγη θα διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα:

$$I_1'=2I_1, I_2'=2I_2, I_3'=2I_3, I_4'=2I_4, I_5'=2I_5, I_6'=2I_6$$

Στηριζόμενοι στα αποτελέσματα της ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για έναν αγωγό και βάσει της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των έξι ισοδύναμων αγωγών. Ο πυλώνας των 400 kV και η σχηματική αναπαράσταση για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.6.1.

Άρα για το πεδίο ισχύει :

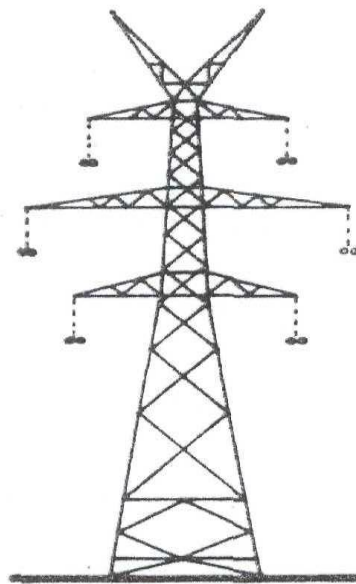
Μαγνητικό πεδίο ισοδύναμου αγωγού 1:

$$\vec{B}_1 = [2I_1\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_1 / \pi h_1(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_1\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_1\sigma\nu\alpha_1 / \pi h_1(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

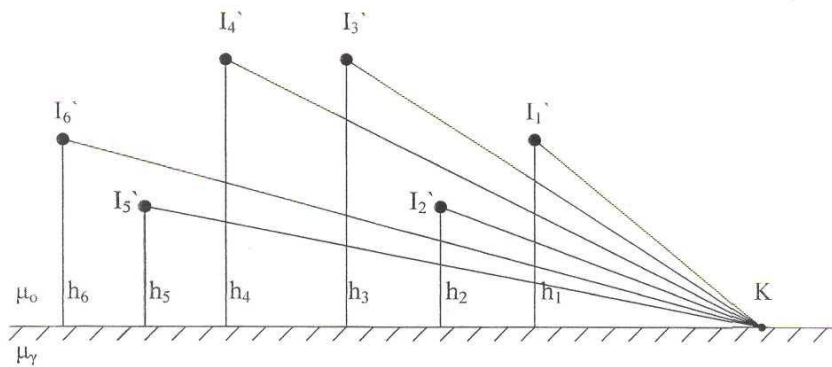
Μαγνητικό πεδίο ισοδύναμου αγωγού 2:

$$\vec{B}_2 = [2I_2\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_2 / \pi h_2(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_2\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_2\sigma\nu\alpha_2 / \pi h_2(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

α)



β)



**Σχήμα: 4.6.1:** α) Πυλώνας 400KV διπλού κυκλώματος.

β) Σχηματική παράσταση

Μαγνητικό πεδίο ισοδύναμου αγωγού 3:

$$\vec{B}_3 = [2I_3\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_3 / \pi h_3(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_3\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_3\sigma\nu\alpha_3 / \pi h_3(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

Μαγνητικό πεδίο ισοδύναμου αγωγού 4:

$$\vec{B}_4 = [2I_4\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_4 / \pi h_4(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_4\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_4\sigma\nu\alpha_4 / \pi h_4(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

Μαγνητικό πεδίο ισοδύναμου αγωγού 5:

$$\vec{B}_5 = [2I_5\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_5 / \pi h_5(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_5\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_5\sigma\nu\alpha_5 / \pi h_5(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

Μαγνητικό πεδίο ισοδύναμου αγωγού 6:

$$\vec{B}_6 = [2I_6\mu_0^2\sigma\nu^2\alpha_6 / \pi h_6(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{\chi} + [I_6\mu_0\mu_\gamma\eta\mu\alpha_6\sigma\nu\alpha_6 / \pi h_6(\mu_0 + \mu_\gamma)]\vec{y}$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο είναι:

$$\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \vec{B}_4 + \vec{B}_5 + \vec{B}_6 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_{ολ} = & \{2\mu_0^2[(I_1\sigma\nu^2\alpha_1/h_1) + (I_2\sigma\nu^2\alpha_2/h_2) + (I_3\sigma\nu^2\alpha_3/h_3) + (I_4\sigma\nu^2\alpha_4/h_4) + \\ & (I_5\sigma\nu^2\alpha_5/h_5) + (I_6\sigma\nu^2\alpha_6/h_6)] / \pi(\mu_0 + \mu_\gamma)\}\vec{\chi} + \\ & \{2\mu_0\mu_\gamma[(I_1\eta\mu\alpha_1\sigma\nu\alpha_1/h_1) + (I_2\eta\mu\alpha_2\sigma\nu\alpha_2/h_2) + (I_3\eta\mu\alpha_3\sigma\nu\alpha_3/h_3) + \\ & (I_4\eta\mu\alpha_4\sigma\nu\alpha_4/h_4) + (I_5\eta\mu\alpha_5\sigma\nu\alpha_5/h_5) + (I_6\eta\mu\alpha_6\sigma\nu\alpha_6/h_6)] / \pi(\mu_0 + \mu_\gamma)\}\vec{y} \end{aligned}$$

**5 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV**



## 5.1 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για ένα αγωγό

Έστω τυχαίο σημείο K το οποίο απέχει απόσταση R από αγωγό γραμμικής πυκνότητας  $\lambda$ , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I σε ύψος h πάνω από την επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 5.1). Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του κατοπτρισμού υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός. Από την επίδραση του αγωγού 1 ρεύματος I, προκύπτει η μαγνητική επαγωγή:

$$\vec{B}_1 = \mu \frac{I}{2\pi R} \quad (5.1.1)$$

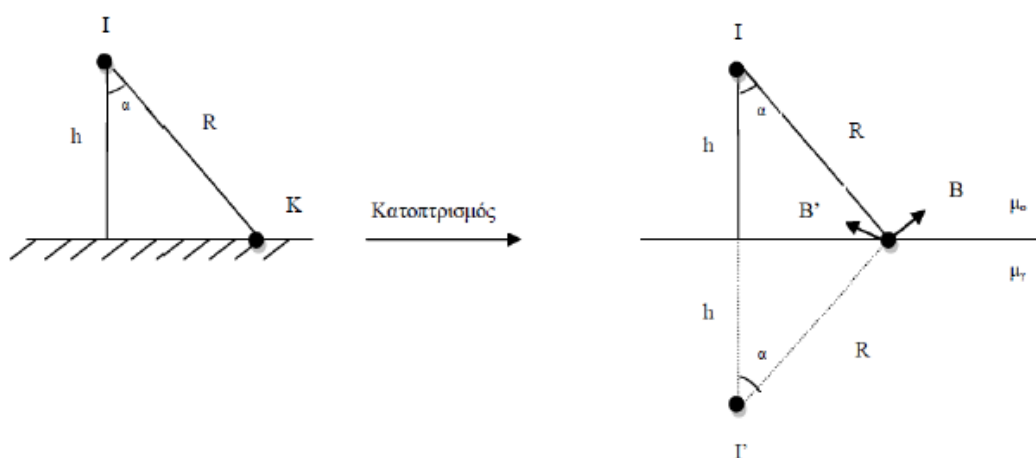
Ομοίως για τον αγωγό 2 προκύπτει

$$\vec{B}_2 = \mu \frac{I}{2\pi R} \quad (5.1.2)$$

$$\text{Όπου } I = I(\mu_\gamma - \mu_0) / (\mu_\gamma + \mu_0) \quad (5.1.3)$$

Σύμφωνα με την επαλληλία η συνολική μαγνητική ροή είναι:

$$\vec{B}_{\text{ολ}} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 \quad (5.1.4)$$



**Σχήμα 5.1:** Υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου ενός αγωγού, σε σημείο K που απέχει από αυτόν απόσταση R, με τη μέθοδο του κατοπτρισμού.

I: ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό

$\mu_0$ : μαγνητική διαπερατότητα του κενού

$\mu_\gamma$ : μαγνητική διαπερατότητα εδάφους

h: ύψος ανάρτησης αγωγού

Αναλύοντας τα  $\vec{B}_1$  και  $\vec{B}_2$  σε άξονες x,y προκύπτει:



Άξονας χ

$$\vec{B}_{ολχ} = \vec{B}_{1χ} + \vec{B}_{2χ} \Rightarrow$$

$$\vec{B}_{ολχ} = [\mu_0 I \sigma_{να} / (2\pi R)] \vec{x} - [\mu_0 I \sigma_{να} / (2\pi R)] \vec{x} =$$

$$= [\mu_0 \sigma_{να} (I - I) / 2\pi R] \vec{x}$$

από την εξίσωση (5.1.3) ισχύει  $I = I(\mu_{\gamma} - \mu_0) / (\mu_{\gamma} + \mu_0)$

$$\text{Άρα } \vec{B}_{ολχ} = \left\{ \mu_0 \sigma_{να} [I - I(\mu_{\gamma} - \mu_0) / (\mu_{\gamma} + \mu_0)] / 2\pi R \right\} \vec{x} \Rightarrow$$

$$\vec{B}_{ολχ} = [I \mu_0^2 \sigma_{να} / \pi R (\mu_{\gamma} + \mu_0)] \vec{x}$$

Όμως  $R = h / \sigma_{να}$  οπότε,

$$\vec{B}_{ολχ} = [\mu_0^2 \sigma_{να}^2 / \pi h (\mu_{\gamma} + \mu_0)] \vec{x} \quad (5.1.5)$$

Άξονας y

$$\vec{B}_{ολy} = \vec{B}_{1y} + \vec{B}_{2y} \Rightarrow$$

$$\vec{B}_{ολy} = [\mu_0 I \eta_{μα} / (2\pi R)] \vec{y} + [\mu_0 I \eta_{μα} / (2\pi R)] \vec{y} =$$

$$= [\mu_0 \eta_{μα} (I + I) / 2\pi R] \vec{y} = \left\{ \mu_0 \eta_{μα} [I + I(\mu_{\gamma} - \mu_0) / (\mu_{\gamma} + \mu_0)] / 2\pi R \right\}$$

$$= [I \mu_0 \mu_{\gamma} \eta_{μα} / \pi h (\mu_{\gamma} + \mu_0)] \vec{y} \quad \text{όμως } R = h / \sigma_{να} \text{ οπότε,}$$

$$\vec{B}_{ολy} = [I \mu_0 \mu_{\gamma} \eta_{μα} \sigma_{να} / \pi h (\mu_{\gamma} + \mu_0)] \vec{y} \quad (5.1.6)$$

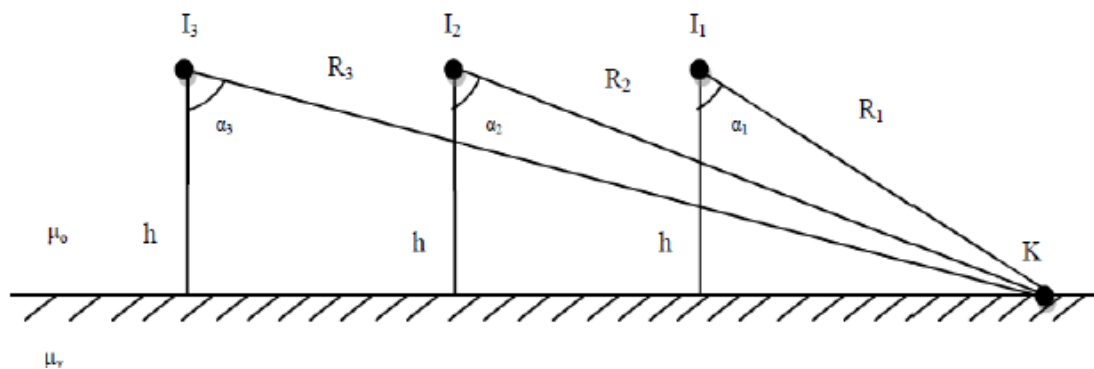
Άρα η συνολική μαγνητική επαγωγή θα είναι:

$$\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_{ολχ} + \vec{B}_{ολy}$$

$$\vec{B}_{ολ} = [\mu_0^2 \sigma_{να}^2 / \pi h (\mu_{\gamma} + \mu_0)] \vec{x} + [I \mu_0 \mu_{\gamma} \eta_{μα} \sigma_{να} / \pi h (\mu_{\gamma} + \mu_0)] \vec{y} \quad (5.1.7)$$

## 5.2 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για τρεις αγωγούς

Έστω τυχαίο σημείο Κ στην επιφάνεια του εδάφους το οποίο απέχει απόσταση  $R_1, R_2, R_3$  αντίστοιχα από τρεις αγωγούς. Οι τρεις αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα  $I_1, I_2, I_3$  αντίστοιχα (σχήμα 5.2). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης του μαγνητικού πεδίου για έναν αγωγό και βάση της αρχής της επαλληλίας, προκύπτει ότι η συνολική τιμή του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των τριών αγωγών.



