



Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

**“ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ
ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ”**



Επιβλέπων Καθηγητής:

Ψωμόπουλος Κωσταντίνος

Σπουδαστής:

Θεοδοσόπουλος Δημήτρης

ΑΜ: 30210

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2017

Copyright © Α.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την στήριξη και την αγάπη τους. Επίσης στη Ναταλί γιατί χωρίς αυτή πιθανότατα δε θα είχα φτάσει μέχρι εδώ.

Ευχαριστώ ακόμα τη φίλη και ζωγράφο Αλεξάνδρα Κορφιάτη, για την άδεια της να χρησιμοποιήσω τα έργα ζωγραφικής που εμφανίζονται στην πρώτη και τελευταία σελίδα και έχουν τίτλο «Ηλιοβασίλεμα» και «Electric Sky» αντίστοιχα.

Φυσικά, ευχαριστώ τον καθηγητή μου Κωνσταντίνο Ψωμόπουλο για την καθοδήγησή του και την υπομονή του. Επίσης ευχαριστώ την φίλη μου Λεάννα Δελή για την συμβολή της στο κομμάτι του προγραμματισμού , αλλά και όσους/ες συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της με οποιονδήποτε τρόπο.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	i
Λίστα ΕΙΚΟΝΩΝ	iv
Λίστα ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	v
Λίστα ΠΙΝΑΚΩΝ	v
Πρόλογος	1
Κεφάλαιο 1 : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.....	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή	1
1.3 Οι εξισώσεις Maxwell	2
1.4 Η κυκλωματική θεωρία	4
1.5 Η ανεπάρκεια της Ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας	4
1.6 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία δικτύων διανομής	5
1.7 Χαμηλόσυχνα Η/Μ πεδία	8
Κεφάλαιο 2 : ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	12
2.3 Μεταφορά.....	14
2.4 Υποσταθμοί	16
2.5 Μετασχηματιστές	18
2.6 Δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης	18
2.7 Δίκτυα διανομής μέσης τάσης	20
2.8 Δ.Ε.Η	21
2.9 Συντήρηση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	23
2.10 Τυποποιημένες Κατασκευές ΔΕΗ	24
Κεφάλαιο 3 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ & ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ	31
3.1 Εισαγωγή - βασικές παραδοχές	31
3.2 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για έναν αγωγό.....	32
3.3 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση 3 αγωγών.....	34
3.4 Επιπλέον παραδοχές για το ηλεκτρικό πεδίο	36
3.5 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου για έναν αγωγό	36
3.6 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου για τρεις αγωγούς.....	38
Κεφάλαιο 4 : ΕΚΤΙΜΗΣΗ Η/Μ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	39
4.1 Εκτίμηση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης	39
4.1.1 Υπολογισμός στην ίδια διάταξη μέσης τάσης σε κάθετη διαδρομή.....	41
4.2 Εκτίμηση μαγνητικού πεδίου χαμηλής τάσης	44
4.1.1 Υπολογισμός στην ίδια διάταξη χαμηλής τάσης σε κάθετη διαδρομή.....	47
4.3 Εκτίμηση ηλεκτρικού πεδίου μέσης τάσης	48
4.4 Εκτίμηση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης	51
4.5 Παρουσίαση φόρμας υπολογισμού excel 2010.....	55
Κεφάλαιο 5 : ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ Η\Μ ΠΕΔΙΩΝ	61
5.1 Εισαγωγή	61
5.2 Επίδραση μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε βιολογικούς οργανισμούς.....	61
5.2.1 Θερμικές Επιδράσεις	63
5.2.2 Μη Θερμικές Επιδράσεις	64
5.2.3 Άμεσες επιδράσεις.....	65
5.3 Επιδημιολογικές μελέτες/έρευνες και δημοσιεύσεις.....	65

5.3.1 Καρκίνος και λευχαιμία.....	66
5.3.2 Επίδραση των ELF πεδίων σε παιδιά.....	69
5.4 Όρια ασφαλείας και προστασία έναντι ELF Πεδίων.....	70
5.4.1 Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς	71
5.4.2 Όρια ασφαλούς έκθεσης σε χαμηλόσυχνα πεδία έντασης 50Hz.....	73
5.5 Συμπεράσματα.....	74
Βιβλιογραφία.....	76
Παράρτημα.....	79

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Παραγωγή, μεταφορά και διανομή Ηλεκτρικής ενέργειας.....	11
Εικόνα 2 Θερμοηλεκτρικός Σταθμός Μεγαλόπολης.....	13
Εικόνα 3 Λιγνιτικό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας - Ορυχείο Νότιου Πεδίου.....	13
Εικόνα 4 Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Χανίων (αριστερά), Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ασωμάτων (δεξιά).....	14
Εικόνα 5 Αιολικό πάρκο Μαρμαρίου Ευβοίας (αριστερά), Φωτοβολταϊκός Σταθμός Σίφνου (δεξιά).....	14
Εικόνα 6 Γραμμές υπερυψηλής τάσης στο Κάστρο Βοιωτίας, Κέντρο Υπερυψηλής τάσης Λάρυμνας.....	16
Εικόνα 7 Τομή κτιρίου ΚΔ Παγκρατίου	17
Εικόνα 8 Τυπική διάταξη χαμηλής τάσης επί ξύλινου στύλου	19
Εικόνα 9 Τυπική διάταξη μέσης τάσης επί ξύλινου στύλου	20
Εικόνα 10 Μορφή αγωγών ASCR.....	21
Εικόνα 11 Εργοτάξιο Υδροηλεκτρικού Σταθμού Κρεμαστών, 1965.....	22
Εικόνα 12 Ελάχιστες αποστάσεις για το κλάδεμα δέντρων σε σχέση με γραμμές Μέσης και Χαμηλής τάσης.....	23
Εικόνα 13 Ελάχιστη κατακόρυφη απόσταση αγωγών πάνω από το έδαφος.....	25
Εικόνα 14 Ελάχιστες κατακόρυφες αποστάσεις σε διασταυρώσεις αγωγών.....	26
Εικόνα 15 Ελάχιστες αποστάσεις αγωγών μέσης τάσης από κτίρια.....	27
Εικόνα 16 Ελάχιστες αποστάσεις αγωγών χαμηλής τάσης από κτίρια.....	28
Εικόνα 17 Κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση ελάχιστες αποστάσεις αγωγών μεταξύ τους καθώς και από άλλα στοιχεία του στύλου στον οποίον στηρίζονται.....	29
Εικόνα 18 Συντεταγμένες αγωγών και σημείου αναφοράς.....	55
Εικόνα 19 Συντεταγμένες σημείου αναφοράς.....	56
Εικόνα 20 Εισαγωγή της σταθερής συχνότητας και της εκάστοτε έντασης του ρεύματος του αγωγού.....	56
Εικόνα 21 Τμηματικός υπολογισμός τριγωνομετρικών αριθμών	57
Εικόνα 22 Υπολογισμός τριγωνομετρικών όρων με βήμα 1 rad.....	57
Εικόνα 23 Απόσταση σημείου από τον εκάστοτε αγωγό.....	58
Εικόνα 24 Τριγωνομετρικοί όροι της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει το σημείο αναφοράς με τον αγωγό και τον άξονα x.....	59
Εικόνα 25 Υπολογισθείσες συνιστώσες εντάσεις του Ηλεκτρικού Πεδίου και η συνισταμένη τους.....	59
Εικόνα 26 Υπολογισθείσες συνιστώσες εντάσεις του Μαγνητικού Πεδίου και η συνισταμένη τους.....	60
Εικόνα 27 Άνθρωπος σε ομογενές Ηλεκτρικό Πεδίο.....	62
Εικόνα 28 Άνθρωπος σε ομογενές Μαγνητικό Πεδίο.....	62
Εικόνα 29 Παραδείγματα ιοντίζουσας και μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας.....	63

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 Διάταξη ενός αγωγού	33
Σχήμα 2 Διάταξη περισσοτέρων αγωγών σε τυχαίο σημείο K.	34
Σχήμα 3 Μέθοδος του κατοπτρισμού στην περίπτωση ενός αγωγού.....	37
Σχήμα 4 Διάταξη αγωγών μέσης τάσης (οριζόντια διαδρομή)	40
Σχήμα 5 Ένταση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης σε οριζόντια διαδρομή $ B =f(x)$ (ύψος 1.5μ από έδαφος)	41
Σχήμα 6 Διάταξη αγωγών μέσης τάσης (κατακόρυφη διαδρομή)	42
Σχήμα 7 Ένταση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης σε κατακόρυφη διαδρομή $ B =f(y)$ από το σημείο K έως τον αγωγό.....	43
Σχήμα 8 Ένταση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης σε κατακόρυφη διαδρομή $ B =f(y)$ από τον αγωγό έως 8m πάνω.	44
Σχήμα 9 Διάταξη αγωγών χαμηλής τάσης (οριζόντια διαδρομή)	45
Σχήμα 10 Ένταση μαγνητικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $ B =f(x)$ (ύψος 1.5μ από έδαφος)	46
Σχήμα 11 Ένταση μαγνητικού πεδίου χαμηλής τάσης σε κατακόρυφη διαδρομή $ B =f(y)$	48
Σχήμα 12 Διάταξη αγωγών μέσης τάσης (οριζόντια διαδρομή εδάφους).....	49
Σχήμα 13 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μέσης τάσης σε οριζόντια διαδρομή $ E =f(x)$ (ύψος 0 μ από έδαφος)	50
Σχήμα 14 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μέσης τάσης σε οριζόντια διαδρομή συναρτήσει της απόστασης από τον μέσο αγωγό.	51
Σχήμα 15 Διάταξη αγωγών χαμηλής τάσης (οριζόντια διαδρομή εδάφους).....	52
Σχήμα 16 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $ Ex = f(x)$ (ύψος 0μ από έδαφος)	53
Σχήμα 17 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $ Ey = f(x)$ (ύψος 0μ από έδαφος)	54
Σχήμα 18 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $ Eολ = f(x)$ (ύψος 0μ από έδαφος)	54

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Οι εξισώσεις του Maxwell	3
Πίνακας 2. Τα κυριότερα μεγέθη	3
Πίνακας 3. Απλοποιημένες εκφράσεις των εξισώσεων Maxwell στο όριο των χαμηλών συχνοτήτων.....	7
Πίνακας 4 Επίδραση στον άνθρωπο ανάλογα με την ένταση πυκνότητας ρεύματος (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)	65
Πίνακας 5 Βασικοί περιορισμοί για Η/Μ πεδία από 0 Hz έως 300 GHz.....	72
Πίνακας 6 Επίπεδα αναφοράς για Η/Μ πεδία από 0 Hz έως 300 GHz.....	72
Πίνακας 7 Όρια ασφαλούς έκθεσης σε Η/Μ πεδία συχνότητας 50 Hz.....	73
Πίνακας 8 Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από συσκευές συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο.....	74
Πίνακας 9 Τιμές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε ύψος 1,5 μέτρου από το έδαφος στο περιβάλλον εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας.....	75

Summary

The aim of this thesis is a theoretical evaluation of the Electromagnetic (E/M) field of overhead low and medium voltage networks. The equations of Maxwell, were we used to calculate the field at various points around the overhead distribution lines.

The first chapter refers to electromagnetic fields in general and especially in low frequency fields of 50 Hz (ELF). The second chapter refers to the transmission and distribution of electricity in Greece and the modeling of the system being studied. In the 3rd and 4th chapter there is an attempt to evaluate the magnetic and electric field for low-voltage lines (4 conductors, 3 of 230 Volt phase voltage and the fourth neutral) and medium-voltage respectively (three horizontal lines from 20 kV polar voltage). The theoretical results are discussed considering protection regulations mentioned before.

Keywords: Electric field, magnetic field, safety limits, low voltage, medium voltage.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η θεωρητική εκτίμηση του Η/Μ πεδίου εναέριων δικτύων μέσης και χαμηλής τάσης. Για τον υπολογισμό του Η/Μ πεδίου μέσης και χαμηλής τάσης χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις του Maxwell. Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία γενικά αλλά και ειδικότερα στα χαμηλόσυχνα πεδία των 50 Hz (ELF). Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και γίνεται η μοντελοποίηση του συστήματος που θα μελετηθεί. Στο 3^ο και 4^ο κεφάλαιο γίνεται η θεωρητική εκτίμηση του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου για τις γραμμές χαμηλής τάσης (4 κατακόρυφοι αγωγοί, οι 3 με 230 Volt φασική τάση και ο τέταρτος ουδέτερος) και μέσης τάσης αντίστοιχα (3 οριζόντιοι αγωγοί με 20 kV πολική τάση).

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βιολογικές επιδράσεις της Η/Μ ακτινοβολίας και μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση αυτών. Γίνεται επίσης αναφορά στα όρια ασφαλείας που ισχύουν στην ελληνική και διεθνής νομοθεσία και τα συμπεράσματα που προκύπτουν .

Τέλος, ακολουθεί η βιβλιογραφία και ένα παράρτημα με τις εντολές που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Matlab.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό πεδίο, Μαγνητικό πεδίο, όρια ασφαλείας, χαμηλή τάση, μέση τάση

Κεφάλαιο 1 : ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

1.1 Εισαγωγή

Όλα τα τεχνολογικά επιτεύγματα σήμερα δεν θα υπήρχαν αν δεν είχε προηγηθεί η εύρεση αρχικά και κατανόηση στην συνέχεια του ηλεκτρομαγνητισμού. Έτσι, ίσως είναι χρήσιμο να γίνει μια σύντομη ιστορική αναδρομή στους κυριότερους σταθμούς αυτής της προσπάθειας ανακάλυψης και κατανόησης ενός από τα σημαντικότερα πεδία της φυσικής.

1.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Κατά χρονολογική σειρά η γνωριμία του ανθρώπου με τον ηλεκτρομαγνητισμό, ακολούθησε μια σταδιακή πορεία . Οι κυριότερες στιγμές της είναι :

- 9^{ος} αιώνας π.Χ. - Στη Μαγνησία της Μικράς Ασίας παρατηρήθηκε ένα ορυκτό με το όνομα μαγνητίτης που είχε την ιδιότητα να έλκει το σίδηρο. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 6^{ος} αιώνας π.Χ. - Ο Θαλής ο Μιλήσιος παρατήρησε ότι το ήλεκτρο (κεχριμπάρι), μετά απο τριβή με το δέρμα μπορούσε να έλκει μικρά σώματα (στατικός ηλεκτρισμός). (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1733 μ.Χ. – Ο Γάλλος C-F Du Fay ανακάλυψε ότι δύο είδη του ηλεκτρικού φορτίου και οτι τα ομώνυμα απωθούνται ενώ τα ετερόνυμα έλκονται. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1752 μ.Χ. – Ο Αμερικάνος B. Franklin εφεύρε το αλεξικέραυνο και εισήγαγε τους όρους θετικό και αρνητικό φορτίο. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1785 μ.Χ. – Ο Γάλλος C-A Coulomb βρήκε την πρώτη ποσοτική σχέση στον ηλεκτρισμό. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)

- 1800 μ.Χ. – Ο Ιταλός A.Volta κατασκεύασε την πρώτη μπαταρία. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1820 μ.Χ. – Ο Δανός H.C Oersted σύνδεσε για πρώτη φορά τον ηλεκτρισμό με τον μαγνητισμό, αφού παρατήρησε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί μαγνητικό πεδίο. Ο Γάλλος A-M Ampere περιέγραψε ποσοτικά τις δυνάμεις που ασκούνται σε αγώγιμα σύρματα που διαρρέονται από ρεύμα. Οι Γάλλοι J.B Biot και F. Savart ανακάλυψαν τον ομώνυμο νόμο. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1831 μ.Χ. – Ο Άγγλος M. Faraday ανακάλυψε ότι ένα χρονομεταβλητό μαγνητικό πεδίο επάγει ηλεκτρεγερτική δύναμη, δηλαδή ηλεκτρικό πεδίο. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1835 μ.Χ. – Ο Γερμανός K.F. Gauss διατύπωσε τον ομώνυμο νόμο, σύμφωνα με τον οποίο, η ηλεκτρική ροή η οποία διασχίζει μια κλειστή επιφάνεια, συνδέεται με το ηλεκτρικό φορτίο που περικλείεται από αυτήν. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1865 μ.Χ. – Ο Σκωτσέζος J.C.Maxwell ενοποίησε τις προηγούμενες ανακαλύψεις σε τέσσερις, ιδιαίτερα κομψές, μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες δημοσιεύτηκαν το 1873 στο έργο του ‘A Treatise on Electricity and Magnetism’. Προέβλεψε επίσης την ύπαρξη και διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και υπολόγισε την ταχύτητα διάδοσης του φωτός. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)
- 1887 μ.Χ. – Ο Γερμανός H.Hertz επιβεβαίωσε και πειραματικά τις ανακαλύψεις των Faraday και Maxwell. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)

1.3 Οι εξισώσεις Maxwell

Ο James Clerk Maxwell θεωρείται ο ιδρυτής της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας στη σημερινή της μορφή. Σε ηλικία 40 ετών εξέδωσε την πρώτη ενοποιημένη θεωρία για τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό. Οι εξισώσεις του Maxwell δεν έγιναν αποδεκτές από όλους τους επιστήμονες ώσπου επιβεβαιώθηκαν από το Γερμανό Heinrich Rudolf Hertz. (Γεωργίου, 2005)

Η γενική μορφή των εξισώσεων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα σε ολοκληρωτική και διαφορική μορφή. (Γεωργίου, 2005)

Διαφορική μορφή (Differential form)	Ολοκληρωτική μορφή (Integral form)	Σημειώσεις
$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho_v dv$	Νόμος του Gauss
$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$	$\oint_S \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = 0$	Μη ύπαρξη απομονωμένου μαγνητικού φορτίου
$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \mathbf{B} dS$	Νόμος του Faraday
$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \mathbf{J} + \left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right) dS$	Νόμος του Ampere

Πίνακας 1. Οι εξισώσεις του Maxwell (Γεωργίου, 2005)

Για να είναι ένα πεδίο ηλεκτρομαγνητικό πρέπει να ικανοποιεί και τις τέσσερις εξισώσεις του Maxwell. Είναι πολύ σημαντικές αφού συνοψίζουν όλους τους γνωστούς νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού. (Γεωργίου, 2005) Τα σημαντικότερα μεγέθη που συνδέονται με τον ηλεκτρομαγνητισμό είναι τα παρακάτω.

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης στο SI
H	Ένταση Μαγνητικού πεδίου	A/m
E	Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου	V/m
B	Μαγνητική Πυκνότητα ροής	Wb/m ² , Tesla (T)
D	Ηλεκτρική Πυκνότητα ροής	C/m ²
J	Πυκνότητα ρεύματος	A/m ²

Πίνακας 2. Τα κυριότερα μεγέθη (Γεωργίου, 2005)

Τα μεγέθη που ενδιαφέρουν σε αυτή την εργασία και θα υπολογιστούν γύρω από τις γραμμές διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα **E** και **B**.

1.4 Η κυκλωματική θεωρία

Η θεωρία κυκλωμάτων, η οποία αποτελεί τα θεμέλια της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού αποτελεί ειδική περίπτωση της Ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας, όταν οι διαστάσεις των συστατικών στοιχείων του κυκλώματος είναι πολύ μικρές, συγκρινόμενες με το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα λειτουργίας. Οι νόμοι του Kirchhoff για τα ρεύματα και τις εντάσεις καθώς και ο γενικότερος γεωμετρικός, ενεργειακός και κυκλωματικός τρόπος περιγραφής των βασικών κυκλωματικών στοιχείων (αντιστάτη, επαγωγέα και πυκνωτή) προκύπτουν από τους αντίστοιχους νόμους του Ηλεκτρομαγνητισμού (εξισώσεις Maxwell). (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)

Όμως, αμέσως μετά την θεμελίωση του κυκλωματικού προτύπου, η θεωρία κυκλωμάτων αυτονομήθηκε και αναπτύχθηκε ξεχωριστά. Η πλειονότητα των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών διατάξεων, όπως και οι γραμμές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας που αφορούν την παρούσα εργασία, αναπτύχθηκαν με βάση το κυκλωματικό πρότυπο. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)

Παρόλα αυτά, για να μελετηθούν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από τις γραμμές διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (μέση και χαμηλή τάση), 'επιβάλλεται' η επιστροφή στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία. (Τσαλαμέγκας & Ρουμελιώτης, 2010)

1.5 Η ανεπάρκεια της Ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας

Μέχρι και την αρχή του εικοστού αιώνα, η ηλεκτρομαγνητική θεωρία όπως διατυπώθηκε από τον Maxwell, θεωρείτο πλήρης. Όμως, κατά τη διάρκεια του ίδιου αιώνα, ανατράπηκε η κλασική αντίληψη για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εισήχθη η υπόθεση του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού του φωτός. (Τραχανάς, 2005)

Την ανατροπή ξεκίνησε πρώτος ο Max Planck με την υπόθεση των κβαντωμένων ενεργειακών καταστάσεων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσα σε μια κοιλότητα, αξιοποιώντας φασματοσκοπικά δεδομένα για το μέλαν σώμα. Ακολούθησε ο Einstein με αφετηρία τα δεδομένα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου (για το οποίο βραβεύτηκε με Νόμπελ). Ο Einstein κατάλαβε ότι ο μόνος τρόπος για να εξηγηθεί η κβάντωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, είναι να του αποδοθεί, εκτός από την κυματική του φύση, και σωματιδιακή. Άλλα

φαινόμενα όπου ο κλασικός ηλεκτρομαγνητισμός αδυνατεί να εξηγήσει, είναι το φαινόμενο Compton (μεταβολή του μήκους κύματος της σκεδαζόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μετά από πρόσπτωση πάνω σε ηλεκτρόνια), καθώς και η ατομική σταθερότητα. (Τραχανάς, 2005)

Έτσι, τον εικοστό αιώνα θεμελιώθηκε η Κβαντομηχανική, η οποία άλλαξε την αντίληψή μας για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλλά και τις υπόλοιπες θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης, όπως η βαρύτητα, η ισχυρή και ασθενής πυρηνική δύναμη, οι οποίες μας γίνονται πλέον γνωστές ως κβαντικά πεδία που φέρονται από τα αντίστοιχα σωματίδια-φορείς. (Τραχανάς, 2005)

Τα κβαντικά φαινόμενα όμως, εκδηλώνονται στον μικρόκοσμο, και γίνονται εντονότερα, όσο μικραίνει το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι, στο όριο των μεγάλων μηκών κύματος και των μικρών συχνοτήτων, με τα οποία ασχολείται η επιστήμη του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, οι νόμοι του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού αποκαθίστανται. Τα κβαντικά φαινόμενα δεν είναι πειραματικά ανιχνεύσιμα και μπορούμε με ασφάλεια να κρατήσουμε την κυματική φύση του ηλεκτρομαγνητισμού, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψιν την σωματιδιακή. (Τραχανάς, 2005)

1.6 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία δικτύων διανομής

Ο άνθρωπος προσπαθούσε ανέκαθεν να ελέγξει και να αξιοποιήσει τις διάφορες μορφές ενέργειας. Περισσότερο ίσως από όλες, τα έχει καταφέρει με την ηλεκτρική. Σήμερα, είναι τόσο εδραιωμένη η ηλεκτρική ενέργεια στη ζωή μας, που δύσκολα θα μπορούσαμε να φανταστούμε την κοινωνία μας χωρίς αυτήν. Βέβαια, ενώ ηλεκτρικά φαινόμενα εκδηλώνονται στη φυσική πραγματικότητα και ορισμένα ήταν ήδη γνωστά από την ελληνική αρχαιότητα (ο Θαλής είχε παρατηρήσει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κεχριμπαριού), η δυνατότητα μαζικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υπό τη μορφή ηλεκτρικού ρεύματος, με μετατροπή άλλων ειδών ενέργειας σε ηλεκτρική, είναι μια καθαρή επινόηση του ανθρώπου που κατέστη δυνατή μόλις το 19ο αιώνα. (Ζτούπης, 2009)

Οι πολλαπλές εφαρμογές του ηλεκτρισμού συνέβαλαν όχι μόνο στην καθοριστική βελτίωση του επιπέδου της καθημερινότητας των ανθρώπων, αλλά και στην πρόοδο και αύξηση της αποδοτικότητας της βιομηχανικής παραγωγής, της επιστημονικής προόδου, των επικοινωνιών, των μεταφορών, της ιατρικής τεχνολογίας, κλπ. (Ζτούπης, 2009)

Μεγάλο πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι μπορεί να παράγεται σε πολύ μεγάλες ποσότητες στους σταθμούς παραγωγής και να χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε τεράστιες αποστάσεις 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 γίνεται ο υποβιβασμός της τάσεως από υψηλή σε μέση ή από μέση σε χαμηλή τάση). (Ζτούπης, 2009)

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. Είναι αρκετά απλές και έχουν σχετικά μικρό κόστος κατασκευής, συγκρινόμενες για παράδειγμα με ένα έναν άλλο τρόπο μεταφοράς και διανομής που είναι διαδεδομένος αρκετά, τις υπόγειες γραμμές. (Ζτούπης, 2009)

Ως φυσικό αποτέλεσμα της τάσης στην οποία λειτουργούν και του ρεύματος από το οποίο διαρρέονται, οι γραμμές μεταφοράς και διανομής 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 - ΕΧΣ (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) το οποίο θα αναλυθεί παρακάτω. (Τσαλικίδης, 2012)

Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας δημιουργούνται εν γένει από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή τις εναέριες γραμμές και τους υποσταθμούς υψηλής τάσης, από το δίκτυο διανομής μέσης και χαμηλής τάσης που χρησιμοποιείται για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και από τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τις καλωδιώσεις και τις συσκευές που λειτουργούν σε σπίτια και χώρους εργασίας. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία αυτά περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell. Για τη συχνότητα των 50Hz οι μεταβολές της ηλεκτρικής και της μαγνητικής πεδιακή έντασης με το χρόνο αποκτούν εξαιρετικά χαμηλές τιμές και μπορούν να θεωρηθούν μηδενικές. Οι δύο λοιπόν εξισώσεις του Maxwell του πίνακα 1 καταλήγουν στις εξής απλοποιημένες εκφράσεις: (Δημουλάς, 2008)

$\nabla \times E \cong 0$	Ηλεκτρικό πεδίο
$\nabla \times B \cong 0$	Μαγνητικό πεδίο

Πίνακας 3. Απλοποιημένες εκφράσεις των εξισώσεων Maxwell στο όριο των χαμηλών συχνοτήτων.
(Δημουλάς, 2008)

Προκύπτει έτσι ότι στις χαμηλές συχνότητες, όπως αυτή των 50 Hz στην οποία λειτουργούν οι γραμμές μεταφοράς, δεν υπάρχει ζεύξη μεταξύ των δύο πεδριακών εντάσεων, της ηλεκτρικής και της μαγνητικής. Στη συχνότητα, λοιπόν, των 50Hz πρακτικά δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αλλά δύο ανεξάρτητα πεδία. Το ηλεκτρικό, το οποίο εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής, και το μαγνητικό, το οποίο εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή. Είναι δυνατή επομένως η μελέτη των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων μιας γραμμής μεταφοράς θεωρώντας τα ανεξάρτητα μεταξύ τους.
(Δημουλάς, 2008)

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 (κλωβός Faraday), 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. (Δημουλάς, 2008)

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 ή διανομής. 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 (Δημουλάς, 2008)

1.7 Χαμηλόσυχνα Η/Μ πεδία

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εμφανίζονται ως αλληλένδετα μεγέθη από τις εξισώσεις του Maxwell. Όμως, στις πολύ χαμηλές συχνότητες των 50 Hz τα πεδία είναι πρακτικά αποζευγμένα, δηλαδή δεν υπάρχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, αλλά δύο ανεξάρτητα πεδία, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Έτσι και η μέτρηση των δύο πεδίων γίνεται ανεξάρτητα. (Τσαλικίδης, 2012)

Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από την ύπαρξη και κατανομή ηλεκτρικού φορτίου στους αγωγούς των ηλεκτρικών γραμμών, συσκευών ή και άλλων εγκαταστάσεων, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ρεύματος ή όχι. Οι τιμές του εξαρτώνται από: (Ζτούπης, 2009)

- την τάση των αγωγών
- τη γεωμετρία της γραμμής (διάταξη αγωγών)
- 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 επηρεάζεται από την παρουσία αγωγίμων διατάξεων και άρα είναι δυνατή η θωράκιση ενός χώρου έναντι ηλεκτρικού πεδίου (κλωβός Faraday). Τα συνήθη οικοδομικά υλικά έχουν επαρκή αγωγιμότητα έτσι ώστε να παρέχεται ικανοποιητική προστασία σε εσωτερικούς χώρους από εξωτερικές πηγές. Επίσης το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται από την παρουσία του ανθρώπινου σώματος και περιορίζεται σχεδόν στην εξωτερική επιφάνειά του. (Δημουλάς, 2008)

Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τις τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία που διαρρέουν τους αγωγούς μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης (δηλ. από τα ηλεκτρικά ρεύματα). Οι τιμές του εξαρτώνται από: (Ζτούπης, 2009)

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

Το ρεύμα μιας γραμμής υπόκειται στη χρονική διακύμανση των φορτίων που εξυπηρετεί, η τιμή του μαγνητικού πεδίου δεν είναι σταθερή σε κάθε θέση, αλλά εξαρτάται από την κατανάλωση των φορτίων στη διάρκεια της ημέρας και μεταξύ των ημερών. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ή αλλιώς μαγνητική επαγωγή μετριέται σε Τέσλα (T) συνήθως με το υποπολλαπλάσιο του μT (T^{-6}). Επίσης χρησιμοποιείται και η μονάδα Γκάους (G), συνήθως με το υποπολλαπλάσιο της mG (G^{-3}). Οι δύο μονάδες συνδέονται με τη σχέση $1\text{ T} = 10^4\text{ G}$ ($1\ \mu\text{T} = 10\text{ mG}$). (Οικονομόπουλος, 2012)

Είναι σύνηθες λάθος του κοινού ότι η υψηλή τάση σημαίνει και υψηλή έκθεση σε μαγνητικό πεδίο. Στην πραγματικότητα, όπως προαναφέρθηκε, μόνον το ηλεκτρικό πεδίο εξαρτάται από την τάση των αγωγών, ενώ το μαγνητικό εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς και μόνον. Αυτό που τελικά ενδιαφέρει είναι το ύψος της έκθεσης και πιο συγκεκριμένα η τιμή του μαγνητικού πεδίου και όχι η φύση της πηγής που το προκαλεί το πεδίο. Ο ανθρώπινος οργανισμός δε διακρίνει κατά πόσον το μαγνητικό πεδίο στο οποίο εκτίθεται δημιουργείται από μία γραμμή υψηλής τάσεως ή από άλλη πηγή. (Οικονομόπουλος, 2012)

