



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας σε γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΙΤΩΜΕΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΣΚΛΗΘΡΙΩΤΗ

**Επιβλέπων:** Ιωάννης Φ. Γκόνος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας σε γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΙΤΩΜΕΝΗ ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΣΚΛΗΘΡΙΩΤΗ

**Επιβλέπων:** Ιωάννης Φ.Γκόκος  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26 Οκτωβρίου 2022.

.....  
Ιωάννης Γκόκος  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Χρυσόστομος Δούκας  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Χρήστος Χριστοδούλου  
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022

.....

Χαριτωμένη Α.Σκληθριώτη

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

Copyright © Σκληθριώτη Χαριτωμένη,2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

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

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

*Την παρούσα εργασία την Αφιερώνω στη Μητέρα όλων των Ανθρώπων την Παναγία  
στη Μνήμη του Πάτερα μου Αντωνίου & στη Μητέρα μου Χαρίκλεια.*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έως τις οικιακές συσκευές έχουμε δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας 50 Hz, με συνέπεια τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία να θεωρούνται αναπόφευκτα περιβαλλοντικοί παράγοντες κάτι που οδήγησε μοιραία τους διεθνείς οργανισμούς προστασίας της ανθρώπινης υγείας να συνεργαστούν, ώστε να εξασφαλίσουν την προστασία των ανθρώπων έναντι των πεδίων αυτών. Αρχικά, υπό την μορφή συστάσεων και εν συνεχεία διαμορφώνοντας πρότυπα ασφαλείας, με βάσει την βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη έκθεση του κοινού, παρέχονται κατευθυντήριες γραμμές τόσο για τα επίπεδα αναφοράς των πεδίων όσο και για τον τρόπο που θα ελεγχθεί η συμμόρφωση με αυτά. Σε ορισμένες περιπτώσεις όπου δεν μπορεί να διαπιστωθεί η τήρηση των ορίων ασφαλείας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, η ανάγκη παρέκτασης των μετρούμενων τιμών σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης γίνεται επιτακτική.

Επιπλέον, στην παρούσα εργασία παρατίθενται κάποια παραμετρικά στοιχεία για τις εναέριες και υπόγειες γραμμές, που επηρεάζουν άμεσα την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και την μαγνητική επαγωγή.

Τέλος, περιλαμβάνονται πίνακες μετρήσεων της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης, οι οποίες διεξήχθησαν αντίστοιχα στις περιοχές του Πολυτεχνείου και της Καρύστου, και γίνεται μια προσπάθεια ερμηνείας των τελικών αποτελεσμάτων.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία Χαμηλής Συχνότητας, Εναέριες Γραμμές Ηλεκτρικής Ενέργειας, Υπόγεια Καλώδια, Επίπεδα Αναφοράς, Πρότυπα Ασφαλείας, Παρέκταση Μετρούμενων Τιμών, Νόμος των Biot-Savart

## **ABSTRACT**

From the electrical energy transmission and distribution systems to the household appliances we have the creation of electromagnetic fields of low frequency 50 Hz, as a result electric and magnetic fields are considered environmental factors which led inevitably the international organizations for the protection of human health to ensure the protection of people against these fields. Initially, in the form of recommendations and subsequently by formulating safety standards, based on short-term or long-term public exposure, guidelines are provided for both field reference levels and how their compliance will be monitored. In some cases where the compliance of safety limits cannot be confirmed as in actual operational conditions, the need to extrapolate the measured values to conditions of maximum loading becomes imperative.

Additionally, in this thesis, some parametric elements for the overhead and underground lines, which directly affect the electric field intensity and the magnetic induction, are listed.

Finally, tables of measurements of the magnetic induction and the intensity of the electric field on medium and high voltage lines, that were carried out in the areas of the NTUA and Karystos respectively, are included and an attempt is made to interpret the final results.