**Σχήμα 5.2** Υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου τριών αγωγών, σε σημείο Κ που απέχει από αυτούς απόσταση R.  
 $I_1, I_2, I_3$ : ένταση ρεύματος αγωγών  
 $\mu_0$ : μαγνητική διαπερατότητα του κενού  
 $\mu_\gamma$ : μαγνητική διαπερατότητα του εδάφους

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 1:

$$\vec{B}_1 = [I_1 \mu_0^2 \sin^2 \alpha_1 / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{x} + [I_1 \mu_0 \mu_\gamma \sin \alpha_1 / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y} \quad (5.2.1)$$

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 2:

$$\vec{B}_2 = [I_1 \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha_2 / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{x} + [I_1 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y} \quad (5.2.2)$$

Μαγνητικό πεδίο αγωγού 3:

$$\vec{B}_3 = [I_1 \mu_0^2 \sigma \nu^2 \alpha_3 / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{x} + [I_1 \mu_0 \mu_\gamma \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3 / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y} \quad (5.2.3)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο είναι:

$$\vec{B}_{ολ} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 \quad (5.2.4)$$

$$\begin{aligned} \vec{B}_{ολ} = & [\mu_0^2 (I_1 \sigma \nu^2 \alpha_1 + I_2 \sigma \nu^2 \alpha_2 + I_3 \sigma \nu^2 \alpha_3) / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{x} + \\ & + [\mu_0 \mu_\gamma (I_1 \eta \mu \alpha_1 \sigma \nu \alpha_1 + I_2 \eta \mu \alpha_2 \sigma \nu \alpha_2 + I_3 \eta \mu \alpha_3 \sigma \nu \alpha_3) / \pi h (\mu_\gamma + \mu_0)] \vec{y} \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

Με χρήση της σχέσης (5.2.5) γίνεται ο υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής κάτω από εναέριες γραμμές μέσης τάσης 20 kV, σε σημείο Κ όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Για την μείωση του μαγνητικού πεδίου, όπως προκύπτει από τα παραπάνω, χρειάζεται ελάττωση των ρευμάτων που διαρρέουν τους αγωγούς, μείωση της απόστασης μεταξύ τους και αύξηση της απόστασης από τους αγωγούς.

### 5.3 *Υλοποίηση εφαρμογής για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου σε γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης 20 kV*

Η εφαρμογή magnetic.jar για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον java netbeans IDE και αναπτύχθηκε για να λειτουργήσει επικουρικά στον μηχανικό ο οποίος χρειάζεται άμεσα τα αποτελέσματα της μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής χωρίς την μαθηματική πολυπλοκότητα των εξισώσεων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 5.2. Το σύνολο του κώδικα και οι οδηγίες εγκατάστασης παρατίθενται στο παράρτημα Α.

Αρχικά, δημιουργούνται αντικείμενα των κλάσεων της java: JLabel, JPanel, JTextField και JButton στον αριθμό που είναι απαραίτητα για την υλοποίηση. Το τμήμα κώδικα που υλοποιεί τα αντικείμενα των παραπάνω κλάσεων της java δίνεται ακολούθως:

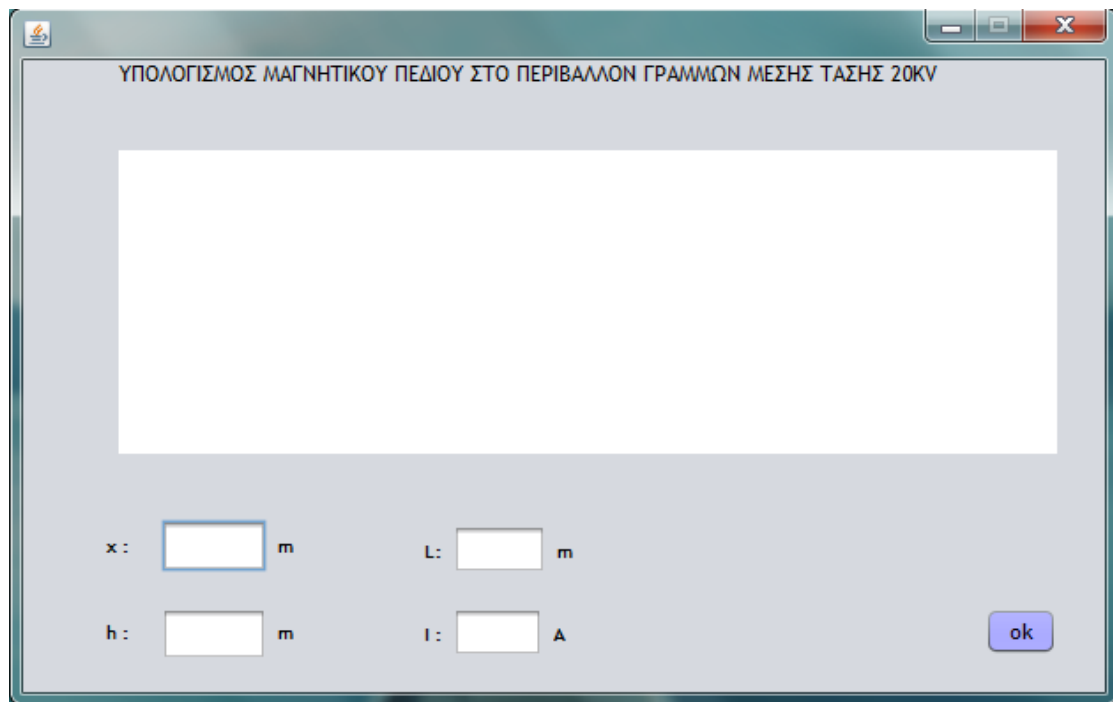
```
private void initComponents()
    JPanel1 = new javax.swing.JPanel();
    JLabel1 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel2 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel3 = new javax.swing.JLabel();
    JTextField1 = new javax.swing.JTextField();
    JTextField2 = new javax.swing.JTextField();
    JTextField3 = new javax.swing.JTextField();
    JTextField4 = new javax.swing.JTextField();
    JLabel4 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel8 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel5 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel6 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel9 = new javax.swing.JLabel();
    JLabel10 = new javax.swing.JLabel();
    JButton1 = new javax.swing.JButton();
    JLabel7 = new javax.swing.JLabel();
    JPanel2 = new javax.swing.JPanel();
```

Στο σημείο αυτό η παραθυρική εφαρμογή έχει δημιουργήσει και καταχωρήσει τα παραπάνω αντικείμενα, χωρίς όμως την μορφοποίηση που χρειάζονται ώστε να είναι κατανοητά από τον χρήστη. Επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία των

αντικειμένων των κλάσεων της java.

- Στο jLabel1 καταχωρείται η φράση “ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ 20 KV”
- Στο jLabel2 καταχωρείται “x:”
- Στο jLabel3 καταχωρείται “y:”
- Στο jLabel8 καταχωρείται “A”
- Στο jLabel4 καταχωρείται “I:”
- Στο jLabel10 καταχωρείται “L:”
- Στα αντικείμενα jLabel5, jLabel6 και jLabel9 καταχωρείται “m”
- Στο jButton1 δίνεται “ok”
- Στα jTextField1 και jTextField2 καθορίζονται οι διαστάσεις όπως και στο jLabel7, ορίζονται οι διαστάσεις του πεδίου όπου θα δίνεται το μήνυμα λάθους
- Στο πεδίο jTextField4 ορίζεται από τον χρήστη το ύψος ανάρτησης των αγωγών, καθώς δεν είναι σταθερό και έχει μέγιστη τιμή τα 10 m
- Στο πεδίο jTextField3 ο χρήστης εισάγει την τιμή του ρεύματος ανάλογα με το επίπεδο της μέσης τάσης: 6.6, 15, 20 kV

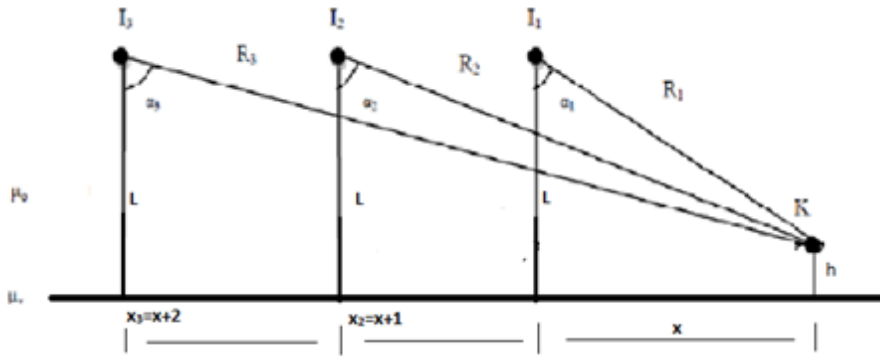
Με την υλοποίηση των εντολών μορφοποίησης έχει δημιουργηθεί η εικόνα που παρουσιάζεται στον χρήστη όταν ανοίγει το αρχείο και χωρίς ακόμη να έχει εισάγει τιμές. Στην εικόνα 1 διακρίνεται το συγκεκριμένο στιγμιότυπο.



**Εικόνα 1:** Πρώτη εικόνα που εμφανίζεται στον χρήστη.

Με το πάτημα του πλήκτρου ok, πλήκτρο ενεργοποίησης και λειτουργίας (submit button) του προγράμματος υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου, εκτελείται η συνάρτηση  `jButton1ActionPerformed`  έχοντας ορίσματα τις τιμές από τα πεδία  `jTextField1` ,  `jTextField2` ,  `jTextField3`  και  `jTextField4`  που εισάγει ο χρήστης δίνοντας τιμές στις μεταβλητές  $x$ ,  $y$ ,  $L$  και  $I$  όπως φαίνεται στην εικόνα 1.

Οι τιμές που έχει εισάγει ο χρήστης αναφέρονται στην οριζόντια απόσταση (σε m) του σημείου μέτρησης από τον πρώτο αγωγό, στην κατακόρυφη απόσταση (σε m) από το έδαφος αντίστοιχα, στην τιμή (σε A) του ρεύματος των αγωγών όπως επίσης και στο ύψος (σε m) ανάρτησης των αγωγών. Στο σχήμα 5.3.1 διακρίνονται οι συγκεκριμένες αποστάσεις με συμβολισμό  $x$ ,  $h$  και  $L$ .



**Σχήμα 5.3.1:** Οι τιμές  $x$  και  $h$  δίνονται από τον χρήστη  
 $x$ : Οριζόντια απόσταση από τον πρώτο αγωγό  
 $h$ : Κατακόρυφη απόσταση από το έδαφος  
 $L$ : Ύψος ανάρτησης αγωγών

Αρχικά στο πρόγραμμα για τις μεταβλητές ισχύει:

```
x=0;
h=0;
I=0;
L=0;
```

Ο χρήστης δίνει τιμές στα πεδία  $x$ ,  $y$  οι οποίες υπεισέρχονται στις μεταβλητές  $x$  και  $h$  στα πεδία `jTextField1` και `jTextField2` και τιμή στο πεδίο `jTextField3`:

```
x = Double.parseDouble(jTextField1.getText());
h = Double.parseDouble(jTextField2.getText());
I = Double.parseDouble(jTextField3.getText());
L = Double.parseDouble(jTextField4.getText());
```

Ωστόσο, σε αυτό το σημείο πρέπει να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των δεδομένων. Πρόκειται για αποστάσεις συνεπώς δεν μπορούν να γίνουν δεκτοί αρνητικοί αριθμοί και χαρακτήρες. Ταυτόχρονα με τις τιμές που εισάγει ο χρήστης χρειάζεται και μία λογική μεταβλητή `ok` για τον έλεγχο ανεπιθύμητων δεδομένων. Σε περίπτωση μη έγκυρων δεδομένων τυπώνεται μήνυμα λάθους.

```
    ok=true;
}

if ((x>0) && (h>0) && (ok))
//System.out.println("x = "+x);
// System.out.println("y = "+y);
```

```

l=java.lang.Math.abs(L-h);
X2=x+1;
X3=X2+1;

R1=java.lang.Math.sqrt(1*1+x*x);
R2=java.lang.Math.sqrt(1*1+X2*X2);
R3=java.lang.Math.sqrt(1*1+X3*X3);
P1=java.lang.Math.pow(μ*I*((1/(R1*R1))+1/(R2*R2))+1/(R3*R3))/6.28,2);
P2=java.lang.Math.pow(μ*I*((x/(R1*R1))+X2/(R2*R2))+X3/(R3*R3))/6.28,2;

    System.out.println("P1 = "+P1+" & P2 = "+P2);
    output = java.lang.Math.sqrt(P1+P2);
    output = output * 1000000; // μετατροπή σε μT
    // double d = Double.parseDouble("7.399999999999985E-5");
    NumberFormat formatter = new DecimalFormat("##.####");
    String f = formatter.format(output);

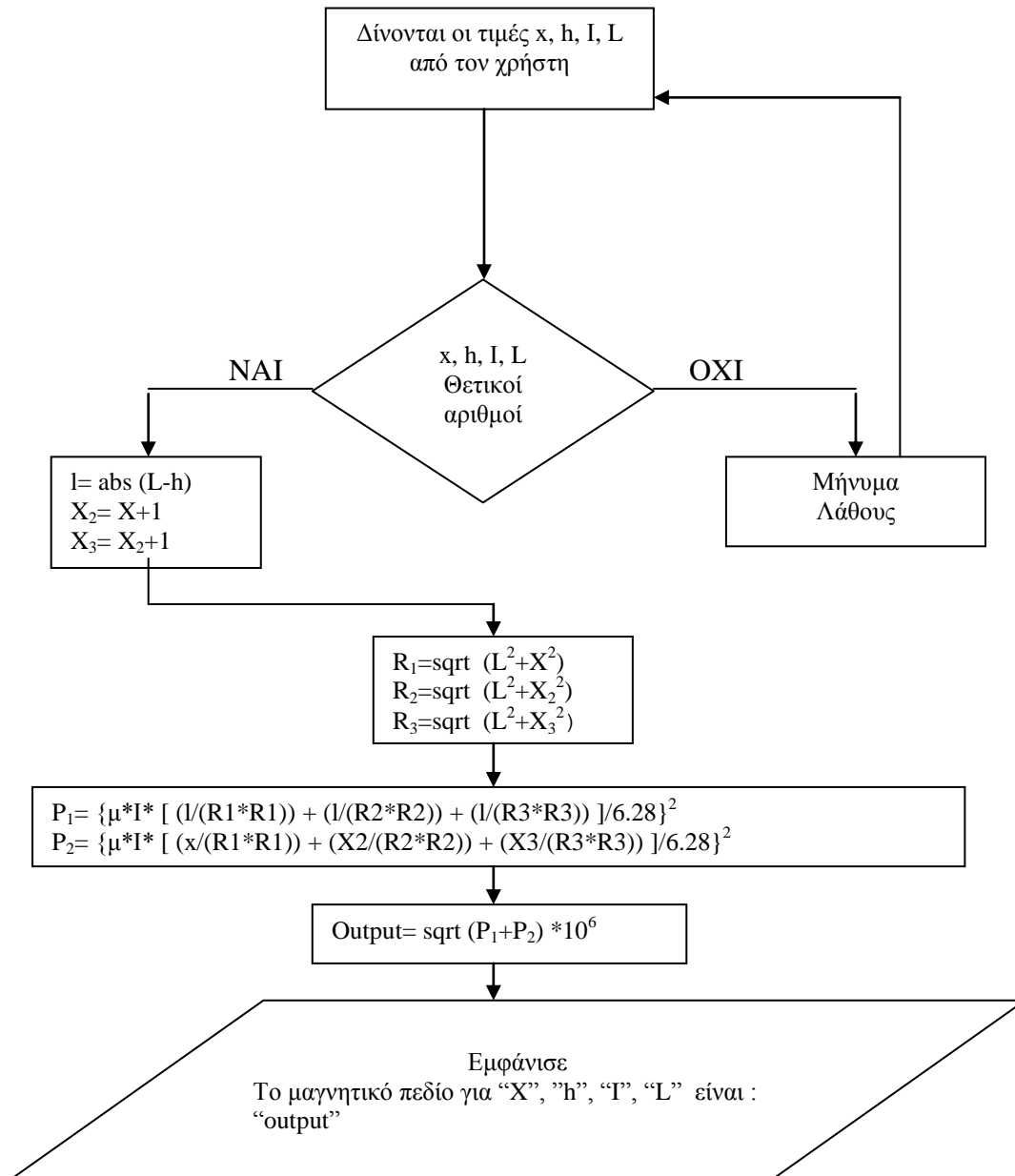
    //output = roundDecimals(output);
    System.out.println("To Output gia "+x+" kai "+h+", "+I+", "+L+" einai
"+output);
    // String output_s = Double.toString(output);
    //jLabel8.setText("B =");
    jLabel7.setText("B = "+f+" μT");

    {;}
    else
    {
        jLabel7.setText("Inputs must be positive numbers.");
        ok=false;
    }