Βασικό κοινό χαρακτηριστικό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων είναι, ότι οι τιμές των πεδιακών εντάσεων αποσβένονται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή που τα δημιουργεί και κατά συνέπεια οπτική επαφή οποιαδήποτε ηλεκτρική εγκατάσταση δεν συνεπάγεται και έκθεση σε πεδία. Αυτή η απόσβεση δεν είναι ανάλογη προς την απόσταση, αλλά ακολουθεί το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου (εκθετικές μειώσεις πλησίον της πηγής και ασυμπτωτική εξασθένηση μέχρι τον πρακτικό μηδενισμό όσο απομακρυνόμαστε από αυτήν. (Οικονομόπουλος, 2012)

Η ηλεκτρική και μαγνητική «εμβέλεια» μιας γραμμής ή άλλης ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, δηλαδή η έκταση του χώρου γύρω από αυτή στον οποίο ανιχνεύεται το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, εξαρτάται, για δεδομένες ισχύς, από τη γεωμετρία της 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. (Οικονομόπουλος, 2012)

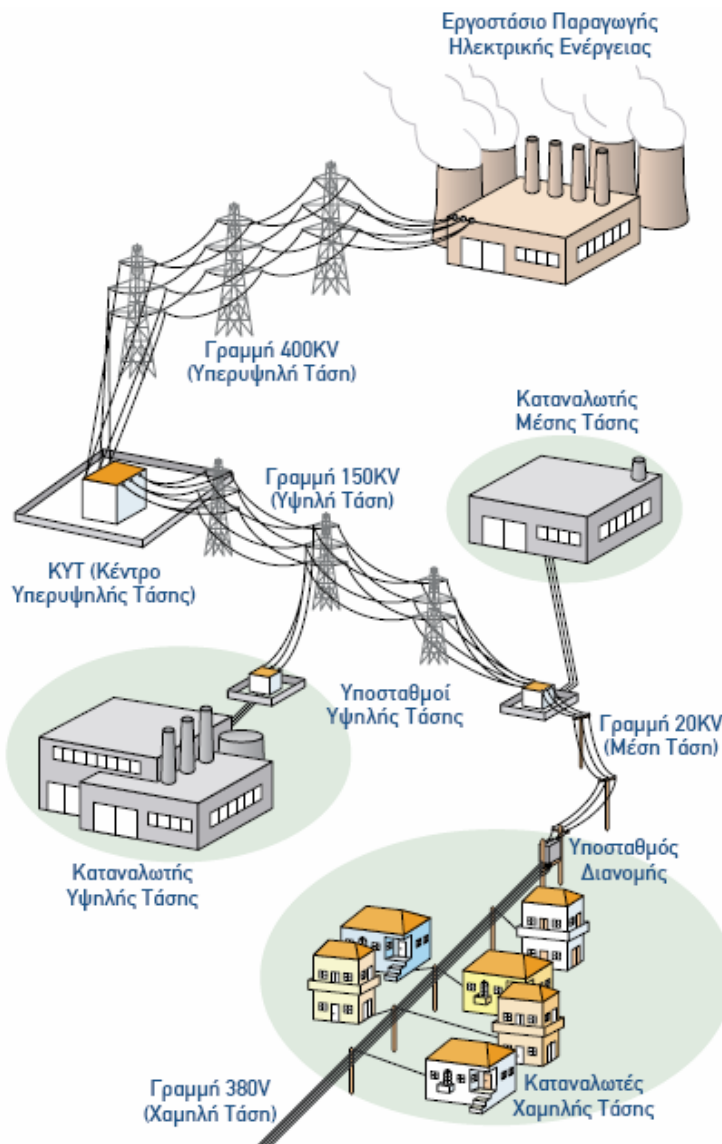
Αν και συχνά θεωρούνται, ως ισχυρές πηγές πεδίων, οι εγκαταστάσεις υψηλής και υπερυψηλής τάσης κυρίως, οι γραμμές μεταφοράς αλλά σε μερικές περιπτώσεις και οι υποσταθμοί υποβιβασμού της υψηλής τάσης, ωστόσο, μαγνητικά πεδία καταγράφονται σε παρόμοιες εντάσεις παντού στο αστικό περιβάλλον, αλλά και μέσα σε κάθε σύγχρονη κατοικία ή χώρο εργασίας. Λόγω της απανταχού παρουσίας του εντός των αστικών ζωνών, το δίκτυο

διανομής, που συνήθως είναι δίπλα στα κτίσματα που εξυπηρετεί στα οποία και διεισδύει, συντελεί καθοριστικά στη διαμόρφωση του ‘μαγνητικού υπόβαθρου’, δηλαδή της μέσης τιμής του μαγνητικού πεδίου που συναντάται κατά μήκος των πεζοδρομίων και δρόμων στο αστικό περιβάλλον. Αντίθετα, μέσα σε κατοικίες και εργασιακούς χώρους το μαγνητικό περιβάλλον, διαμορφώνεται βασικά από την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση καθώς και τη χρήση διαφόρων ηλεκτρικών συσκευών και εξοπλισμού. (Οικονομόπουλος, 2012)

Κεφάλαιο 2 : ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

2.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να παραχθεί σε υψηλές ποσότητες στους σταθμούς παραγωγής και να μεταφέρεται σε αποστάσεις μέσης και μεγάλης εμβέλειας, έως τα σημεία κατανάλωσης. Αυτό γίνεται με τα δίκτυα μεταφοράς (υψηλή τάση), με υποσταθμούς υποστήριξης, και τέλος με το δίκτυο διανομής (μέση και χαμηλή τάση). Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται σχηματικά όλη αυτή η διαδικασία.



Εικόνα 1 Παραγωγή, μεταφορά και διανομή Ηλεκτρικής ενέργειας (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)

2.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με συγκεκριμένους τρόπους και χρήση-εκμετάλλευση συγκεκριμένων πρωτογενών πηγών ενέργειας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται από χώρα σε χώρα για την παραγωγή ενέργειας διαφέρουν ανάλογα με τις διαθέσιμες πηγές, τους ενεργειακούς πόρους και την ενεργειακή πολιτική, καθώς και τις γεωφυσικές και γεωλογικές ιδιαιτερότητες της κάθε χώρας. (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνεται σε δύο κατηγορίες. Στην παραγωγή από παραδοσιακές ή αλλιώς συμβατικές πηγές και σε αυτή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στην πρώτη περίπτωση περιλαμβάνονται υλικά όπως ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης), το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο, ενώ στην δεύτερη κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών, περιλαμβάνεται η ενέργεια που παράγεται από το νερό, τον αέρα, τον ήλιο. Επιπρόσθετα, στην δεύτερη κατηγορία μπορεί να συμπεριληφθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα (πρόκειται για οποιοδήποτε υλικό που προέρχεται άμεσα ή έμμεσα από τον φυτικό κόσμο), από γεωθερμία (η εκμετάλλευση της φυσικής θερμικής ενέργειας της γης που διαρρέει το εσωτερικό του πλανήτη και οδεύει προς την επιφάνεια) και από πυρηνική ενέργεια. (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017)

Στη χώρα μας η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο στους σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. Οι σταθμοί αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στους θερμοηλεκτρικούς και στους υδροηλεκτρικούς, ενώ υπάρχουν και πολλές εγκαταστάσεις ΑΠΕ από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά. Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, σε αυτή χρησιμοποιούνται υλικά όπως ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, ενώ στη δεύτερη, γίνεται χρήση της υδατόπτωσης (ενέργεια που παράγεται εξαιτίας της κίνησης και πτώσης μεγάλων ποσοτήτων νερού σε διαφορά ύψους). (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017)

Το 50% του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας μας παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που βρίσκονται στην περιφέρεια της Δυτικής Μακεδονίας (περιοχή Αμυνταίου-Πτολεμαΐδας), καθώς οι πιο σημαντικές πηγές λιγνίτη βρίσκονται στη Δράμα, στη Δυτική Μακεδονία, στην Ελασσόνα και στην Μεγαλόπολη. Βέβαια, η εγκατάσταση των θερμικών σταθμών σε αυτή την περιοχή προκαλεί απώλεια κατά ένα ποσοστό στη μεταφορά του ρεύματος στους καταναλωτές. Σύμφωνα με τα στοιχεία που δόθηκαν το 2011, το 66,5% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην Ελλάδα επιτυγχάνεται σε θερμικούς σταθμούς, ενώ το 19,6 % σε υδροηλεκτρικούς σταθμούς (υδροηλεκτρική μονάδα Λούρου, Λάδωνα, Άγρα και Γλαύκου). (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017)



Εικόνα 2 Θερμοηλεκτρικός Σταθμός Μεγαλόπολης
(Tzeferis, 2005)



Εικόνα 3 Λιγνιτικό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας - Ορυχείο Νότιου Πεδίου
(ΔΕΗ, 2010)



Εικόνα 4 Ατμοηλεκτρικός Σταθμός Χανίων (αριστερά), Υδροηλεκτρικός Σταθμός Ασωμάτων (δεξιά)
(ΔΕΗ, 2010)

Μερική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται επίσης και στα αιολικά πάρκα της χώρας μας, τα οποία επικρατούν στο σύνολο των ΑΠΕ, μέσω της χρήσης ανεμογεννητριών αλλά και μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία παρουσιάζουν αρκετή άνοδο τα τελευταία έτη. Και τα δύο δημιουργούν ηλεκτρική ενέργεια με τη συλλογή και μετατροπή της ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο και τον ήλιο αντίστοιχα. (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017)



Εικόνα 5 Αιολικό πάρκο Μαρμαρίου Ευβοίας (αριστερά), Φωτοβολταϊκός Σταθμός Σίφνου (δεξιά)
(ΔΕΗ, 2010)

Μέχρι και το τέλος του 2011, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των εν λειτουργία σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ ήταν 2,14 TW. (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017)

2.3 Μεταφορά

Μετά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επόμενο βήμα αποτελεί η μεταφορά της στις διάφορες πόλεις της χώρας με επόμενο και τελικό βήμα τη διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος στον χώρο κατοικίας (ή χώρο εργασίας) κάθε Έλληνα πολίτη, ακόμη κι αν αυτό βρίσκεται στο πιο απομακρυσμένο σημείο της χώρας. Αλλά ας αναφερθούμε με λίγα λόγια στο πως ακριβώς

γίνεται η μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, από το σταθμό παραγωγής, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω γραμμών υψηλής τάσης (66 και 150 kV) και υπερυψηλής τάσης (400 kV) στα κέντρα κατανάλωσης. (Ζτούπης, 2009).

Παρά το ότι δεν θα ασχοληθούμε διεξοδικά με τις γραμμές υψηλής τάσης, αξίζει να αναφέρουμε πως η χρησιμότητά τους έγκειται στη μείωση της απώλειας που προκύπτει από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικά, στην συνέχιση της παροχής ενέργειας, ακόμη και στην περίπτωση πρόκλησης βλάβης. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πυλώνες ή πύργους (όταν πρόκειται για εναέριες γραμμές), από μονωτήρες και από αγωγούς (χάλκινους ή αλουμινένιους). (Οικονομόπουλος, 2012)

Οι γραμμές μεταφοράς είναι εναέριες, υπόγειες ή υποβρύχιες. Οι υπόγειες και υποβρύχιες γραμμές χρησιμοποιούν υψηλή τάση ενώ οι εναέριες τόσο υψηλή όσο και υπερυψηλή. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς αποτελούν έναν από τους πιο αποτελεσματικούς, απλούς και φυσικά φθηνούς τρόπους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Γι' αυτό ακριβώς το λόγο, στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου 10.945 km εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής και υπερυψηλής τάσης, καθώς και 131 km υπόγειων γραμμών υψηλής τάσης, οι οποίες μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα σε κατοικημένες περιοχές. Οι υποβρύχιες γραμμές που μεταφέρουν ρεύμα στα νησιά ανέρχονται στα 155 km. Συνολικά, το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από γραμμές που απλώνονται περίπου στα 11.232 km. (ΑΔΜΗΕ, 2013)

Κάποια από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος είναι ότι ξεκινούν από και καταλήγουν σε υποσταθμούς και ότι είναι είτε απλού είτε διπλού κυκλώματος. Κάποιες από τις πιο συνηθισμένες διατάξεις αυτών των γραμμών είναι οι εξής:

- απλό κύκλωμα οριζόντιας διάταξης 150 kV
- διπλό κύκλωμα κάθετης διάταξης 150 kV
- απλό κύκλωμα οριζόντιας διάταξης 400 kV
- διπλό κύκλωμα κάθετης διάταξης 400 kV

(Οικονομόπουλος, 2012)

Τα δίκτυα μεταφοράς είναι είτε ακτινωτά (όταν πρόκειται για νησιά ή αγροτικές περιοχές), είτε βροχοειδή (ή αλλιώς κλειστά) δίκτυα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα ενός ακτινωτού δικτύου είναι η οικονομική κατασκευή του αλλά σε περίπτωση βλάβης σε ένα

ορισμένο σημείο, δημιουργείται πρόβλημα και στους υπόλοιπους καταναλωτές, κάτι που δεν συμβαίνει με τα βροχοειδή δίκτυα. (Οικονομόπουλος, 2012)



Εικόνα 6 Γραμμές υπερυψηλής τάσης στο Κάστρο Βοιωτίας, Κέντρο Υπερυψηλής τάσης Λάρυμνας (ΔΕΗ, 2011)

2.4 Υποσταθμοί

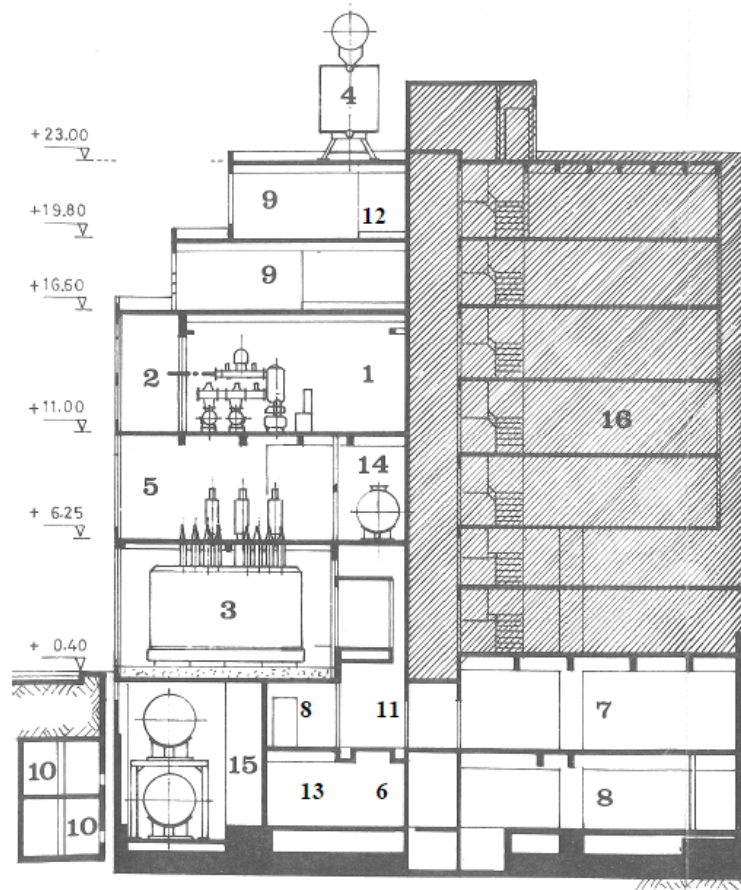
Ο υποσταθμός αποτελεί βασικό κομμάτι του δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υποσταθμοί του δικτύου μεταφοράς τοποθετούνται στην αρχή μιας γραμμής μεταφοράς για την ανύψωση της τάσης και στο τέλος αυτής, για τον υποβιβασμό της τάσης του ρεύματος και τη μεταφορά του στα δίκτυα διανομής. (Ζτούπης, 2009)

Εκτός από τους μετασχηματιστές ισχύος, τους οποίους θα περιγράψουμε παρακάτω, ένας υποσταθμός περιλαμβάνει επίσης αυτόματους διακόπτες που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία ή μη του μετασχηματιστή, ειδικές συνδέσεις, προστασία από βραχυκυκλώματα. Όσο για τους υποσταθμούς διανομής, συνήθως τοποθετούνται εναερίως, ανάμεσα από δύο κολώνες, εάν είναι μεγάλοι, ή πάνω σε στύλους και μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης τους καταναλωτές. Οι εναερίοι υποσταθμοί ενέχουν μεγαλύτερη πιθανότητα βλάβης από τους επίγειους ή υπόγειους υποσταθμούς. (Ζτούπης, 2009)

Οι επίγειοι υποσταθμοί τοποθετούνται είτε σε εσωτερικό-κλειστό είτε σε υπαίθριο χώρο, ενώ τους υπόγειους τους συναντάμε στον υπόγειο χώρο ενός κτιρίου. Τα συγκεκριμένα είδη υποσταθμών διανέμουν μεγαλύτερη τάση ηλεκτρικής ενέργειας από τους εναερίους

υποσταθμούς. Συνήθως αντιστοιχεί ένας υποσταθμός ανά συγκεκριμένο αριθμό κατοικιών (ανά περίπου εκατό). (Ζτούπης, 2009)

Γύρω από τους υποσταθμούς δημιουργούνται μαγνητικά πεδία που εξασθενούν με την απομάκρυνση από αυτούς. Παρακάτω θα δούμε το σχέδιο ενός τυπικού υποσταθμού που αντιστοιχεί στο Κτίριο ΚΔ Παγκρατίου. (Παρασκευόπουλος, 2009)



Εικόνα 7 Τομή κτιρίου ΚΔ Παγκρατίου
(ΔΕΗ, 1985)

1. Πίνακες 150kV
2. Καλώδια 150kV
3. Μετασχηματιστές (ΜΣ) 150/20kV, 100MVA
4. Ψυγεία ΜΣ
5. Ακροδέκτες ΜΣ
6. Αντιστάσεις κόμβου ΜΣ 12Ω
7. Πίνακες 20kV
8. Καλώδια 20kV
9. Πυκνωτές 20kV, 4MVAR
10. Στοές καλωδίων 20kV
11. Τοπικοί ΜΣ 20/0,4kV
12. Σύστημα τηλεχειρισμού ακουστικής συχνότητας (ΤΑΣ)
13. Βοηθητικές εγκαταστάσεις
14. Δεξαμενές πυρόσβεσης
15. Δεξαμενές ελαίου ΜΣ
16. Γραφεία

2.5 Μετασηματιστές

Πρόκειται για εφεύρεση, η οποία χρησιμοποιείται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας της διατυπώθηκε από τον Michael Faraday, αν και ο ίδιος τη χρησιμοποίησε για επίδειξη των νόμων της επαγωγής, χωρίς να δώσει αρχικά σημασία στην πρακτική της χρησιμότητα. Δύο από τις κατηγορίες μετασηματιστών είναι οι μετασηματιστές ισχύος και οι μετασηματιστές διανομής, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. (Βικιπαίδεια, 2017)

Οι μετασηματιστές ισχύος περιλαμβάνουν τους μετασηματιστές ανύψωσης τάσης, που τοποθετούνται έξω από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, τους μετασηματιστές μεταφοράς ή διανομής, που υποβιβάζουν την τάση του ρεύματος για να μεταφερθεί στους καταναλωτές και τέλος, τους μετασηματιστές βιομηχανικών εγκαταστάσεων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες του εργοστασίου σε μεγάλες μηχανές ή κινητήρες. Ένας μετασηματιστής είναι είτε μονοφασικός είτε τριφασικός. Οι τριφασικοί μπορούν να είναι είτε σε συνδεσμολογία αστέρα είτε σε συνδεσμολογία τριγώνου. (Οικονομόπουλος, 2012)

2.6 Δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης

Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς διανομής στους υποσταθμούς των καταναλωτών και μπορεί να αποτελείται από εναέριες γραμμές, επιτοίχια ή και υπόγεια καλώδια. Συνήθως χρησιμοποιούνται εναέριες γραμμές λόγω του χαμηλού τους κόστους. Οι γραμμές αυτές μπορούν να αποτελούνται από γυμνούς αγωγούς κατασκευασμένους με συνεστραμμένα καλώδια και προκαλούν στο περιβάλλον ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Οι γυμνοί αγωγοί αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου ή χαλκού. (Ζτούπης, 2009)

Ουσιαστικά το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται λόγω της παρουσίας ηλεκτρικών φορτίων. λόγω της χαμηλής τάσης των αγωγών, τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται είναι σχετικά μικρά. Οι τιμές των ηλεκτρικών πεδίων παραμένουν σταθερές. Όσο για τα μαγνητικά πεδία, αυτά δημιουργούνται εξαιτίας της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων που διαρρέουν έναν αγωγό. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου δεν παραμένουν σταθερές όπως σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, λόγω της συνεχούς μεταβολής των ηλεκτρικών φορτίων στη διάρκεια της ημέρας. Τόσο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου όσο και του μαγνητικού εξασθενεί με την απομάκρυνση από την πηγή. (Ζτούπης, 2009)

Η παροχή χαμηλής τάσης ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινά από τον πίνακα χαμηλής τάσης του υποσταθμού που ονομάζεται αλλιώς ασφαλειοκιβώτιο. Στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται κυρίως ξύλινοι στύλοι (οι οποίοι αποτελούνται από τυποποιημένα υλικά), αν και κάποιες φορές είναι πιθανό να είναι από τσιμέντο και πιο σπάνια από μέταλλο. (Χαλεβίδης, 2012)



Εικόνα 8 Τυπική διάταξη χαμηλής τάσης επί ξύλινου στύλου

Στην παραπάνω διάταξη χαμηλής τάσης που φαίνεται στην εικόνα και ξεκινώντας από πάνω, οι τρεις πρώτοι αγωγοί αντιστοιχούν στις τρεις φάσεις του συστήματος, ο τέταρτος αγωγός στον δημοτικό φωτισμό και ο τελευταίος αντιστοιχεί στον ουδέτερο. Οι διατομές των αγωγών που χρησιμοποιούνται στα Ελληνικά εναέρια δίκτυα, είναι 16, 50 και 95 mm^2 ενώ οι τύποι καλωδίων στα δίκτυα χαμηλής τάσης είναι 3x70+54,6+25 mm^2 , 4x120 mm^2 . (Τσιαμίτας, 2013)

Η τάση ενός τέτοιου δικτύου είναι εναλλασσόμενη, ημιτονοειδούς μορφής. Το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης διακρίνεται σε τρία μέρη, εκ των οποίων το καθένα σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί υπό ορισμένη ονομαστική τάση και παράλληλα, συνδέεται με τα υπόλοιπα τμήματα του δικτύου που έχουν κι αυτά με τη σειρά τους διαφορετική ονομαστική τάση. Οι διαφορετικές ονομαστικές τάσεις στα μέρη ενός τέτοιου δικτύου επιτυγχάνονται μέσω μετασχηματιστών. Συνήθως, η ονομαστική τάση μεταξύ φάσεως και ουδέτερου είναι 230 V και ονομάζεται φυσική τάση, ενώ μεταξύ των φάσεων είναι 400 V και ονομάζεται πολική τάση.

Η συχνότητα του δικτύου, η οποία αναφέρεται στον ρυθμό επανάληψης του θεμελιώδους κύματος της τάσης ανά δευτερόλεπτο, είναι ενιαία και ίση με τη συχνότητα λειτουργίας ολόκληρου του συστήματος του δικτύου, δηλαδή ίση με 50 Hz.

2.7 Δίκτυα διανομής μέσης τάσης

Υπάρχουν περιπτώσεις που οι καταναλωτές επιθυμούν να προμηθευτούν με ηλεκτρικό ρεύμα μέσης τάσης, λόγω των αναγκών τους. Αυτοί είναι συνήθως ιδιοκτήτες ξενοδοχείων ή μικρών εργοστασίων, οι οποίοι τροφοδοτούνται με τριφασικές παροχές μεσαίας τάσης των 380 Volt. Γενικότερα, το δίκτυο διανομής μέσης τάσης μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής και περιλαμβάνει γραμμές (μέσης τάσης) των 20 kV. Στην χώρα μας, μπορεί να συναντήσει κανείς δίκτυο μέσης τάσης που λειτουργεί στα 15 kV. Σε αυτή την περίπτωση, εγκαθίστανται συγκεκριμένου είδους μετασχηματιστές, μονωτήρες και άλλα υλικά, τα οποία είναι έτσι σχεδιασμένα για τάση λειτουργίας αλλά και μεταφορά τάσης των 20kV. (Τσαλικίδης, 2012)

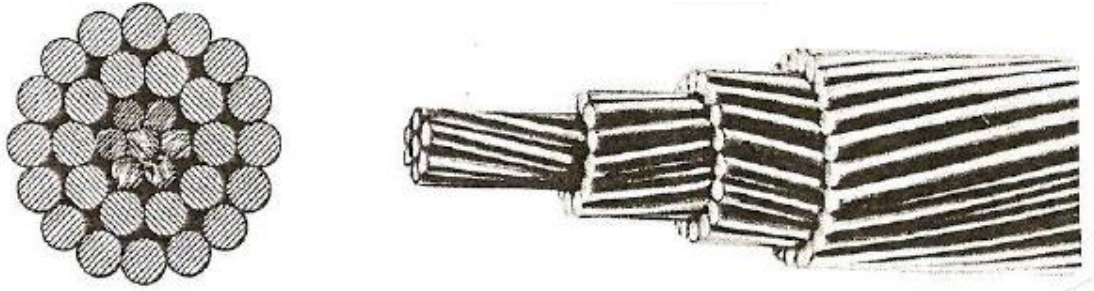


Εικόνα 9 Τυπική διάταξη μέσης τάσης επί ξύλινου στύλου

Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης στην Ελλάδα έχει βροχοειδή μορφή, ενώ η λειτουργία του είναι ακτινική.

Για τη στήριξη των γυμνών αγωγών ASCR (οι οποίοι αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου και χάλυβα) που συναντώνται στα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως ξύλινοι στύλοι και πιο σπάνια, στύλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα (μπετόν). Οι πολύκλωνοι αγωγοί ACSR αποτελούνται από στρώματα χαλύβδινων συρμάτων και από

στρώματα συρμάτων αλουμινίου. Τα συνεστραμμένα με αντίθετη διεύθυνση συστροφής σε δυο γειτονικά στρώματα σύρματα, είναι έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συνοχή του συρματόσκοινου. (Τσαλικίδης, 2012)



Εικόνα 10 Μορφή αγωγών ASCR
(Τσαλικίδης, 2012)

Οι διατομές των αγωγών που χρησιμοποιούνται στα Ελληνικά εναέρια δίκτυα, είναι 16, 50 , 95 mm^2 ενώ οι τύποι καλωδίων στα δίκτυα μέσης τάσης είναι $3 \times 50 + 70 mm^2$, $3 \times 150 + 250 mm^2$. (Τσιαμίτας, 2013)

Όλα τα δίκτυα είναι τριφασικά, τριών αγωγών, με γείωση στον ουδέτερο κόμβο του δεύτερου μετασχηματιστή των υποσταθμών υψηλής τάσης μέσω αντίστασης 12 Ω . (Τσαλικίδης, 2012)

Οι μετασχηματιστές, όπως και στην περίπτωση του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης, μετασχηματίζουν την μέση τάση ηλεκτρικού ρεύματος σε χαμηλή, για την παράλληλη μεταφορά του και στις γραμμές χαμηλής τάσης.