## **KEYWORDS**

Low Frequency Electromagnetic Fields, Overhead Power Lines, Underground Cables, Reference Levels, Safety Standards, Extrapolation of Measured Values, Biot-Savart's law

*Ευχαριστίες:*

*Στον Καθηγητή κ. Ιωάννη Γκόνο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε να μου αναθέσει το παρόν θέμα αλλά και για την επιστημονική του συνδρομή στην εργασία μου.*

*Στην Δρ. Ελένη Νικολοπούλου για τις διορθώσεις που έκανε στο στάδιο συγγραφής της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων που συνέβαλαν στην διεξαγωγή των μετρήσεων.*

*Σε όλους τους καλούς ανθρώπους που βρέθηκαν στο δρόμο μου καθ' όλη την ακαδημαϊκή μου πορεία.*



# Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract	7
Περιεχόμενα	9
<b>1) Εισαγωγή</b>	<b>12</b>
1.1 Χαρακτηριστικά Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων	12
1.1.1 Διαφορετικές μορφές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	12
1.1.2 Ιοντίζοντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και μη ιοντίζουσα ακτινοβολία	13
1.1.3 Κύριες πηγές πεδίων χαμηλών, μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων	13
1.1.4 Στατικά πεδία και τα χρονομεταβλητά πεδία	13
1.2 Τυπικά επίπεδα έκθεσης στο σπίτι και το περιβάλλον	14
1.2.1 Ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι	14
1.3 Κανονισμοί προστασίας έναντι των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων	18
1.3.1 Ιστορική αναδρομή	18
1.3.2 Σκοπός των προτύπων	19
1.3.3 Έκθεση του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων	21
1.3.3.1 Βιολογικές επιδράσεις	21
1.3.3.2 Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς για την έκθεση του κοινού- Ρεύμα επαφής και ρεύμα άκρων	21
1.3.3.3 Έκθεση σε πηγές με πολλαπλές συχνότητες	23
1.3.4 Αρμόδιες Υπηρεσίες και έλεγχος συμμόρφωσης με τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας	24
1.4 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία και γραμμές μεταφοράς	25
1.4.1 Χρονική μεταβολή των πεδιακών εντάσεων	25
1.4.2 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, διατάξεις αγωγών και φάσεων και παράγοντες που επηρεάζουν το πεδίο	26
1.4.3 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ανάγκη δημιουργίας νέων γραμμών	38
1.4.3.1 Επιπτώσεις από την καθυστέρηση κατασκευής νέων γραμμών	39
<b>2) Μαγνητικά πεδία που παράγονται από δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας</b>	<b>41</b>
2.1 Ιστορικό υπόβαθρο	41
2.2 Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος που δημιουργούνται από ζεύξεις ισχύος γραμμών-Αναφορά στους παράγοντες που τα επηρεάζουν	41

2.2.1	Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος που δημιουργούνται από εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας	42
2.2.1.1	Επιρροή των σταθερών ή εξαρτώμενων από το σχεδιασμό παραμέτρων σε εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας	42
2.2.1.2	Επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στο μαγνητικό πεδίο σε εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας	43
2.2.2	Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος που δημιουργούνται από υπόγεια καλώδια	45
2.2.2.1	Επιρροή των σταθερών ή εξαρτώμενων από το σχεδιασμό παραμέτρων σε υπόγεια καλώδια	45
2.2.3	Μη ομοιομορφία μαγνητικών πεδίων συχνότητας ισχύος	51
<b>3)</b>	<b>Μετρήσιμα όρια έκθεσης και οι αντίστοιχες συνθήκες φόρτισης αναφοράς</b>	<b>53</b>
3.1	Μετρήσιμα όρια έκθεσης σύμφωνα με τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις	53
3.1.1	Συνθήκες φόρτισης αναφοράς για παρέκταση μετρήσεων μαγνητικού πεδίου	55
3.1.2	Σχετικοί ορισμοί ρεύματος αναφοράς	56
3.1.2.1	Ονομαστικό ρεύμα	56
3.1.2.2	Μέγιστο ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας	57
3.1.2.3	Τιμή P95	57
3.2	Μετρήσιμα όρια έκθεσης σύμφωνα με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις	57
3.2.1	Συνθήκες φόρτισης αναφοράς για την παρέκταση των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου	60
3.2.2	Ρεύμα αναφοράς	60
3.2.2.1	Πρακτική των ΗΠΑ	60
3.2.2.2	Πρακτική στην Ιταλία	61
3.2.3	Στατιστικές μετρήσεις για μακροπρόθεσμη έκθεση	61
3.2.3.1	Μέση τιμή	61
3.2.3.2	Διάμεση Τιμή	62
3.2.3.3	P95 τιμή	62
<b>4)</b>	<b>Απαιτήσεις των διαδικασιών μέτρησης όσον αφορά τις ανάγκες παρέκτασης</b>	<b>63</b>
4.1	Βασικές έννοιες για τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου	63
4.1.1	Βασικές απαιτήσεις σχετικά με τις μετρήσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	64
4.1.2	Πρόσθετες συστάσεις σχετικά με τις μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	64
4.2	Απαιτήσεις διαδικασιών μέτρησης, για έλεγχο συμμόρφωσης, με μετρήσιμα όρια εκφραζόμενα σε στιγμιαίες RMS τιμές	65