```



Η σειρά εκτέλεσης των εντολών μπορεί να γίνει καλύτερα κατανοητή με την βοήθεια του λογικού διαγράμματος.



Οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα ορίζονται double μέσα στην κύρια συνάρτηση της εφαρμογής. Η μαγνητική διαπερατότητα του κενού  $\mu$  (ίση με την μαγνητική διαπερατότητα του εδάφους, όπως σημειώθηκε) έχει σταθερή τιμή.

Ο αριθμός των δεκαδικών ψηφίων που επιλέχτηκε είναι τέσσερα, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια για σημεία του χώρου που βρίσκονται σε κοντινή

απόσταση. Η ακρίβεια των τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων εξασφαλίζεται με την βοήθεια της συνάρτησης roundDecimals.

```
double roundDecimals(double d) {  
    DecimalFormat twoDForm = new DecimalFormat("#.####");  
    return Double.valueOf(twoDForm.format(d));  
}
```

Για καλύτερη κατανόηση του χώρου που βρίσκεται το τυχαίο σημείο, δημιουργήθηκε σχηματική αναπαράσταση των αγωγών στο διδιάστατο επίπεδο. Επιπλέον, απεικονίζεται το σημείο που επιλέγει ο χρήστης για τον υπολογισμό της τιμής της μαγνητικής επαγωγής. Αρχικά ορίζονται οι συντεταγμένες του επιπέδου και οι γραμμές του εδάφους:

```
Stroke drawingStroke = new BasicStroke(1);  
  
Line2D ground = new Line2D.Double(0, 162, 520, 162) ; // συντεταγμένες  
του επιπέδου  
BufferedImage bimage = new BufferedImage(500, 300,  
BufferedImage.TYPE_INT_RGB);  
Graphics2D graph = bimage.createGraphics();  
graph = (Graphics2D)jPanel2.getGraphics();  
graph.setBackground(Color.white);  
graph.setStroke(drawingStroke);  
graph.setPaint(Color.BLACK);  
graph.draw(ground);  
Line2D underground;  
int i=1;  
while (i<520) // πλάγιες γραμμές του εδάφους  
{  
    underground = new Line2D.Double(i*20, 162, i*20-10, 172);  
    graph.draw(underground);  
    i++;  
}
```

Στην συνέχεια ακολουθεί το τμήμα κώδικα για την υλοποίηση και υπόλοιπων παραμέτρων του σχήματος. Υπενθυμίζεται ότι το σύνολο του κώδικα συναντάται στο παράρτημα Α.

```
Line2D agwgos;
    i=4; int j=1;
    while (j<=10)          //
    {                       // Οι αγωγοί διακεκομμένα
        while (i<=6)      //
        {
            agwgos = new Line2D.Double(i*10, 172-j*10, i*10, 172-(j+1)*10);
            graph.draw(agwgos);
            System.out.println("i = "+i);
            i++;
        }
        System.out.println("j = "+j);
        j=j+2;
        i=4;
    }
    agwgos = new Line2D.Double(40 , 72, 110, 22); // Οι 3 πλάγιοι αγωγοί
    graph.draw(agwgos);
    agwgos = new Line2D.Double(50 , 72, 120, 22); //
    graph.draw(agwgos);
    agwgos = new Line2D.Double(60 , 72, 130, 22); //
    graph.draw(agwgos);

    //Shape circle = new Ellipse2D.Float(100.0f, 100.0f, 100.0f, 100.0f);
    // Graphics2D ga = (Graphics2D)g;
    //ga.draw(circle);
    //ga.setPaint(Color.green);
    //ga.fill(circle);
    //ga.setPaint(Color.red);
    //ga.draw(square);
```

```

Shape dot = new Ellipse2D.Double( 37, 69, 6, 6); // Σημεία σύνδεσης
αγωγού με πλώνα
graph.draw(dot);
graph.setPaint(Color.BLACK);
graph.fill(dot);

dot = new Ellipse2D.Double( 47, 69, 6, 6); //
graph.draw(dot);
graph.setPaint(Color.BLACK);
graph.fill(dot);

dot = new Ellipse2D.Double( 57, 69, 6, 6); //
graph.draw(dot);
graph.setPaint(Color.BLACK);
graph.fill(dot);

double x_diag = (x*9+57); // Μετατροπή των x,h στις συντεταγμένες του
επιπέδου
double h_diag = (162-h*9); // Κλίμακα 1:20

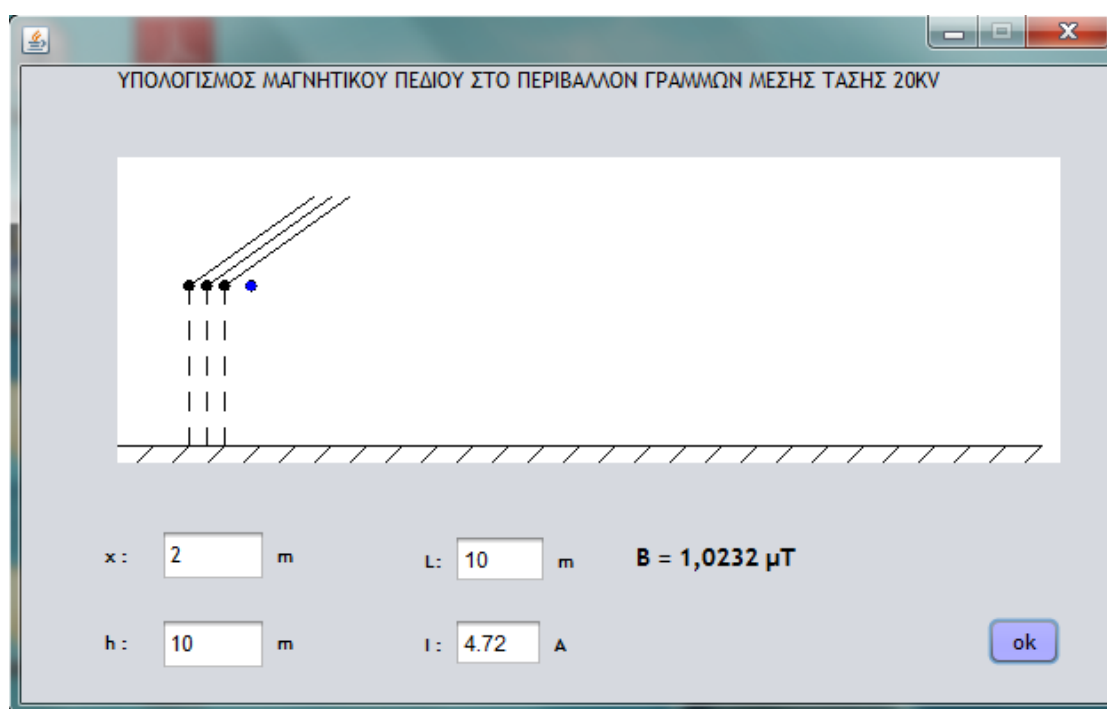
Shape our_place = new Ellipse2D.Double( x_diag-3, h_diag-3, 6, 6);
graph.draw(our_place);
graph.setPaint(Color.BLUE);
graph.fill(our_place);
}

```

## 5.4 Παραδείγματα εκτέλεσης του προγράμματος

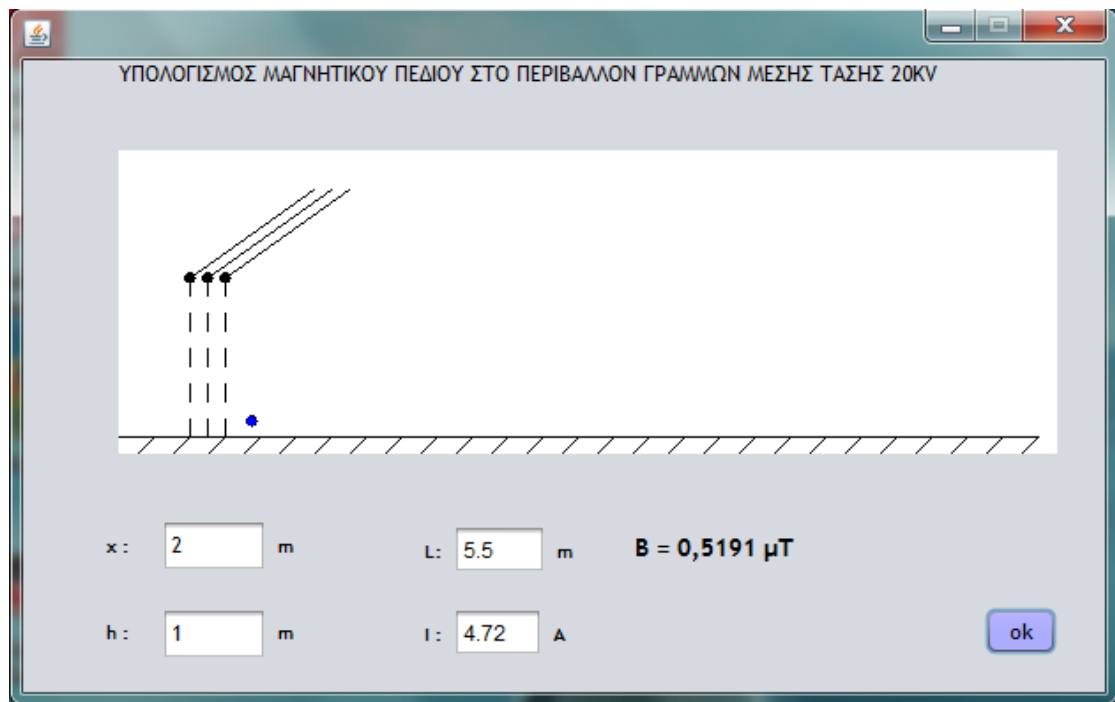
Για διάφορες εισόδους ακολουθούν παραδείγματα εκτέλεσης όπου και φαίνεται η σχηματική αναπαράσταση του εκάστοτε σημείου στον χώρο. Η αρχή λειτουργίας του προγράμματος magnetic βρίσκεται στο παράρτημα Α όπου δίνονται οδηγίες εγκατάστασης ανάλογα με το λειτουργικό σύστημα του εκάστοτε Η/Υ.

Παράδειγμα εκτέλεσης: ο χρήστης εισάγει τις τιμές  $x=2$  m,  $h=4$  m,  $L=10$  m,  $I=4.72$  A, το οποίο αντιστοιχεί σε τιμή τάσης 20kV.