2.8 Δ.Ε.Η

Η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού ιδρύθηκε το 1950 με σκοπό την παραγωγή και μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον ελλαδικό χώρο. Παρά το γεγονός ότι υπήρχαν και άλλες εταιρείες παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (περίπου 400), είτε δημόσιες είτε ιδιωτικές, από το 1889 μέχρι το 1949, η Δ.Ε.Η είναι αυτή που συνέβαλε στην διανομή ηλεκτρικής ενέργειας και την αυτάρκεια σχεδόν όλης της χώρας σε ρεύμα. Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιούνταν έως τότε εισαγόταν από το εξωτερικό και ήταν το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας. Το 1956 έγινε η εξαγορά όλων των προαναφερθέντων επιχειρήσεων. (ΔΕΗ Α.Ε., 2013)



Εικόνα 11 Εργοτάξιο Υδροηλεκτρικού Σταθμού Κρεμαστών, 1965
(ΔΕΗ, 2011)

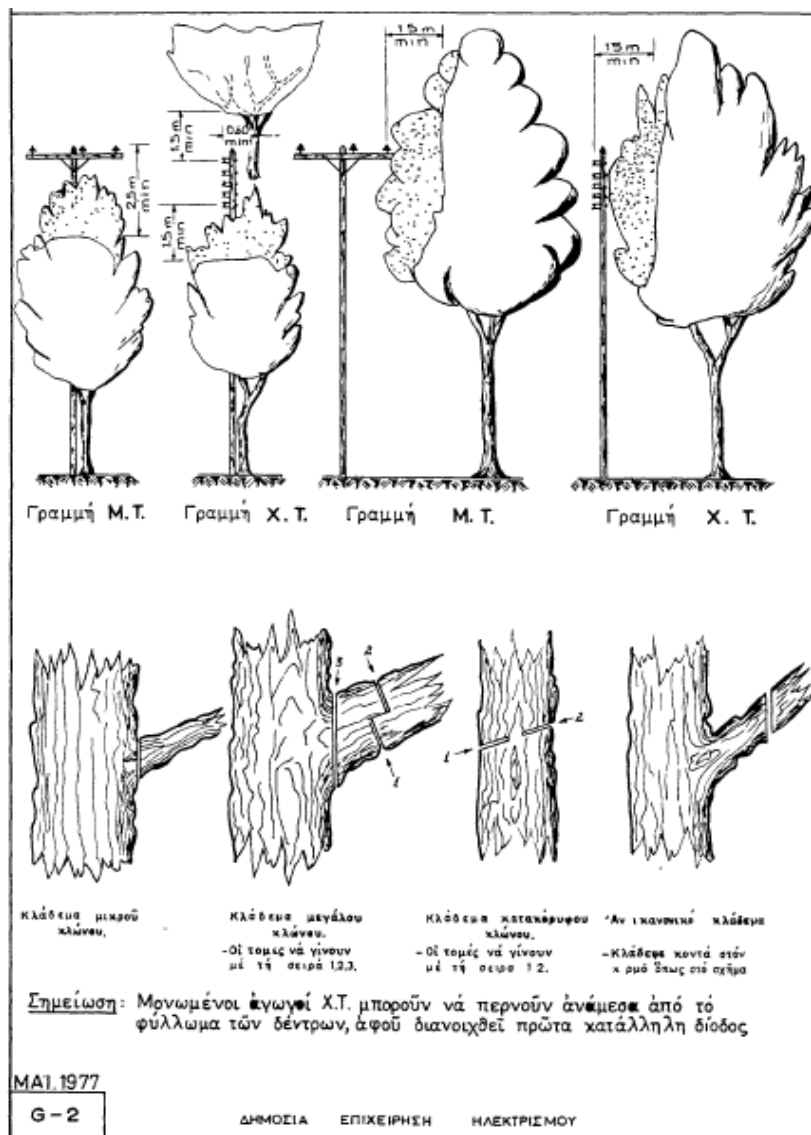
Σήμερα, η ΔΕΗ Α.Ε., είναι η μεγαλύτερη εταιρεία παραγωγής και προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Οι πελάτες της ανέρχονται περίπου στα 7,4 εκατομμύρια. Με τους λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς, πετρελαϊκούς σταθμούς, όπως επίσης και σταθμούς φυσικού αερίου και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), κατέχει περίπου το 68% της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος στην Ελλάδα. Το 2012 η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής έφτασε τα 12.5 GW, με 19.998 τακτικό προσωπικό. (ΔΕΗ Α.Ε., 2013)

Με την απόσχιση των κλάδων Μεταφοράς και Διανομής, δημιουργήθηκαν δύο θυγατρικές εταιρείες της ΔΕΗ Α.Ε., ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.) ο οποίος έχει και την ευθύνη της διαχείρισης, της λειτουργίας, της ανάπτυξης και συντήρησης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και των διασυνδέσεών του και ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε.), ο οποίος έχει την ευθύνη για την διαχείριση, ανάπτυξη, λειτουργία και συντήρηση του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. (ΔΕΗ Α.Ε., 2013)

2.9 Συντήρηση δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα εναέρια δίκτυα διανομής χαμηλής και μέσης τάσης κατασκευάζονται υπό αυστηρούς ελέγχους σε κάθε χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Σύμφωνα με τον Κανονισμό Εγκατάστασης Συντήρησης Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ, άρθρο 281), πρέπει να γίνεται κλάδεμα των δέντρων που βρίσκονται σε επαφή ή σε κοντινή απόσταση με τις εναέριες γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης, κάθε χρόνο, όπως επίσης και διεξαγωγή ειδικού ελέγχου (τόσο οπτικού όσο και με ειδικές μετρήσεις με θερμοκάμερα) των υπόλοιπων στοιχείων του δικτύου, όπως των μονωτήρων, των διακοπών κτλ. (Φ. 608/Β/6.10.1967, 1967)



Εικόνα 12 Ελάχιστες αποστάσεις για το κλάδεμα δέντρων σε σχέση με γραμμές Μέσης και Χαμηλής τάσης. (ΔΕΗ, 1985)

Επιπρόσθετα, έχουν οριστεί συγκεκριμένες αποστάσεις ασφαλείας, σύμφωνα με τον ΚΕΣΥΓΗΕ, οι οποίες αφορούν αποστάσεις από τους ηλεκτροφόρους αγωγούς και όχι από τους στύλους πάνω στους οποίους είναι εγκατεστημένη η γραμμή μέσης τάσης. (Φ. 608/Β/6.10.1967, 1967). Ανεξάρτητα από την συντήρηση που γίνεται στα δίκτυα διανομής χαμηλής και μέσης τάσης, η διάρκεια ζωής τους γενικότερα εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής των επιμέρους στοιχείων που συνθέτουν το δίκτυο, δηλαδή τους μετασχηματιστές, τους μονωτήρες και τους αγωγούς, οι οποίοι διατηρούνται και λειτουργούν συνήθως για περίπου πενήντα χρόνια. (Χαλεβίδης, 2012)

Όπως προαναφέρθηκε, υπεύθυνος φορέας για την συντήρηση του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας), η οποία από το 2010 αποτελεί κατά 100% θυγατρική εταιρεία του ομίλου ΔΕΗ Α.Ε. (ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., 2017)

Οι εργασίες που εκτελούνται από την ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. αφορούν:

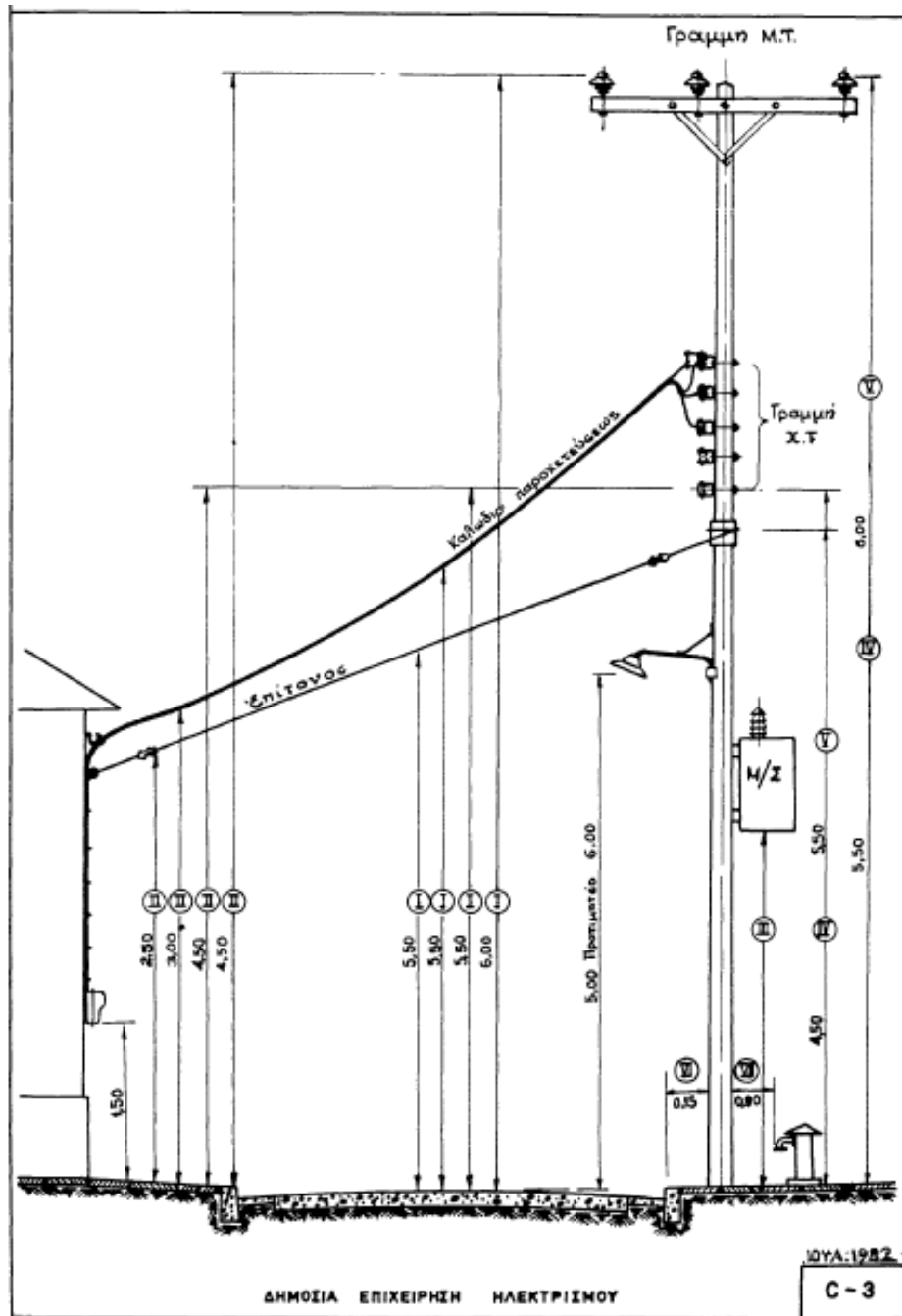
- Νέες Συνδέσεις Καταναλωτών και Παραγωγών, συμπεριλαμβανομένης της τροποποίησης Παλαιών Παροχών και τις μετατοπίσεις δικτύου
- Την Ανάπτυξη του Δικτύου
- Ενισχύσεις, βελτιώσεις και εκσυγχρονισμός του Δικτύου
- Κατασκευή Κέντρων Διανομής και Γραμμών 150kV
- Τις εργασίες Εκμετάλλευσης του Δικτύου, συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας του Δικτύου Διανομής, την επιθεώρηση και Συντήρηση του Δικτύου, την αποκατάσταση βλαβών, της εξυπηρέτησης των χρηστών δικτύου στα γραφεία και τέλος την καταμέτρηση των καταναλώσεων.
- Την ομαλή και αποδοτική λειτουργία της Αγοράς Ηλεκτρισμού στο επίπεδο των δικτύων.
- Την αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία των αυτόνομων νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων.

(ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., 2017)

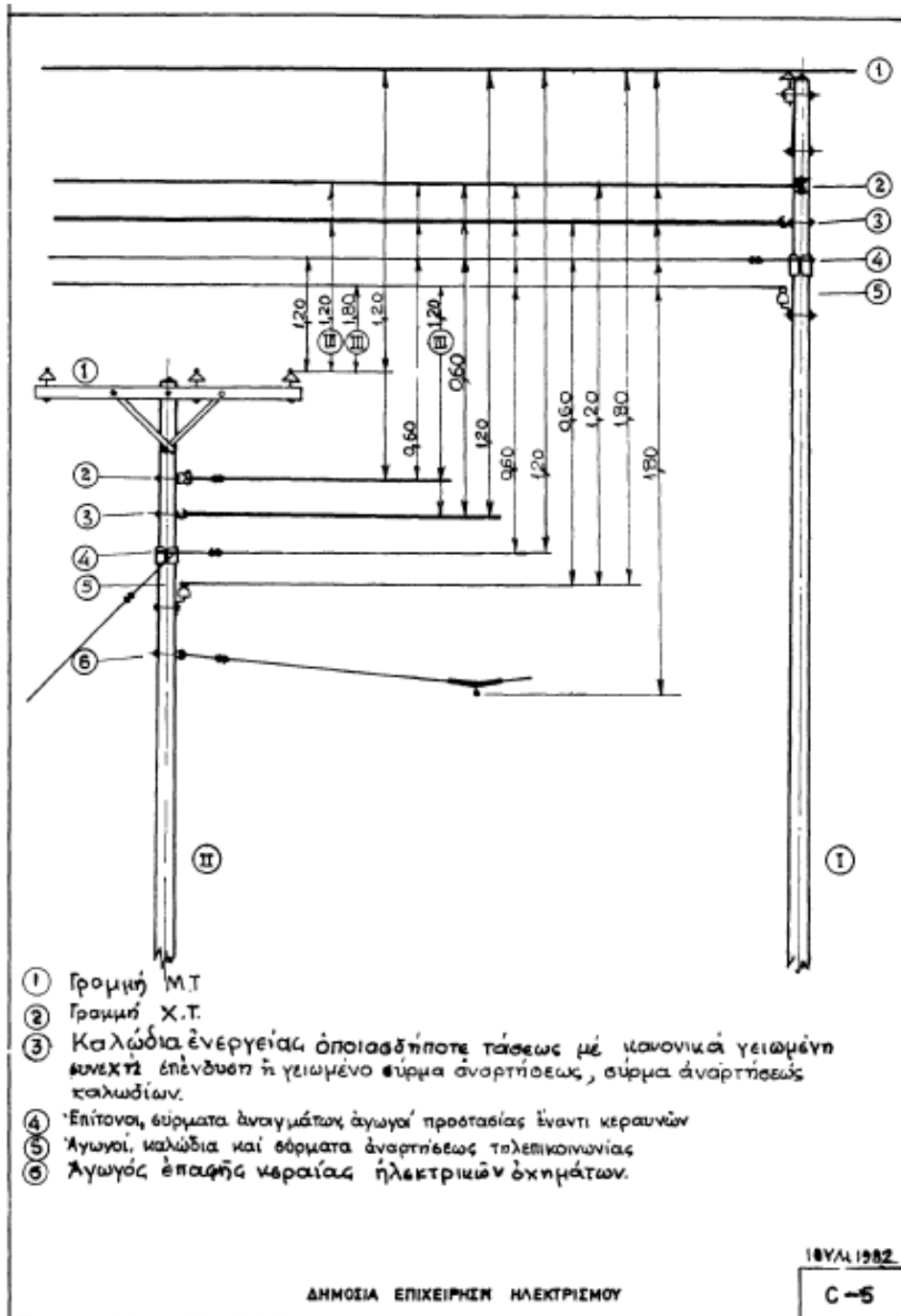
2.10 Τυποποιημένες Κατασκευές ΔΕΗ

Συγκεντρώνοντας τις σχετικές οδηγίες, τον Δεκέμβριο του 1985, εκδίδονται από τη ΔΕΗ οι τυποποιημένες κατασκευές για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, σε ένα τεύχος 873 σελίδων. Παρά τον μεγάλο όγκο των πληροφοριών, στις επόμενες εικόνες επιλέγονται οι ελάχιστες προβλεπόμενες αποστάσεις από το έδαφος, τους αγωγούς μεταξύ τους, καθώς και

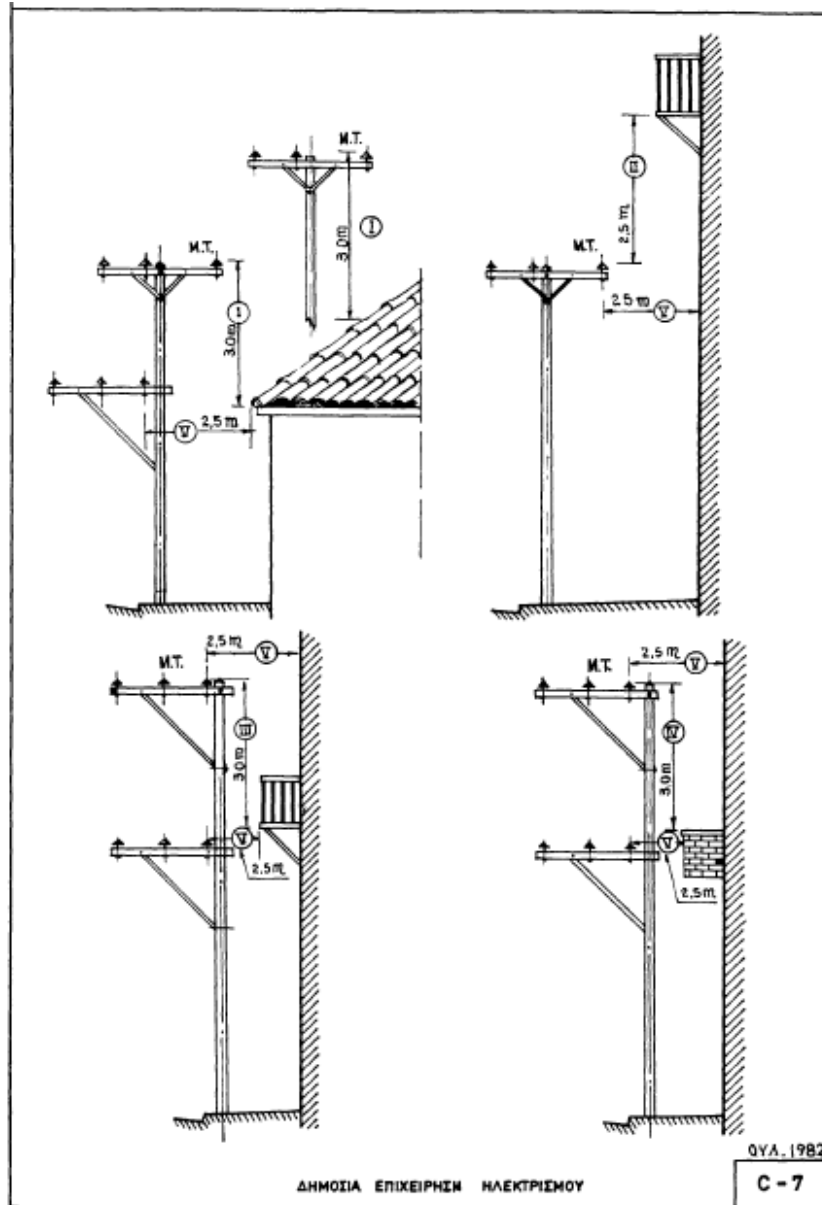
από σπίτια και κτίρια. Η παραπάνω επιλογή έγινε καθώς σχετίζεται με τα επίπεδα Ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, που θα μελετηθούν στα επόμενα κεφάλαια.



Εικόνα 13 Ελάχιστη κατακόρυφη απόσταση αγωγών πάνω από το έδαφος (ΔΕΗ, 1985)

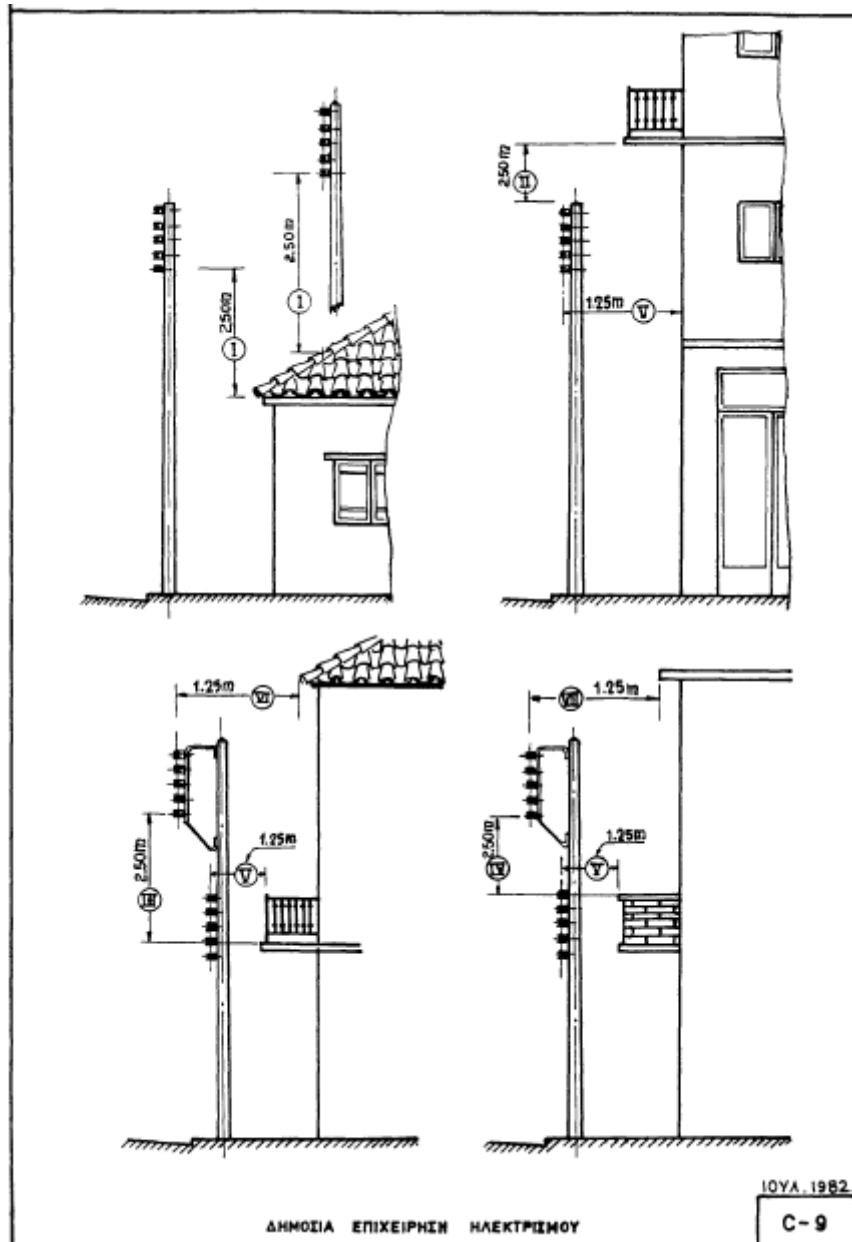


Εικόνα 14 Ελάχιστες κατακόρυφες αποστάσεις σε διασταυρώσεις αγωγών.
(ΔΕΗ, 1985)



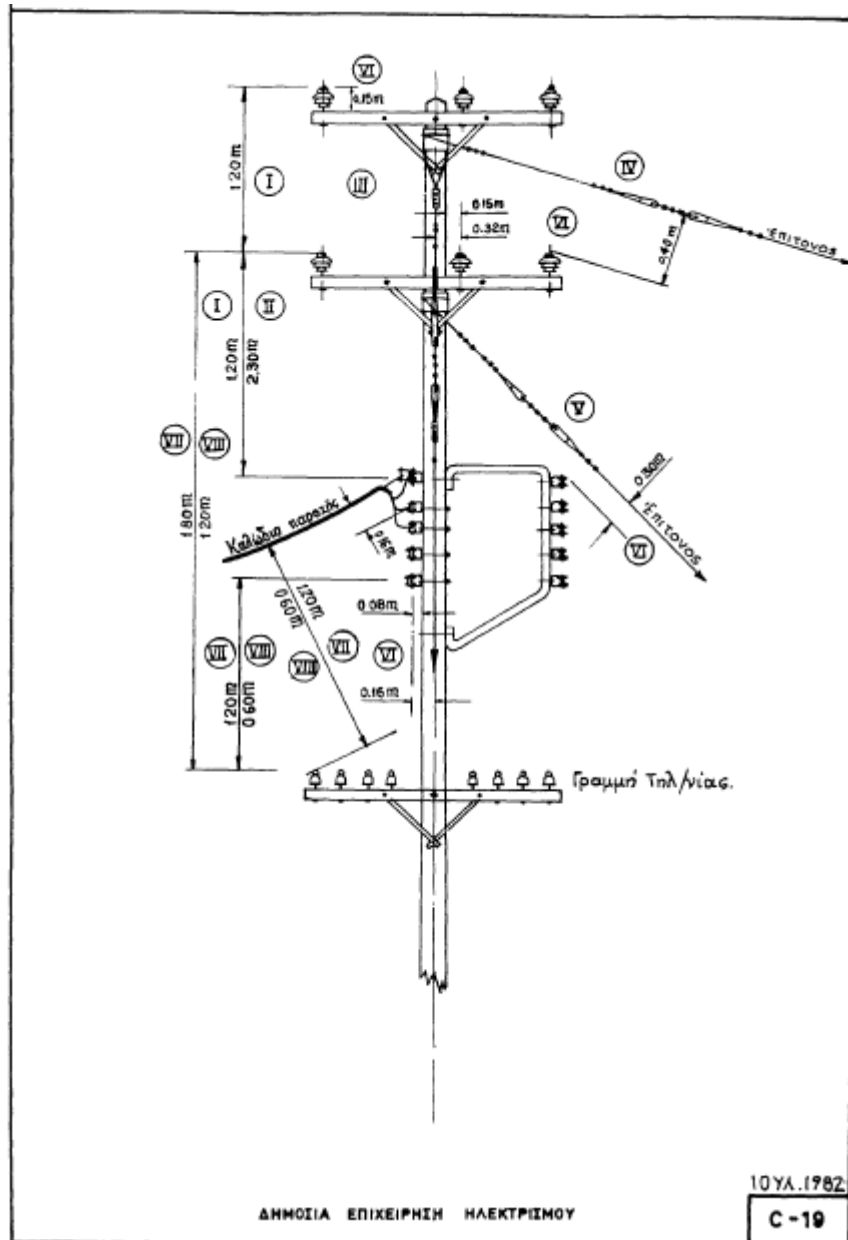
Εικόνα 15 Ελάχιστες αποστάσεις αγωγών μέσης τάσης από κτίρια.
(ΔΕΗ, 1985)

- I. Η κατακόρυφη απόσταση μετριέται από τη στηθαίο του εξώστη ή της ταράτσας εάν η κατασκευή του είναι τέτοια που να μπορεί να σταθεί άνθρωπος πάνω σε αυτό.
- II. Τα ανοίγματα των γραμμών νοούνται έως 45 m. Για μεγαλύτερα ανοίγματα οι παραπάνω αποστάσεις προσαυξάνονται κατά 1 cm ανά μέτρο επιπλέον των 45m.
- III. Οι αποστάσεις της εικόνας 15 αφορούν τάσεις από 8,7 kV έως 25 kV.
- IV. Σε ειδικές περιπτώσεις όπως στενοί δρόμοι όπου η οριζόντια απόσταση των 2,5m δεν είναι δυνατόν να τηρηθεί, επιτρέπεται η μείωσή της σε 2 m.
- V. Η κατακόρυφη απόσταση 3 m είναι επιθυμητό να τηρείται γενικά και μόνον σε όσες περιπτώσεις υπάρχουν τεχνικές δυσκολίες, θα εφαρμόζεται η ελάχιστη απόσταση των 2,5 m που προβλέπεται από τους κανονισμούς ΚΕΣΥΓΗΕ.
(ΔΕΗ, 1985)



Εικόνα 16 Ελάχιστες αποστάσεις αγωγών χαμηλής τάσης από κτίρια.
(ΔΕΗ, 1985)

- I. Η κατακόρυφη απόσταση μετρείται από τη στήθαιό του εξώστη ή της ταράτσας εάν η κατασκευή του είναι τέτοια που να μπορεί να σταθεί άνθρωπος πάνω σε αυτό.
- II. Η κατακόρυφη απόσταση καλωδίου Χ.Τ. με μεταλλικό γειωμένο μανδύα ή με συγκεντρικό γειωμένο αγωγό μπορεί να ελαττωθεί σε 0.9m από το υψηλότερο σημείο επικλινούς στέγης.
- III. Η οριζόντια απόσταση 1,25 m είναι επιθυμητό να τηρείται γενικά. Η εφαρμογή της προβλεπόμενης από τους κανονισμούς ΚΕΣΥΓΗΕ, ελάχιστης οριζόντιας αποστάσεως 0,9 m θα περιορίζεται στις περιπτώσεις εκείνες που δεν είναι τεχνικά δυνατή η τήρηση της απόστασης 1,25 m.
(ΔΕΗ, 1985)



Εικόνα 17 Κατά οποιαδήποτε κατεύθυνση ελάχιστες αποστάσεις αγωγών μεταξύ τους καθώς και από άλλα στοιχεία του στύλου στον οποίον στηρίζονται.
(ΔΕΗ, 1985)

- I. Οι διαχωρισμοί μεταξύ αγωγών που καθορίζονται στην εικόνα 17 ισχύουν για σταθερά αναρτημένους αγωγούς και για φασικές τάσεις έως 25kV.
- II. Στην περίπτωση μικτής γραμμής με επίτονο Μ.Τ., ο κατακόρυφος διαχωρισμός μεταξύ Η και Χ.Τ πρέπει να είναι τουλάχιστον 2,30m.
- III. Η απόσταση μετρείται από το κέντρο των βραχιόνων.
- IV. Οι μονωτήρες επιτόνου πρέπει να τοποθετούνται σε τέτοια θέση ώστε σε περίπτωση θραύσεως του επιτόνου και επαφής αυτού με τους υποκείμενους

αγωγούς Μ.Τ. και οι δύο μονωτήρες επιτόνου να βρίσκονται κάτω από τους αγωγούς της γραμμής.

- V. Οι μονωτήρες επιτόνου πρέπει να τοποθετούνται σε τέτοια θέση ώστε σε περίπτωση θραύσεως του επιτόνου και επαφής αυτού με τους υποκείμενους αγωγούς Χ.Τ. και οι δύο μονωτήρες επιτόνου να βρίσκονται πάνω από τους αγωγούς της γραμμής.
- VI. Οι διαχωρισμοί μεταξύ των αγωγών και επιτόνων ή αγωγών και επιφανειών στύλων και βραχιόνων, ισχύουν για τάσεις έως 20 kV. Για μεγαλύτερες τάσεις, οι διαχωρισμοί αυτοί πρέπει να αυξάνονται κατά 1 cm ή 0,5 cm, αντίστοιχα, για κάθε υπέρβαση τάσης 1 kV.
- VII. Αποστάσεις από γραμμή τηλεπικοινωνίας διαφορετικής επιχειρήσεως (Ο.Τ.Ε).
- VIII. Αποστάσεις από γραμμή τηλεπικοινωνίας της ίδιας επιχειρήσεως που χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση των γραμμών Ενεργείας.

(ΔΕΗ, 1985)

Όλα τα παραπάνω αφορούν τις τυποποιημένες ελάχιστες αποστάσεις και η πραγματικότητα ενδέχεται να διαφέρει. Για παράδειγμα, τα συνήθη ύψη των στηλών μέσης και χαμηλής τάσης κυμαίνονται από 9 m έως 15 m. (Τσιαμίτας, 2013)

Κεφάλαιο 3 : ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ & ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

3.1 Εισαγωγή - βασικές παραδοχές

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που θα εξετάσουμε, όπως αναφέραμε στις δυο πρώτες περιπτώσεις του 3 αγωγοί που διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα διαφορετικής φάσης. Κάθε αγωγός δημιουργεί στον περιβάλλοντα χώρο ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συχνότητας ίσης, με την συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος (50Hz).

Το πεδίο αυτό, περιγράφεται όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο κεφάλαιο από τις εξισώσεις του Maxwell :

$$\nabla \times \mathbf{E} = \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.1.2)$$

Όπου :

\mathbf{E} - η ηλεκτρική πεδιακή ένταση.

\mathbf{H} - η μαγνητική πεδιακή ένταση.

μ - η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου. Στον αέρα θα την θεωρήσουμε ίση με:

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

ε - η διηλεκτρική σταθερά του μέσου. Στον αέρα θα την θεωρήσουμε ίση με:

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

σ - η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου.

Στα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας η πολύ χαμηλή συχνότητα (50Hz), σε συνδυασμό με την πρακτικά μηδενική τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του αέρα αλλά και τις τιμές μ_0 και ε_0 δίνουν, όπως φαίνεται και τον πίνακα 1 του 1^{ου} Κεφαλαίου, σχεδόν μηδενικές τιμές για τη χρονική μεταβολή του Ηλεκτρικού και Μαγνητικού πεδίου. Ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν υπάρχει ζεύξη μεταξύ των πεδίων και χειριστούν ως ανεξάρτητα.