4.2.1	Απαιτήσεις σχετικά με τις ανάγκες παρέκτασης	65
4.3	Απαιτήσεις διαδικασιών μέτρησης που αποσκοπούν στον έλεγχο της συμμόρφωσης με μετρήσιμα όρια εκφρασμένα σε στατιστικές τιμές	66
4.3.1	Απαιτήσεις σχετικά με τις ανάγκες παρέκτασης	67
<b>5)</b>	<b>Εφαρμογές παρέκτασης σε Γαλλία, Ιταλία και Ηνωμένες Πολιτείες</b>	<b>68</b>
5.1	Η περίπτωση της Γαλλίας	68
5.1.1	Νομοθετικό πλαίσιο: Όρια έκθεσης σε Γαλλία	68
5.1.2	Νομοθετικό Πλαίσιο: Ενημέρωση του κοινού	69
5.1.3	Απαιτήσεις μετρήσεων και μέθοδος παρέκτασης	70
5.2	Η περίπτωση της Ιταλίας	71
5.3	Ηνωμένες Πολιτείες	72
<b>6)</b>	<b>Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης</b>	<b>74</b>
6.1	Σκοπός των μετρήσεων	74
6.2	Μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων	76
6.3	Σημεία μέτρησης-Περιγραφή	76
6.3.1	Μετρήσεις σε γραμμή Μέσης Τάσης 20kV	76
6.3.2	Μετρήσεις σε Γραμμή Υψηλής τάσης διπλού κυκλώματος 150kV	78
6.4	Παρατηρήσεις επί των μετρήσεων	87
	<b>Παράρτημα</b>	<b>91</b>
A	Αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία	91
B	Αρμονικές-χρόνου του πεδίου	92
Γ	Μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από ζεύξεις ισχύος	93
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>95</b>

# 1) Εισαγωγή

## 1.1 Χαρακτηριστικά Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

Όπως είναι ευρέως γνωστό, τα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται από διαφορά δυναμικού: όσο υψηλότερη είναι η τάση, τόσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του πεδίου που δημιουργείται. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) μετριέται σε βόλτ ανά μέτρο (V/m). Ένα φορτίο ή ένας φορτισμένος αγωγός παράγουν ακτινικό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από τις πηγές του. Οι γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παράγουν ηλεκτρικά πεδία, η ένταση των οποίων μειώνεται όταν συναντούν κτίρια, βλάστηση κλπ.