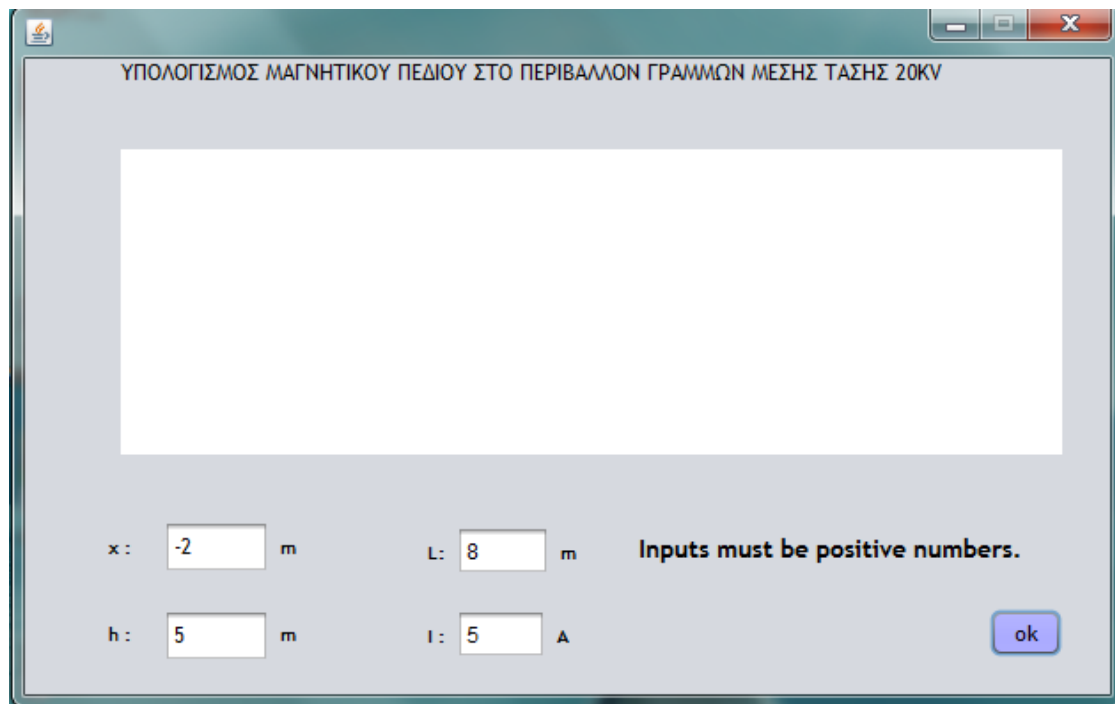
Εικόνα 2: Παράδειγμα εκτέλεσης για τιμές εισόδου  $x=2$  m,  $h=10$  m,  $I=4.72$  A,  $L=10$  m

Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται η εκτέλεση της εφαρμογής, για τιμές εισόδου  $x=2$  m,  $h=10$  m,  $L=10$  m και  $I=4.72$  A και δίνεται σχηματική αναπαράσταση των 3 αγωγών στο διδιάστατο επίπεδο. Ακολουθεί ένα ακόμη παράδειγμα εκτέλεσης στην εικόνα 3 με διαφορετικό ύψος ανάρτησης των αγωγών.



Εικόνα 3: Παράδειγμα εκτέλεσης για  $x=4$  m,  $h=2$  m

Η μαγνητική επαγωγή  $B$  μειώνεται στην δεύτερη εκτέλεση, όπως παρατηρείται στην εικόνα 3, κάτι που αναμενόταν λόγω της μετακίνησης του τυχαίου σημείου σε μεγαλύτερη απόσταση από τους αγωγούς. Στην επόμενη επιλογή δεδομένων της εικόνας 4 το πρόγραμμα οδηγείται σε μήνυμα λάθους και εκ νέου εισαγωγή τιμών στις μεταβλητές  $x$ ,  $h$ ,  $I$ ,  $L$ .



Εικόνα 4: Μη αποδεκτά δεδομένα,  $x$  αρνητικός αριθμός

## 6 Εύρεση μαγνητικής επαγωγής σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση FEMM 4.0

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο διασαφηνίζεται ακόμη ένας τρόπος με τον οποίο επιλύεται το πρόβλημα υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου κοντά σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Μία ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος της αριθμητικής ανάλυσης που προσφέρεται για την επίλυση πολύπλοκων πεδιακών προβλημάτων, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Η μέθοδος βασίζεται στο λογισμό των μεταβολών και μπορεί να εφαρμοστεί σε πεδιακά προβλήματα όπου η μαθηματική επεξεργασία αφορά την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Η περιοχή στην οποία αναζητείται η λύση για το πεδιακό πρόβλημα προσεγγίζεται από μία συνάθροιση στοιχείων. Κατασκευάζεται δηλαδή μία διαμέριση της λύσης, η οποία αποτελείται από διακριτά και πεπερασμένα στοιχεία διαφόρων σχημάτων.

Έτσι, σε διδιάστατα προβλήματα όπως και ο υπολογισμός του μαγνητικού πεδίου, ως στοιχεία χρησιμοποιούνται συνήθως τρίγωνα ή τετράπλευρα. Στην συνέχεια, υπολογίζεται η τιμή της άγνωστης μεταβλητής του προβλήματος σε όλους τους κόμβους των στοιχείων και χρησιμοποιούνται κατάλληλες συναρτήσεις της μορφής  $\varphi^e(x,y)$  για ένα διδιάστατο πρόβλημα, που ονομάζονται συναρτήσεις μορφής ή παρεμβολής. Το πρόγραμμα που υλοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι το FEMM 4.0 και παρακάτω ορίζονται τα βασικά του μέρη.

### 6.1 Το πρόγραμμα FEMM 4.0

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποτελείται από μία αλληλουχία υποπρογραμμάτων για την επίλυση χαμηλής συχνότητας μαγνητικών προβλημάτων σε διδιάστατο χώρο. Χωρίζεται σε τρία μέρη:

- **Femm.exe:** Πρόκειται για ένα γραφικό περιβάλλον στο οποίο ο χρήστης υλοποιεί τη γεωμετρία του προβλήματος, καθορίζει τις ιδιότητες των υλικών και τις συνοριακές συνθήκες. Έτοιμα αρχεία σχεδίασης DFX μπορεί να εισαχθούν για διευκόλυνση του χρηστή. Επιπλέον απεικονίζει τα

δημιουργούμενα πεδία του προβλήματος σε περιγεγραμμένα γραφήματα πυκνότητας σε όλο το χώρο επίλυσης. Επίσης επιτρέπει στον χρήστη να εξετάσει τον χώρο σε αυθαίρετα σημεία όπως και να εκτιμήσει διαφορετικές ποσότητες κατά μήκος της περιοχής που έχει ορίσει.

**Triangle.exe:** Σύμφωνα με αυτό το πρόγραμμα η περιοχή επίλυσης διαχωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό τριγώνων, προσδιοριζόμενο από το χρήστη. Το πλεονέκτημα του κερματισμού του χώρου σε ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων είναι η μετατροπή του μικρού αλλά δύσκολου στη λύση προβλήματος σε ένα μεγάλο αριθμό προβλημάτων εύκολα στη λύση. Συγκεκριμένα, στο FEMM ο χώρος διαιρείται σε τριγωνικά στοιχεία όπου η λύση προσεγγίζεται μέσω γραμμικής παρεμβολής των τιμών στις τρεις κορυφές του τριγώνου. (Το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας μορφοποιείται ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ της ακριβούς διαφορικής εξίσωσης και της προσεγγιστικής διαφορικής εξίσωσης καθώς γράφεται σε σειρά γραμμικών συναρτήσεων.)

- **Fkern.exe:** Εδώ επιλύονται οι εξισώσεις Maxwell στα σημεία του χώρου του προβλήματος που σχεδιάστηκε στο κομμάτι femm.exe.

## 6.2 Το αρχείο *femm.exe*.

Το αρχείο *\*.fem* είναι το αρχείο εισόδου του FEMM. Περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την γεωμετρία του προβλήματος, τις συνοριακές συνθήκες και τις ιδιότητες των υλικών. Δημιουργείται από το χρήστη σαν ένα απλό αρχείο κειμένου και παρακάτω εξετάζονται οι παράμετροι του:

### **[Precision]:**

Η επιθυμητή ακρίβεια επίλυσης.

### **[Frequency]:**

Η συχνότητα του ρεύματος των κλάδων του κυκλώματος.

### **[Length units]:**

Η μονάδα μέτρησης των αποστάσεων.

### **[Problem Type]:**



Ο τύπος του προβλήματος.

**[Coordinates]:**

Οι επιθυμητές συντεταγμένες του προβλήματος.

**[BdryProps]:**

Εδώ καθορίζονται οι οριακές συνθήκες του προς επίλυση χώρου. Για δισδιάστατο πρόβλημα το διανυσματικό δυναμικό  $A$  καθορίζεται από τις παραμέτρους  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  και  $\varphi$  που συνδέονται με τη σχέση:

$$A=(A_0+A_1x+A_2y)e^{i\varphi}$$

**[BlockProps]:**

Ορίζονται οι ιδιότητες των υλικών των αγωγών φάσεων, των αγωγών προστασίας, του ουδετέρου, της γης και του αέρα. Ο αριθμός δεξιά της παραμέτρου  $[BlockProps]$  ορίζει το πλήθος των υλικών του προβλήματος. Στη θέση  $\langle BlockName \rangle$  γράφεται το όνομα του υλικού και στη συνέχεια οι ιδιότητες του, οι οποίες αναλυτικά είναι οι εξής:

$\langle Mu_x \rangle$

Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού κατά την κατεύθυνση του άξονα  $x$ .

$\langle Mu_y \rangle$

Η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού κατά την κατεύθυνση του άξονα  $y$ .

$\langle H_c \rangle$

Το συνεκτικό πεδίο. Για μη μόνιμα μαγνητικά υλικά τοποθετείται η τιμή 0. Για μόνιμους μαγνήτες τοποθετείται η τιμή του σε  $[A/m]$ .

$\langle J_{re} \rangle$

Το πραγματικό μέρος της εφαρμοζόμενης πυκνότητας ρεύματος.

$\langle J_{im} \rangle$

Το φανταστικό μέρος της εφαρμοζόμενης πυκνότητας ρεύματος.

$\langle Sigma \rangle$

Η ειδική αγωγιμότητα του υλικού σε  $[MS/m]$ .

$\langle d_{lam} \rangle$

Το πάχος του πολυστρωματικού υλικού. Στην περίπτωση κατά την οποία το υλικό που

χρησιμοποιείται δεν είναι πολυστρωματικό γράφεται η τιμή 0.

$\langle Phi\_h \rangle$

Η γωνία καθυστέρησης της υστέρησης.

$\langle Phi\_hx \rangle$

καθυστέρηση της υστέρησης στον άξονα x

$\langle Phi\_hy \rangle$

καθυστέρηση της υστέρησης στον

άξονα y  $\langle LamType \rangle$  0- όχι

πολυστρωματικό πολυστρωματικό

κατά x πολυστρωματικό κατά y

$\langle LamFill \rangle$

Είναι το στρώμα του πυρήνα που πληρείται από μέταλλο. Συγκεκριμένα είναι ένα κλάσμα με αριθμητή το πάχος του στρώματος μετάλλου και παρονομαστή το άθροισμα του πάχους του μετάλλου με το πάχος της μόνωσης των στρωμάτων. Για μη πολυστρωματικά υλικά παίρνει την τιμή μηδέν.

### **[CircuitProps]:**

Εδώ καθορίζονται οι ιδιότητες του κυκλώματος. Χρησιμοποιείται μία συνθήκη για κάθε κλάδο, του προς επίλυση κυκλώματος. Συγκεκριμένα τίθενται προς συμπλήρωση οι εξής παράμετροι:

$\langle TotalAmps\_re \rangle$

Το πραγματικό μέρος του συνολικού ρεύματος που διαρρέει το συγκεκριμένο κλάδο του κυκλώματος σε  $[A]$ ,  $\langle TotalAmps\_im \rangle$

Το φανταστικό μέρος του συνολικού ρεύματος που διαρρέει το συγκεκριμένο κλάδο του κυκλώματος σε  $[A]$

$\langle CircuitType \rangle = 0$ -παράλληλο

1-σειρά

### **[NumPoints]:**

Ορίζονται οι συντεταγμένες των σημείων  $(x,y)$  που προσδιορίζουν τη θέση των αγωγών φάσης, προστασίας, του ουδετέρου και της περιοχής επίλυσης που

επιλέχτηκε, της γραμμής που αναφέρεται στην επιφάνεια της γης και στην περίπτωση δύο ή τριών στρωμάτων γης των διαχωριστικών γραμμών των στρωμάτων. Όλα αυτά τα σημεία βρίσκονται πάνω στο επίπεδο  $xy$ , στο οποίο έχει επιλεγεί να γίνει η επίλυση του εξεταζόμενου συστήματος. Η πρώτη στήλη δίνει τις συντεταγμένες των σημείων στον άξονα  $x$ , ενώ η δεύτερη στήλη τις αντίστοιχες συντεταγμένες στον άξονα των  $y$ .

#### **[NumSegments]:**

Δημιουργούνται τα ευθύγραμμα τμήματα της γεωμετρίας του προβλήματος. Σε κάθε σειρά γράφονται οι δύο συντεταγμένες των σημείων που θα δημιουργήσουν μια ευθεία γραμμή. Τα σημεία αυτά είναι καταχωρημένα στην παράμετρο *[NumPoints]* στην οποία το πρώτο σημείο αριθμείται ως μηδέν.

#### **[NumArcSegments]:**

Τα απαραίτητα κυκλικά τμήματα της γεωμετρίας του προβλήματος δημιουργούνται εδώ. Σε κάθε σειρά τοποθετούνται οι δύο συντεταγμένες των σημείων που θα δημιουργήσουν ένα κυκλικό τόξο. Η τρίτη στήλη δίνει τη γωνία που σχηματίζει το κυκλικό αυτό τόξο. Στην περίπτωση για παράδειγμα που θέλουμε να δημιουργήσουμε έναν κυκλικό αγωγό, αρκούν δύο αντιδιαμετρικά σημεία του, τα οποία σχηματίζουν το ένα με το άλλο τόξο γωνίας  $180^\circ$ .