Εξαιτίας της διαφορετικής γεωμετρικής διάταξης των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης, θα αναπτυχθεί η ανάλυση σε 2 μέρη. Αρχικά θα υπολογιστεί το μαγνητικό και ηλεκτρικό πεδίο ενός αγωγού, και στην συνέχεια θα γενικευτεί η ανάλυση στην περίπτωση 3 και 4 αγωγών. Σημειώνεται ότι εξαιτίας των διαφορετικών φάσεων της εναλλασσόμενης φύσης του ρεύματος και τάσης, τα προκύπτοντα πεδία παρουσιάζουν μεγάλη περιπλοκότητα, χωρική ανομοιογένεια,

και χρονική διαφοροποίηση. Ο υπολογισμός έχει προσεγγιστεί με δύο τρόπους, όπου έγινε ο υπολογισμός μιας μέσης τιμής της έντασης του εκάστοτε πεδίου. Και οι δύο τρόποι ανήκουν στην αναλυτική κατηγορία υπολογισμού πεδίων. Ο ίδιος υπολογισμός μπορεί να προσεγγιστεί και με επιλύσεις μερικών διαφορικών εξισώσεων και μεθόδους συνοριακών τιμών. Το κύριο θέμα εδώ βρίσκεται αφενός στο σημείο που τελειώνει η ύπαρξη του πεδίου (στο μαγνητικό), αλλά και στις ισοδυναμικές επιφάνειες στο ηλεκτρικό πεδίο. Η κύρια μέθοδος για τον υπολογισμό των H/M πεδίων είναι η αριθμητική μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM – Finite Element Method). Χρησιμοποιείται για πολυπλοκότερα προβλήματα και έχει δειχθεί ότι δίνει πολύ κοντινά αποτελέσματα σε σχέση με την αναλυτική μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. (Ανδρέας, 2010)

Επίσης, οι αγωγοί λόγω του μεγάλου τους μήκους και την επίδραση της βαρύτητας, παρουσιάζουν το λεγόμενο «βέλος κάμψης», δεν είναι δηλαδή ευθύγραμμοι αλλά παρουσιάζουν μια καμπυλότητα από στύλο σε στύλο. Η επίδραση όμως στο παραγόμενο H/M πεδίο είναι αμελητέα και έτσι το «βέλος κάμψης» δεν λήφθηκε υπόψιν. (Ανδρέας, 2010)

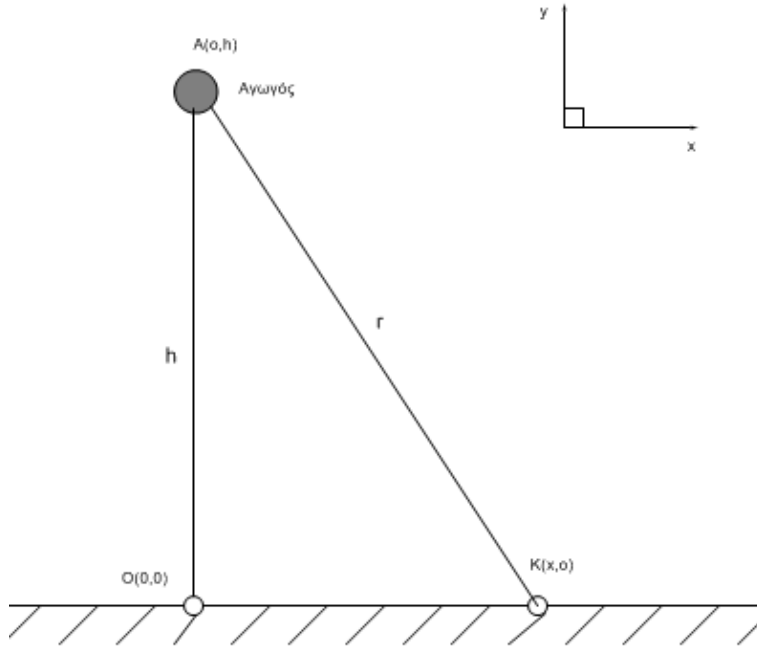
Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που δεν χρησιμοποιήθηκε χάριν απλοποίησης στην μοντελοποίηση του συστήματος, είναι οι «χωρητικότητες» και οι «αυτεπαγωγές» των αγωγών. Λόγω της κατανομής φορτίου, οι αγωγοί των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης, φέρονται όπως οι πλάκες ενός πυκνωτή με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται χωρητικότητες ανάμεσα στους αγωγούς αλλά και ανάμεσα στους αγωγούς και το έδαφος. Με παρόμοιο τρόπο, φερόμενοι ως πηνία, οι αγωγοί παρουσιάζουν το φαινόμενο της αυτεπαγωγής. Οι επιδράσεις στο παραγόμενο H/M πεδίο είναι επίσης αμελητέες. (Ανδρέας, 2010)

Συνοψίζοντας, οι αγωγοί θεωρήθηκαν ευθύγραμμοι, απείρου μήκους, με γραμμική κατανομή φορτίου, χωρίς τις μεταξύ τους χωρητικότητες και αυτεπαγωγές.

3.2 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου για έναν αγωγό

Καταρχήν να επισημανθεί ότι εξαιτίας της ύπαρξης εναλλασσόμενου ρεύματος, τα αντίστοιχα μαγνητικά πεδία, έχουν και αυτά μια αντίστοιχη περιοδικότητα, και μπορεί να αποδειχθεί θεωρητικά (για τις περιπτώσεις ενός αγωγού) ότι η τιμή της μέσης έντασης του πεδίου μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά, χρησιμοποιώντας την ενεργό τιμή της έντασης η οποία διαρρέει τον αγωγό. Στους υπολογισμούς που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο, χρησιμοποιήθηκαν στιγμιαίες τιμές, και έμμεσος υπολογισμός της μέσης τιμής της έντασης του πεδίου, σε συγκεκριμένα σημεία. Οι δυο τρόποι της προηγούμενης παραγράφου, δίνουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα με πάρα πολύ μικρές αποκλίσεις. Θα χρησιμοποιηθούν και οι δυο.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται σχηματικά η απλή περίπτωση του ενός αγωγού απείρου μήκους, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I(t)$.



Σχήμα 1 Διάταξη ενός αγωγού

Η παραπάνω περίπτωση είναι η απλούστερη δυνατή, ωστόσο αναλύεται, επειδή η προσθήκη 2 αγωγών, με βάση την αρχή της επαλληλίας, θα οδηγήσει στην επανάληψη αυτής.

Αν ο αγωγός στο σημείο $A(0, h)$, θεωρητικά απείρου μήκους, διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , μια δεδομένη χρονική στιγμή, τότε η ένταση του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργείται στο σημείο $K(x,0)$ στην επιφάνεια του εδάφους, θα είναι:

$$\vec{B} = \frac{\mu \overline{I(t)}}{2\pi r} \tag{3.2.1}$$

Όπου

r : η απόσταση από τον αγωγό . $r = \sqrt{x^2 + h^2}$

μ : μαγνητική διαπερατότητα του αέρα ($\mu \approx \mu_0$)

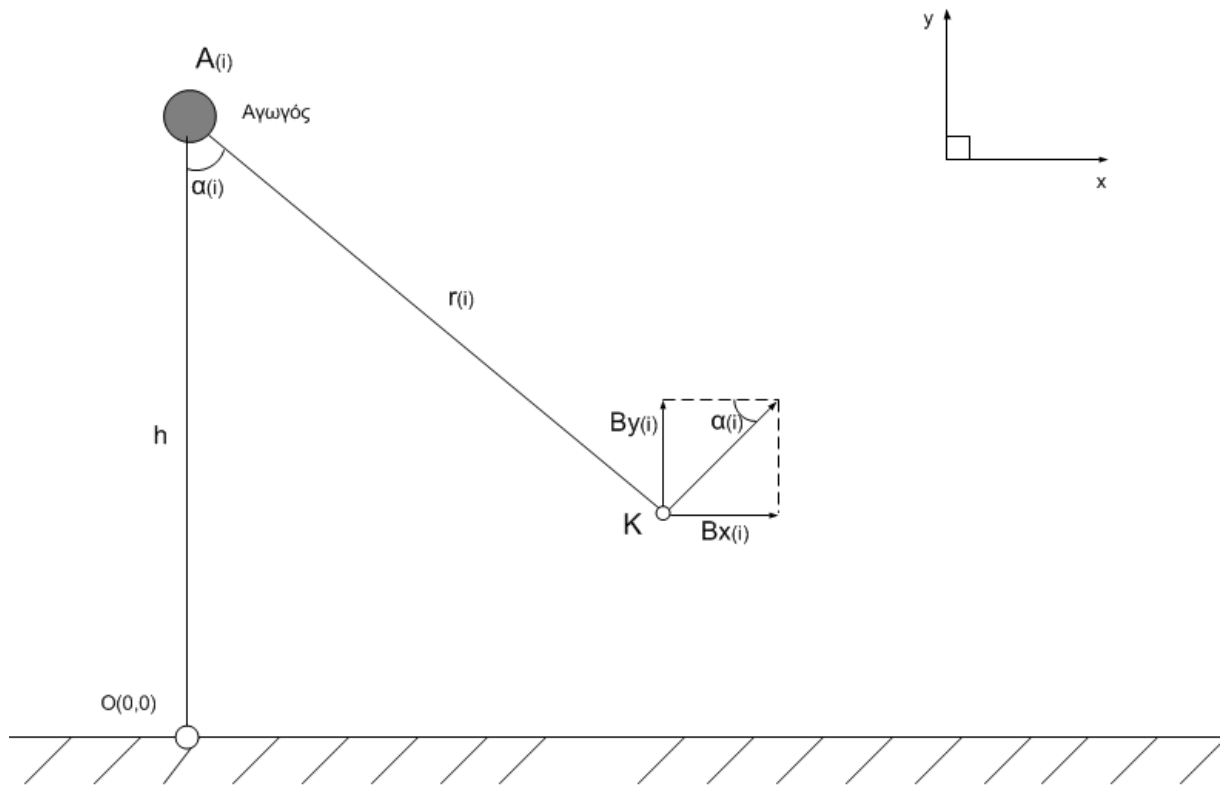
$\overline{I(t)} = I \sin(\omega t + \varphi_0)$, η στιγμιαία τιμή της έντασης του εναλλασσόμενου ρεύματος.

$\omega = 2\pi f$, $f = 50\text{Hz}$

I : η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος.

3.3 Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου στην περίπτωση 3 αγωγών

Εστιάζοντάς στο σημείο $K(x,y)$, ισχύει η παρακάτω διάταξη για περισσότερους του ενός αγωγούς:



Σχήμα 2 Διάταξη περισσότερων αγωγών σε τυχαίο σημείο K .

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι:

$$\vec{B}_i = \frac{\mu \overline{I_i(t)}}{2\pi r_i} \quad (3.3.1)$$

Όπου $i = 1,2,3$ ο αριθμός του αγωγού για τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός και $I_i(t)$ η στιγμιαία τιμή της έντασης του ρεύματος στον αγωγό αυτόν.

Οι συνιστώσες στους άξονες x,y είναι:

$$Bx_i = B_i \cos a_i \quad (3.3.2)$$

$$By_i = B_i \sin a_i \quad (3.3.3)$$

Όπου a_i η γωνία που σχηματίζει με την κατακόρυφη, το διάνυσμα θέσης του σημείου, από τον αγωγό.

Στην περίπτωση τριών παράλληλων αγωγών, για την ένταση του ρεύματος που τους διαρρέει είναι:

$$\overline{I_1(t)} = I_1 \sin \omega t \quad (3.3.4)$$

$$\overline{I_2(t)} = I_2 \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) \quad (3.3.5)$$

$$\overline{I_3(t)} = I_3 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.3.6)$$

Όπου I_i η μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος.

Η ολική ένταση του πεδίου στο συγκεκριμένο σημείο υπολογίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα των αντίστοιχων συνιστωσών στους άξονες x,y:

$$\begin{aligned} Bx_{ολ} &= Bx_1 + Bx_2 + Bx_3 = B_1 \cos a_1 + B_2 \cos a_2 + B_3 \cos a_3 = \frac{\mu \overline{I_1(t)}}{2\pi r_1} \cos a_1 + \\ &\frac{\mu \overline{I_2(t)}}{2\pi r_2} \cos a_2 + \frac{\mu \overline{I_3(t)}}{2\pi r_3} \cos a_3 \Rightarrow \\ Bx_{ολ} &= \frac{\mu}{2\pi} \sqrt{2} I_{\epsilon\nu} \left[\sin(\omega t) \frac{\cos a_1}{r_1} + \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \frac{\cos a_2}{r_2} + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{\cos a_3}{r_3} \right] \quad (3.3.7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} By_{ολ} &= By_1 + By_2 + By_3 = B_1 \sin a_1 + B_2 \sin a_2 + B_3 \sin a_3 + \frac{\mu \overline{I_1(t)}}{2\pi r_1} \sin a_1 + \\ &\frac{\mu \overline{I_2(t)}}{2\pi r_2} \sin a_2 + \frac{\mu \overline{I_3(t)}}{2\pi r_3} \sin a_3 \Rightarrow \\ By_{ολ} &= \frac{\mu}{2\pi} \sqrt{2} I_{\epsilon\nu} \left[\sin(\omega t) \frac{\sin a_1}{r_1} + \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \frac{\sin a_2}{r_2} + \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{\sin a_3}{r_3} \right] \quad (3.3.8) \end{aligned}$$

(P. D. BOURKAS, 2001)

Χρησιμοποιώντας το πυθαγόρειο θεώρημα για τις δύο συνιστώσες στους άξονες x,y, το ολικό μαγνητικό πεδίο στους άξονες υπολογίζεται ως εξής:

$$B_{ολ} = \sqrt{B_{xολ}^2 + B_{yολ}^2} \quad (3.3.9)$$

Για την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, χρησιμοποιήθηκε η ενεργός έκφραση για λόγους υπολογισμού. Επίσης επειδή εξαρτάται από την κατανάλωση, στο επόμενο κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν κάποιες ενδεικτικές τιμές με τελευταία αυτή του θερμικού ορίου των εκάστοτε αγωγών, που είναι το όριο της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος που αντέχει ο αγωγός, μέχρι να καταστραφεί από την θερμότητα.

3.4 Επιπλέον παραδοχές για το ηλεκτρικό πεδίο

Ο υπολογισμός της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να γίνει με 2 τρόπους :

1^{ον}) Με την αναλυτική μέθοδο, στην οποία θα χρησιμοποιούνται τεχνικές ηλεκτροστατικής.

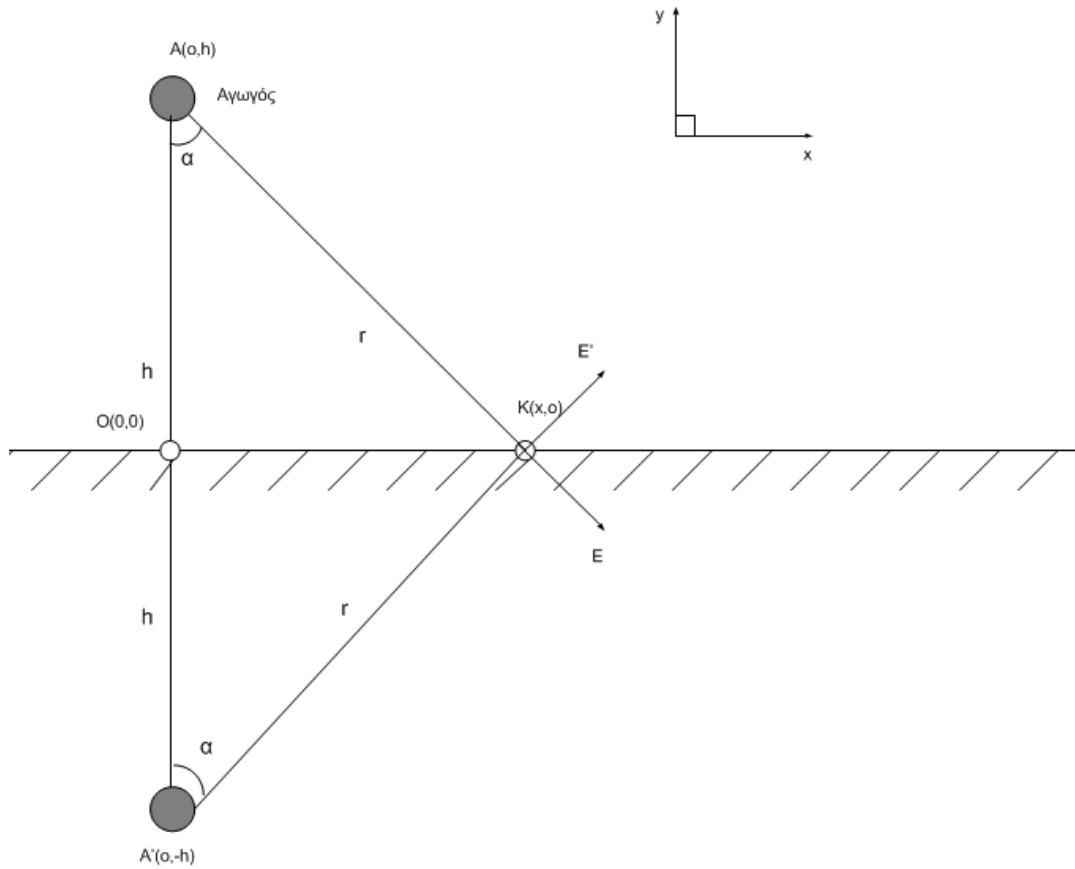
2^{ον}) Με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία χρησιμοποιείται σε προβλήματα συνοριακών τιμών.

Θα χρησιμοποιηθεί η αναλυτική μέθοδος, της οποίας οι διαφορές με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στις υπολογισθείσες τιμές είναι πάρα πολύ μικρές ($\Delta E < 5\%$ για αποστάσεις πολύ κοντινές ($r < 1\text{m}$) η πολύ μακρινές ($r > 10\text{m}$). Σε ενδιάμεσες αποστάσεις έχουμε σχεδόν ταύτιση. (S.S. Razavipour, 2012)

Η ύπαρξη του εδάφους, ως διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ 2 υλικών με διαφορετική διηλεκτρική σταθερά, όπως θα αναφερθούμε στην συνέχεια, μας οδήγησε στην εφαρμογή μιας συγκεκριμένης μεθόδου (κατοπτρισμού), η οποία αναφέρεται σε προσδιορισμό ηλεκτροστατικών πεδιακών εντάσεων σε χώρους με συνοριακές ισοδυναμικές επιφάνειες (εδώ θεωρούμε το έδαφος).

3.5 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου για έναν αγωγό

Θα θεωρηθεί αγωγός απείρου μήκους και γραμμικής πυκνότητας λ , ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I σε ύψος h πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Έστω σημείο K στην επιφάνεια το οποίο απέχει απόσταση r από τον αγωγό. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του κατοπτρισμού θα υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί ο αγωγός. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα με τη μέθοδο του κατοπτρισμού θεωρούμε εικονικό αγωγό ως αντανάκλαση του κυρίως αγωγού, ο οποίος βρίσκεται σε συμμετρικό σημείο ως προς την ισοδυναμική επιφάνεια που στην περίπτωση μας είναι το έδαφος. Η μέθοδος του κατοπτρισμού μπορεί να επεκταθεί και σε περιπτώσεις όπου η διαχωριστική επιφάνεια δεν είναι ισοδυναμική όμως το έδαφος, λόγω του σχεδόν μηδενικού του δυναμικού (≈ 0), θεωρείται ισοδυναμικό.



Σχήμα 3 Μέθοδος του κατοπτρισμού στην περίπτωση ενός αγωγού

Οι εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου που προκαλούνται από τους αγωγούς Α και το εικονικό είδωλό του Α', υπολογίζονται ως εξής:

$$\vec{E}_A = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \tag{3.5.1}$$

$$\vec{E}_{A'} = \frac{\lambda'}{2\pi\epsilon_0 r} \tag{3.5.2}$$

Η γραμμική πυκνότητα ρεύματος λ είναι διαφορετική λόγω της διαφοράς στη διηλεκτρική σταθερά του αέρα και αυτή της γης. Η σχέση που τις συνδέει είναι η:

$$\lambda' = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\gamma)\lambda}{(\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)} \tag{3.5.3}$$

Όπως και στο μαγνητικό πεδίο, ισχύει και εδώ η αρχή της επαλληλίας, οπότε για την συνολική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ισχύει:

$$\vec{E}_{o\lambda} = \vec{E}_A + \vec{E}_{A'} \quad (3.5.4)$$

Οι συνιστώσες στους άξονες x,y είναι:

$$\begin{aligned} \vec{E}_{x o\lambda} &= \vec{E}_{x A} + \vec{E}_{x A'} = \frac{\lambda \sin \alpha}{2\pi \varepsilon_0 r} + \frac{\lambda' \sin \alpha}{2\pi \varepsilon_0 r} = \frac{\sin \alpha}{2\pi \varepsilon_0 r} \left[\lambda + \frac{\lambda(\varepsilon_0 - \varepsilon_\gamma)}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma)} \right] = \frac{\lambda \sin \alpha}{\pi r(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma)} \Rightarrow \\ \vec{E}_{x o\lambda} &= \frac{\lambda \sin \alpha \cos \alpha}{\pi h(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma)} \end{aligned} \quad (3.5.5)$$

$$\begin{aligned} \vec{E}_{y o\lambda} &= \vec{E}_{y A} - \vec{E}_{y A'} = \frac{\lambda \cos \alpha}{2\pi \varepsilon_0 r} - \frac{\lambda' \cos \alpha}{2\pi \varepsilon_0 r} = \frac{\cos \alpha}{2\pi \varepsilon_0 r} \left[\lambda - \frac{\lambda(\varepsilon_0 - \varepsilon_\gamma)}{(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma)} \right] = \frac{\lambda \cos \alpha \varepsilon_\gamma}{\pi r(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma) \varepsilon_0} \Rightarrow \\ \vec{E}_{y o\lambda} &= \frac{\lambda \cos^2 \alpha \varepsilon_\gamma}{\pi h(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma) \varepsilon_0} \end{aligned} \quad (3.5.6)$$

Επίσης, για την γραμμική πυκνότητα φορτίου λ , μπορεί να υπολογιστεί έμμεσα ως εξής:

$$\lambda = \frac{dq}{dx} = \frac{dq/dt}{dx/dt} = \frac{I}{u} \stackrel{u=c}{\Rightarrow} \lambda = \frac{I}{c} \quad (3.5.7)$$

Η ταχύτητα διάδοσης του ρεύματος δεν είναι ακριβώς η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό, όμως για λόγους απλότητας θεωρήθηκε ίση. Έτσι για την ολική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ισχύει:

$$E_{o\lambda} = \sqrt{E_{x o\lambda}^2 + E_{y o\lambda}^2} \quad (3.5.8)$$

3.6 Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου για τρεις αγωγούς

Με βάση τον παραπάνω υπολογισμό για το ηλεκτρικό πεδίο ενός αγωγού και την αρχή της επαλληλίας, το ηλεκτρικό πεδίο τριών ή περισσότερων αγωγών θα είναι το διανυσματικό άθροισμα των επιμέρους.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{o\lambda} &= \vec{E}_{1o\lambda} + \vec{E}_{2o\lambda} + \vec{E}_{3o\lambda} \Rightarrow \\ \vec{E}_{o\lambda} &= [(I_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + I_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 + I_3 \sin \alpha_3 \cos \alpha_3)/c\pi h(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma)]\hat{x} + \\ &[\varepsilon_\gamma(I_1 \cos^2 \alpha_1 + I_2 \cos^2 \alpha_2 + I_3 \cos^2 \alpha_3)/c\pi h(\varepsilon_0 + \varepsilon_\gamma)\varepsilon_0]\hat{y} \end{aligned} \quad (3.5.9)$$

Στο επόμενο κεφάλαιο θα ακολουθήσουν οι εφαρμογές της θεωρίας για τον υπολογισμό του Η/Μ πεδίου γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης.

Κεφάλαιο 4 : ΕΚΤΙΜΗΣΗ Η/Μ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕΣΗΣ ΚΑΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

4.1 Εκτίμηση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί από το πρώτο κεφάλαιο, η διάταξη των τριών αγωγών στη μέση τάση είναι οριζόντια. Για μεγαλύτερη ευκολία στους υπολογισμούς, οι αγωγοί θεωρήθηκαν ότι ισαπέχουν και η μεταξύ τους απόσταση ορίστηκε στα 60cm. Το ύψος τους ενώ στην πραγματικότητα μπορεί να ποικίλει (αλλά δεν μπορεί να είναι μικρότερο από τις τυποποιημένες κατασκευές) εδώ ορίστηκε σε 10m.

Στην συνέχεια η ανάλυση θα εξειδικευτεί σε δυο διαδρομές, μία οριζόντια και μία κάθετη στους αγωγούς, προσπαθώντας να απεικονιστεί και γραφικά η μεταβολή της έντασης του πεδίου, ως συνάρτηση με την απόσταση από τους αγωγούς.

Στο σχήμα 4 φαίνεται η πρώτη περίπτωση της οριζόντιας διαδρομής, η οποία θα είναι σε ύψος $y=1,5\text{m}$, και σε τετμημένη, θα κυμαίνεται από $x=-10\text{m}$ έως $+10\text{m}$.

Ως ανεξάρτητη μεταβλητή θα ληφθεί η απόσταση $r_2 (=r)$.

Για να γίνει συνάρτηση $B_{ολ}=f(r)$, θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις του προηγούμενου κεφαλαίου (3.3.7), (3.3.8) και (3.3.9) αλλά και θα πραγματοποιηθούν οι κάτωθι μετασχηματισμοί ώστε να προσαρμοστούν στο σχήμα 4.

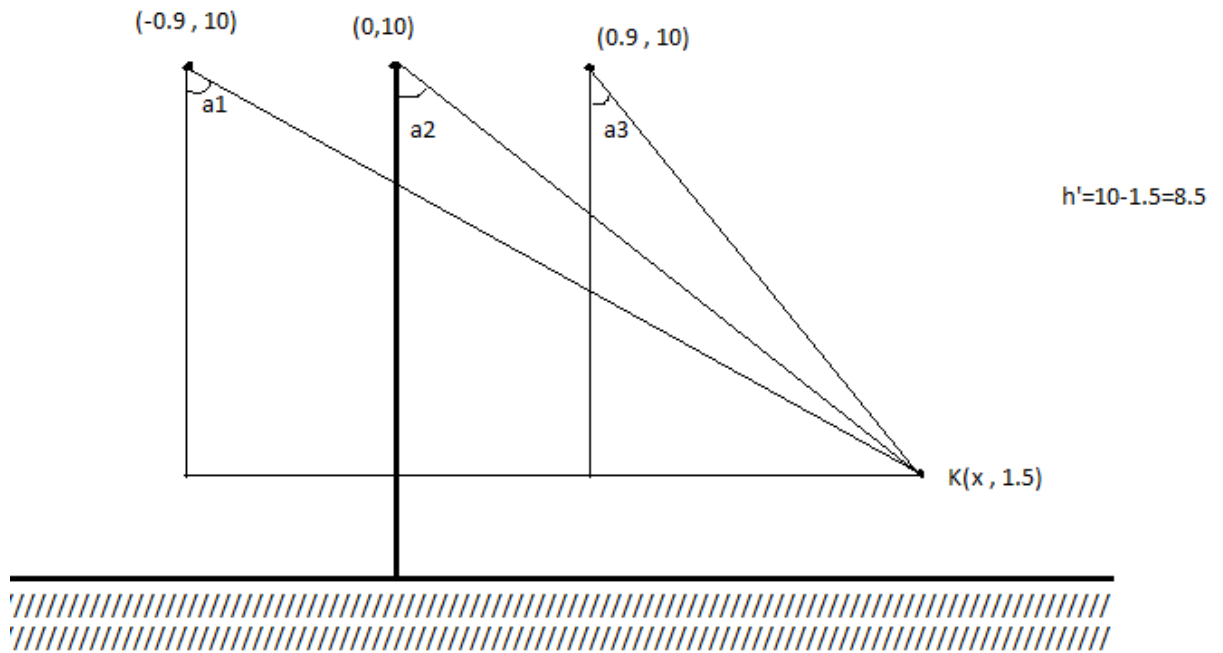
$$r = \sqrt{x^2 + h'^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(x + 0,9)^2 + h'^2}$$

$$r_3 = \sqrt{(x - 0,9)^2 + h'^2}$$

$$h' = 8,5\text{m}$$

Η οριζόντια διαδρομή έχει υπολογιστεί σε απόσταση 1,5m από το έδαφος ώστε να υποδείξει την ένταση του πεδίου στο ύψος του ανθρώπου.



Σχήμα 4 Διάταξη αγωγών μέσης τάσης (οριζόντια διαδρομή)

Βάσει του παραπάνω σχήματος, για τον υπολογισμό των τριγωνομετρικών όρων θα γίνουν οι παρακάτω μετασχηματισμοί:

$$\cos \alpha_2 = \frac{h'}{r_2}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{|x|}{r_2}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{h'}{r_1}$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{|x+0,9|}{r_1}$$

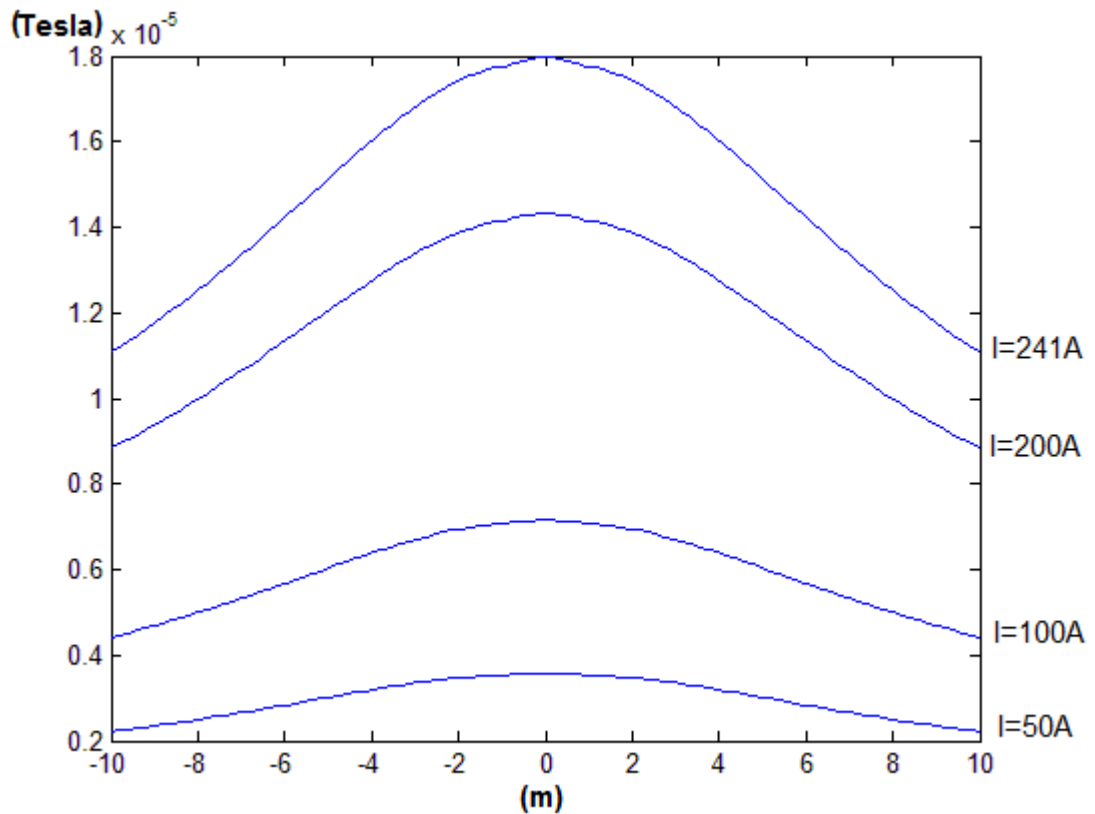
$$\cos \alpha_3 = \frac{h'}{r_3}$$

$$\sin \alpha_3 = \frac{|x-0,9|}{r_3}$$

Απο τις παραπάνω εξισώσεις, λυνοντας ως προς r_i , και απο την εξίσωση (3.3.9), αντικαθιστούμε στις (3.3.7), και (3.3.8). Τα παραπάνω γίνονται για να μπορέσει να «πλοταριστεί» η ένταση του πεδίου, ως συνάρτηση του r . Λόγω της πολυπλοκότητας των μαθηματικών παραστάσεων και της χρονικής μεταβλητότητας των εντάσεων, χρησιμοποιήθηκε κώδικας στο μαθηματικό πακέτο matlab (παρατίθεται στο παράρτημα -1- μέση τάση, μαγνητικό -διαδρομή-1). Εξαιτίας των ημιτονοειδών όρων του εναλλασσόμενου ρεύματος

πραγματοποιήθηκε έμμεσος τρόπος υπολογισμού της μέσης εξαγόμενης έντασης (για διαδοχικές φάσεις τις τάξεως των 1rad.