Ένας ρευματοφόρος αγωγός παράγει μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει κάθετες δυναμικές γραμμές ομόκεντρους κύκλους με κέντρο τον ίδιο τον αγωγό. Προφανώς όσο υψηλότερη είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος τόσο μεγαλύτερο θα είναι το μαγνητικό πεδίο. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου μετράται σε αμπέρ ανά μέτρο (A/m). Ωστόσο, σε διεθνή πρότυπα μετρήσεων ο ορισμός του μαγνητικού πεδίου (IEC -IEV 121-11-69) είναι συνώνυμος με την πυκνότητα μαγνητικής ροής (IEV 121-11-19) εκφραζόμενη σε μικροτέσλα (μΤ).

Σε μια ηλεκτρική συσκευή υπάρχει πάντοτε ένα ηλεκτρικό πεδίο ακόμα κι αν δεν διαρρέεται από ρεύμα, ενώ όταν κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα η ένταση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την κατανάλωση ισχύος, ωστόσο η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει σταθερή [1].

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

Πίνακας 1.1: Γενικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου [1]

### 1.1.1 Διαφορετικές μορφές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Τα κύρια χαρακτηριστικά που ορίζουν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι η συχνότητά του και το αντίστοιχο μήκος κύματος. Τα πεδία σε διαφορετικό φάσμα συχνοτήτων έχουν διαφορετικές

επιδράσεις στο ανθρώπινο σώμα. Μπορούμε να φανταστούμε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα σαν μια σειρά από κύματα, τα οποία "ταξιδεύουν" με την ταχύτητα του φωτός. Η συχνότητα εκφράζει τον αριθμό των ταλαντώσεων ή κύκλων ανά δευτερόλεπτο, ενώ το μήκος κύματος εκφράζει την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κυμάτων. Συνεπώς, η συχνότητα και το μήκος κύματος είναι μεγέθη αλληλοεξαρτώμενα δηλαδή όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα, τόσο μικρότερο θα είναι το μήκος κύματος.

### **1.1.2 Ιοντίζοντα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και μη ιοντίζουσα ακτινοβολία**

Το μήκος κύματος και η συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων καθορίζουν ένα σημαντικό χαρακτηριστικό τους: Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται από σωματίδια που λέγονται κβάντα εκ των οποίων αυτά που είναι υψηλότερης συχνότητας και άρα μικρότερου μήκους κύματος μεταφέρουν περισσότερη ενέργεια από ότι τα χαμηλόσυχνα πεδία με μεγαλύτερο μήκος κύματος. Έτσι, κάποια ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας ανά κβάντο, ώστε να καταστεί δυνατόν να διασπάσουν τους δεσμούς μεταξύ των μορίων.

Τα πεδία των οποίων τα κβάντα δεν επαρκούν ώστε να διασπάσουν τους μοριακούς δεσμούς καλούνται "μη ιοντίζουσα ακτινοβολία". Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, τα κέντρα εκπομπής ραδιοκυμάτων όπως οι πηγές μετάδοσης ραδιοκυμάτων μπαίνουν στην κατηγορία του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μεγάλα μήκη κύματος και χαμηλές συχνότητες, που τα κβάντα τους δεν μπορούν να διασπάσουν τους χημικούς δεσμούς μεταξύ των μορίων [1].

### **1.1.3 Στατικά πεδία και χρονομεταβλητά πεδία**

Το στατικό ηλεκτρικό πεδίο δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο δοθείσας μιας θέσης στον χώρο. Ένα παράδειγμα στατικού μαγνητικού πεδίου είναι το μαγνητικό πεδίο της γης. Ένας μαγνήτης δημιουργεί γύρω του ένα στατικό μαγνητικό πεδίο. Όμως, θα σταθούμε στα χρονομεταβλητά ηλεκτρομαγνητικά πεδία και συγκεκριμένα σε πεδία συχνότητας ισχύος (50 Hz-αργή χρονική μεταβολή στο χρόνο), όπου τη στιγμή  $t$  για ένα σημείο  $r$ , οι τιμές των πεδίων δίνονται από τον νόμο Biot-Savart.