#### **[NumBlockLabels]:**

Εδώ, η πρώτη και δεύτερη στήλη δίνουν τις συντεταγμένες τυχαίων σημείων των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα. Έτσι για κάθε υλικό επιλέγεται ένα σημείο  $(x, y)$  το οποίο ανήκει στο υλικό αυτό. Η τρίτη στήλη δείχνει σε ποιο υλικό ανήκει το σημείο αυτό. Τα υλικά και οι ιδιότητες του καθενός από αυτά έχουν δοθεί στην παράμετρο *[BlockProps]* και η αρίθμηση τους ξεκινάει από τον αριθμό ένα (το 1<sup>ο</sup> υλικό έχει αριθμηθεί ως 1). Στην τέταρτη στήλη επιλέγεται το επιθυμητό μέγεθος των τριγώνων που θα σχηματιστεί κατά τη δημιουργία του πλέγματος τριγώνων στην περιοχή επίλυσης από το πρόγραμμα *triangle.exe*. Τέλος, στην πέμπτη στήλη γράφεται η κυκλωματική συνθήκη του κάθε υλικού. Αυτές οι κυκλωματικές συνθήκες έχουν δοθεί στην παράμετρο *[CircuitProps]*.

### 6.3 Η γλώσσα LUA για την εύρεση της μαγνητικής επαγωγής και του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού

Η συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού συνεργάζεται με το πρόγραμμα FEMM παρέχοντας στον χρήστη κάθε φορά τις τιμές των διαφόρων μεγεθών του πεδίου που εξετάζεται μέσω συγκεκριμένων εντολών. Τα δεδομένα παρέχονται από την επίλυση του πεδίου που πραγματοποιείται από το πρόγραμμα FEMM. Παρακάτω παρατίθεται η επεξήγηση των εντολών της γλώσσας LUA που καταστούν δυνατή την εύρεση της μαγνητικής επαγωγής και του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού σε σημεία του χώρου.

#### **open ("filename")**

Ανοίγει το αρχείο που καθορίζεται από τη μεταβλητή «filename». Περιέχει όλο το path.

#### **mi\_analyse ():**

Τρέχει το fkern για να λύσει το πρόβλημα.. Με την εντολή αυτή υπάρχει άμεση σύνδεση της πριν και της μετά διαδικασία για την επίλυση του προβλήματος καθώς η διαδικασία αποφορτίζεται από την επίλυση του χώρου μέσω του FEMM και στη συνέχεια εύρεση της μαγνητικής επαγωγής μέσω της γλώσσας LUA.

#### **mo\_getpointvalues(x,y):**

Η εντολή αυτή υπολογίζει τις τιμές των μεγεθών που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα στο σημείο (x,y) που επιλέγουμε.

Are	Το πραγματικό μέρος του διανυσματικού δυναμικού
Aim	Το φανταστικό μέρος του διανυσματικού δυναμικού
B1re	Το πραγματικό μέρος της μαγνητικής επαγωγής στον άξονα x, όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο Bx ή Br εάν είναι στον χώρο
B1im	Το φανταστικό μέρος της μαγνητικής επαγωγής στον άξονα x, όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο Bx ή Br εάν είναι στον χώρο
B2re	Το πραγματικό μέρος της μαγνητικής επαγωγής στον άξονα y, όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο By ή Bz εάν είναι στον χώρο

B2im	Το φανταστικό μέρος της μαγνητικής επαγωγής στον άξονα $y$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $B_y$ ή $B_z$ εάν είναι στον χώρο
Sig	Ειδική αγωγιμότητα $\sigma$
E	Αποθηκευμένη πυκνότητα ενέργειας
H1re	Το πραγματικό μέρος της μαγνητικής πεδιακής έντασης στον άξονα $x$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $H_x$ , $H_r$ όταν είναι στον χώρο
H1im	Το φανταστικό μέρος της μαγνητικής πεδιακής έντασης στον άξονα $x$ , όταν το πρόβλημα είναι στον διδιάστατο επίπεδο $H_x$ , $H_r$ όταν είναι στον χώρο
H2re	Το πραγματικό μέρος της μαγνητικής πεδιακής έντασης στον άξονα $y$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $H_y$ , $H_z$ όταν είναι στον χώρο
H2im	Το φανταστικό μέρος της μαγνητικής πεδιακής έντασης στον άξονα $y$ , όταν το πρόβλημα είναι στον διδιάστατο επίπεδο $H_y$ , $H_z$ όταν είναι στον χώρο
Jere	Το πραγματικό μέρος της πυκνότητας των δινορευμάτων
Jeim	Το φανταστικό μέρος της πυκνότητας των δινορευμάτων
Jsre	Το πραγματικό μέρος της πυκνότητας του ρεύματος
Jsim	Το φανταστικό μέρος της πυκνότητας του ρεύματος
Mu1re	Το πραγματικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας στον άξονα $x$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $M_x$ , $M_r$ όταν είναι στον χώρο
Mu1im	Το φανταστικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας στον άξονα $x$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $M_x$ , $M_r$ όταν είναι στον χώρο

Mu2re	Το πραγματικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας στον άξονα $y$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $My, Mz$ όταν είναι στον χώρο
Mu2im	Το φανταστικό μέρος της μαγνητικής διαπερατότητας στον άξονα $y$ , όταν το πρόβλημα είναι στο διδιάστατο επίπεδο $My, Mz$ όταν είναι στον χώρο
Pe	Ισχύς ωμικών απωλειών
Ph	Ισχύς απωλειών υστέρησης

**Πίνακας 6.3.1:** Υπολογιζόμενα μεγέθη της εντολής `mo_getpointvalues(x,y)`:

## 7 Σχόλια-Συμπεράσματα

### 7.1 Μετρήσεις στην Ελλάδα

#### 7.1.1 Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο Κρυονέρι Αττικής και στο περιβάλλον του ΚΥΤ(κέντρο υψηλής τάσης)Αργυρούπολης-Ηλιούπολης

Οι διερχόμενες γραμμές του ηλεκτρικού δικτύου της ΔΕΗ είναι της τάξης των 150 kV και 400kV. Από τις μετρήσεις της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας προκύπτει ότι:

Η μαγνητική επαγωγή B είναι από 19,5 έως και 106 φορές μικρότερη από το όριο ασφαλείας των 100  $\mu$ T.

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

Υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών σε ύψη:

- 1,7 m από το έδαφος (ύψος ανθρώπου)
- 5,2 m από το έδαφος (εξώστης ύψους 3,5 m από το έδαφος και άνθρωπος 1,7 m)
- 9,7 m από το έδαφος (ύψος κτίσματος 8,0 m και 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 το ύψος 1,7 m από το έδαφος : B=4,2  $\mu$ T και E=1,4 kV/m
- Για το ύψος 5,2 m από το έδαφος : B=6,0  $\mu$ T και E=1,9 kV/m
- Για το ύψος 9,7 m από το έδαφος : B=11,0  $\mu$ T και E=3,5 kV/m

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής είναι μικρότερες από το όριο ασφαλείας των 100  $\mu$ T.

Οι τιμές που μετρήθηκαν (από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών με σύμπραξη ειδικών

επιστημόνων υγείας) είναι πολύ μικρότερες από τις παραπάνω μέγιστες τιμές, δεδομένου ότι οι υπολογισμοί έγιναν με δυσμενέστατες παραδοχές.

Οι υπολογισμοί στο περιβάλλον του Κ.Υ.Τ. Αργυρούπολης -Ηλιούπολης έγιναν στα πλαίσια της μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων με τη μέγιστη τιμή του ρεύματος λειτουργίας ανά φάση κάθε κυκλώματος (1000 Α). Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 7.1.1.

<b>Θέση υπολογισμού</b>	<b>B<sub>max</sub> σε [μΤ]</b>	<b>E<sub>max</sub> σε [kV/m]</b>
Σε όριο περιφραξής σχολείου	0,23	0,016
Σε όριο περιφραξής του Κ.Υ.Τ.	0,27	0,020
Κάτω από τις γραμμές, στο όριο περιφραξής του Κ.Υ.Τ. Αργυρούπολης	10,20	2,570

**Πίνακας 7.1.1** :Υπολογιστικές διερευνήσεις στο περιβάλλον του Κ.Υ.Τ. Αργυρούπολης-Ηλιούπολης.

B<sub>max</sub> και E<sub>max</sub> :μέγιστες τιμές της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 7.1.1 προκύπτει ότι οι υπολογισμένες τιμές είναι πολύ μικρότερες των ορίων ασφαλείας που είναι 100 μΤ και 5 kV/m και συνεπώς δεν υπάρχει καμία παραβίαση των αρχών πρόληψης και προφύλαξης.

### **7.1.2 Πεδιακές εντάσεις από υποσταθμούς υποβιβασμού υψηλής τάσης (150kV/20kV)**

Σε αντίθεση με τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου είναι δυνατός ο υπολογισμός των αναμενόμενων πεδιακών εντάσεων, στην περίπτωση των



υποσταθμών τέτοιος υπολογισμός είναι πρακτικά αδύνατος λόγω της πολυπλοκότητάς τους και του μεγάλου αριθμού των επί μέρους συνιστωσών του εξοπλισμού που αυτοί περιλαμβάνουν. Για το λόγο αυτό η εκτίμησή τους είναι δυνατή μόνο με τη διενέργεια μετρήσεων.

Οι υποσταθμοί υποβιβασμού της υψηλής τάσης σε μέση τάση συνιστούν τα κομβικά σημεία διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας (η «πηγή» που τροφοδοτεί το δίκτυο διανομής) και αναπτύσσονται σε θέσεις πλησίον των κέντρων κατανάλωσης. Οι υποσταθμοί του ελληνικού συστήματος είναι, στην πλειονότητά τους, υπαίθριοι με εναέρια τροφοδότηση από την υψηλή τάση και συνήθως εγκαθίστανται σε θέσεις στις παρυφές των πόλεων (ή και σε άλλες απομακρυσμένες θέσεις), ενώ η ανάγκη τροφοδότησης πυκνών και εκτεταμένων πολεοδομικών οικιστικών ιστών με υψηλή πυκνότητα δόμησης και αντίστοιχα υψηλή πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου, επέβαλε τη δημιουργία κλειστών (εντός κτιρίου) υποσταθμών στο εσωτερικό των πόλεων, με υπόγεια τροφοδότηση από την υψηλή τάση και χρήση κατάλληλου προς εσωτερική εγκατάσταση εξοπλισμού. Τέτοιοι υποσταθμοί λειτουργούν από ετών σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη και έχει καθιερωθεί να ονομάζονται Κέντρα Διανομής (Κ/Δ).

Δεδομένου ότι οι υποσταθμοί γίνονται συχνά αντιληπτοί από το κοινό ως πηγές ισχυρών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, έχει πραγματοποιηθεί πληθώρα μελετών και μετρήσεων στον περίγυρο και το εσωτερικό λειτουργούντων υποσταθμών, τόσο από τη ΔΕΗ όσο και από Πανεπιστημιακά Ιδρύματα και επίσημους φορείς της Πολιτείας (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας).

Πολλές μετρήσεις έχουν διενεργηθεί μέσα και έξω από τα Κέντρα Διανομής της Αθήνας, δηλαδή τους κλειστούς υποσταθμούς 150/20 kV που λειτουργούν στην περιοχή της πρωτεύουσας. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δεδομένου ότι οι υποσταθμοί αυτοί λειτουργούν εντός κατοικημένων περιοχών και γειτνιάζουν με κατοικίες αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις και με σχολικά κτίρια και έχουν εκφραστεί κατά καιρούς ανησυχίες από περιοίκους, συλλόγους γονέων κλπ. Οι ανησυχίες αυτές εντείνονται στις περιπτώσεις που τμήμα των εγκαταστάσεων (ζυγοί και διακόπτες 150 kV) είναι υπαίθριο και επομένως ορατό (όπως συμβαίνει στα Κέντρα Διανομής Αιγάλεω και Ν. Σμύρνης).



**Εικόνα 7.1.2** Υποσταθμός διανομής

Στους πίνακες 7.1.2.1 και 7.1.2.2 που ακολουθούν δίνονται μετρήσεις μαγνητικού πεδίου στο χώρο του Κ/Δ Διανομής Ν. Σμύρνης (εικόνα 7.1.2) και του έναντι ευρισκόμενου σχολικού συγκροτήματος.

<b>B[<math>\mu</math>T]</b>	<b>Μετρήσεις στο χώρο του Κ/Δ</b>
0,5-2,5	κατά μήκος του χώρου ζυγών και διακοπών 150 kV
9,0-25,0	στις εισόδους των οικίσκων των μετασχηματιστών
1,0-10,0	κατά μήκος του χώρου πινάκων μέσης τάσεως
1,7	στο ενδιάμεσο μεταξύ μετασχηματιστών και κτιρίου μέσης τάσεως
0,53	προς την έξοδο του Κ/Δ
0,21	στην πόρτα του Κ/Δ

**Πίνακας 7.1.2.1:** Τιμές μαγνητικού πεδίου στο χώρο του Κ/Δ Ν. Σμύρνης

<b>B[μT]</b>	<b>Μετρήσεις στο χώρο του σχολικού συγκροτήματος</b>
0,1-0,17	εντός του προαυλίου
0,07	στις αίθουσες διδασκαλίας και τους χώρους γραφείων

**Πίνακας 7.1.2.2:** Τιμές μαγνητικού πεδίου στο χώρο σχολικού συγκροτήματος

### **7.1.3 Αποτελέσματα μετρήσεων του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και μετρήσεων του ΕΜΠ.**

Παρακάτω παρουσιάζονται μετρήσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που διεξήχθησαν από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*1) Υπολογιστική διερεύνηση για το υπόγειο καλώδιο των 150 kV στο Ολυμπιακό Χωριό.*

Οι τιμές που ελήφθησαν για μέγιστο ρεύμα λειτουργίας (ονομαστικό ρεύμα) των αγωγών είναι :  $B=12 \mu T$  και  $E \approx 0 \text{ kV/m}$ .