Στο σχήμα 5, παρουσιάζονται οι εξαγόμενες τιμές και η προκύπτουσα γραφική παράσταση. Ο κώδικας υπολογισμού παρατίθεται στο παράρτημα.



Σχήμα 5 Ένταση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης σε οριζόντια διαδρομή $|B|=f(x)$ (ύψος 1.5μ από έδαφος)

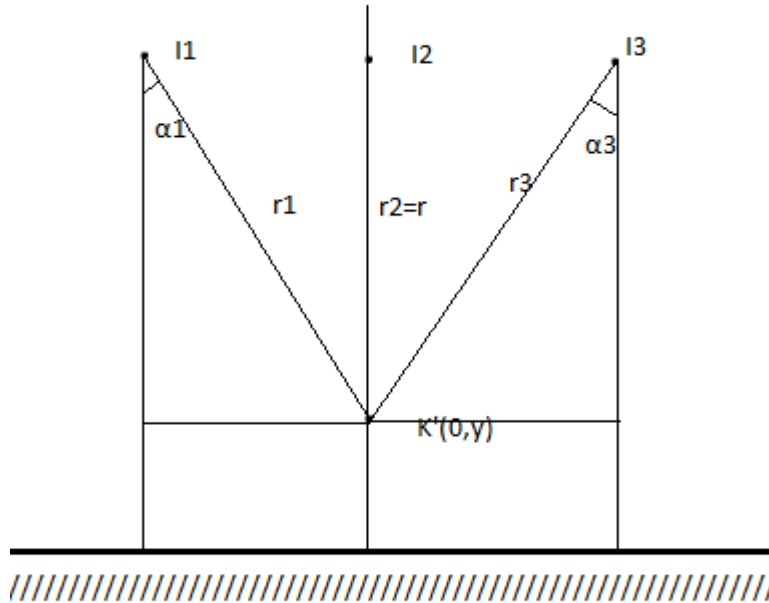
Ο κάθετος άξονας είναι σε Tesla και ο οριζόντιος σε m. Οι τέσσερις καμπύλες αντιστοιχούν σε τέσσερις ενδεικτικές τιμές της έντασης του ρεύματος $I=50A$, $100A$, $200A$ και $241A$. Το τελευταίο αποτελεί και το θερμικό όριο του αγωγού.

Το ίδιο αποτέλεσμα προσεγγίστηκε και με την βοήθεια της φόρμας στο excel με 2ο τρόπο ο οποίος παρατίθεται στην παράγραφο 4.5.

4.1.1 Υπολογισμός στην ίδια διάταξη μέσης τάσης σε κάθετη διαδρομή

Σε αυτήν την περίπτωση και πάλι σε απόσταση 1,5m από το έδαφος, ακολουθείται η κάθετη διαδρομή από το σημείο $K(0,0)$ έως και την συντεταγμένη $(0,7)$, η οποία είναι πλησίον του 2^{ου} αγωγού.

Η μεταβλητή εδώ θα είναι η y κυρίως λόγω συμμετρίας/απλούστευσης του σχήματος, αλλά λόγω και της διαδρομής, αφού περνάει από τον 2^ο αγωγό. Πιο αναλυτικά φαίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6 Διάταξη αγωγών μέσης τάσης (κατακόρυφη διαδρομή)

Όπως και στην οριζόντια διαδρομή, έτσι και εδώ για να γίνει συνάρτηση $B_{oλ}=f(r)$, θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις του προηγούμενου κεφαλαίου (3.3.7), (3.3.8) και (3.3.9) αλλά και θα πραγματοποιηθούν οι κάτωθι μετασχηματισμοί ώστε να προσαρμοστούν οι εξισώσεις στο σχήμα 6.

$$\sin \alpha_2 = 0$$

$$\cos \alpha_2 = 1$$

$$\sin \alpha_2 = \sin \alpha_1 = \frac{0,9}{r_1}$$

$$\cos \alpha_3 = \cos \alpha_1 = \frac{r_2}{r_1}$$

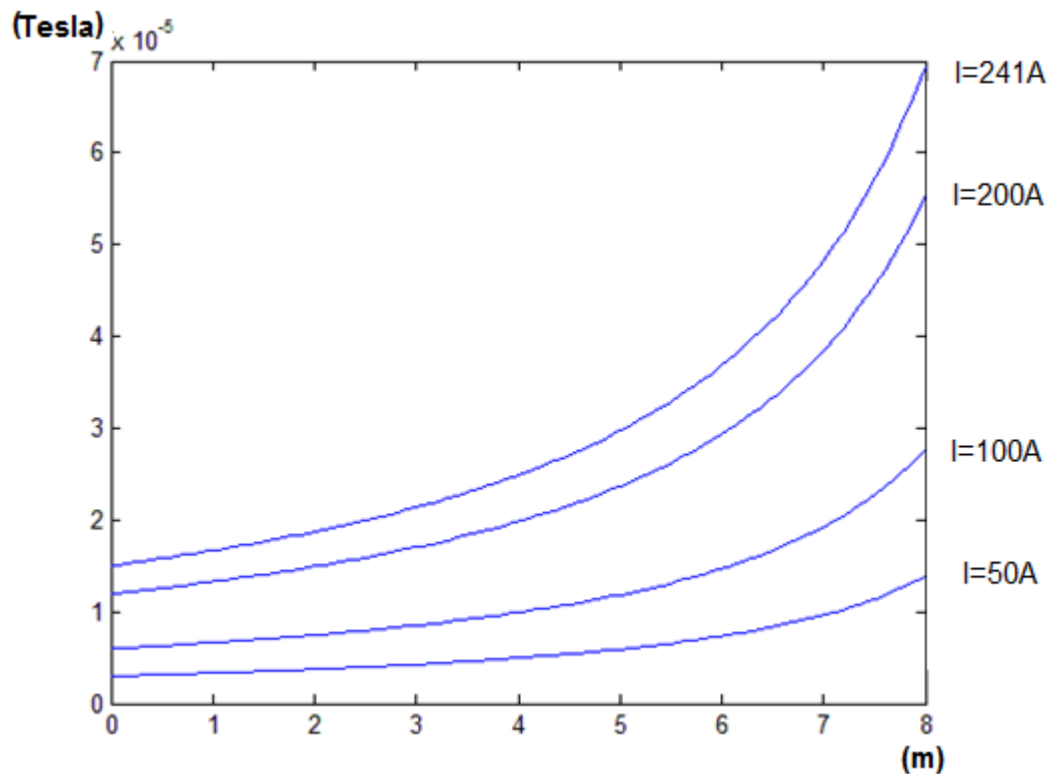
$$r = |10 - y|$$

$$r_1 = \sqrt{r^2 + 0,9^2}$$

$$r_3 = r_1$$

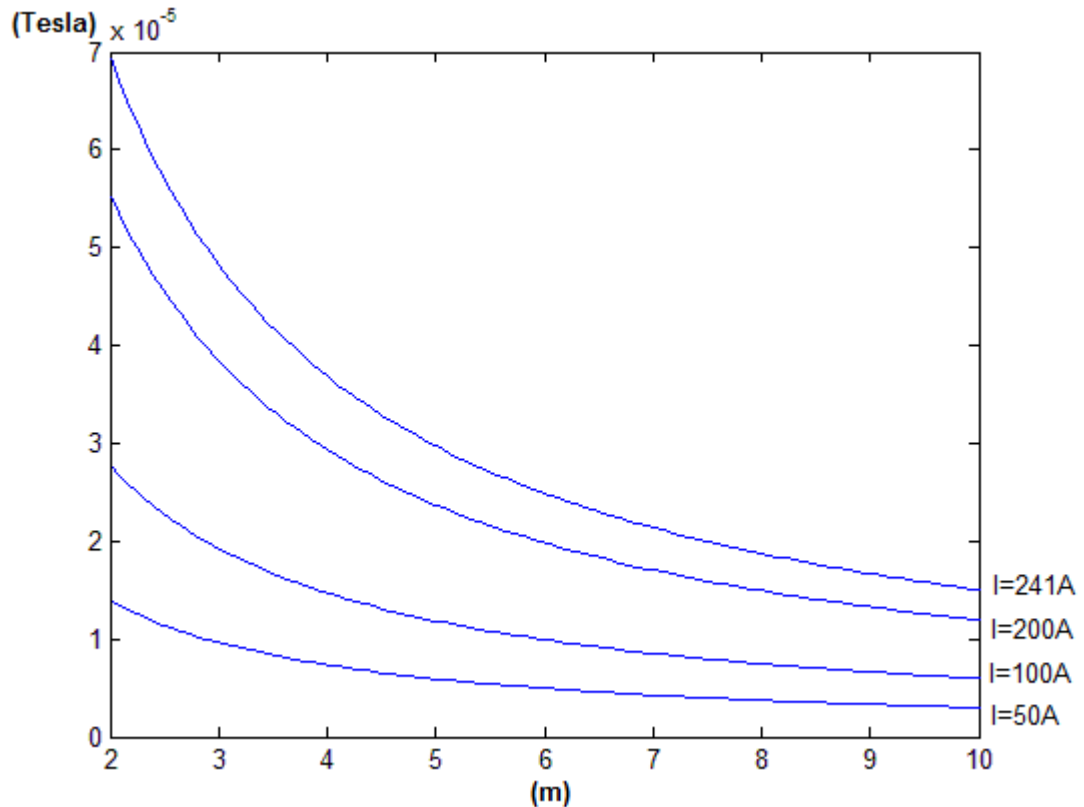
Απο από τους παραπάνω μετασχηματισμούς, παρομοίως λύνοντας ως προς r_i αντικαθιστούμε στις (3.3.7), και (3.3.8). Τα παραπάνω γίνονται για να μπορέσει να σχεδιαστεί η ένταση του πεδίου, ως συνάρτηση του r . Ισχύουν πάλι τα παραπάνω σχόλια για την οριζόντια διαδρομή.

Στα σχήματα 7 και 8, παρουσιάζονται οι εξαγόμενες τιμές και η προκύπτουσα γραφική παράσταση. Ο κώδικας υπολογισμού παρατίθεται στο παράρτημα.



Σχήμα 7 Ένταση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης σε κατακόρυφη διαδρομή $|B|=f(y)$ από το σημείο K έως τον αγωγό.

Λόγω της αδυναμίας εξαγωγής γραφικής παράστασης όταν η διαδρομή περνάει μέσα από οποιονδήποτε αγωγό, η κατακόρυφη διαδρομή χωρίστηκε σε 2 γραφικές παραστάσεις, η μία από το σημείο K και μέχρι τον αγωγό και η δεύτερη από τον αγωγό και σε ίση απόσταση προς τα πάνω.



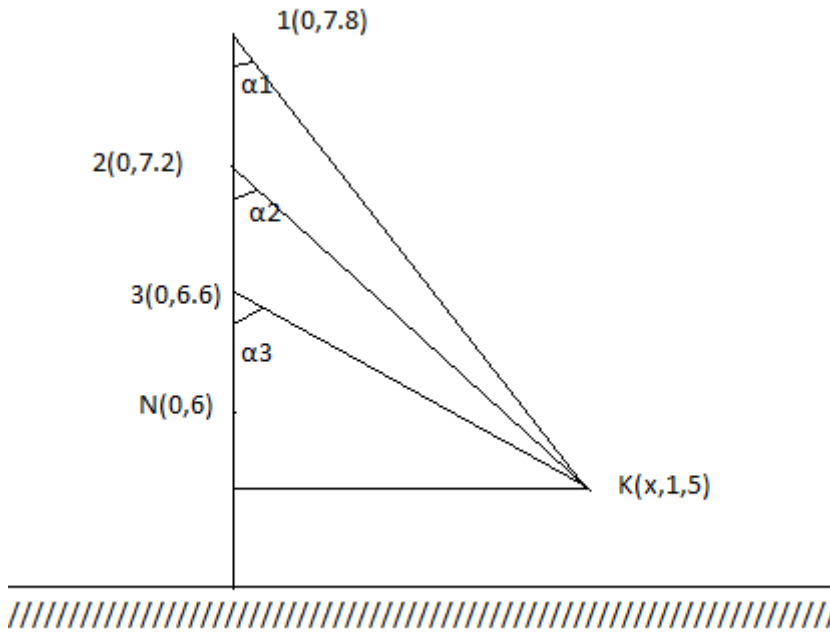
Σχήμα 8 Ένταση μαγνητικού πεδίου μέσης τάσης σε κατακόρυφη διαδρομή $|B|=f(y)$ από τον αγωγό έως 8m πάνω.

Ο κάθετος άξονας είναι σε Tesla και ο οριζόντιος σε m. Οι τέσσερις καμπύλες αντιστοιχούν σε τέσσερις ενδεικτικές τιμές της έντασης του ρεύματος $I=50A$, $100A$, $200A$ και $241A$. Το τελευταίο αποτελεί και το θερμικό όριο του αγωγού.

Το ίδιο αποτέλεσμα προσεγγίστηκε και με την βοήθεια της φόρμας στο excel με 2ο τρόπο ο οποίος παρατίθεται στην παράγραφο 4.5.

4.2 Εκτίμηση μαγνητικού πεδίου χαμηλής τάσης

Για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου στην χαμηλή τάση θα ακολουθηθεί παρόμοια διαδικασία με αυτήν της μέσης, με μερικές διαφοροποιήσεις. Στην περίπτωση της χαμηλής τάσης, υπάρχουν τέσσερις κατακόρυφοι αγωγοί (3 και ουδέτερος), οι οποίοι αρχίζουν από ύψος δμέτρων από το έδαφος (ουδέτερος N), και απέχουν 60 εκατοστά μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 9.



Σχήμα 9 Διάταξη αγωγών χαμηλής τάσης (οριζόντια διαδρομή)

Για τους υπολογισμούς των τριγωνομετρικών όρων θα χρησιμοποιηθούν οι κάτωθι μετασχηματισμοί. Και σε αυτή την περίπτωση θα αποτελέσει την βάση μέτρησης της απόστασης ο κεντρικός αγωγός ($r_2 = r$).

$$\sin a_1 = \frac{|x|}{r_1}$$

$$\cos a_1 = \frac{6.3}{r_1}$$

$$\sin a_2 = \frac{|x|}{r_2}$$

$$\cos a_2 = \frac{5.7}{r_2}$$

$$\sin a_3 = \frac{|x|}{r_3}$$

$$\cos a_3 = \frac{5.1}{r_3}$$

Και οι αποστάσεις:

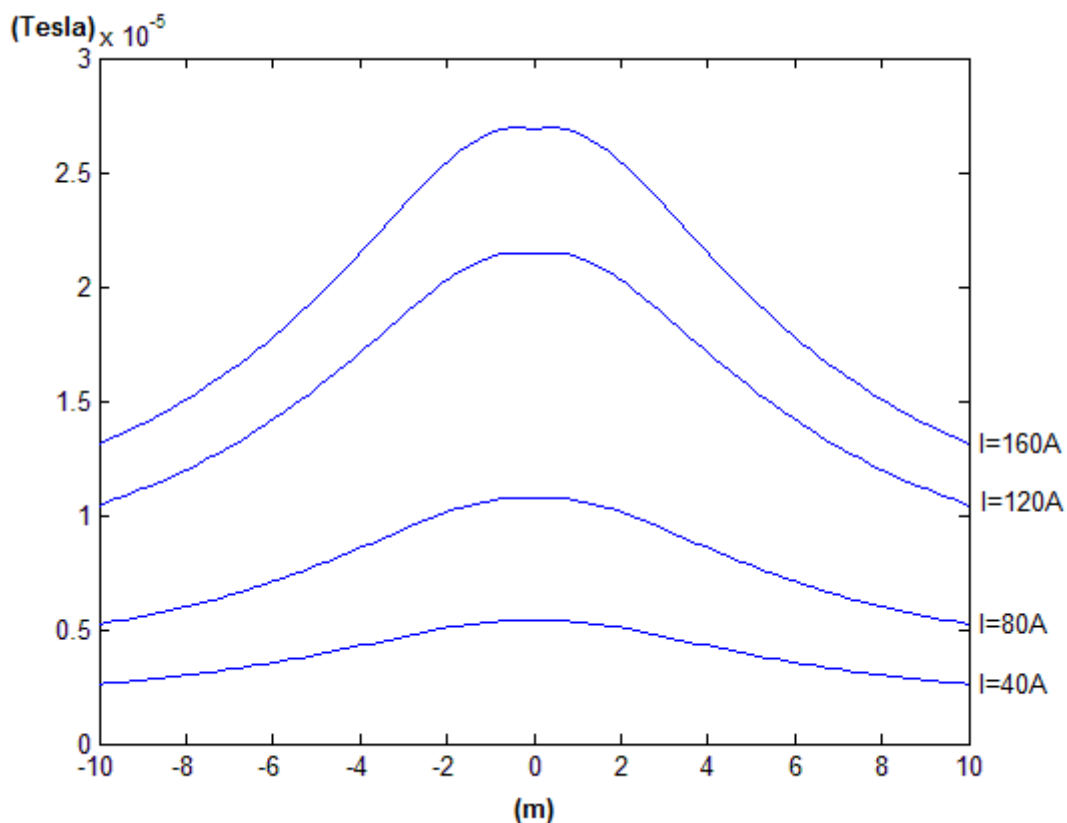
$$x = \sqrt{r^2 - 5,7^2} = \sqrt{r^2 - 32,49}$$

$$r_3^2 = x^2 + (5,1)^2 \Rightarrow r_3 = \sqrt{r^2 - 32,49} + 26,01$$

$$r_1 = \sqrt{(r^2 - 32,49) + 39,69}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις, λύνοντας ως προς r_i , και από την εξίσωση (3.3.9), αντικαθιστούμε στις (3.3.7), και (3.3.8). Τα παραπάνω γίνονται για να μπορέσει να σχεδιαστεί η ένταση του πεδίου, ως συνάρτηση του r . Εξαιτίας των ημιτονοειδών όρων του εναλλασσόμενου ρεύματος πραγματοποιήθηκε έμμεσος τρόπος υπολογισμού της μέσης εξαγόμενης έντασης (για διαδοχικές φάσεις τις τάξεως των 1rad.

Στο σχήμα 10, παρουσιάζονται οι εξαγόμενες τιμές και η προκύπτουσα γραφική παράσταση. Ο κώδικας υπολογισμού παρατίθεται στο παράρτημα.



Σχήμα 10 Ένταση μαγνητικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $|B|=f(x)$ (ύψος 1.5μ από έδαφος)

Ο κάθετος άξονας είναι σε Tesla και ο οριζόντιος σε m . Το ίδιο αποτέλεσμα προσεγγίστηκε και με την βοήθεια της φόρμας στο excel με 2ο τρόπο ο οποίος παρατίθεται στην παράγραφο 4.5.

Οι 4 γραφικές αντιστοιχούν σε ρεύματα ενεργών εντάσεων $I=40A$, $80A$, $120A$ και $160A$. Λόγο της μείωσης της έντασης του ρεύματος, τα επίπεδα του Η/Μ πεδίου στην χαμηλή τάση είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα στη μέση.

4.1.1 Υπολογισμός στην ίδια διάταξη χαμηλής τάσης σε κάθετη διαδρομή

Σε αυτήν την περίπτωση και πάλι σε απόσταση 1,5m από το έδαφος, ακολουθείται η κάθετη διαδρομή από 1,5m (1.5,1.5) κάτω από τους αγωγούς του σχήματος 9, έως και την συντεταγμένη (0,10), η οποία είναι λίγο πάνω και από τον τελευταίο αγωγό. Η μεταβλητή εδώ θα είναι η y κυρίως λόγω συμμετρίας/απλούστευσης του σχήματος,

Όπως και στην οριζόντια διαδρομή, έτσι και εδώ για να γίνει συνάρτηση $B_{ολ}=f(r)$, θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις του προηγούμενου κεφαλαίου (3.3.7), (3.3.8) και (3.3.9) αλλά και θα πραγματοποιηθούν οι κάτωθι μετασχηματισμοί ώστε να προσαρμοστούν οι εξισώσεις στο σχήμα 6.

Για τον υπολογισμό των τριγωνομετρικών όρων χρησιμοποιούνται οι κάτωθι μετασχηματισμοί:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$$

$$\cos \alpha_l = 1$$

$$\sin \alpha_l = 0$$

$$x = 0$$

$$y = \text{μεταβλητή (0 έως +10}\mu\text{)}$$

Και για τις αποστάσεις:

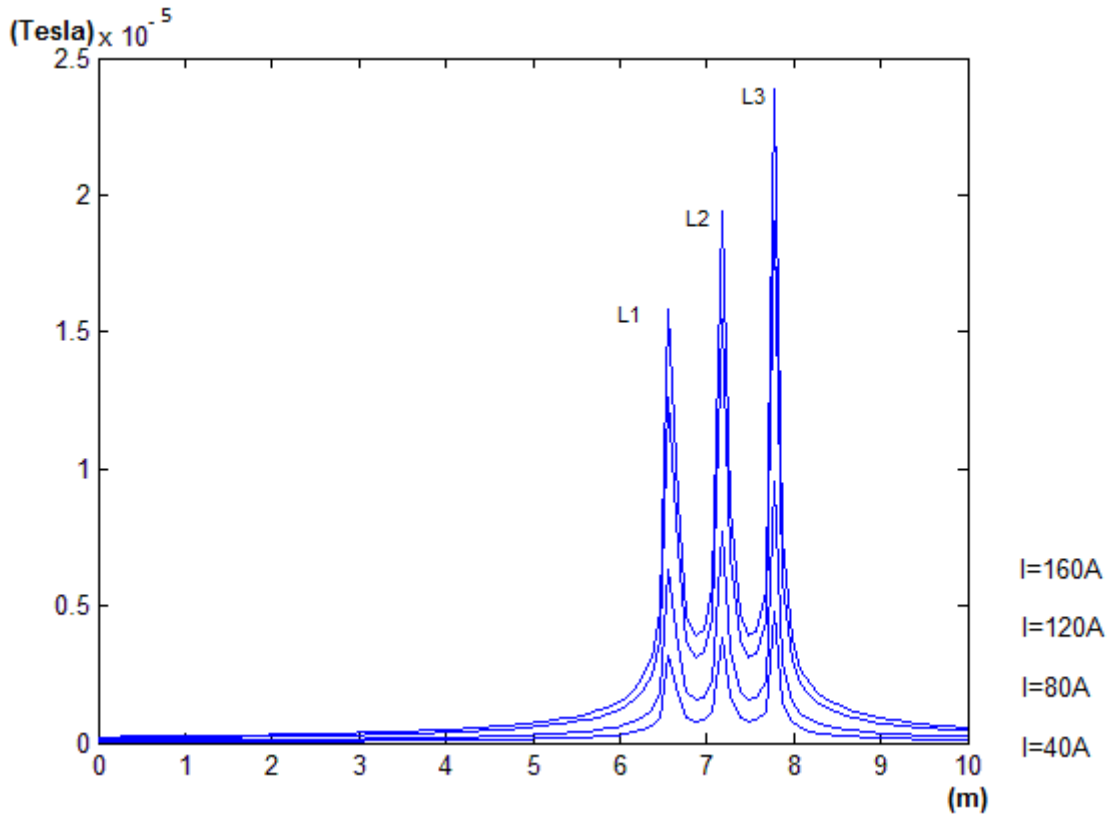
$$r_1 = |7,8 - y| \quad \Rightarrow \quad r_1 = |0,6 + r|$$

$$r_2 = |7,2 - y| \quad \Rightarrow \quad y = |7,2 - r|$$

$$r_3 = |6,6 - y| \quad \Rightarrow \quad r_3 = |r - 0,6|$$

$$y = h \text{ (ύψος σημείου)}$$

Με βάση τους παραπάνω μετασχηματισμούς και τις εξισώσεις (3.3.7), (3.3.8), (3.3.9) φτιάχτηκε ο κώδικας που παρατίθεται στο παράρτημα για τον υπολογισμό του πεδίου. Στο σχήμα 11, παρουσιάζονται οι εξαγόμενες τιμές και η προκύπτουσα γραφική παράσταση.



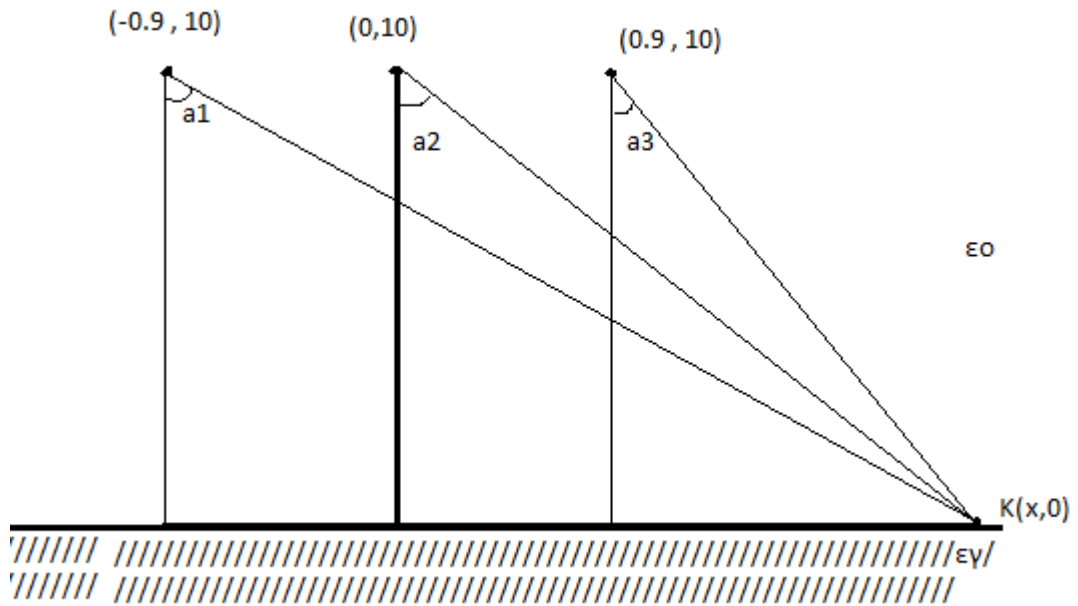
Σχήμα 11 Ένταση μαγνητικού πεδίου χαμηλής τάσης σε κατακόρυφη διαδρομή $|B|=f(y)$

Ο κάθετος άξονας είναι σε Tesla και ο οριζόντιος σε m. Το ίδιο αποτέλεσμα προσεγγίστηκε και με την βοήθεια της φόρμας στο Excel με 2ο τρόπο ο οποίος παρατίθεται στην παράγραφο 4.5.

Οι 4 γραφικές αντιστοιχούν σε ρεύματα ενεργών εντάσεων $I=40A$, $80A$, $120A$ και $160A$. Παρατηρούμε ότι καθώς πλησιάζουμε τον κάθε αγωγό η πεδιακή ένταση αυξάνεται λόγω της μεγαλύτερης επίδρασής του. Οι τιμές παραμένουν χαμηλές και εντός των ορίων της νομοθεσίας που θα παρουσιασθούν στο τελευταίο κεφάλαιο.

4.3 Εκτίμηση ηλεκτρικού πεδίου μέσης τάσης

Η εκτίμηση του ηλεκτρικού πεδίου θα γίνει με παρόμοιο τρόπο με το μαγνητικό, χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους γεωμετρικούς μετασχηματισμούς για τους τριγωνομετρικούς όρους και χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες σχέσεις για το ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα 12 Διάταξη αγωγών μέσης τάσης (οριζόντια διαδρομή εδάφους)

Θεωρούμε εναέρια γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος σε ύψος \$h=10\mu\$ από την επιφάνεια του εδάφους. (σχήμα 12)

Έστω τυχαίο σημείο \$K\$ με συντεταγμένες \$(x,0)\$ το οποίο απέχει απόσταση \$r_1, r_2, r_3\$ αντίστοιχα από τους τρεις αγωγούς.