### **1.1.4 Κύριες πηγές πεδίων χαμηλών, μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων**

Τα μεταβαλλόμενα με το χρόνο ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που παράγονται από τις ηλεκτρικές συσκευές, αποτελούν παραδείγματα πεδίων εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (ELF). Γενικά, τα πεδία ELF έχουν συχνότητες που φτάνουν μέχρι τα 300 Hz. Κάποια αντικείμενα τεχνολογίας παράγουν πεδία μεσαίων συχνοτήτων (IF) μεταξύ 300 Hz και 10 MHz, καθώς και πεδία ραδιοσυχνοτήτων (RF), με συχνότητες μεταξύ 10 MHz και 300 GHz.

Η ενέργεια που φέρουν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και η συχνότητα ταλάντωσης τους είναι δύο παράγοντες που συνυπολογίζονται στην διαμόρφωση των επιπέδων έκθεσης σε πεδία, καθώς ανάλογα με τις τιμές που λαμβάνουν τα πεδία επιδρούν διαφορετικά στο ανθρώπινο σώμα. Το κύκλωμα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και όλες οι συσκευές που λειτουργούν με ρεύμα αποτελούν τις κύριες πηγές πεδίων εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων (ELF). Οι οθόνες

των υπολογιστών, τα αντικλεπτικά συστήματα και τα συστήματα ασφαλείας αποτελούν τις κύριες πηγές πεδίων μεσαίων συχνοτήτων (IF).

Τέλος, το ραδιόφωνο, η τηλεόραση, τα ραντάρ, οι κεραιές των κινητών τηλεφώνων και οι φούρνοι μικροκυμάτων αποτελούν τις κύριες πηγές πεδίων ραδιοσυχνοτήτων (RF). Αυτά τα πεδία προκαλούν στο ανθρώπινο σώμα ρεύμα επαγωγής, το οποίο σε οριακές καταστάσεις μπορεί να προκαλέσει επιπτώσεις στο ανθρώπινο σώμα όπως άνοδο της θερμοκρασίας και ηλεκτροπληξία, που εξαρτάται από το πλάτος και την περιοχή συχνοτήτων τους. Ωστόσο, μια τέτοια περίπτωση είναι σπάνια μιας και για να υπάρξουν τέτοιες επιδράσεις, τα εξωτερικά πεδία θα πρέπει να είναι πολύ ισχυρά ισχυρότερα σε σχέση με ένα συνηθισμένο περιβάλλον [1].

## **1.2 Τυπικά επίπεδα έκθεσης στο σπίτι και το περιβάλλον**

Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις μέσα από καλώδια υψηλής τάσης. Με τους μετασχηματιστές στους εκάστοτε υποσταθμούς επιτυγχάνεται αλλαγή του επιπέδου της τάσης και για τοπική διανομή σε οικιστικές και εμπορικές περιοχές μείωση. Από τις εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και από τις ηλεκτρικές καλωδιώσεις και τις συσκευές στα σπίτια μας, προέρχονται τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο υποβάθρου που υπάρχουν στα σπίτια μας. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας (1 Hz – 100 kHz), όπως αυτά που παράγονται από δίκτυα ισχύος, παρουσιάζουν ένα πολύ ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ήτοι το ηλεκτρικό πεδίο σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο είναι ανεξάρτητα. Αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια των αγωγών και το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος εντός των αγωγών. Επομένως, το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από τα δίκτυα ισχύος εξαρτάται κυρίως από την τάση λειτουργίας του συστήματος, ενώ το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανεξάρτητο από την τάση λειτουργίας, εξαρτάται κυρίως από την κατάσταση φόρτισης του συστήματος.

Σε οικιστικές περιοχές που δεν βρίσκονται κοντά σε γραμμές μεταφοράς ρεύματος, το επίπεδο του πεδίου υποβάθρου ανέρχεται περίπου σε 0,2  $\mu\text{T}$ . Η πυκνότητα μαγνητικής ροής κοντά στο έδαφος ανέρχεται σε μερικά  $\mu\text{T}$ . Η τιμή της έντασης ηλεκτρικού πεδίου κάτω από τις γραμμές μεταφοράς μπορεί να φτάσει έως και 10 kV/m, που αποτελεί το ανώτερο όριο για ελεγχόμενη επαγγελματική έκθεση.