*2) Μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής σε διάφορες εγκαταστάσεις της ΔΕΗ*

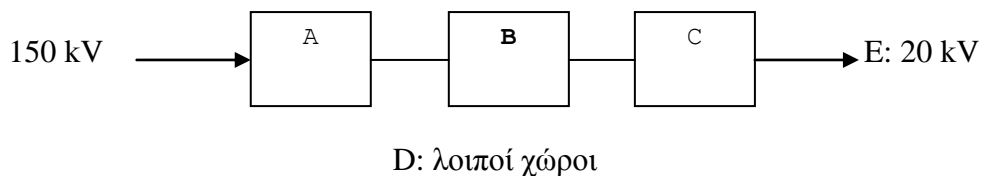
<b>Περιοχή μέτρησης</b>	<b>B σε μT</b>
Κάτω απο εναέρια γραμμές μέσης τάσης 20kV	0,2-1,1
Κάτω απο εναέρια γραμμές χαμηλής τάσης (400,230) V	0,2-2,4
Γραμμές χαμηλής ή μέσης τάσης στο έδαφος	0,15-1,7
Κ.Υ.Τ Παγκρατίου 150/20 kV	2,0-5,2
Κάτω από γραμμές υψηλών τάσεων (400,150) kV	1,0-2,0

**Πίνακας 7.1.3.1:** Μετρήσεις σε διάφορες εγκαταστάσεις της ΔΕΗ

*3) Μετρήσεις σε Κ.Υ.Τ. και σε κέντρα διανομής (Κ.Δ.) στην Αττική*

Λόγω του μεγάλου όγκου των μετρήσεων αλλά και του αριθμού των υποσταθμών διανομής που επιλέχθηκαν για τις μετρήσεις, θα παρουσιαστεί ο μέσος όρος των τιμών της μαγνητικής επαγωγής. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε

πρόσφατη επιστημονική εργασία και έγιναν με βάση την διαρρύθμιση των χώρων όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.1.3.1.



**Σχήμα 7.1.3.1:** Διαρρύθμιση χώρων

A: πίνακας 150 kV

B: μετασχηματιστής 150/20kV

C: πίνακας 20 kV

D: λοιποί χώροι

E: περιοχή έξω από κάθε υποσταθμό

Σε κάθε χώρο ελήφθησαν περισσότερες από μία μετρήσεις και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 7.1.3.2

Περιοχή	B σε $\mu\text{T}$
A	52
B	10.2
C	8
D	1.8
E	1.2

**Πίνακας 7.1.3.2:** μέσες τιμές μαγνητικής επαγωγής

4) Αναλυτικές μετρήσεις στο Κ.Υ.Τ. Παγκρατίου

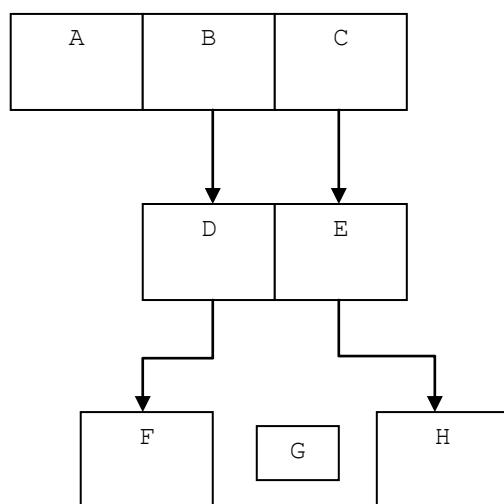
Ενότητα των χώρων	χώρος	B (μT)
A	Καλώδια 150 kV (0.7m)	38
	Καλώδια 150 kV (1m)	17
	Καλώδια 150 kV (2m)	6
	Διακόπτες 150 kV (1 m)	1
B	Ακροδέκτες των μετασχηματιστών 150 kV (3 m)	2,2
	Κέλυφος των μετασχηματιστών	0,5
	Χώρος ψυγείων των μετασχηματιστών	2
	Σε επαφή με το δοχείο του μετασχηματιστή	0,5
	Εξωτερικός χώρος ισογείου (12 m από τον μετασχηματιστή)	0,1
C	Καλώδια 20 kV (0.1 m)	5
	Αναχώρηση καλωδίων- υπόγεια στοά	0,9
D	Κλιμακοστάσιο	0,1
	Ισόγειο	0,5
E	Εξωτερικός χώρος ισογείου	0,15
	Είσοδος του κτιρίου	0,5
	Σε απόσταση 10 m από το κτήριο	0,3

**Πίνακας 7.1.3.3:** Αναλυτικά οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε όλους τους χώρους του ΚΥΤ Παγκρατίου

5) Μετρήσεις σε υποσταθμό (ΥΣ) Μέσης Τάσης ισχύος 9.5 MVA στον Οργανισμό Λιμένος Πειραιώς.

Η ισχύς του Υποσταθμού είναι 9.5 MVA, καλυπτόμενη από 2 μετασχηματιστές 20/6.6 kV, 3150 kVA και από 2 μετασχηματιστές 20/0.4 kV, 1600 kVA (συνολικά 4

μετασχηματιστές). Από τους 4 μετασχηματιστές οι 3 ήταν σε λειτουργία (ένας των 1600 kVA και ένας των 3150 kVA) ενώ οι άλλοι δύο ήταν εφεδρικοί και κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων δεν λειτουργούσαν. Στην πλευρά της μέσης τάσης (20 kV και 6.6 kV) υπάρχει τοποθετημένο προστατευτικό πλέγμα που εξασφαλίζει προστασία από την τάση. Ο υποσταθμός έχει 2 ορόφους (ισόγειο και πρώτο όροφο). Στον 1<sup>ο</sup> όροφο υπήρχαν ο πίνακας των 20 kV που περιλάμβανε μεταξύ άλλων τον υποπίνακα καλωδίων 20 kV, τον υποπίνακα μετασχηματιστών 20/0,4 kV, 1600 kVA, και τον υποπίνακα μετασχηματιστών 20/6,6 kV, 3150 kVA. Στον ίδιο όροφο υπήρχε μία τράπεζα χειρισμών, διάδρομοι, γραφεία και συνεργείο. Στο ισόγειο βρισκόταν οι χώροι των μετασχηματιστών, ο πίνακας των 6,6 kV, ο πίνακας 0,4 kV και ο πίνακας των πυκνωτών. Στο σχήμα 7.3.1.2 δίνεται το απλοποιημένο διάγραμμα του υποσταθμού και στον πίνακα 7.1.3.5 οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής ανάλογα με την απόσταση του σημείου μέτρησης.



**Σχήμα 7.1.3.2:** Απλοποιημένο διάγραμμα υποσταθμού: Πίνακας 20 kV,  
A: Υποπίνακας άφιξης  
B: Υποπίνακας μετασχηματιστή 20/0,4 kV, 1600 kVA  
C: Υποπίνακας μετασχηματιστή 20/6,6 kV, 3150 kVA Χώροι μετασχηματιστών,  
D: Χώρος μετασχηματιστή 20/0,4 kV, 1600 kVA E: Χώρος μετασχηματιστή 20/6,6 kV, 3150 kVA Πίνακας 6,6 kV,  
F: Υποπίνακας μετασχηματιστή 20/6,6 kV, 3150 kVA Πίνακας 0,4 kV,  
G: Πυκνωτές  
H: Υποπίνακας μετασχηματιστή 20/0,4 kV, 1600 kVA

Τμήμα εγκατάστασης	X (cm)	B(μT)
Πίνακας 20 kV (υποπίνακας άφιξης)		
Κλειστή πόρτα	100	6
Ανοιχτή πόρτα	100	5
Όπισθεν της κυψέλης	100	1.2
Όπισθεν της κυψέλης	1	1,8
Πίνακας 20 kV (υποπίνακας μετασχηματιστή 20/0,4 kV, 1600 kVA)		
Κλειστή πόρτα	100	3
Ανοιχτή πόρτα	100	2,4
Τράπεζα χειρισμών	1	0,5
Υπόβαθρο 20 kV (όροφος)	-	1-5
Διάδρομος	-	1,7
Κλιμακοστάσιο	-	2
Συνεργείο	-	1,5
Πίνακας 6,6 kV (υποπίνακας μετασχηματιστή 20/6,6 kV, 3150 kVA)		
Κλειστή πόρτα	100	0,6
Ανοιχτή πόρτα	100	0,6
Όπισθεν της κυψέλης	100	0,7
Όπισθεν της κυψέλης	1	2,2
Υπόβαθρο 6,6kV (όροφος)	-	1,0
Πίνακας 0,4 kV (υποπίνακας μετασχηματιστή 20/0,4 kV, 1600 kVA)		
Κλειστή πόρτα	1	72,5
Όπισθεν της κυψέλης	40	88
Όπισθεν της κυψέλης	10	98
Πίνακας 0,4 kV (υποπίνακας φωτισμού)		
Κλειστή πόρτα	1	32
Όπισθεν της κυψέλης	40	35
Όπισθεν της κυψέλης	10	37
Πυκνωτές	1-10	26-88
Υπόβαθρο 0,4 kV (όροφος)	-	14

**Πίνακας 7.1.3.5:** Μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής στους χώρους του υποσταθμού (δεν περιλαμβάνονται οι χώροι των μετασχηματιστών).

X : απόσταση από το στοιχείο μέτρησης (όπου δεν αναφέρεται η απόσταση δίνεται η μέγιστη τιμή σε τυχαία θέση) .

#### 7.1.4 Μετρήσεις του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου, Θράκης

##### 1) Μετρήσεις σε Υποσταθμό εξωτερικού χώρου

Μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής και της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης πραγματοποιήθηκαν από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου, εντός υποσταθμού εξωτερικού χώρου 150/20 kV, 2x50 MVA, κοντά σε αυτοκινητόδρομο στην Ξάνθη. Ο υποσταθμός αφορά δύο μετασχηματιστές των 50 MVA ο καθένας και τρεις συστοιχίες πυκνωτών (C1,C2 και C3). Οι C1 και C2 έχουν ονομαστική ισχύ 13,91 MVA και η C3 13,30 MVA. Επίσης υπάρχουν 13 διακόπτες ισχύος SF<sub>6</sub> εγκατεστημένοι μπροστά από τους μετασχηματιστές. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου έγιναν σε τρία ύψη, 0 m, 1 m και 1,8 m από το έδαφος. Στον πίνακα 7.1.4.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της μαγνητικής επαγωγής. Ενώ η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης ήταν 4,3 kV/m, κοντά στην πλευρά της υψηλής τάσης στο μετασχηματιστή T1. Η πλειονότητα των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου που παρατηρήθηκαν ήταν αρκετά χαμηλότερες από τα όρια που αναφέρονται στην έκθεση του πληθυσμού και των εργαζομένων.

Περιοχή μέτρησης	B <sub>max</sub> (μT)
Ζυγοί 150 kV	24,4
Μετασχηματιστής T1	26,3
Μετασχηματιστής T2	28,5
Συστοιχία πυκνωτών C1	707,6
Συστοιχία πυκνωτών C2	705,5
Συστοιχία πυκνωτών C3	20
Διακοπών ισχύος SF <sub>6</sub>	61,4
Δωμάτιο ελέγχου	3,5
Ευρύτερη περιοχή υποσταθμού	42,7
Περιμετρικά υποσταθμού	1,04

**Πίνακας 7.1.4.1:** Μέγιστες μετρούμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου στους χώρους υποσταθμού εξωτερικού χώρου 150/20 kV, 2x50

Σε δύο σημεία υπήρξαν τιμές μεγαλύτερες των ορίων (100 μT) και αυτά ήταν κοντά στις συστοιχίες των πυκνωτών. Αξίζει να σημειωθεί πως στο δωμάτιο ελέγχου οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής που μετρήθηκαν ήταν αρκετά χαμηλές. Όσον αφορά τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου ήταν και αυτές χαμηλές εντός των διεθνών καθορισμένων ορίων για την έκθεση του πληθυσμού και των εργαζομένων.



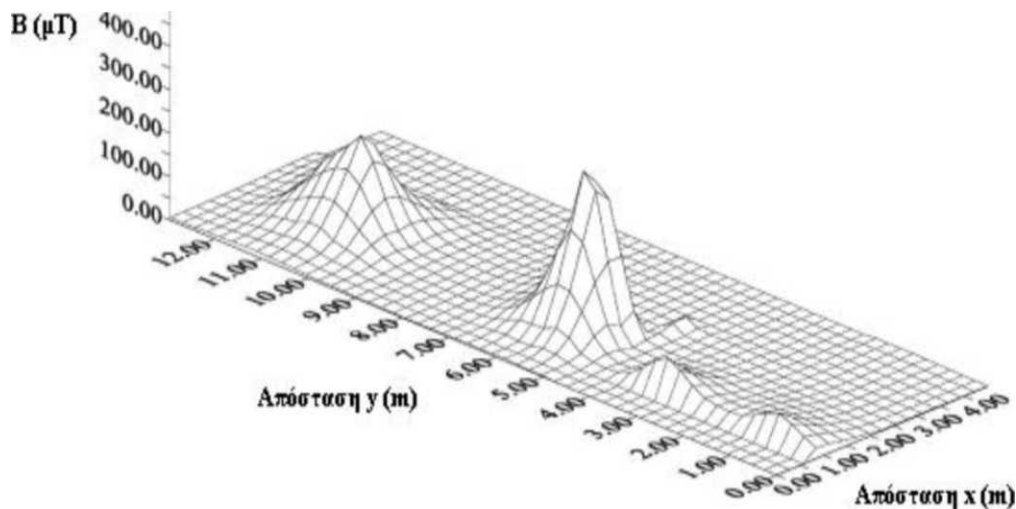
## 2) Μετρήσεις σε Υποσταθμούς εσωτερικού χώρου

Οι μετρήσεις της μαγνητικής επαγωγής και της ηλεκτρικής πεδιακής έντασης έγιναν εντός υποσταθμών μέσης τάσης (20/0,4 kV), όπου έχει πρόσβαση μόνο το τεχνικό προσωπικό της ΔΕΗ. Οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που μετρήθηκαν στα περισσότερα σημεία ήταν αρκετά χαμηλότερες από το όρια που αναφέρονται για την έκθεση των εργαζομένων. Σε ότι αφορά το μαγνητικό πεδίο, μετρήθηκε σε τρία ύψη από το έδαφος (0 m, 1 m και 1,8 m) σε 74 σημεία σε κάθε υποσταθμό. Οι μέγιστες τιμές που καταγράφηκαν σε κάθε υποσταθμό παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1.4.2.