Οι τρεις αγωγοί διαρρέονται αντίστοιχα από ρεύμα εντάσεων \$I_1, I_2, I_3\$, τα οποία έχουν ίδιο μέτρο αλλά διαφορά φάσης \$120^\circ\$. Η συνολική μέση τιμή του της έντασης του πεδίου θα ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των επιδράσεων των τριών αγωγών.

$$\begin{aligned} \vec{E}_{o\lambda} &= \vec{E}_{1o\lambda} + \vec{E}_{2o\lambda} + \vec{E}_{3o\lambda} \Rightarrow \\ \vec{E}_{o\lambda} &= [(I_1 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + I_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 + I_3 \sin \alpha_3 \cos \alpha_3) / c\pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma)] \hat{x} + \\ & [\epsilon_\gamma (I_1 \cos^2 \alpha_1 + I_2 \cos^2 \alpha_2 + I_3 \cos^2 \alpha_3) / c\pi h (\epsilon_0 + \epsilon_\gamma) \epsilon_0] \hat{y} \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

Για τον υπολογισμό των τριγωνομετρικών όρων θα γίνουν οι κάτωθι μετασχηματισμοί:

$$r = r_2 = \sqrt{x^2 + h'^2} \Rightarrow x = \sqrt{r^2 - (10)^2}$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{h'}{r_2} = \frac{10}{r_2}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{|x|}{r_2}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{10}{r_1}$$

$$\sin \alpha_1 = \frac{|x+0,9|}{r_1}$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{10}{r_3}$$

$$\sin \alpha_3 = \frac{|x-0,9|}{r_3}$$

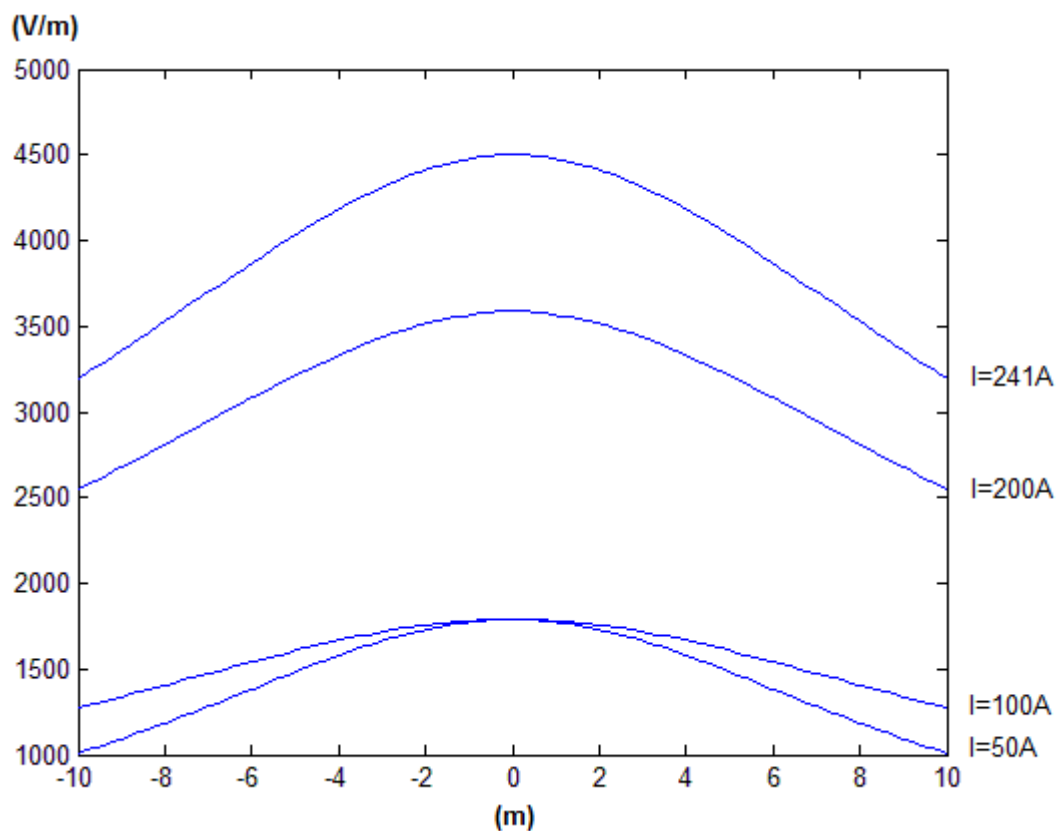
$$r = r_2 = \sqrt{x^2 + h'^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(x + 0.9)^2 + h'^2}$$

$$r_3 = \sqrt{(x - 0.9)^2 + h'^2}$$

$$h' = 10\text{m}$$

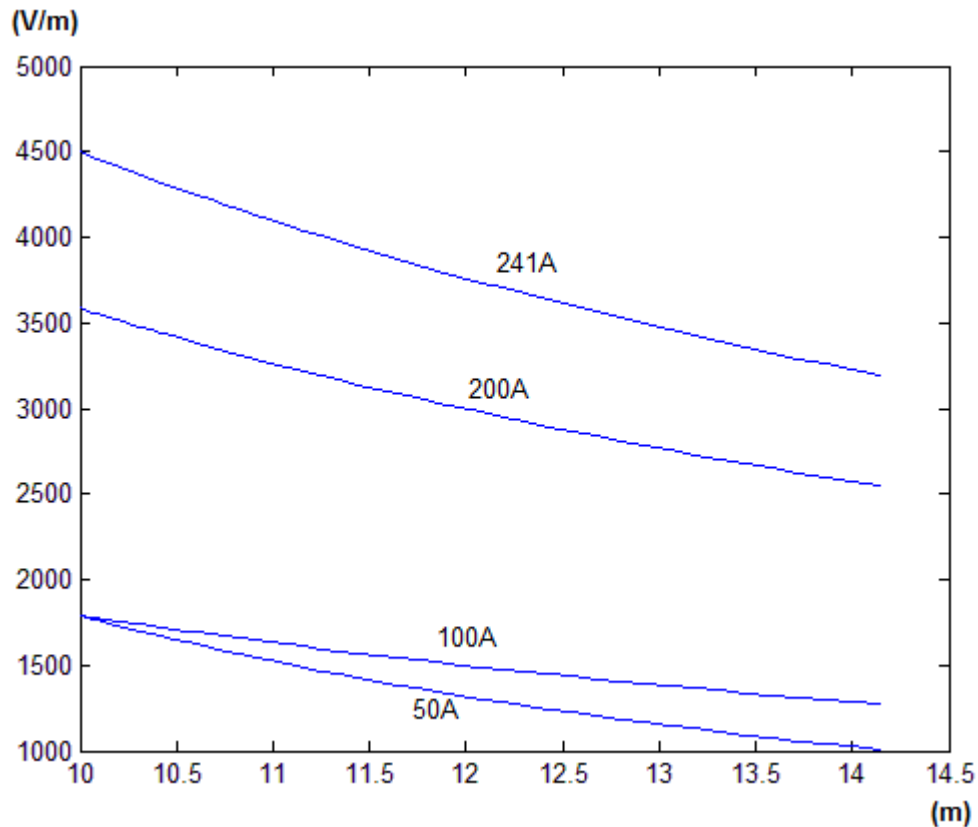
Από τις παραπάνω εξισώσεις και την αντικατάστασή τους στην εξίσωση (4.3.1), φτιάχτηκε ο κώδικας για τα παρακάτω γραφήματα και τους υπολογισμούς ο οποίος παρατίθεται στο παράρτημα 1.



Σχήμα 13 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μέσης τάσης σε οριζόντια διαδρομή $|E|=f(x)$ (ύψος 0 μ από έδαφος)

Στο σχήμα 13 φαίνονται οι εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου σε διαδρομή εδάφους από $\chi = -10\text{m}$, $\chi = +10\text{m}$.

Ο κατακόρυφος άξονας είναι σε V/m , ο οριζόντιος m . Όπως και στο μαγνητικό πεδίο, έτσι και εδώ οι τέσσερις καμπύλες αντιστοιχούν σε τέσσερις ενδεικτικές τιμές της έντασης του ρεύματος $I=50\text{A}, 100\text{A}, 200\text{A}$ και 241A .

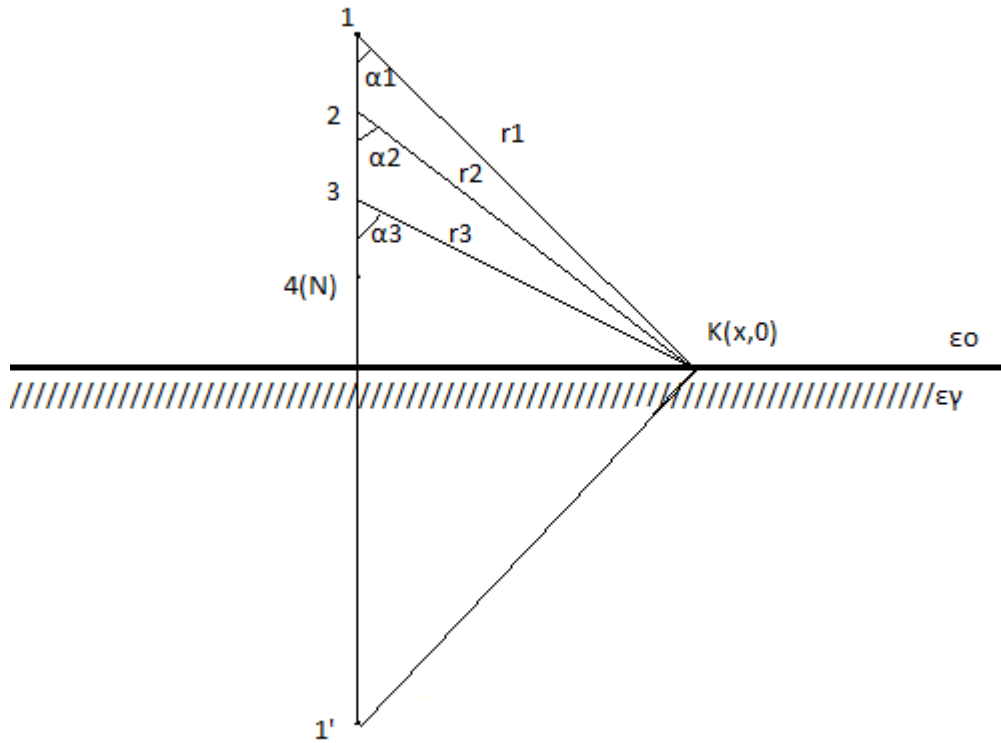


Σχήμα 14 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου μέσης τάσης σε οριζόντια διαδρομή συναρτήσει της απόστασης από τον μέσο αγωγό.

Στο σχήμα 14 φαίνεται η προηγούμενη γραφική παράσταση (E) ως συνάρτηση απόστασης από τον μέσο αγωγό (για $\chi = 0$ το οποίο αντιστοιχεί σε απόσταση $r = 10$ μέτρα). Και εδώ ο κατακόρυφος άξονας είναι σε V/m , ενώ ο οριζόντιος m . Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες ενδεικτικές τιμές για τις εντάσεις των ρευμάτων των αγωγών.

4.4 Εκτίμηση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης

Στην περίπτωση αυτή, έχουμε 4 αγωγούς σε κατακόρυφη διάταξη. Ο ένας είναι ουδέτερος, και θα θεωρήσουμε πολύ μικρή την συμμετοχή του στην πεδιακή ένταση. Συνεπώς αναλύουμε με 3 αγωγούς σε ύψη 6.6, 7.2 και 7.8 (αγωγοί 3,2,1 αντίστοιχα):



Σχήμα 15 Διάταξη αγωγών χαμηλής τάσης (οριζόντια διαδρομή εδάφους)

Για τον υπολογισμό του πεδίου θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (4.3.1), με την αντικατάσταση των απαραίτητων γεωμετρικών μετασχηματισμών για τους τριγωνομετρικούς όρους. Η πεδιακή ένταση με την βοήθεια της ανάλυση για τον έναν αγωγό θα δίνεται ως το διανυσματικό άθροισμα των 3 επιδράσεων. Έτσι, με βάση το σχήμα 15 ισχύει:

$$\sin \alpha_1 = \frac{|x|}{r_1}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{7.8}{r_1}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{|x|}{r_2}$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{7.2}{r_2}$$

$$\sin \alpha_3 = \frac{|x|}{r_3}$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{6.6}{r_3}$$

Επίσης για τις αποστάσεις ισχύει:

$$x = \sqrt{r^2 - 51,84} \quad (r^2 = r_2^2 = 51,84 = (7.2)^2)$$

$$r_3^2 = x^2 + (6.6)^2 \Rightarrow r_3 = \sqrt{(r^2 - 51,84) + 43,56}$$

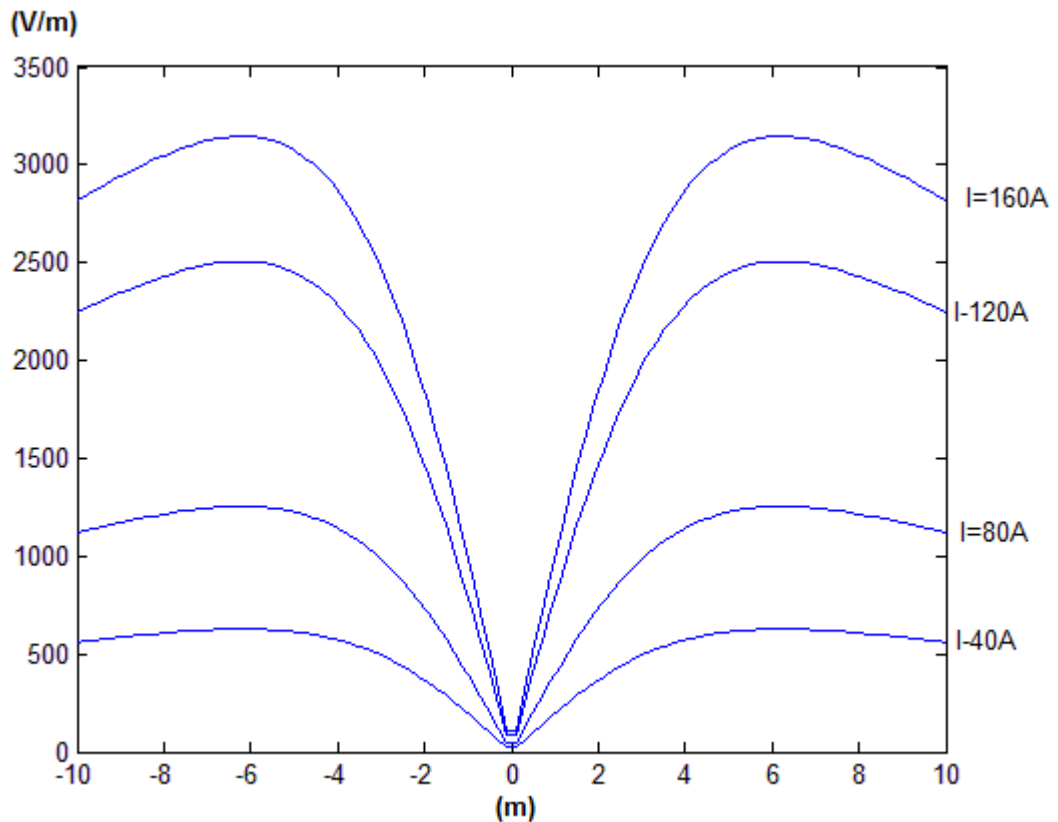
$$r_1 = \sqrt{(r^2 - 51,84) + 60,84}$$

$$h_1 = 7.8$$

$$h_2 = 7.2$$

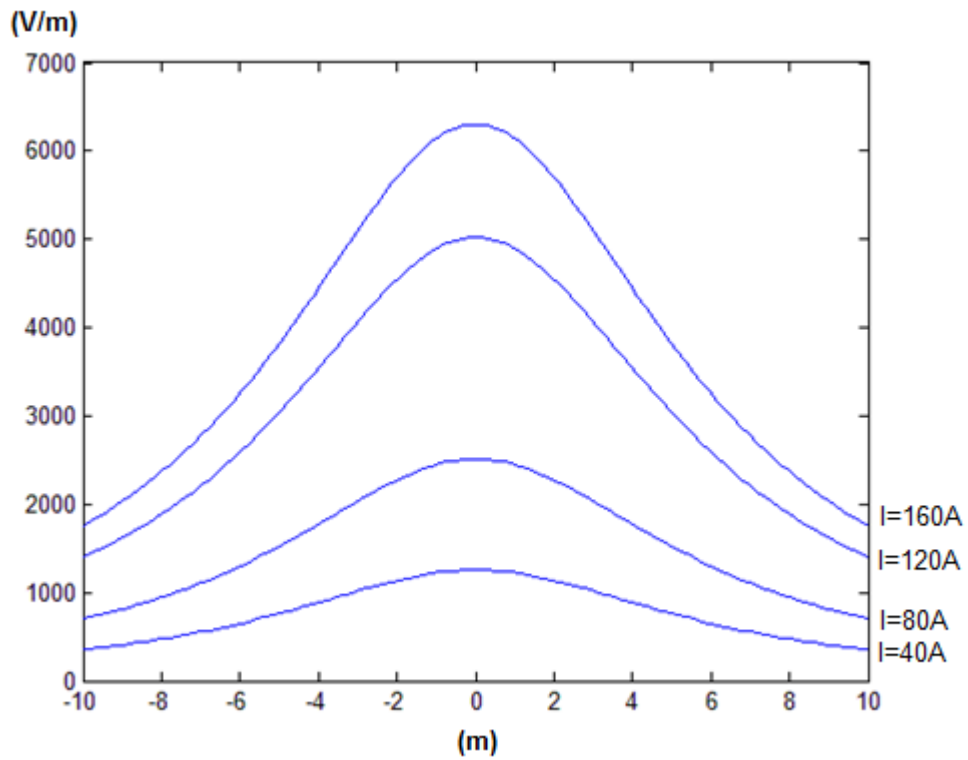
$$h_2 = 6.6$$

Με την βοήθεια πάλι του πακέτου Matlab έχουμε



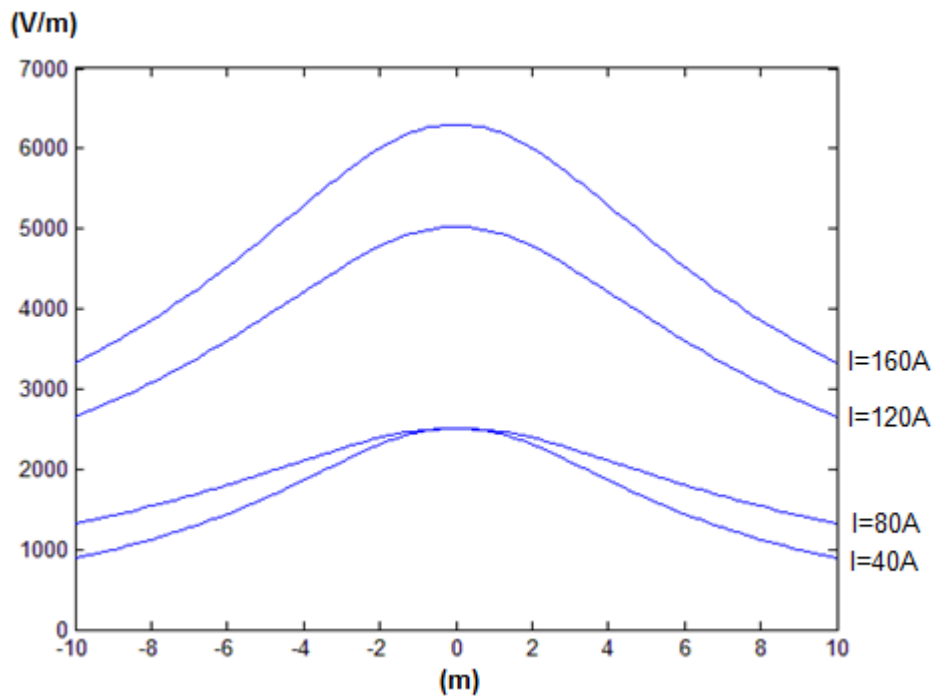
Σχήμα 16 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $|E_x| = f(x)$ (ύψος 0μ από έδαφος)

Η y συνιστώσα στην ίδια διαδρομή :



Σχήμα 17 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $|E_y| = f(x)$ (ύψος 0μ από έδαφος)

Και η ολική ένταση :



Σχήμα 18 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου χαμηλής τάσης σε οριζόντια διαδρομή $|E_{ολ}| = f(x)$ (ύψος 0μ από έδαφος)

Ο κατακόρυφος άξονας είναι σε V/m, ο οριζόντιος m. Όπως και στο μαγνητικό πεδίο, έτσι και εδώ οι τέσσερις καμπύλες αντιστοιχούν σε τέσσερις ενδεικτικές τιμές της έντασης του ρεύματος I=40A, 80A, 120A και 160A.

4.5 Παρουσίαση φόρμας υπολογισμού excel 2010

Στα πλαίσια της ανάπτυξης της παρούσας διπλωματικής, και για την ανάγκη υπολογισμού της έντασης του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, σε διάφορα σημεία του χώρου, αναπτύχθηκε, παράλληλα με των κώδικα στο πακέτο Matlab, στο οποίο επιχειρήθηκε δημιουργία συνάρτηση έντασης μίας μεταβλητής, ένταση πεδίου =f(απόστασης από κέντρο αγωγών) μια φόρμα υπολογισμού του πεδίου, με μεταβλητές

1) Τις συντεταγμένες των αγωγών:

20	Τεταγμένη γ σημείου μέτρησης γ(m)		
21		0 sina1	
22	τετμημένη σημείου χ (m)		1
23		0	
24		sina2	
25	Τετμημένη 1ου αγωγού σε καθετη διατομή(μετρα)		1
26		0 sina3	
27	Τεταγμενη 1ου αγωγου σε καθετη διατομή		1
28		7,8 cosa1	
29	Τετμημένη 2ου αγωγού σε καθετη διατομή		0
30		0 cosa2	
31	Τεταγμενη 2ου αγωγου σε καθετη διατομή		0
32		7,2 cosa3	
33	Τετμημένη 3ου αγωγού σε καθετη διατομή		0
34		0	
35	Τεταγμενη 3ου αγωγου σε καθετη διατομή		
36		6,6	
37	Τετμημένη 4ου αγωγού (N)		
38		0 sina4	
39	Τεταγμένη 4ου αγωγού (N)		1
40		6 cosa4	
41			0

Εικόνα 18 Συντεταγμένες αγωγών και σημείου αναφοράς

Θα δούμε ότι αυτό μας δίνει την δυνατότητα να υπολογίσουμε και τις 2 εξεταζόμενες δομές, αλλά φυσικά και άλλες (οπουδήποτε στο επίπεδο).

2) Την συντεταγμένη του σημείου υπολογισμού της έντασης

20	Τεταγμένη γ σημείου μέτρησης γ(m)	
21		1
22	τετμημένη σημείου χ (m)	
23		0
24		

Εικόνα 19 Συντεταγμένες σημείου αναφοράς

3) Την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς (τιμή και συχνότητα).

(*εδώ να σημειωθεί ότι η τελική ένταση που διαρρέει τους αγωγούς, είναι μεταβλητή και εξαρτάται από την κατανάλωση. Κάθε εταιρία παροχής, διατηρεί σχεδόν σταθερή την τάση.)

συχνότητα f(hz)	Ενταση I _{rms} (A)
50	100

Εικόνα 20 Εισαγωγή της σταθερής συχνότητας και της εκάστοτε έντασης του ρεύματος του αγωγού.

Να σημειωθεί επίσης ότι όλες οι συντεταγμένες, αλλά και τα διανυσματικά μεγέθη, υπολογίστηκαν σε κάθετη στους αγωγούς διατομή. Αν το επίπεδο αυτό το ονομάσουμε Oxy , τότε η κάθετη σε αυτό συνιστώσα $-z$ -των εντάσεων, μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου, αποδεικνύεται ότι είναι μηδέν (αλληλεξουδετέρωση). Συνεπώς η δισδιάστατη ανάλυση δικαιολογείται .

Επίσης, και εξαιτίας της περιπλοκότητας των τύπων υπολογισμού, έχουν τμηματικά υπολογιστεί οι τριγωνομετρικοί όροι, αφενός αυτοί που οφείλονται στην γεωμετρία του επιπέδου ($\sin\alpha_i$, $\cos\alpha_i$, α_i η γωνία που σχηματίζει το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει τον i αγωγό με το υπό εξέταση σημείο, με την κατακόρυφη), και αφετέρου αυτοί που οφείλονται στην εναλλασσόμενη φύση του ρεύματος.

16	Απόσταση σημείου από 3'(είδωλο)(r3')		
17		14,53822548	
18	Απόσταση σημείου από 4'(N)(είδωλο)(r4')		
19		8,246211251	
20	Τεταγμένη γ σημείου μέτρησης γ(m)		
21		2	sina1
22	τετμημένη σημείου χ (m)		0,945372982
23		2	
24			sina2
25	Τετμημένη 1ου αγώγου σε καθητη διατομή(μετρα)		0,933345606
26		0	sina3
27	Τεταγμένη 1ου αγώγου σε καθητη διατομή		0,917070056
28		7,8	cosa1
29	Τετμημένη 2ου αγώγου σε καθητη διατομή		0,325990683
30		0	cosa2
31	Τεταγμένη 2ου αγώγου σε καθητη διατομή		0,358979079
32		7,2	cosa3
33	Τετμημένη 3ου αγώγου σε καθητη διατομή		0,398726111
34		0	
35	Τεταγμένη 3ου αγώγου σε καθητη διατομή		
36		6,6	
37	Τετμημένη 4ου αγώγου (N)		
38		0	sina4
39	Τεταγμένη 4ου αγώγου (N)		0,894427191
40		6	cosa4
41			0,447213595
42			

Εικόνα 21 Τμηματικός υπολογισμός τριγωνομετρικών αριθμών

α/α	Sin(ωt)*sina1/r1	sin(ωt-2π/3)sina2/r2	sin(ωt+2π/3)sina3/r3	αθροισμα ημιτονοειδων όρων	Sin(ωt)*cosa1/r1	sin(ωt-2π/3)cosa2/r2	sin(ωt+2π/3)cosa3/r3	Αθροισμα συν/ων Όρων
28								
29	0	-0,139767065	0,154742107	0,014975043	0	0	0	0
30	0,014681385	-0,147105083	0,145071741	0,012648043	0	0	0	0
31	0,029216078	-0,152973275	0,133951866	0,010194669	0	0	0	0
32	0,043458854	-0,15731301	0,121493588	0,007639432	0	0	0	0
33	0,057267403	-0,160080924	0,107821386	0,005007865	0	0	0	0
34	0,070503756	-0,161249363	0,093071869	0,002326261	0	0	0	0
35	0,083035658	-0,160806652	0,077392408	-0,000378586	0	0	0	0
36	0,094737895	-0,158757214	0,060939668	-0,00307965	0	0	0	0
37	0,105493543	-0,155121526	0,043878039	-0,005749944	0	0	0	0
38	0,115195134	-0,149935915	0,026377995	-0,008362786	0	0	0	0
39	0,123745733	-0,143252194	0,008614391	-0,01089207	0	0	0	0
40	0,131059906	-0,135137145	-0,009235285	-0,013312524	0	0	0	0
41	0,137064571	-0,125671849	-0,026992686	-0,015599964	0	0	0	0
42	0,141699733	-0,114950883	-0,044480384	-0,017731533	0	0	0	0
43	0,144919078	-0,103081365	-0,061523649	-0,019685936	0	0	0	0
44	0,146690439	-0,090181892	-0,07795219	-0,021443643	0	0	0	0
45	0,146996118	-0,076381351	-0,093601859	-0,022987092	0	0	0	0
46	0,14583306	-0,061817633	-0,108316288	-0,024300862	0	0	0	0
47	0,143212887	-0,046636254	-0,121948458	-0,025371825	0	0	0	0
48	0,139161778	-0,030988901	-0,134362158	-0,026189282	0	0	0	0
49	0,13372021	-0,015031917	-0,145433356	-0,026745064	0	0	0	0
50	0,126942554	0,001075261	-0,155051433	-0,027033618	0	0	0	0
51	0,11889653	0,017171695	-0,163120286	-0,027052061	0	0	0	0
52	0,109662531	0,033096556	-0,169559296	-0,026800209	0	0	0	0
53	0,099332821	0,048690726	-0,174304125	-0,026280578	0	0	0	0
54	0,088010609	0,063798395	-0,177307365	-0,02549836	0	0	0	0
55	0,075809025	0,078268612	-0,178539008	-0,024461371	0	0	0	0
56	0,062849982	0,091956794	-0,177986749	-0,023179973	0	0	0	0
57	0,049262963	0,104726174	-0,175656105	-0,021666967	0	0	0	0
58	0,035183725	0,116449166	-0,171570363	-0,019937472	0	0	0	0
59	0,020752942	0,127008635	-0,165770347	-0,018008769	0	0	0	0

Εικόνα 22 Υπολογισμός τριγωνομετρικών όρων με βήμα 1 rad

Σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι εξαιτίας της χρονικής μεταβλητότητας των εντάσεων, υπολογίστηκε μια ενδεικτική μέση τιμή της έντασης των πεδίων, με έναν έμμεσο τρόπο. Για το χρονικό διάστημα μιας πλήρους εναλλαγής της φάσης κατά 2π , υπολογίστηκαν στιγμιαίες τιμές των αντίστοιχων τριγωνομετρικών όρων. Προέκυψαν έτσι αντίστοιχες στιγμιαίες τιμές, από τις οποίες, υπολογίστηκε η μέση τιμή.

Σε αρκετές δημοσιεύσεις έχει χρησιμοποιηθεί μια ανάλογη μέθοδος, ενώ σε άλλα η στιγμιαία τιμή έχει αντικατασταθεί από την ενεργό τιμή, σε μια υποτιθέμενη χρονική σταθερότητα. Θα μπορούσε να υπολογιστεί η περίοδος του κάθε πεδίου και να υπολογιστεί έπειτα μια «ενεργός τιμή» rms της έντασης του κάθε πεδίου, ωστόσο, το αποτέλεσμα θα ήταν σχεδόν το ίδιο.

Στο ηλεκτρικό πεδίο οι αναλύσεις που κάναμε ήταν με χρήση της ενεργού τιμής. Από εκεί και πέρα, αλληλοσυνδεμένοι υπολογισμοί μας επιτρέπουν, αυτόματα, με κάθε καταχώρηση του υπό εξέταση σημείου x,y , να υπολογιστούν:

1) Οι αποστάσεις από τους αγωγούς :

2	
3	
4	Απόσταση σημείου από 1 αγωγό (r_1)
5	6,8
6	Απόσταση σημείου από 2 αγωγό (r_2)
7	6,2
8	Απόσταση σημείου από 3 αγωγό (r_3)
9	5,6
10	Απόσταση σημείου από 4 αγωγό (r_4)
11	5
12	Απόσταση σημείου από 1'(είδωλο) (r_1')
13	8,8
14	Απόσταση σημείου από 2'(είδωλο) (r_2')
15	8,2
16	Απόσταση σημείου από 3'(είδωλο) (r_3')
17	14,4
18	Απόσταση σημείου από 4'(N)(είδωλο) (r_4')
19	7

Εικόνα 23 Απόσταση σημείου από τον εκάστοτε αγωγό.

2) Οι τριγωνομετρικοί όροι

sina1	0,945372982
sina2	0,933345606
sina3	0,917070056
cosa1	0,325990683
cosa2	0,358979079
cosa3	0,398726111
sina4	0,894427191
cosa4	0,447213595

Εικόνα 24 Τριγωνομετρικοί όροι της γωνίας που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει το σημείο αναφοράς με τον αγωγό και τον άξονα x.

3) Η κάθε συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που οφείλεται σε κάθε αγωγό ξεχωριστά και η συνισταμένη τους ($E_{χολ}$, $E_{yολ}$, E) :

	B	C	D	E
1	$E_{x1}(V/m)$	E_{x2}	E_{x3}	$E_{x4}(N)$
2	198,8577576	251,2188768	420,1723654	423,5294118
3				
4				
5	E_{y1}	E_{y2}	E_{y3}	$E_{y4}(N)$
6	-924,6463136	-1627,898321	-1341,112565	423,5294118
7				
8				

I
$ E (V/m)$ μετρο εντασης ΗΠ
3703,464519

Εικόνα 25 Υπολογισθείσες συνιστώσες εντάσεις του Ηλεκτρικού Πεδίου και η συνισταμένη τους.