Ωστόσο, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μειώνονται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από τις γραμμές μεταφοράς. Σε απόσταση 50 με 100 μέτρα, τα πεδία κυμαίνονται σε κανονικό επίπεδο, όπως σε περιοχές μακριά από γραμμές υψηλής τάσης. Επιπροσθέτως, τα κτίρια φθίνουν σημαντικά το μέτρο των ηλεκτρικών πεδίων σε σχέση με τον εσωτερικό χώρο [1].

### **1.2.1 Ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι**

Συνδέοντας το καλώδιο μιας συσκευής στην πρίζα, δημιουργούνται ηλεκτρικά πεδία γύρω από αυτό. Το ηλεκτρικό πεδίο θα συνεχίσει να υπάρχει γύρω από το εντοιχισμένο ρευματοφόρο καλώδιο της πρίζας αν δεν βγάλουμε την πρίζα ή δεν κλείσουμε τον διακόπτη της πρίζας, παρά

το κλείσιμο του διακόπτη(απενεργοποιημένη συσκευή), αφού η τάση θα συνεχίσει να υφίσταται ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή μη ρεύματος στα καλώδια. Όσον αφορά τον εξοπλισμό για οικιακούς καταναλωτές, αυτός κατασκευάζεται για χαμηλή τάση λειτουργίας 220-230 Volt.

Τα μαγνητικά πεδία, που δημιουργούνται από εγκαταστάσεις ρευμάτων αγωγών καλωδίσεων, οι οποίες ακολουθούν συγκεκριμένους κανονισμούς λειτουργίας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, σε μεγάλο βαθμό αλληλοαναιρούνται.

Το μαγνητικό πεδίο σε ακτινική απόσταση  $r$  [m] από έναν ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$  [A] δίνεται από τη σχέση

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

ενώ για αγωγούς σε κοντινές αποστάσεις, το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών πεδίων των διαρρέομενων από αντίθετα ρεύματα αγωγών είναι μηδενικό (αλληλοαναιρούνται).

Σε λίγες περιπτώσεις ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που δεν πληρούν τα κριτήρια των κανονισμών υπάρχει η πιθανότητα λόγω λανθασμένης συνδεσμολογίας ουδέτερου αγωγού ή του αγωγού γείωσης ή ακόμα και λόγω διαρροής ρεύματος, να δημιουργηθούν μεγάλα μαγνητικά πεδία στο γύρω από τις καλωδίσεις. Συνεπώς, οι μεγάλες τιμές μαγνητικών πεδίων σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι επακόλουθο λανθασμένης ηλεκτρολογικής συνδεσμολογίας, που ενδεχομένως να υποκρύπτει κινδύνους ηλεκτροπληξίας στους χρήστες της εγκατάστασης [2].

Τα ισχυρότερα ηλεκτρικά πεδία συχνοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας που απαντώνται στο περιβάλλον σε κανονικές συνθήκες βρίσκονται κάτω από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Αντιθέτως, τα ισχυρότερα μαγνητικά πεδία σε επίπεδα συχνοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται συνήθως πολύ κοντά σε κινητήρες και άλλες ηλεκτρικές συσκευές, καθώς και σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, όπως σαρωτές μαγνητικού συντονισμού που χρησιμοποιούνται σε συστήματα ιατρικής απεικόνισης.

Οι ηλεκτρικές συσκευές (εν λειτουργία) παράγουν μαγνητικά πεδία στο περιβάλλον τους. Τα πεδία αυτά εξασθενούν ταχύτατα με την αύξηση της απόστασης από την συσκευή και γι' αυτόν τον λόγο αρχίζουμε να μετράμε την επιρροή του μαγνητικού πεδίου στον άνθρωπο σε αποστάσεις μικρότερες του 1m. Το πεδίο σε επαφή με τη συσκευή μπορεί να ανέλθει μέχρι εκατοντάδες  $\mu T$ .