Ονομαστική ισχύς υποσταθμού (kVA)	$B_{\max}$ ( $\mu T$ )
250	24
400	81
630	466
2x400	255
2x630	429

**Πίνακας 7.1.4.2:** Μέγιστες τιμές μαγνητικού πεδίου σε υποσταθμό εσωτερικού χώρου.

Στο σχήμα 7.1.4.1 φαίνεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου που μετρήθηκε σε ύψος 1 m από το έδαφος στον υποσταθμό 2x630 kVA.



**Σχήμα 7.1.4.1:** Τρισδιάστατη κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε υποσταθμό εσωτερικού χώρου 2x630 kVA.

## **7.2 Μετρήσεις και υπολογισμοί του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου εκτός Ελλάδας**

Η πεδιακή ένταση εξαρτάται, όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 1.4, από την τάση λειτουργίας, από την απόσταση από τη γραμμή, τη διάταξη, τη διατομή και τον αριθμό των αγωγών. Η μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη του ρεύματος και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης από τον αγωγό και είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ των αγωγών. Στην πράξη κάτω από γραμμές μεταφοράς η μαγνητική επαγωγή είναι από μερικά  $\mu\text{T}$  μέχρι μερικές δεκάδες  $\mu\text{T}$ .

Επομένως, γνωρίζοντας τις τιμές των ρευμάτων που διαρρέουν τους αγωγούς των γραμμών, μπορεί να γίνει μία πρόβλεψη των πεδίων που προέρχονται από γραμμές μεταφοράς και διανομής. Αυτή η θεωρητική προσέγγιση εναρμονίζεται με μετρήσεις που έγιναν κοντά σε γραμμές μεταφοράς και διανομής στις Η.Π.Α..

Ένα στατιστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μαγνητικών πεδίων σε γραμμές μεταφοράς βασίζεται στην προσομείωση με την μέθοδο Monte. Στην μέθοδο Monte Carlo χρειάζεται η γνώση της στατιστικής διακύμανσης του ρεύματος φορτίου και της στατιστικής κατανομής του μαγνητικού πεδίου σε αυτή. Επιπρόσθετα οι υπολογισμοί των πεδίων με τις μετρήσεις που έγιναν στον Καναδά ταυτίζονται ικανοποιητικά.

Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής που υπολογίστηκε δεν ξεπερνούσε τα 18  $\mu\text{T}$ , ενώ η τιμή που προέκυψε από μετρήσεις ήταν ίση με 17.5  $\mu\text{T}$ . Στις χαμηλότερες τιμές η ταύτιση υπολογισμού με την μέθοδο Monte Carlo και των μετρήσεων είχε ακόμη μικρότερη απόκλιση.

### 7.3 Σύγκριση των τιμών $B$ και $E$ γραμμών υψηλών τάσεων και Κ.Υ.Τ. και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων της καθημερινής ζωής των ανθρώπων

Σε πολλές περιπτώσεις της καθημερινής ζωής, η τιμή της έντασης ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ξεπερνά τα όρια ασφαλείας, όπως καταγράφηκαν στην παράγραφο 1.5, σε αντίθεση με Κέντρα Υψηλών Τάσεων και διατάξεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

- i. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ενός ρευματοδότη είναι τουλάχιστον διπλάσια από το όριο ασφαλείας των 5 kV/m.

Η απόσταση μεταξύ των ακροδεκτών του ρευματοδότη είναι  $L=2$  cm. Διαιρώντας την τάση της πρίζας ( $U=220$  V) με την απόσταση  $L$ , προκύπτει η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου  $E= U/L =110$  V/cm.

Παρατηρείται λοιπόν ότι η τιμή της  $E$  ξεπερνά το όριο των 5 kV/m=50 V/cm. Προκύπτει ότι το ηλεκτρικό πεδίο στον ρευματοδότη είναι υπερδιπλάσιο από το όριο ασφαλείας αλλά και από την τιμή του σε γραμμές υψηλών τάσεων και κέντρων διανομής υψηλών τάσεων (Κ.Υ.Τ.).

- ii. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη σε εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης από ότι σε εγκαταστάσεις υψηλής τάσης.

Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε ακτίνα  $r$  από εναέριο αγωγό που άγει το εναλλασσόμενο ρεύμα  $I$  δίνεται από την γνωστή σχέση:

$$B= \mu_0 I / (2\pi r)$$

(όπου  $\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα :  $\mu_0= 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am).

Η τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι ανάλογη του ρεύματος. Έτσι, επειδή για την ηλεκτρική ισχύ ισχύει η σχέση:

$$P= \sqrt{3} U I$$

Για σταθερή ισχύ αύξηση, της τάσης συνεπάγεται μείωση της έντασης του ρεύματος και επομένως μείωση και της μαγνητικής επαγωγής. Συνεπώς, υπό σταθερή ισχύ η ένταση της μαγνητικής επαγωγής είναι μικρότερη στην υψηλή τάση συγκριτικά προς τη μέση τάση, πολύ δε περισσότερο ως προς την χαμηλή τάση.

- iii. Η μαγνητική επαγωγή σε ηλεκτρικές συσκευές είναι πολύ μεγαλύτερη από το όριο ασφαλείας των 100  $\mu\text{T}$

Στον πίνακα 7.3.1 δίνονται με βάση την οδηγία N<sub>o</sub>27 (που προέρχεται από την συνεργασία O.H.E., I.R.P.A., Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας) τιμές της μαγνητικής επαγωγής για μεγάλο αριθμό συσκευών. Βέβαια, δεν υπάρχει συνεχής έκθεση του πληθυσμού στις μικρές αποστάσεις των 3 cm (και 30 cm σε ορισμένες συσκευές) όμως λόγω της μικρής σταθεράς χρόνου η φόρτιση γίνεται ακαριαία και διαρκεί λόγω της μεγάλης τιμής της αντίστασης R του ανθρώπου η οποία υπολογίζεται σε μερικά k $\Omega$  (ο άνθρωπος έχει χωρητικότητα της τάξεως C= 100-300 pF).

Επιπροσθέτως επισημαίνεται η αθροιστική φόρτιση από τις διάφορες συσκευές. Βέβαια, δεν υπάρχει πρόβλημα για την υγεία των ανθρώπων από την χρησιμοποίηση των ηλεκτρικών συσκευών που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.3.1 (καμία σχετική απόφαση από Παγκόσμια Οργάνωση ή Κανονισμός περί αυτού). Το ίδιο ισχύει και για τις γραμμές υψηλών τάσεων, δεδομένου επιπλέον ότι δεν υπάρχουν για τις εγκαταστάσεις αυτές επιβαρυντικά στοιχεία αφού υπερπληρούν τα όρια ασφαλείας κατά την ισχύουσα νομοθεσία.

Ηλεκτρική Συσκευή		Μαγνητική επαγωγή σε $\mu\text{T}$
Στεγνωτήρας μαλλιών		6 - 2000
Ηλεκτρική ξυριστική μηχανή		15 - 1500
Ηλεκτρικό πριόνι	(απόσταση 3 cm)	250 - 1000
Ηλεκτρική σκούπα	(απόσταση 3 cm)	200 - 800
	(απόσταση 30 cm)	2 - 20
Ηλεκτρικό τρυπάνι	(απόσταση 3 cm)	400 - 800
Μίξερ	(απόσταση 3 cm)	60 - 700
	(απόσταση 30 cm)	0,6 - 10
Ηλεκτρικό μάτι κουζίνας	(απόσταση 3 cm)	6 - 200
	(απόσταση 30 cm)	0,35 - 4
Ηλεκτρικό σίδερο	(απόσταση 3 cm)	8 - 30
Πλυντήριο ρούχων	(απόσταση 3 cm)	0,8 - 50

	(απόσταση 30cm)	0,15 - 3
Πλυντήριο πιάτων	(απόσταση 3 cm)	3,5 - 20
	(απόσταση 30 cm)	0,6 - 3
Ψυγείο	(απόσταση 3 cm)	0,5 - 1,7

**Πίνακας 7.3.1 :** Τιμές της μαγνητικής επαγωγής για έναν αριθμό ηλεκτρικών συσκευών (από συνεργασία Ο.Η.Ε., Ι.Ρ.Ρ.Α., Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας ).



## ***Παράρτημα Α***

Για τον υπολογισμό της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον γραμμών μεταφοράς μέσης τάσης 20kV σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε μία παραθυριακή εφαρμογή με την γλώσσα υψηλού επιπέδου java με την βοήθεια του NetBeans IDE χωρίς να χρειάζεται από τον χρήστη η εγκατάσταση του συγκεκριμένου προγράμματος παρά μόνο η πλατφόρμα java.

Ο χρήστης πρέπει αρχικά να «τρέξει» το αρχείο magnetic.jar. Το μόνο που απαιτείται για την σωστή λειτουργία και απεικόνιση της εφαρμογής είναι το περιβάλλον java Runtime Environment, ή JRE<sup>TM</sup>. Ο σύνδεσμος στο διαδίκτυο που περιέχει τα απαραίτητα έγγραφα για τον κάθε τύπο λειτουργικού συστήματος είναι: <http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/jre7u9-downloads-1859586.html>.

Αρχικά ο χρήστης, καλείται να δώσει τέσσερις τιμές: την οριζόντια απόσταση του τυχαίου σημείου από τον πρώτο αγωγό, την κατακόρυφη απόσταση από το έδαφος και την τιμή του ρεύματος των αγωγών.

Για σαφέστερη απεικόνιση ένα τμήμα κώδικα αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο διδιάστατο επίπεδο με χρήση κλίμακας η οποία εξασφαλίζει καλύτερη εποπτεία του προβλήματος υπολογισμού της μαγνητικής επαγωγής, όπως φαίνεται με παραδείγματα υλοποίησης στο κεφάλαιο 5.4.

Παρατίθεται ο κώδικας:

```
package kk;
import javax.swing.JLabel;
import java.awt.Component;
import java.text.*;
import java.util.*;
import java.awt.geom.*;
import java.awt.image.*;
import java.awt.*;
/**
 *
 * @author konstantinos Oikonomopoulos
 */
public class Kostantinos extends javax.swing.JFrame {

    /**
     * Creates new form test_k
     */
    public magnetic() {
        initComponents();
    }

    private void initComponents() {

        jPanel1 = new javax.swing.JPanel();
        jLabel1 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel2 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel4 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel8 = new javax.swing.JLabel();
        jLabel9 = new javax.swing.JLabel();
```



```

jLabel10 = new javax.swing.JLabel();
jLabel3 = new javax.swing.JLabel();
jTextField1 = new javax.swing.JTextField();
jTextField2 = new javax.swing.JTextField();
jTextField3 = new javax.swing.JTextField();
jLabel5 = new javax.swing.JLabel();
jLabel6 = new javax.swing.JLabel();
jButton1 = new javax.swing.JButton();
jLabel7 = new javax.swing.JLabel();
jPanel2 = new javax.swing.JPanel();

        javax.swing.GroupLayout      jPanel1Layout      =      new
javax.swing.GroupLayout(jPanel1);
        jPanel1.setLayout(jPanel1Layout);
        jPanel1Layout.setHorizontalGroup(

jPanel1Layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
            .addGap(0, 100, Short.MAX_VALUE)
        );
        jPanel1Layout.setVerticalGroup(

jPanel1Layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
            .addGap(0, 100, Short.MAX_VALUE)
        );

setDefaultCloseOperation(javax.swing.WindowConstants.EXIT_ON_CLOSE);
setBackground(new java.awt.Color(204, 255, 255));
setResizable(false);

jLabel1.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 0, 12)); // NOI18N
jLabel1.setText("ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΟ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ 20 KV");

jLabel2.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 1, 10)); // NOI18N

```

```

jLabel2.setText("x :");

jLabel3.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 1, 10)); // NOI18N
jLabel3.setText("y :");

jTextField1.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 0, 12)); // NOI18N
jTextField1.setMinimumSize(new java.awt.Dimension(50, 20));
jTextField1.setPreferredSize(new java.awt.Dimension(60, 30));
jTextField1.addActionListener(new java.awt.event.ActionListener() {
    public void actionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
        jTextField1ActionPerformed(evt);
    }
});

jTextField2.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 0, 12)); // NOI18N
jTextField2.setMinimumSize(new java.awt.Dimension(20, 20));
jTextField2.setPreferredSize(new java.awt.Dimension(60, 30));

jLabel5.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 1, 10)); // NOI18N
jLabel5.setText("m");

jLabel6.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 1, 10)); // NOI18N
jLabel6.setText("m");

jButton1.setBackground(new java.awt.Color(153, 153, 255));
jButton1.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 0, 12)); // NOI18N
jButton1.setCursor(new java.awt.Cursor(java.awt.Cursor.HAND_CURSOR));
jButton1.setLabel("ok");
jButton1.addActionListener(new java.awt.event.ActionListener() {
    public void actionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
        jButton1ActionPerformed(evt);
    }
});