4)Ομοίως για το μαγνητικό πεδίο , οι συνιστώσες και συνισταμένες :

K	L	M
B _{χολ}	B _{χολ} ²	B (T) μετρο έντασης ΜΠ στο σημείο (χ,γ)
4,06961E-07	1,65617E-13	4,56472E-07
B _{γολ}	B _{γολ} ²	
2,06759E-07	4,27492E-14	

Εικόνα 26 Υπολογισθείσες συνιστώσες εντάσεις του Μαγνητικού Πεδίου και η συνισταμένη τους.

Το Excel έδωσε μια λύση στην αναλυτική μέθοδο υπολογισμού των πεδίων, αλλά υπάρχουν και άλλες με πιο εξειδικευμένα λογισμικά, και με μια διευρυμένη προσέγγιση μεθοδολογίας (στην παρούσα χρησιμοποιήθηκε η αναλυτική μέθοδος) όπως η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 5 : ΒΙΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗ Η\Μ ΠΕΔΙΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Οι ανθρώπινοι και γενικότερα ζωικοί οργανισμοί χρησιμοποιούν τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό στις περισσότερες βιοχημικές διεργασίες. Στο νευρικό σύστημα οι επικοινωνίες μεταξύ νευρικών κυττάρων γίνονται με ηλεκτρικά σήματα παλμικής φύσεως. Οι βιοχημικές αντιδράσεις περιλαμβάνουν ηλεκτρικές διεργασίες. Τέλος ο εγκέφαλος μας λαμβάνει πληροφορίες υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. (Παντελής, 2013)

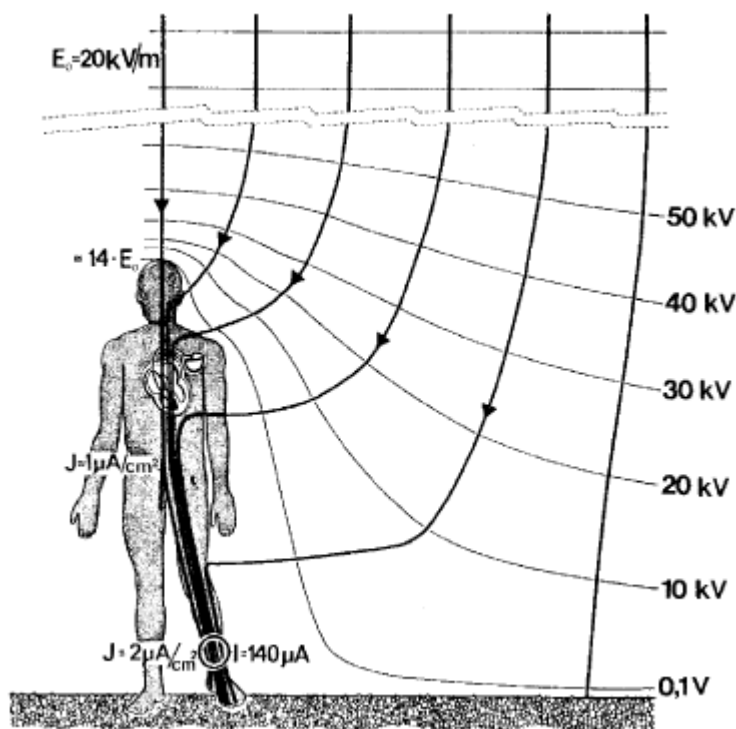
Τα βιολογικά όντα αποτελούνται κατά 70% από νερό. Τα μόρια του νερού είναι χημικά ηλεκτρικά δίπολα. Η έκθεση ενός οργανισμού σε ένα Η/Μ πεδίο, έχει ως αποτέλεσμα τον μαζικό προσανατολισμό των μαγνητικών αυτών μονάδων. Επίσης επηρεάζεται – κατά τον ίδιο μαγνητικό μοντέλο – και η ενδοεπικοινωνία μεταξύ κυττάρων. (Παντελής, 2013)

5.2 Επίδραση μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε βιολογικούς οργανισμούς

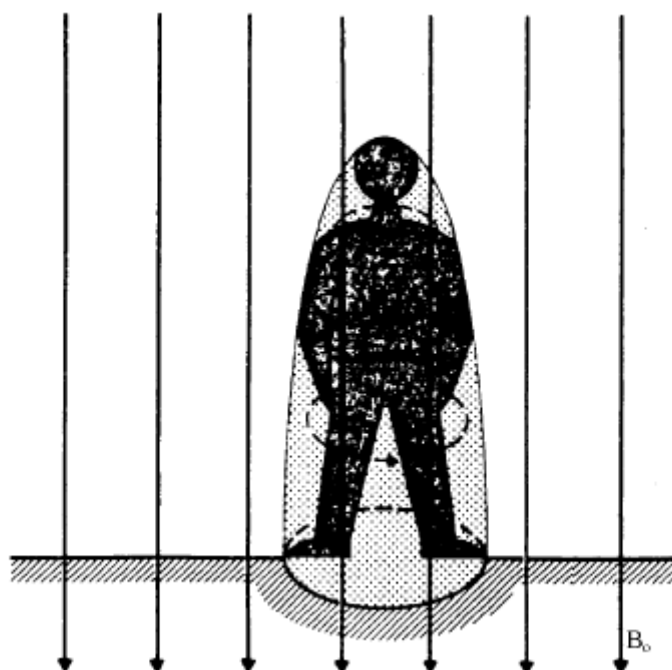
Η αλληλεπίδραση των Η/Μ πεδίων με τους βιολογικούς οργανισμούς, όπως για παράδειγμα με τους ανθρώπινους ιστούς, προκαλεί διάφορα «συμβάντα», με τρόπους που θα αναλυθούν παρακάτω, σε διάφορα επίπεδα οργάνωσης, όπως πολύπλοκα συστήματα, ενδιάμεσης πολυπλοκότητας συστήματα και κύτταρα ή υποκυτταρικές δομές. (Κάππας, 2015)

Η ισχύς της αλληλεπίδρασης έχει άμεση σχέση με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου. Για παράδειγμα, την περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων, το ανθρώπινο σώμα είναι εντελώς μη μαγνητικό. Στο ηλεκτρικό πεδίο, η αλληλεπίδραση με τα διάφορα επίπεδα οργάνωσης, εξαρτάται από τρεις παράγοντες. Τη διηλεκτρική σταθερά τους, η οποία εκφράζει την ικανότητα του ιστού να αποθηκεύσει την ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου, την αγωγιμότητα των βιολογικών ιστών, καθώς και τον παράγοντα απωλειών, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό ενέργειας το οποίο απορροφάται από το υλικό ανά Hz. Επίσης, υπάρχει και η αλληλεπίδραση των Η/Μ πεδίων με τους ιστούς μέσω των ρευμάτων αγωγιμότητας και των δινορευμάτων. (Κάππας, 2015)

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται ο τρόπος που τα Η/Μ πεδία αλληλοεπιδρούν με τον ανθρώπινο οργανισμό.

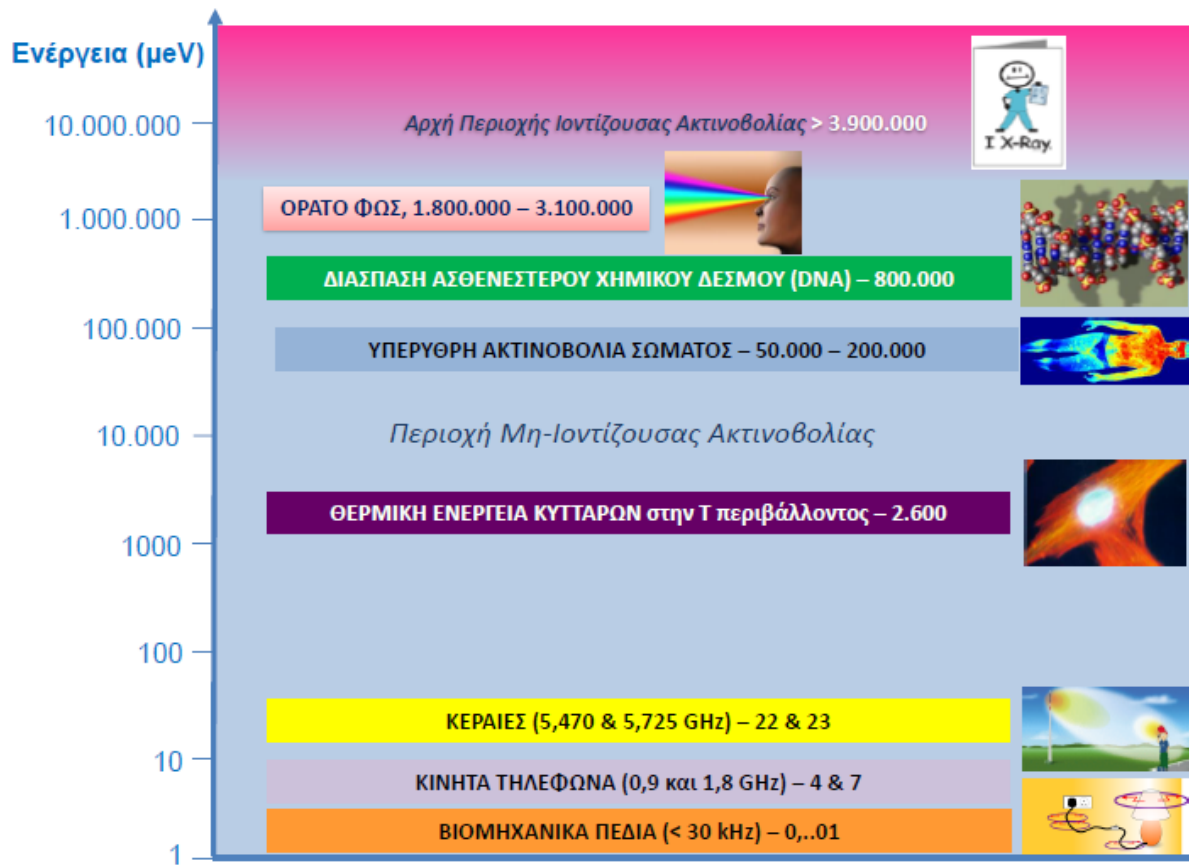


Εικόνα 27 Άνθρωπος σε ομογενές Ηλεκτρικό Πεδίο (Σαφιγιάννη, 2017)



Εικόνα 28 Άνθρωπος σε ομογενές Μαγνητικό Πεδίο (Σαφιγιάννη, 2017)

Λόγω του ότι η μη ιοντίζουσα ακτινοβολία δεν έχει τη δυνατότητα να σπάσει τους χημικούς δεσμούς, η βιολογική της αλληλεπίδραση είναι πολύ διαφορετική από αυτή της ιοντίζουσας. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η Η/Μ ακτινοβολία που παράγεται από το δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι στο φάσμα της μη ιοντίζουσας.



Εικόνα 29 Παραδείγματα ιοντίζουσας και μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας (Κάππας, 2015)

5.2.1 Θερμικές Επιδράσεις

Υπάρχουν δύο ειδών επιδράσεις, οι οποίες οφείλονται στην Η/Μ ακτινοβολία, οι θερμικές και οι μη θερμικές. Οι Θερμικές αφορούν την αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών που δέχονται ακτινοβολία πάνω από $0,1^{\circ}\text{C}$ και η οποία οφείλεται σε πυκνότητες ισχύος άνω του $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ή για μέσο EPA (ρυθμός απορρόφησης) πάνω από $5 \text{ W}/\text{Kg}$. (Παντελής, 2013)

Η διαδικασία δημιουργίας θερμικών επιδράσεων, αποτελείται από τρία στάδια. Αρχικά η έκθεση του οργανισμού στην Η/Μ ακτινοβολία αυξάνει την κινητική ενέργεια των μορίων του νερού που αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής μάζας του ανθρώπου (70%). Έπειτα, γίνεται μεταφορά την κινητικής ενέργειας των μορίων του νερού στα βιολογικά συστατικά των ιστών όπως αμινοξέα, σάκχαρα κ.λπ.. Τέλος, είτε τοπικά είτε σε ολόκληρο τον ανθρώπινο οργανισμό, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας. (Κάππας, 2015)

Η παραγόμενη θερμότητα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές στα κύτταρα του ανθρώπινου οργανισμού, έως και την πλήρη καταστροφή τους. Αν καταστραφεί μεγάλη

ποσότητα κυττάρων, μπορεί να προκληθούν εγκαύματα, νεκρώσεις και άλλες μακροπρόθεσμες βλάβες. Τα μη κατεστραμμένα κύτταρα μπορούν βαθμιαία να επανέλθουν σε φυσιολογική κατάσταση, χωρίς μόνιμες βλάβες. Λόγω τρόπου αιμάτωσης, τα περισσότερο ευαίσθητα όργανα στις επιδράσεις αυτές, είναι οι οφθαλμοί και οι όρχεις. (Κάππας, 2015)

Ένα από τα προβλήματα στην μελέτη των θερμικών επιδράσεων είναι η πιθανή κατανομή της θερμότητας στους ιστούς και ο χρόνος που σταματά η αύξηση της θερμοκρασίας και σταθεροποιείται. Όμως η μελέτη των θερμικών επιδράσεων είναι αυτή που παίζει το μεγαλύτερο ρόλο στη θέσπιση των ορίων της Η/Μ ακτινοβολίας έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται όταν τα όρια αυτά τηρούνται. (Παντελής, 2013)

5.2.2 Μη Θερμικές Επιδράσεις

Οι μη θερμικές ή αθερμικές επιδράσεις είναι οι επιδράσεις που δεν οφείλονται σε μετρήσιμη αύξηση της θερμοκρασίας. Οι επιδράσεις αυτές μπορούν να προκληθούν ακόμα και από πολύ μικρές πυκνότητες ισχύος. (Παντελής, 2013)

Μία από τις προτεινόμενες θεωρίες για τις αθερμικές επιδράσεις είναι η εκροή ιόντων ασβεστίου. Από έρευνα σε ιστούς πειραματόζωων, έχει παρατηρηθεί η εκροή ιόντων ασβεστίου, χωρίς να υπάρχει αισθητή αύξηση της θερμοκρασίας, όταν εκτεθούν σε παλμικά διαμορφωμένα σήματα ραδιοσυχνότητας. Επίσης, ο εγκέφαλος εκπέμπει ακτινοβολία ίδιας τάξης συχνότητα (6-25Hz με πυκνότητα ισχύος $1\text{mW}/\text{cm}^2$) με τα εγκεφαλικά κύτταρα, τα οποία όταν εκτεθούν σε παλμική ακτινοβολία, δεσμεύουν και απελευθερώνουν ιόντα ασβεστίου. (Κάππας, 2015)

Ακόμα, τα ηλεκτρικά πεδία, μέσω επαγόμενων δυνάμεων, μπορούν να προκαλέσουν την κίνηση φορτισμένων σωματιδίων, να προσανατολίσουν μοριακά δίπολα και να παραμορφώσουν τις κυτταρικές δομές ή ακόμα και να αλλάξουν τη διαφορά δυναμικού στις δύο πλευρές μίας κυτταρικής μεμβράνης. (Κάππας, 2015)

Μία ακόμα ικανότητα των Η/Μ πεδίων είναι να επιδρούν στις χημικές αντιδράσεις που δημιουργούν ελεύθερες ρίζες. Λόγω της διαφοράς στην περίοδο, 10^{-6}s για τις ελεύθερες ρίζες και 10^{-3}s για τα Η/Μ πεδία, τα τελευταία λειτουργούν σαν στατικά πεδία στη διάρκεια των χημικών αντιδράσεων. Βέβαια, μελέτες γονοτοξικότητας και επιγενετικής, έδειξαν ότι δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της δράσης των ελεύθερων ριζών και της καρκινογένεσης. (Κάππας, 2015)

Ένας άλλος μηχανισμός ο οποίος μελετάται είναι η έλξη μεταξύ κυττάρων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο «πολώνει» τα κύτταρα δημιουργώντας ηλεκτρικά

δίπολα, και αυτά με τη σειρά τους έλκουν άλλα δίπολα. Η επαγόμενη ενέργεια από την επίδραση αυτή είναι συγκρίσιμη με τη θερμική ενέργεια πεδίων έντασης 300 V/m, για συχνότητες μικρότερες των 100 MHz. Σημασία επίσης δίνεται όταν ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει την κυτταρική μεμβράνη, όμως έχειδειχθεί ότι για μικρές πεδιακές εντάσεις (μικρότερες των 200V/m) δεν προκύπτουν βιολογικές επιπτώσεις. (Κάππας, 2015)

5.2.3 Άμεσες επιδράσεις

Όταν το Η/Π είναι αρκετά ισχυρό, το ανθρώπινο σώμα λόγω της αγωγιμότητάς του διαταράσσεται, με αποτέλεσμα η επιφάνειά του να είναι ισοδυναμική. Καθώς μεταβάλλεται το πεδίο, μεταβάλλεται και η κατανομή των φορτίων σε αυτή την ισοδυναμική επιφάνεια, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ρεύματα στο εσωτερικό του σώματος. Τα αποτελέσματα μπορεί να είναι ίδια με την απευθείας επαφή αγωγών υπό τάση. Οι επιδράσεις εξαρτώνται από την ένταση της πυκνότητας ρεύματος που διαρρέει τον ανθρώπινο οργανισμό, με τις πιο συνηθείς να αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα. (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)

Ένταση πυκνότητας ρεύματος	Επίδραση στον άνθρωπο
1000 mA/m ²	Κοιλιακός Ινιδισμός
100 mA/m ²	Διέγερση μυών και νεύρων (αίσθηση λάμψης στο οπτικό νεύρο)
10 mA/m ²	Καμία επίδραση (Όριο Ευρωπαϊκής Ένωσης για τους επαγγελματικά εκτεθειμένους)
2 mA/m ²	Καμία επίδραση (Όριο Ευρωπαϊκής Ένωσης για το κοινό)

Πίνακας 4 Επίδραση στον άνθρωπο ανάλογα με την ένταση πυκνότητας ρεύματος (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)

5.3 Επιδημιολογικές μελέτες/έρευνες και δημοσιεύσεις

Η επιδημιολογία ορίζεται ως η μελέτη της κατανομής των ασθενειών στους πληθυσμούς και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Ενώ η κλινική ιατρική, δίνει έμφαση στη θεραπεία του ατόμου, η επιδημιολογία δίνει έμφαση στην εύρεση μοντέλων ασθενειών σε ομάδες ασθενών και όχι σε μεμονωμένα περιστατικά. Οι επιδημιολογικές μελέτες, με βάση τους τη

στατιστική, βασίζονται περισσότερο στην παρατήρηση, παρά στο πείραμα. Για το λόγο αυτό μεγάλη σημασία στις μελέτες αυτές, έχει η ποιότητα του δείγματος. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του πρέπει να είναι το μέγεθος του, που όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο μειώνεται η πιθανότητα του σφάλματος και τα αποτελέσματα της μελέτης είναι περισσότερο ακριβή. Σημαντικό πλεονέκτημα επίσης έχουν οι επιδημιολογικές μελέτες πάνω σε ανθρώπους εκτιθέμενους σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, έναντι αυτών πάνω σε ζώα, διότι παρέχουν περισσότερο άμεση πληροφόρηση για την υγεία των ανθρώπων. (Ιακωβάκης, 2008)

Οι πρώτες έρευνες κάτω από την υποψία ότι τα Η/Μ πεδία θα μπορούσαν να έχουν επιδράσεις στον άνθρωπο πραγματοποιήθηκαν ήδη από το 1960, αλλά δεν μπορούν να καταλογιστούν σε μια συστηματική επιδημιολογική επιστημονική προσέγγιση. Ουσιαστικά οι έρευνες με ξεκάθαρες ενδείξεις και επιστημονική μεθοδολογία αναπτύχθηκαν σε πολλαπλή βάση στις αρχές τις δεκαετίας του 90. Οι έρευνες είχαν αντικείμενο είτε τον άνθρωπο είτε διάφορους άλλους βιολογικούς οργανισμούς (κυρίως θηλαστικά), και επικεντρώθηκαν κυρίως στην αρχή σε αναπτύξεις καρκίνου ενώ επεκταθήκαν σε διάφορες άλλες υποψήφιες παρενέργειες στην συνέχεια. (Moulder, 2005)

Θα παρουσιαστούν οι κύριες έρευνες από μια πάρα πολύ μεγάλη βιβλιογραφική αναφορά, επιγραμματικά και τέλος θα εξεταστούν τα ασφαλή όρια έκθεσης για τον πληθυσμό, για ευπαθείς και υψηλά εκτιθέμενες ομάδες (παιδιά και εργαζόμενοι στους σχετικούς κλάδους) και πως αυτά καθορίζονται στην διεθνή και ελληνική νομοθεσία.

5.3.1 Καρκίνος και λευχαιμία

Διαχρονικά έχουν γίνει πολλές έρευνες που εξέτασαν αν τα Η/Π προκαλούν ή όχι κάποιας μορφής καρκίνο. Η συχνότητα του πεδίου παίζει βασικό ρόλο, και στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα πεδία που παράγονται από το δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο έχει συχνότητα 50Hz και ανήκει στα χαμηλόσυχνα πεδία (ELF). Στο σύνολο των ερευνών παρατηρήθηκαν αυξήσεις των ποσοστών κινδύνου.

Ο κίνδυνος λευχαιμίας σε παιδιά συσχετίστηκε σε έρευνες με την έκθεση των παιδιών σε πολύ χαμηλής έντασης Η/Π στο σπίτι τους. Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τους αγωγούς μέσης και χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις αποστάσεις μεταξύ των σπιτιών και των αγωγών. Όσο απομακρυνόμαστε από τους αγωγούς αυτούς, τόσο μειώνεται το Η/Μ πεδίο που εκτίθεται ο εκάστοτε οργανισμός. (Αθανασίου, 2008)

Μερικές επιδημιολογικές έρευνες, έδειξαν ότι υπήρχε συσχετισμός έκθεσης σε Η/Π πολύ χαμηλής έντασης και λευχαιμίας στα παιδιά. Όμως μετέπειτα μελέτες έδειξαν ότι η σχέση συσχετισμού ήταν αδύνατη. Ουδέποτε αποδείχθηκε ότι τα χαμηλής έντασης Η/Π είναι αιτία λευχαιμίας στα παιδιά ή στους ενήλικες. (Moulder, 2005)

Πριν την δεκαετία του 90', δύο αρχικές έρευνες παρουσίασαν αυξημένο κίνδυνο ανάπτυξης καρκίνου (λευχαιμίας) σε παιδιά που ζούσαν κοντά σε ηλεκτρικά καλώδια και για εργαζόμενους που εκτίθεντο σε υψηλής έντασης Η/Μ πεδία στα πλαίσια της δουλειάς τους. (Nancy Wertheimer, Robert Becker – Αρχικοί ερευνητές των επιδράσεων αυτών). Οι πρώτες αυτές ενδείξεις ακολουθήθηκαν από μια σειρά από μελέτες που έγιναν τα μετέπειτα χρόνια και κατέγραψαν μια σειρά παρενεργειών που συσχετιζόνταν με την μακροχρόνια έκθεση σε αυτές τις ακτινοβολίες. (Αθανασίου, 2008)

Εν συντομία, αναφέρουμε τις πιο σημαντικές σε μια χρονολογική αναφορά (1980-σημερα):

- Tomenius L, 1980. Σε περιοχές όπου το μαγνητικό πεδίο υπερβαίνει το 0,3 μT ο κίνδυνος καρκίνου βρέθηκε 2,7 φορές μεγαλύτερος.
- Szmigielski, 1988. Για τους ηλεκτρολόγους, ο κίνδυνος καρκίνου του αίματος και της λέμφου είναι 7 φορές μεγαλύτερος.
- Savitz, 1988. Για τα παιδιά που κατοικούν κοντά σε καλώδια υψηλής τάσης, ο κίνδυνος καρκίνου είναι 5 φορές μεγαλύτερος.
- Speers, 1988. Ο κίνδυνος ανάπτυξης όγκων του εγκεφάλου στους τεχνικούς ηλεκτρικών εγκαταστάσεων είναι 13 φορές μεγαλύτερος.
- Matanosky 1989. Δείχθηκε για πρώτη φορά ποσοτική σχέση μεταξύ πιθανότητας και επιπέδου έκθεσης (δύο φορές μεγαλύτερο κίνδυνο αντιμετώπισης οποιαδήποτε μορφής, επτά φορές τον κίνδυνο για λευχαιμία και αυξημένη συχνότητα καρκίνου του προστάτη, γαστρεντερολογικού, μαστού και εγκεφάλου. Τα ποσοστά του καρκίνου μειώνονταν σχετικά προς την έκθεση).
- J. Peters 1991. Σε μια διερεύνηση σχέσης μεταξύ της λευχαιμίας και της μετρημένης έκθεσης, δε βρέθηκε κάποια σημαντική σχέση συνολικά, αλλά σε κάποιες κατηγορίες τύπων της καλωδίωσης.
- 1993 Feychting Sweden. Σε ένα τεράστιο αθροιστικό δείγμα (400.000 υποθέσεις) που έζησαν επί ένα χρόνο δίπλα από γραμμές υψηλής τάσης, έδειξε μια σχετική αύξηση των περιπτώσεων λευχαιμίας σε μαγνητικά πεδία μεγαλύτερα των 0.2 μT .

- Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας των ΗΠΑ (1996). Τα συμπεράσματά του από την εξέταση περίπου 500 εργασιών 17 ετών σχετικά με την πιθανή επίδραση των πεδίων στην υγεία. Συμμετείχαν διακεκριμένοι επιστήμονες της Ιατρικής, περιβάλλοντος, Ηλεκτρολογίας, της Γενετικής, της Βιολογίας, της Δημόσιας Υγείας, της Ογκολογίας κ.ά. Προέκυψε ότι δεν υπάρχουν πειστικά στοιχεία ότι τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία που συναντώνται στα σπίτια παίζουν κάποιο ρόλο στην ανάπτυξη καρκίνου, καθώς και σε αναπαραγωγικές και αναπτυξιακές ανωμαλίες ή σε προβλήματα μάθησης και συμπεριφοράς.

(Moulder, 2005)

Οι πιο πρόσφατες (μετά το 1995) έρευνες της επίδρασης των μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας στην αύξηση των φυσιολογικών κυττάρων ή των καρκινικών κυττάρων δεν έχουν παρουσιάσει επίσης καμία επίδραση αλλά μερικές έχουν αναφέρει αυξημένη ή μειωμένη ανάπτυξη κυττάρων, μετά από την έκθεση σε ισχυρά (> 90 μT) πεδία. (Αθανασίου, 2008)

Οι πρόσφατες αναφορές των αποτελεσμάτων των πεδίων χαμηλής συχνότητας στην ανάπτυξη των κυττάρων περιλαμβάνουν:

- 2001 Heredia-Rojias. Ανέφεραν ότι η αύξηση των ανθρώπινων λεμφοκυττάρων ενισχύθηκε ελαφρώς μετά από 72 ώρες έκθεση σε πεδία 60 Hz, και ισχύος $1.000 \div 2.000 \mu\text{T}$.
- 2001 Zeni. Ανέφερε ότι η αύξηση των ανθρώπινων λευκοκυττάρων ενισχύθηκε ελαφρώς από 72ώρη έκθεση σε πεδία 50 Hz, $1.000 \mu\text{T}$.
- 2003 Verheyen. Ανέφερε ότι έκθεση σε πεδίο $800\mu\text{T}$ υπάρχει αυξημένη μιτωτική δραστηριότητα στα λευκοκύτταρα που βρίσκονται στο ανθρώπινο αίμα αλλά όχι με την παρουσία γενοτοξικού φαρμάκου και όχι σε πεδία έντασης $80\mu\text{T}$.
- 2003 Santini. Ανέφερε ότι από έκθεση σε πεδία $500\mu\text{T}$ επί 7 ημέρες προκλήθηκε μείωση της ανάπτυξης κυττάρων.
- 2003 Pirozzoli. Ανέφερε ότι πολυήμερη έκθεση γραμμής κυττάρων ανθρώπινων όγκων σε πεδίο έντασης $1000 \mu\text{T}$, και συχνότητας 50 Hz, αύξησε ελαφρώς την ανάπτυξη κυττάρων.
- 2004 Grassi. Ανέφερε ότι έκθεση κυττάρων μαστοφόρων σε ένα πεδίο έντασης 500 έως $1000 \mu\text{T}$, συχνότητας 50 Hz, επί 24 μέχρι 72 ώρες, αύξησε την ανάπτυξη κυττάρων. Χαμηλότερες όμως εντάσεις δεν είχαν καμία επίδραση.

- 2004 Stronati. Ανέφερε ότι έκθεση ανθρώπινων κυττάρων αίματος επί 2 ώρες σε ένα πεδίο 1000 μT , 50 Hz, προκάλεσε μια "μικρή, αλλά σημαντική, μείωση πολλαπλασιασμού κυττάρων.