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ανιχνεύσιμο κοντά σε συσκευές, εφόσον βρίσκονται υπό τάση και οι τιμές του είναι της τάξης των 0,01kV/m, που σημαίνει ότι λαμβάνει εξαιρετικά χαμηλές τιμές σε σχέση με τα όρια των 5kV/m, που θέτει η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελληνική νομοθεσία.

Η έκθεση των ανθρώπων σε μαγνητικό πεδίο προερχόμενο από οικιακές συσκευές στην πλειοψηφία των περιπτώσεων λαμβάνει χώρα σε αποστάσεις αρκετά μεγαλύτερες των προκαθορισμένων ορίων έκθεσης με εξαίρεση να αποτελούν ορισμένες συσκευές που κατά τη χρήση τους βρισκόμαστε αναπόφευκτα κοντά τους, π.χ. οι ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές και τα σεσουάρ για τα μαλλιά. Όμως σε αυτές τις περιπτώσεις, έμφαση δίνεται στο χρονικό διάστημα χρήσης των προαναφερθέντων συσκευών και άρα του χρόνου έκθεσης στο πεδίο, το οποίο είναι μικρό. Επιπλέον, η έκθεση στο πεδίο των συσκευών αυτών εστιάζεται τοπικά σε μια πολύ μικρή περιοχή του σώματος, ενώ η σύζευξη του πεδίου με το σώμα είναι εξαιρετικά

ασθενής. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν τις ειδικές αυτές συνθήκες έκθεσης στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν είναι δυνατόν να ξεπεραστούν οι βασικοί περιορισμοί τοπικής έκθεσης, αν και μπορεί να υπάρχει υπέρβαση των επιπέδων αναφοράς που αναφέρθηκαν [1].

Τα πραγματικά επίπεδα έκθεσης διαφοροποιούνται ανάλογα με το μοντέλο της συσκευής και την απόσταση από αυτήν.

Ηλεκτρική Συσκευή	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)
ΣΤΕΡΕΟΦΩΝΙΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ	180
ΣΙΔΕΡΟ	120
ΨΥΓΕΙΟ	120
ΜΙΞΕΡ	100
ΤΟΣΤΙΕΡΑ	80
ΠΙΣΤΟΛΑΚΙ ΜΑΛΛΙΩΝ	80
ΕΓΧΡΩΜΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	60
ΚΑΦΕΤΙΕΡΑ	60
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΚΟΥΠΑ	50
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΦΟΥΡΝΟΣ	8
ΛΑΜΠΑ ΦΩΤΙΣΜΟΥ	5
<b>Τιμή ορίου σύμφωνα με τις οδηγίες</b>	<b>5000</b>

Πίνακας 1.2: Τυπικές τιμές ισχύος ηλεκτρικών πεδίων μετρημένες κοντά σε οικιακές συσκευές (σε απόσταση 30 εκ.) [1]

Ηλεκτρική συσκευή	Απόσταση 3cm (μΤ)	Απόσταση 30cm (μΤ)	Απόσταση 1m (μΤ)
ΠΙΣΤΟΛΑΚΙ ΜΑΛΛΙΩΝ	<b>6-2000</b>	0,01-7	0,01-0,03
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΞΥΡΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ	<b>15-1500</b>	0,08-9	0,01-0,03
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΚΟΥΠΑ	200-800	<b>2-20</b>	0,13-2
ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ	40-400	<b>0,5-2</b>	0,02-0,25
ΦΟΥΡΝΟΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ	73-200	<b>4-8</b>	0,25-0,6
ΦΟΡΗΤΟ ΡΑΔΙΟΦΩΝΟ	16-56	<b>1</b>	<0,01
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΦΟΥΡΝΟΣ	1-50	<b>0,15-0,5</b>	0,01-0,04
ΠΛΥΝΤΗΡΙΟ	0,8-50	<b>0,15-3</b>	0,01-0,15
ΣΙΔΕΡΟ	8-30	<b>0,12-0,3</b>	0,01-0,03
ΠΛΥΝΤΗΡΙΟ ΠΙΑΤΩΝ	3,5-20	<b>0,6-3</b>	0,07-0,3
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ	0,5-30	<b>&lt;0,01</b>	
ΨΥΓΕΙΟ	0,5-1,7	<b>0,01-0,25</b>	<0,01
ΕΓΧΡΩΜΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	2,5-50	0,04-2	<b>0,01-0,15</b>