```

```

jLabel7.setFont(new java.awt.Font("Trebuchet MS", 1, 14)); // NOI18N

jPanel2.setBackground(new java.awt.Color(255, 255, 255));

    javax.swing.GroupLayout        jPanel2Layout        =        new
javax.swing.GroupLayout(jPanel2);
    jPanel2.setLayout(jPanel2Layout);
    jPanel2Layout.setHorizontalGroup(

jPanel2Layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
        .addGap(0, 0, Short.MAX_VALUE)
    );
    jPanel2Layout.setVerticalGroup(

jPanel2Layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
        .addGap(0, 176, Short.MAX_VALUE)
    );

    javax.swing.GroupLayout        layout        =        new
javax.swing.GroupLayout(getContentPane());
    getContentPane().setLayout(layout);
    layout.setHorizontalGroup(

layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
        .addGroup(layout.createSequentialGroup()

.addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
            .addGroup(layout.createSequentialGroup()
                .addGap(47, 47, 47)

.addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.TRAILING)
                .addComponent(jLabel2)

```

```

        .addComponent(jLabel3))
    .addGap(18, 18, 18)

.addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
NG)

        .addGroup(layout.createSequentialGroup())
            .addComponent(jTextField1,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)

.addPreferredGap(javax.swing.LayoutStyle.ComponentPlacement.RELATED)
        .addComponent(jLabel5)
        .addGap(146, 146, 146)
        .addComponent(jLabel7,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
        .addGap(0, 0, Short.MAX_VALUE))
        .addGroup(layout.createSequentialGroup())
            .addComponent(jTextField2,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)

.addPreferredGap(javax.swing.LayoutStyle.ComponentPlacement.RELATED)
        .addComponent(jLabel6)

.addPreferredGap(javax.swing.LayoutStyle.ComponentPlacement.RELATED,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE)
        .addComponent(jButton1))))
    .addGroup(layout.createSequentialGroup())
        .addGap(54, 54, 54)

```

237,

```

.addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
NG)
        .addComponent(jPanel2,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE, Short.MAX_VALUE)
        .addGroup(layout.createSequentialGroup()
        .addComponent(jLabel1,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,          491,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
        .addGap(29, 29, 29))))
        .addContainerGap(36, Short.MAX_VALUE)
);
layout.setVerticalGroup(
layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
        .addGroup(layout.createSequentialGroup()
        .addComponent(jLabel1)
        .addGap(36, 36, 36)
        .addComponent(jPanel2, javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
        .addGap(33, 33, 33)
        .addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.LEADING)
NG)
        .addGroup(layout.createSequentialGroup()
        .addComponent(jLabel7,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,          28,
javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)
        .addGap(1, 1, 1))
        .addGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.TRAILING,
layout.createSequentialGroup()

```

```
.addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.BASELINE)
```

```
    .addComponent(jTextField1,  
    javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,  
    javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,  
    javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)  
    .addComponent(jLabel2)  
    .addComponent(jLabel5))  
    .addGap(18, 18, 18))
```

```
.addGroup(layout.createParallelGroup(javax.swing.GroupLayout.Alignment.BASELINE)
```

```
    .addComponent(jButton1)  
    .addComponent(jTextField2,  
    javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE,  
    javax.swing.GroupLayout.DEFAULT_SIZE,  
    javax.swing.GroupLayout.PREFERRED_SIZE)  
    .addComponent(jLabel6)  
    .addComponent(jLabel3))  
    .addGap(18, 18, 18))
```

```
);
```

```
pack();
```

```
}// </editor-fold>
```

```
private void jTextField1ActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {  
    // TODO add your handling code here:  
}
```

```
double roundDecimals(double d) {  
    DecimalFormat twoDForm = new DecimalFormat("#.####");  
    return Double.valueOf(twoDForm.format(d));  
}
```

```

private void jButton1ActionPerformed(java.awt.event.ActionEvent evt) {
    // TODO add your handling code here:
    double  $\mu$  = 12.56637* java.lang.Math.pow(10, -7);
    double x,h,l, R1,R2,R3,X2,X3, $\pi$ =3.14,I=4.72,P1,P2, output;
    x=0; h=0;
    boolean ok=true;
    try
    {
        x = Double.parseDouble(jTextField1.getText());
        h = Double.parseDouble(jTextField2.getText());
        I = Double.parseDouble(jTextField2.getText());
        L = Double.parseDouble(jTextField2.getText());

    }catch(Exception ee)
    {
        System.out.println("Wrong input"+ee);
        jLabel7.setText("Inputs must be positive numbers.");
        ok=false;
    }

    if ((x>0) && (h>0) && (ok))
    {;}
    else
    {
        jLabel7.setText("Inputs must be positive numbers.");
        ok=false;
    }
    if(ok)
    {
        //System.out.println("x = "+x);
        // System.out.println("y = "+y);
    }
}

```

```

l=java.lang.Math.abs(L-h);
X2=x+1;
X3=X2+1;

R1=java.lang.Math.sqrt(1*x*x);
R2=java.lang.Math.sqrt(1+X2*X2);
R3=java.lang.Math.sqrt(1+X3*X3);
P1=java.lang.Math.pow(μ*4.72*((1/(R1*R1))+(1/(R2*R2))+(1/(R3*R3)))/6.28,
2);

P2=java.lang.Math.pow(μ*4.72*((x/(R1*R1))+(X2/(R2*R2))+(X3/(R3*R3)))/6.28,
2);

System.out.println("P1 = "+P1+" & P2 = "+P2);
output = java.lang.Math.sqrt(P1+P2);
output = output * 1000000; // metatroph se μT
// double d = Double.parseDouble("7.39999999999985E-5");
NumberFormat formatter = new DecimalFormat("##.####");
String f = formatter.format(output);

//output = roundDecimals(output);
System.out.println("To Output gia "+x+" kai "+h+" einai "+output);
// String output_s = Double.toString(output);
//jLabel8.setText("B =");
jLabel7.setText("B = "+f+" μT");

Stroke drawingStroke = new BasicStroke(1);

Line2D ground = new Line2D.Double(0, 162, 520, 162) ; //syntetagmenes
tou epipedou
BufferedImage bimage = new BufferedImage(500, 300,
BufferedImage.TYPE_INT_RGB);
Graphics2D graph = bimage.createGraphics();
graph = (Graphics2D)jPanel2.getGraphics();

```



```

graph.setBackground(Color.white);
graph.setStroke(drawingStroke);
graph.setPaint(Color.BLACK);

graph.draw(ground);
Line2D underground;
int i=1;
while (i<520)    //ftiaxnw tis plagies grammes tou underground
{
    underground = new Line2D.Double(i*20, 162, i*20-10, 172);
    graph.draw(underground);
    i++;
}
Line2D agwgos;
i=4; int j=1;
while (j<=10)    //
{
    // Ftiaxnw tous agwgous diakekomena
    while (i<=6)    //
    {
        agwgos = new Line2D.Double(i*10, 172-j*10, i*10, 172-(j+1)*10);
        graph.draw(agwgos);
        System.out.println("i = "+i);
        i++;
    }
    System.out.println("j = "+j);
    j=j+2;
    i=4;
}
agwgos = new Line2D.Double(40 , 72, 110, 22);    // Oi 3 agwgoi plagioi
graph.draw(agwgos);
agwgos = new Line2D.Double(50 , 72, 120, 22);    //
graph.draw(agwgos);
agwgos = new Line2D.Double(60 , 72, 130, 22);    //
graph.draw(agwgos);

```

```

//Shape circle = new Ellipse2D.Float(100.0f, 100.0f, 100.0f, 100.0f);
// Graphics2D ga = (Graphics2D)g;
//ga.draw(circle);
//ga.setPaint(Color.green);
//ga.fill(circle);
//ga.setPaint(Color.red);
//ga.draw(square);
Shape dot = new Ellipse2D.Double( 37, 69, 6, 6); // Ta 3 dots
graph.draw(dot);
graph.setPaint(Color.BLACK);
graph.fill(dot);

dot = new Ellipse2D.Double( 47, 69, 6, 6); //
graph.draw(dot);
graph.setPaint(Color.BLACK);
graph.fill(dot);

dot = new Ellipse2D.Double( 57, 69, 6, 6); //
graph.draw(dot);
graph.setPaint(Color.BLACK);
graph.fill(dot);

double x_diag = (x*9+57); //metatrepoume ta x kai h stis syntetagmenes toy
sxhmatos mas
double h_diag = (162-h*9); //kai vazoume klimaka 1:20

Shape our_place = new Ellipse2D.Double( x_diag-3, h_diag-3, 6, 6);
graph.draw(our_place);
graph.setPaint(Color.BLUE);
graph.fill(our_place);
}
}

```

```

/**
 * @param args the command line arguments
 */
public static void main(String args[]) {
    /*
     * Set the Nimbus look and feel
     */
    //<editor-fold defaultstate="collapsed" desc=" Look and feel setting code
(optional) ">
    /*
     * If Nimbus (introduced in Java SE 6) is not available, stay with the
     * default look and feel. For details see
     * http://download.oracle.com/javase/tutorial/uiswing/lookandfeel/plaf.html
     */
    try {
        for (javax.swing.UIManager.LookAndFeelInfo info :
javax.swing.UIManager.getInstalledLookAndFeels()) {
            if ("Nimbus".equals(info.getName())) {
                javax.swing.UIManager.setLookAndFeel(info.getClassName());
                break;
            }
        }
    } catch (ClassNotFoundException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(Kostas.class.getName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
    } catch (InstantiationException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(Kostas.class.getName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
    } catch (IllegalAccessException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(Kostas.class.getName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);

```

```

    } catch (javax.swing.UnsupportedLookAndFeelException ex) {

java.util.logging.Logger.getLogger(Kostas.class.getName()).log(java.util.logging.Level.SEVERE, null, ex);
    }
//</editor-fold>

/*
 * Create and display the form
 */
java.awt.EventQueue.invokeLater(new Runnable() {

    public void run() {
        new Kostas().setVisible(true);

    }
});
}
// Variables declaration - do not modify
private javax.swing.JButton jButton1;
private javax.swing.JLabel jLabel1;
private javax.swing.JLabel jLabel2;
private javax.swing.JLabel jLabel3;
private javax.swing.JLabel jLabel5;
private javax.swing.JLabel jLabel6;
private javax.swing.JLabel jLabel7;
private javax.swing.JPanel jPanel1;
private javax.swing.JPanel jPanel2;
private javax.swing.JTextField jTextField1;
private javax.swing.JTextField jTextField2;
// End of variables declaration
}

```

### Επεξήγηση-Σχόλια

Η λειτουργία της εφαρμογής ενεργοποιείται με το πάτημα του submit button, οπότε και εκτελείται η  `jButton1ActionPerformed` συνάρτηση. Λαμβάνονται οι τιμές των `x`, `y`, `I`, `L` από τα  `jTextField1`,  `jTextField2`,  `jTextField3` και  `jTextField4` που έχει δώσει ο χρήστης. Σε περίπτωση λανθασμένης εισαγωγής δεδομένων (αρνητικοί αριθμοί ή χαρακτήρες) επιστρέφεται μήνυμα λάθους. Με χρήση της συνάρτησης (5.2.5) υπολογίζεται το μαγνητικό πεδίο και εμφανίζεται μέσω του  `jLabel7`.

Επιπροσθέτως, η εφαρμογή αναπαριστά σε διδιάστατο επίπεδο το τυχαίο σημείο υπολογισμού της μαγνητικής επαγωγής με βάση τα δεδομένα που δόθηκαν από τον χρήστη. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιούμε αντικείμενα των κλάσεων  `BasicStroke`,  `Line2D`,  `BufferedImage` και  `Graphics2D`. Το τυχαίο σημείο αναπαρίσταται με μπλε κουκίδα. Το αποτέλεσμα της σχεδίασης παρουσιάζεται μέσω του  `jPanel2`.



## 8 Βιβλιογραφία

- Π.Δ. Μπούρκας, “ Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων ”, Ε.Μ.Π. Αθήνα 1998
- Β.Κ.Παπαδιάς, “ Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ”, Συμμετρία, Αθήνα 1999
- John J. Grainer, William D. Stevenson, Jr. “ Power Systems Analysis ”, International editions, 1994
- Ι.Τσαλαμέγκας, Ι.Ρουμελιώτης, “ Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία τόμος Α ”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010
- Ι.Τσαλαμέγκας, Ι.Ρουμελιώτης, “ Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία τόμος Β ”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2011
- Ι.Λ.Βομβορίδης, “ Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία μέρη Α και Β ”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 2009
- R.B.Adler, L.J. Chu, and R.M. Fano, “ Electromagnetic Energy Transmission and Radiation, Wiley ”, New York 1965
- A.N. Πρώιος, “ Το Μαγνητικό Πεδίο Στο Περιβάλλον Των Υποσταθμών Διανομής (20 kV/400 V) Και Μέσα Περιορισμού Του ”, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Αθήνα 2011
- P.Naughton, H.Schildt, “ Java 2: The Complete Reference, Third Edition ”, Osborne Publishing, 1999
- 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
- Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, “ Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία ”, 2005
- 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 ”
- Κ.Βουρνάς, Γ.Κονταξή, “ Εισαγωγή στα ΣΗΕ ”, ΕΜΠ, 2001
- Π.Δ. Μπούρκας, “ Εφαρμογές εγκαταστάσεων σε Νοσοκομεία ”, ΕΜΠ, 1999
- IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, IEEE Std C95.6-2002, 0-3 kHz, October 2002

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

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