(Moulder, 2005)

Παρά το ότι οι έρευνες συνεχίζονται, δεν έχει υπάρξει κανένα αναφερόμενο αποτέλεσμα στον πολλαπλασιασμό κυττάρων ή την πρόοδο όγκων, και δεν έχει υπάρξει ουδεμία έκθεση των αποτελεσμάτων καθολικά για πεδία κάτω των περίπου 50 μT . (Moulder, 2005)

5.3.2 Επίδραση των ELF πεδίων σε παιδιά

Τον Ιούνιο του 2001 με βάση οδηγίες διεθνών ερευνητικών οργανισμών (International Agency for Research on Cancer), τα χαμηλόσυχνα μαγνητικά πεδία χαρακτηρίστηκαν ως ενδεχομένως καρκινογόνα (κατηγορία 2B) για πρόκληση παιδικής λευχαιμίας. Τα ELF μαγνητικά πεδία ταξινομήθηκαν από την IARC σε αυτήν την κατηγορία βάσει των "περιορισμένων" στοιχείων από τις επιδημιολογικές μελέτες που αφορούν την παιδική λευχαιμία. Τα επιδημιολογικά στοιχεία που αφορούν τους υπόλοιπους καρκίνους, καθώς και αυτά από εργαστηριακές μελέτες που έγιναν σε πειραματόζωα, ιστούς και κύτταρα θεωρήθηκαν "ανεπαρκή" και έτσι τα ELF μαγνητικά πεδία δεν κατατάχθηκαν σε κατηγορίες των πιο επικίνδυνων παραγόντων. Τα παιδιά αποτελούν την πλέον ευάλωτη κατηγορία πληθυσμού διότι τα κύτταρά τους είναι πολύ πιο ευαίσθητα από αυτά των ενηλίκων στην ακτινοβολία, αφού στον παιδικό οργανισμό υπάρχουν περισσότερα αναπτυσσόμενα και διαιρούμενα κύτταρα απ' ό,τι στον οργανισμό των ενηλίκων. (Αθανασίου, 2008)

Ερευνητές έχουν ενδείξεις ότι η διαμονή κοντά σε ηλεκτρικές γραμμές υψηλής τάσης μπορεί να συνδέεται με την εμφάνιση της λευχαιμίας κατά την παιδική ηλικία, αλλά όπως αναφέρθηκε πριν, η σύνδεση αυτή παραμένει "μικρή" και η σχέση μπορεί να οφείλεται στην πιθανότητα. (Αθανασίου, 2008)

Βέβαια, σύμφωνα με μελέτη, που δημοσιεύθηκε στο Βρετανικό Ιατρικό Περιοδικό (BMJ) η οποία ανέλυσε περίπου 29.000 περιπτώσεις / 9700 περιπτώσεις λευχαιμίας) σε παιδιά μικρότερα των 15 ετών τα οποία συγκρίθηκαν με έναν εξίσου μεγάλο αριθμό παιδιών χωρίς καρκίνο, σε αντιστοίχιση φύλου, ηλικίας και περιοχής γέννησης. Και στις δύο ομάδες, υπολογίστηκε η απόσταση του σπιτιού των παιδιών και των πιο κοντινών ηλεκτροφόρων συρμάτων υψηλής τάσης κατά τη γέννηση τους. (Αθανασίου, 2008)

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα παιδιά που κατά τη γέννηση κατοικούσαν κοντά σε εναέριους αγωγούς μέσης και χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, κινδύνευαν περισσότερο να προσβληθούν από λευχαιμία. Επίσης η σχέση απόστασης και κινδύνου για λευχαιμία έδειξε, ότι παιδιά που κατοικούσαν κατά τη γέννηση τους σε σπίτια που βρίσκονταν σε λιγότερο από 200 μέτρα από σύρματα υψηλής τάσης, είχαν 70% αυξημένο κίνδυνο για λευχαιμία σε σύγκριση με εκείνα που ζούσαν κατά την ίδια περίοδο της ζωής τους, σε σπίτια βρισκόμενα σε απόσταση μεγαλύτερη των 600 μέτρων από σύρματα υψηλής τάσης. Τα παιδιά επίσης που ζούσαν σε ενδιάμεση απόσταση, δηλαδή μεταξύ 200 και 600 μέτρων είχαν ελαφρώς μεγαλύτερο κίνδυνο. Τέλος, δεν βρέθηκε συσχετισμός μεταξύ συρμάτων υψηλής τάσης και αυξημένου κινδύνου για οποιαδήποτε άλλη μορφή παιδικού καρκίνου. (Αθανασίου, 2008)

Ο παραπάνω συσχετισμός είναι ενδεικτικός και όχι στατιστικά σημαντικός. Επίσης φαίνεται ότι δεν υπάρχει κάποια βιολογική εξήγηση στο γεγονός ότι τα μαγνητικά πεδία είναι ικανά να προκαλούν λευχαιμία στα παιδιά τόσο μακριά, σε απόσταση μέχρι και 200 μέτρων, στην οποία τα πεδία είναι σχεδόν μηδενικά. (Αθανασίου, 2008)

Συμπερασματικά παρά το γεγονός ότι έχουν γίνει πολύχρονες και εκτεταμένες έρευνες για την αιτιολογία του παιδικού καρκίνου και λευχαιμίας, εντούτοις στο 95% των περιπτώσεων σήμερα δεν γνωρίζουμε την αιτία. (Αθανασίου, 2008)

5.4 Όρια ασφαλείας και προστασία έναντι ELF Πεδίων

Τα όρια ασφαλούς έκθεσης στα Η/Μ πεδία είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστούν κυρίως λόγω την μακροπρόθεσμων επιδράσεων αυτών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημοσίευση πολλών κανονισμών και ορίων ασφαλείας έως ότου η Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας και αργότερα ολόκληρη η ευρωπαϊκή ένωση αποδεχθεί τα όρια που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Οργανισμός Προστασίας από τις ακτινοβολίες (IRPA). (Αθανασίου, 2008)

Η προστασία από μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από την καλή γνώση των μηχανισμών δράσης τους στον άνθρωπο. Όμως, παρά την έλλειψη επαρκών επιστημονικών τεκμηρίων, προτείνεται η μείωση των επιστημονικών ορίων λαμβάνοντας υπόψιν κοινωνικά και πολιτικά κριτήρια. Σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία για παράδειγμα, τα όρια ασφαλούς έκθεσης είναι κατά 20% μικρότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες. (Καραμπέτσος, 2005)

Για τις εκπομπές Η/Μ ακτινοβολίας έχει εκδοθεί η Κοινή Υπουργική απόφαση με αριθμό 53571/3839 (Φ.Ε.Κ. Αρ.1105, Τεύχος Δεύτερο, 6 Σεπτεμβρίου 2000) από τα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Υγείας και Πρόνοιας,

Μεταφορών και Επικοινωνιών, με θέμα τα μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία κεραιών εγκατεστημένων στην ξηρά και η Κοινή Υπουργική Απόφαση με αριθμό 3060 (ΦΟΡ) 238 (Φ.Ε.Κ. Αρ. 512, Τεύχος Δεύτερο, 25 Απριλίου 2002) από τα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και Υγείας και Πρόνοιας, με θέμα τα μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων. (Καραμπέτσος, 2005)

Οι προαναφερθείσες Κοινές Υπουργικές Αποφάσεις βασίστηκαν στη Σύσταση του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης "Σχετικά με τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία 0 Hz - 300 GHz" (L199, 1999/519/EC) καθώς και στις κατευθυντήριες γραμμές που εξεδόθησαν από την ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection) το 1998. Τα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού στη χώρα μας για τις εγκαταστάσεις σταθμών κεραιών όλων των ειδών είναι το 80 % των επιπέδων αναφοράς όπως αυτά ορίζονται στην προαναφερθείσα σύσταση της Ε.Ε. ενώ στην περίπτωση των διατάξεων εκπομπής χαμηλών συχνοτήτων ως όρια ισχύουν ως έχουν. (Καραμπέτσος, 2005)

5.4.1 Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς

Για όλους τους ανωτέρω κανονισμούς για την εφαρμογή περιορισμών, υπάρχει η διαφοροποίηση μεταξύ βασικών περιορισμών και επιπέδων αναφοράς.

Οι βασικοί περιορισμοί είναι οι περιορισμοί έκθεσης σε Η/Μ πεδία που βασίζονται άμεσα σε αποδεδειγμένες επιδράσεις στην υγεία και σε βιολογικές μελέτες. Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν αυτούς τους περιορισμούς, είναι η μαγνητική επαγωγή (B), η πυκνότητα ρεύματος (J), ο ρυθμός ειδικής απορρόφησης ενέργειας (SAR) και η πυκνότητα ισχύος (S). (Καραμπέτσος, 2005)

Τα επίπεδα αναφοράς είναι τα επίπεδα που χρησιμοποιούνται για την πρακτική εκτίμηση της έκθεσης, προκειμένου να ελεγχθεί το ενδεχόμενο υπέρβασης των βασικών περιορισμών. Τα φυσικά μεγέθη που προέρχονται από αντίστοιχους βασικούς περιορισμούς με τη χρήση μετρήσεων ή/και υπολογισμών είναι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E), η ένταση μαγνητικού πεδίου (H), η μαγνητική επαγωγή (B), η πυκνότητα ισχύος (S) και το ρεύμα των άκρων (IL). Το μέγεθος που σχετίζεται με την αντίληψή του από τον εκτιθέμενο και άλλες έμμεσες επιδράσεις είναι το ρεύμα επαφής (IC) και για παλμικά πεδία η ειδική απορρόφηση ενέργειας (SA). (Καραμπέτσος, 2005)

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα επίπεδα αναφοράς και οι βασικοί περιορισμοί για Ηλεκτρικά, Μαγνητικά και Ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Σημειώνεται επίσης ότι όπου f είναι και η αντίστοιχη συχνότητα στη στήλη που παρουσιάζεται.

Περιοχή συχνοτήτων	Μαγνητική Επαγωγή (mT)	Πυκνότητα ρεύματος (mA/m ²) (rms)	Ολόσωμο SAR (W/kg)	Τοπικό SAR (κεφάλι & κορμός) (W/kg)	Τοπικό SAR (άκρα) (W/kg)	Πυκνότητα ισχύος, S (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
0-1 Hz	-	8	-	-	-	-
1-4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4-1000 Hz	-	2	-	-	-	-
1000 Hz – 100 kHz	-	f/500	-	-	-	-
100 kHz – 10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz – 10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 – 300 GHz	-	-	-	-	-	10

Πίνακας 5 Βασικοί περιορισμοί για Η/Μ πεδία από 0 Hz έως 300 GHz
(Καραμπέτσος, 2005)

Περιοχή συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού πεδίου (V/m)	Ένταση Μαγνητικού πεδίου (A/m)	Μαγνητική επαγωγή (μT)	Ισοδύναμη Πυκνότητα ισχύος επίπεδου κύματος S_{eq} (W/m ²)
0-1 Hz		$3,2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	1000	$3,2 \times 10^4 / f^{1/2}$	$4 \times 10^4 / f^{1/2}$	
8-25 Hz	1000	4000/f	5000/f	
0.025 - 0.8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0.8 – 3 kHz	250/f	5	6,25	
3 – 150 kHz	87	5	6,25	
0.15 – 1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	
1 – 10 MHz	$87 / f^{1/2}$	0,73/f	0,92/f	
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	
400 - 2000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	f/200
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Πίνακας 6 Επίπεδα αναφοράς για Η/Μ πεδία από 0 Hz έως 300 GHz
(Καραμπέτσος, 2005)

5.4.2 Όρια ασφαλούς έκθεσης σε χαμηλόσυχα πεδία έντασης 50Hz

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα Η/Μ πεδία που παράγονται από το δίκτυο μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, ανήκουν στα χαμηλόσυχα πεδία (Extremely low frequency – ELF) με συχνότητα 50 Hz. Σύμφωνα με την υπάρχουσα νομοθεσία, τα όρια ασφαλούς έκθεσης για τα πεδία αυτά ορίζονται στα κάτωθι.

Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (E)	5 kV/m
Μαγνητική Επαγωγή (B)	100 μ T

Πίνακας 7 Όρια ασφαλούς έκθεσης σε Η/Μ πεδία συχνότητας 50 Hz
(Καραμπέτσος, 2005)

Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι οι ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες παράγουν μαγνητικά πεδία τα οποία μπορεί να φτάσουν μέχρι και μερικές εκατοντάδες μ T, ξεπερνώντας έτσι κατά πολύ τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Όμως οι τιμές αυτές είναι για εξαιρετικά μικρές αποστάσεις που πρακτικά υπάρχουν σε πολύ λίγες περιπτώσεις όπως αυτή του σεσουάρ ή της ηλεκτρικής ξυριστικής μηχανής. Επίσης, ο ανθρώπινος οργανισμός δεν βρίσκεται συνεχώς υπό την επίδραση αυτών των πεδίων αλλά μόνο στη διάρκεια που χρησιμοποιεί τις συσκευές αυτές. Έτσι ο κίνδυνος πρακτικά και εδώ είναι αμελητέος. Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου για τρεις ενδεικτικές αποστάσεις για τις πλέον συνήθεις ηλεκτρικές συσκευές που υπάρχουν σε ένα τυπικό σπίτι. (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)

Αναφορικά με τα ηλεκτρικά πεδία των συσκευών αυτών δεν προκύπτει ιδιαίτερη ανησυχία, καθώς οι τιμές τους κυμαίνονται στα 10 V/m, δηλαδή πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερες σε σχέση με τα επιτρεπόμενα όρια. (Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)

Συσκευή	Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 3 cm (μΤ)	Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 30 cm (μΤ)	Μαγνητικό πεδίο σε απόσταση 1 m (μΤ)
Ξυριστική μηχανή	10 – 900	0.05 – 9	0.01 – 0.2
Σεσουάρ Μαλλιών	8 – 800	0.01 – 7	0.01 – 0.03
Λαμπτήρας Φθορισμού	40 – 400	0.5 – 2	0.02 – 0.25
Ηλεκτρική Κουζίνα	1 - 50	0.15 – 0.5	0.01 – 0.04
Φούρνος Μικροκυμάτων	5 – 10	0.4 – 8	0.15 – 0.5
Ψυγείο	0.5 – 1.7	0.01 – 0.3	0.01 – 0.05
Πλυντήριο Ρούχων	0.8 – 40	0.15 – 3	0.01 – 0.15
Πλυντήριο Πιάτων	1 – 15	0.2 – 2	0.07 – 0.3
Ηλεκτρικό Σίδερο	3 – 30	0.14 – 0.3	0.01 – 0.03
Ηλεκτρική Σκούπα	60 – 500	0.8 – 12	0.08 – 0.8
Φορητό Ραδιόφωνο	1 – 15	0.4 – 1.5	0.01 – 0.1
Τηλεόραση	2 – 80	0.04 – 8	0.01 – 0.9
Βιντεοκάμερα	0.6 – 20	0.7 – 2.5	0.01 – 0.03
Φωτοτυπικό	0.6 – 40	0.1 – 2.7	0.01 – 0.3
Συσκευή FAX	0.4 – 1.5	0.01 – 0.2	0.01 – 0.02
Οθόνη Υπολογιστή	1 – 60	0.02 – 5	0.01 – 0.6
Ηλεκτρικό Τρυπάνι	4 – 200	0.2 – 3.3	0.01 – 0.8

Πίνακας 8 Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από συσκευές συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο

(Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005)

5.5 Συμπεράσματα

Όπως είδαμε στα προηγούμενα στο 3^ο και 4^ο κεφάλαιο, οι θεωρητικές αναμενόμενες τιμές, σπανίως ξεπερνούν τα παραπάνω όρια, και σε όλες τις εξεταζόμενες διαδρομές τα επίπεδα ήταν πολύ πιο χαμηλά.

Κλείνοντας, θα παρουσιαστούν διάφορες πειραματικές μετρήσεις, που έχουν πραγματοποιηθεί από πολλούς φορείς, και δείχνουν σύνταξη των θεωρητικών επιπέδων με τα πραγματικά, έτσι όπως αυτά έχουν μετρηθεί.

Ενδεικτικά παραθέτουμε στοιχεία από την Ελληνική επιτροπή ατομικής ενέργειας, από μετρήσεις που έγιναν από το αρμόδιο γραφείο ακριβώς κάτω και 25m παραπλεύρως από κάθε γραμμή. (Καραμπέτσος, 2005)

		Μαγνητικό πεδίο (μT)	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)
Γραμμές 400 kV (μεταλλικοί πυλώνες)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	25	6000
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	1 – 4	2000 – 4000
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0.5 – 2	200 – 500
Γραμμές 150 kV (μεταλλικοί πυλώνες)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	15	2000
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	0.5 – 2	1000 – 2000
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0.1 – 0.2	100 – 300
Γραμμές 150 kV (μεταλλικοί ιστοί)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	10	1200
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	0.3 – 1.5	500 – 1000
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0.05 – 0.2	50 – 100
Γραμμές 20 kV (ξύλινες κολώνες)	Μέγιστη τιμή (κάτω από αγωγούς)	5	700
	Τυπική τιμή (κάτω από αγωγούς)	0.2 – 0.5	200
	Τυπική τιμή (25m παραπλεύρως)	0.01 – 0.05	10 - 20

Πίνακας 9 Τιμές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε ύψος 1,5 μέτρου από το έδαφος στο περιβάλλον εναέριων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας

(Καραμπέτσος, 2005)

Όπως βλέπουμε οι τιμές των ηλεκτρικών πεδίων είναι αρκετά κοντά στους υπολογισμούς μας και αντιστοιχούν σε πολύ μικρά πεδία. Τα μαγνητικά πεδία είναι και αυτά σε επίπεδα $<10 \mu\text{T}$ και $<1 \mu\text{T}$ σε απόσταση μερικών μέτρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Moulder, J. E., 2005. *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Ανθρώπινη Υγεία*. s.l.:MEDICAL COLLEGE OF WISCONSIN.

P. D. BOURKAS, C. G. K. C. S. P. P. H., 2001. THEORETICAL AND EXPERIMENTAL APPROXIMATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD RESULTED FROM UNDERGROUND POWER LINES OF 150KV. *Power And Energy Systems*, July.

S.S. Razavipour, M. J. H. S., 2012. *Electrical Field around the overhead Transmission Lines*, s.l.: World Academy of Science, Engineering and Technology.

Tzeferis, D. P., 2005. <https://commons.wikimedia.org/>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lignite Mine Megalopolis.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lignite_Mine_Megalopolis.jpg)

ΑΔΜΗΕ, 2013. <http://www.admie.gr>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.admie.gr/to-systima-metaforas/dedomena-stoicheia-systimatos/perigrafi-systimatos-metaforas/>
[Πρόσβαση 2017].

Αθανασίου, Ν., 2008. *Μετρήσεις Ηλεκτρομαγνητικών πεδίων*. Πάτρα: s.n.

Ανδρέας, Α. Π., 2010. *Ημερήσια έκθεση σε μαγνητικό πεδίο 50Hz αναλόγως της δομής του δικτύου διανομής*. Αθήνα: s.n.

Βικιπαίδεια, 2017. <https://el.wikipedia.org>. [Ηλεκτρονικό]
Available at:
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%83%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%82>

Γεωργίου, Γ., 2005. www.eng.ucy.ac.cy/ece331/notes/. [Ηλεκτρονικό].

ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., 2017. <http://www.deddie.gr>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.deddie.gr/el/i-etaireia/profil>

ΔΕΗ Α.Ε., 2013. <https://www.dei.gr>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.dei.gr/el/i-dei/i-etairia/omilos-dei-ae/dei-ae>

ΔΕΗ, 1985. *Τυποποιημένες Κατασκευές Διανομής*. 1η επιμ. s.l.:s.n.

ΔΕΗ, 2010. <https://www.flickr.com>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://www.flickr.com/photos/dei_gr/5525867821/in/photostream/

ΔΕΗ, 2011. <https://www.flickr.com>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://www.flickr.com/photos/dei_gr/5525867821/in/photostream/

Δημουλάς, Ε., 2008. *Προσομοίωση Μαγνητικών Πεδίων Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Θεσσαλονίκη: s.n.

Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας, 2005. www.eeae.gr. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://eeae.gr/files/%CE%B5%CE%BD%CE%B7%CE%BC%CE%AD%CF%81%CF%89%CF%83%CE%B7/%CF%87%CE%B1%CE%BC%CE%B7%CE%BB%CF%8C%CF%83%CF%85%CF%87%CE%BD%CE%B1-%CF%80%CE%B5%CE%B4%CE%AF%CE%B1.pdf>

Ζτούπης, Ι. Ν., 2009. *Μέτρηση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου Χαμηλής Συχνότητας*. Αθήνα: s.n.

Ιακωβάκης, Δ. Β., 2008. *Μη Ιονίζουσα Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία και οι Βιολογικές της Επιδράσεις, Βιβλιογραφική Έρευνα*. Αθήνα: s.n.

Κάππας, Κ., 2015. *Βιολογική Επίδραση Της Μη Ιονίζουσας Ακτινοβολίας επί των ιστών*, s.l.: ΕΕΑΕ.

Καραμπέτσος, Δ. Ε., 2005. *Ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Νομοθετικό πλαίσιο, Όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού, Αποτελέσματα ελέγχων*, s.l.: Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ).

Οικονομόπουλος, Κ., 2012. *Υπολογισμός Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου στο Περιβάλλον Γραμμών Μεταφοράς και Μέσης Τάσης*. Αθήνα: s.n.

Παντελής, Μ. Ν., 2013. *Μελέτη Επιδράσεων της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας Από Κινητά Τηλέφωνα και Σταθμούς Βάσης Στον Ανθρώπινο Οργανισμό*. Αθήνα: s.n.

Παρασκευόπουλος, Α., 2009. *Το Ηλεκτρικό και Μαγνητικό πεδίο σε δίκτυα και εγκαταστάσεις ως παράγων περιβαλλοντικών επιπτώσεων*. s.l.:s.n.

Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), 2017. <http://www.rae.gr>. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/production.csp [Πρόσβαση 2017].

Σαφιγιάννη, Α., 2017. <https://eclass.duth.gr>. [Ηλεκτρονικό]

Available at:

<https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA403/%CE%97%CE%9B%CE%95%CE%9A%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%A7%CE%91%CE%A1%CE%91%CE%9A%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%A3%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%91%20%CE%91%CE%93%CE%A9%CE%93%CE%A9%CE%9D%20%CE%94%CE%99%CE%>

Τραχανάς, Σ., 2005. *Κβαντομηχανική Ι*. Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.

Τσαλαμέγκας, Ι. Α. & Ρουμελιώτης, Ι. Α., 2010. *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία, Τόμος Ι*. Αθήνα: Τζιόλα.

Τσαλικίδης, Χ., 2012. *Μαγνητικά Πεδία σε Γραμμές Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Θεσσαλονίκη: s.n.

Τσιαμίτας, Ν., 2013. *Τομεάρχης Μελετών Κατασκευών Δικτύων* [Συνέντευξη] 2013.

Φ. 608/Β/6.10.1967, 1967. Περί εγκρίσεως Κανονισμών δια την εγκατάστασιν και συντήρησιν Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Χαλεβίδης, Κ. Δ., 2012. *Διηλεκτρικά και θερμικά φαινόμενα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής*. s.l.:s.n.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1)#τυποι 21α,β

Ε διαδρομή εδαφους (h=0)

x=linspace(-10,10);

#Τιμες σταθερών

#h2=h';

h2=10 ;

#r2 η αποσταση απο τον μεσαιο αγωγο(=r)

r2=(x.^2.+h2^2).^(1/2)

x=(r2^2-h2^2)^(1/2);

r1=((x+0.9).^2.+h2.^2).^(0.5);

i1=50;

i2=100;

i3=200;

i4=251;

c=3*10^8;

$$m_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7};$$

$$e_0 = 1 / ((c^2) \cdot m_0);$$

#2 x's

$$\#x = (r_2^2 - h_2^2)^{1/2};$$

$$\#x = (r_2^2 - h_2^2)^{1/2};$$

$$\#x = (r_2^2 - h_2^2)^{1/2};$$

$$r_1 = ((x + 0.9)^2 + h_2^2)^{0.5};$$

$$r_3 = ((x - 0.9)^2 + h_2^2)^{0.5};$$

$$\cos \alpha_1 = h_2 / r_1;$$

$$\sin \alpha_1 = \text{abs}(x + 0.9) / r_1;$$

$$\sin \alpha_2 = \text{abs}(x) / r_2;$$

$$\cos \alpha_2 = h_2 / r_2;$$

$$\cos \alpha_3 = h_2 / r_3;$$

$$\sin \alpha_3 = \text{abs}(x - 0.9) / r_3;$$

$$I_1 = i_1 / (3 \cdot 10^8);$$

$$I_2 = i_2 / (3 \cdot 10^8);$$

$$I_3 = i_3 / (3 \cdot 10^8);$$

$$I_4 = i_4 / (3 \cdot 10^8);$$

#B

#HLEKTRIKO

$$E_{x1} = (i_1 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3);$$

$$E_{x2} = (i_2 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3);$$

$$E_{x3} = (i_3 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3);$$

$$E_{x4} = (i_4 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 + \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3);$$

$$E_{y1} = (i_1 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3);$$

$$E_{y2} = (i_2 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3);$$

$$E_{y3} = (i_3 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3);$$

$$E_{y4} = (i_4 / (c \cdot \pi \cdot h^2 \cdot 2 \cdot \epsilon_0)) \cdot (\cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3);$$

$$E_1 = (E_{x1}^2 + E_{y1}^2)^{0.5};$$

$$E_2 = (E_{x2}^2 + E_{y2}^2)^{0.5};$$

$$E_3 = (E_{x3}^2 + E_{y3}^2)^{0.5};$$

$$E_4 = (E_{x4}^2 + E_{y4}^2)^{0.5};$$

```
plot(x,E1)
```

```
hold
```

```
plot(x,E2)
```

```
plot(x,E3)
```

```
plot(x,E4)
```

```
plot (r2,E1)
```

```
plot (r2,E2)
```

```
plot (r2,E3)
```

```
plot (r2,E4)
```

2) #τυποι 7-10

```
# B διαδρομή 1.5μ(y=1,5)
```

```
x=linspace(-10,10);
```

```
#Τιμες σταθερών
```

```
#h2=h';
```

```
h2=8.5;
```

```
#r2 η αποσταση απο τον μεσαιο αγωγο(=r)
```

```
r2=(x^2+h2^2)^(1/2)
```

$$r1=((x+0.9)^2+h2^2)^{(0.5)};$$

$$i1=50;$$

$$i2=100;$$

$$i3=200;$$

$$i4=251;$$

$$c=3*10^8;$$

$$mo=4*pi*10^{(-7)};$$

$$eo=1/((c^2)*mo);$$

#2 x's

$$\#x=(r2.^2-h2^2)^{(1/2)};$$

$$\#x=(r2.^2-h2.^2).^{(1/2)};$$

$$r1=((x+0.9).^2+h2.^2).^{(0.5)};$$

$$r3=((x-0.9).^2+h2.^2).^{(0.5)};$$

$$\text{cosa1}=h2./r1;$$

$$\text{sina1}=\text{abs}(x+0.9)./r1;$$

$$\text{sina2}=\text{abs}(x)./r2;$$

$$\text{cosa2}=h2./r2;$$

$$\text{cosa3}=h2./r3;$$

$$\text{sina3}=\text{abs}(x-0.9)./r3;$$

$$r1=((x+0.9).^2+h2^2).^^(0.5);$$

$$r2=(x.^2.+h2^2);$$

$$r3=((x-0.9).^2+h2^2).^^(0.5);$$

$$\text{sina1}=\text{abs}(x+0.9)./r1;$$

$$\text{sina2}=\text{abs}(x)./r2;$$

$$\text{cosa2}=h2./r2;$$

$$\text{cosa3}=h2./r3;$$

$$\text{sina3}=\text{abs}(x-0.9)./r3;$$

$$\text{cosa1}=h2./r1 ;$$

#B

$$Bx1=(\text{mo}*i1/(2*\text{pi}))*(\text{cosa1}./r1+\text{cosa2}./r2+\text{cosa3}./r3)$$

$$Bx2=(\text{mo}*i2/(2*\text{pi}))*(\text{cosa1}./r1+\text{cosa2}./r2+\text{cosa3}./r3)$$

$$Bx3=(\text{mo}*i3/(2*\text{pi}))*(\text{cosa1}./r1+\text{cosa2}./r2+\text{cosa3}./r3)$$

$$Bx4=(\text{mo}*i4/(2*\text{pi}))*(\text{cosa1}./r1+\text{cosa2}./r2+\text{cosa3}./r3)$$

$$By1= ((\text{mo}*i1)/(2*\text{pi}))*(\text{sina1}./r1+\text{sina2}/r2+\text{sina3}./r3);$$

$$By2= ((\text{mo}*i2)/(2*\text{pi}))*(\text{sina1}./r1+\text{sina2}/r2+\text{sina3}./r3);$$

$$By3= ((\text{mo}*i3)/(2*\text{pi}))*(\text{sina1}./r1+\text{sina2}/r2+\text{sina3}./r3);$$

$$By4= ((\text{mo}*i4)/(2*\text{pi}))*(\text{sina1}./r1+\text{sina2}/r2+\text{sina3}./r3);$$


```
B1=(Bx1.^2+By1.^2).^0.5  
B2=(Bx2.^2+By2.^2).^0.5;  
B3=(Bx3.^2+By3.^2).^0.5;  
B4=(Bx4.^2+By4.^2).^0.5;
```

```
plot(x,B1);
```

```
hold
```

```
plot(x,B2);
```

```
plot(x,B3);
```

```
plot(x,B4);
```

3) #τυποι 11

```
# μεση τάση μαγνητικό διαδρομή 2 (x=0 , y=0-8 m)
```

```
y=linspace(0,8);
```

```
#Τιμες σταθερών
```

```
#r2 η αποσταση απο τον μεσαιο αγωγο(=r)
```

```
i1=50;
```

```
i2=100;
```

```
i3=200;
```

```
i4=251;
```

```
c=3*10^8;
```

```
mo=4*pi*10^(-7);
```

$$e_0 = 1 / ((c^2) * m_0);$$

$$r_2 = 10 - y;$$

$$r_1 = ((0.9)^2 + r_2^2)^{0.5};$$

$$r_3 = r_1;$$

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha_3 = 0.9 / r_1;$$

$$\sin \alpha_2 = 0;$$

$$\cos \alpha_2 = 1;$$

$$\cos \alpha_3 = h_2 / r_3;$$

$$\cos \alpha_1 = r_2 / r_1;$$

$$\cos \alpha_3 = \cos \alpha_1;$$

li

$$l_1 = i_1 / (3 * 10^8);$$

$$l_2 = i_2 / (3 * 10^8);$$

$$l_3 = i_3 / (3 * 10^8);$$

$$l_4 = i_4 / (3 * 10^8);$$

#B

$$B_{x1} = (m_0 * i_1 / (2 * \pi)) * (\cos \alpha_1 / r_1 + \cos \alpha_2 / r_2 + \cos \alpha_3 / r_3);$$

$$B_{x2} = (m_0 * i_2 / (2 * \pi)) * (\cos \alpha_1 / r_1 + \cos \alpha_2 / r_2 + \cos \alpha_3 / r_3);$$

$$Bx3=(mo*i3/(2*pi))*(cosa1./r1+cosa2./r2+cosa3./r3);$$

$$Bx4=(mo*i4/(2*pi))*(cosa1./r1+cosa2./r2+cosa3./r3);$$

$$By1= ((mo*i1)/(2*pi))*(sina1./r1+sina2./r2+sina3./r3);$$

$$By2= ((mo*i2)/(2*pi))*(sina1./r1+sina2./r2+sina3./r3);$$

$$By3= ((mo*i3)/(2*pi))*(sina1./r1+sina2./r2+sina3./r3);$$

$$By4= ((mo*i4)/(2*pi))*(sina1./r1+sina2./r2+sina3./r3);$$

$$B1=(Bx1.^2+By1.^2).^0.5;$$

$$B2=(Bx2.^2+By2.^2).^0.5;$$

$$B3=(Bx3.^2+By3.^2).^0.5;$$

$$B4=(Bx4.^2+By4.^2).^0.5;$$

plot(y,B1);

hold

plot(y,B2);

plot (y,B3);

plot(y,B4);

Αθήνα

Ιούλιος - 2017