Πίνακας 1.3: Ένταση μαγνητικού πεδίου ηλεκτρικών συσκευών σε αποστάσεις 3cm, 30cm, 1m Από την Ομοσπονδιακή υπηρεσία για την ασφάλεια από την ακτινοβολία, Γερμανία 1999 (Η φυσιολογική απόσταση λειτουργίας δίνεται με έντονους χαρακτήρες) [1]



Συσκευή	Απόσταση 3cm ( $\mu\text{T}$ )	Απόσταση 30cm ( $\mu\text{T}$ )	Απόσταση 1m ( $\mu\text{T}$ )
ΞΥΡΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ	10-900	0,05-9	0,01-0,2
ΣΕΣΟΥΑΡ ΜΑΛΛΙΩΝ	8-800	0,01-7	0,01-0,03
ΛΑΜΠΤΗΡΑΣ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ	40-400	0,5-2	0,02-0,25
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΟΥΖΙΝΑ	1-50	0,15-0,5	0,01-0,04
ΦΟΥΡΝΟΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ	5-100	0,4-8	0,15-0,5
ΨΥΓΕΙΟ	0,5-1,7	0,01-0,3	0,01-0,05
ΠΛΥΝΤΗΡΙΟ ΡΟΥΧΩΝ	0,8-40	0,15-3	0,01-0,15
ΠΛΥΝΤΗΡΙΟ ΠΙΑΤΩΝ	1-15	0,2-2	0,07-0,3
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΙΔΕΡΟ	3-30	0,14-0,3	0,01-0,03
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΣΚΟΥΠΑ	60-500	0,8-12	0,08-0,8
ΦΟΡΗΤΟ ΡΑΔΙΟΦΩΝΟ	1-15	0,4-1,5	0,01-0,1
ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	2-80	0,04-8	0,01-0,9
ΒΙΝΤΕΟΚΑΜΕΡΑ	0,6-20	0,7-2,5	0,01-0,03
ΦΩΤΟΤΥΠΙΚΟ	0,6-40	0,1-2,7	0,01-0,3
ΣΥΣΚΕΥΗ ΦΑΞ	0,4-1,5	0,01-0,2	0,01-0,02
ΟΘΟΝΗ Η/Υ	1-60	0,02-5	0,01-0,6
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΤΡΥΠΑΝΙ	4-200	0,2-3,3	0,01-0,8

Πίνακας 1.4:Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από κοινές ηλεκτρικές συσκευές που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο.(Οι αναφερόμενες τιμές αναγράφονται στην διεθνή βιβλιογραφία και έχουν επιβεβαιωθεί από μετρήσεις του γραφείου Μη Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας) [2]

Τονίζουμε ξανά ότι οι πίνακες 1.3 έως 1.4 επαληθεύουν τα όσα προαναφέρθηκαν: Η ένταση του μαγνητικού πεδίου γύρω από όλες τις συσκευές μειώνεται εκθετικά όσο απομακρυνόμαστε από αυτές. Επίσης, οι περισσότερες οικιακές συσκευές δεν χρησιμοποιούνται σε μικρή απόσταση (πχ.3 cm) από το σώμα. Σε απόσταση 30 εκατοστών, τα μαγνητικά πεδία που περιβάλλουν τις περισσότερες οικιακές συσκευές είναι πάνω από 100 φορές χαμηλότερα από το όριο των 100  $\mu\text{T}$ (επίπεδο αναφοράς),που ορίζει η ευρωπαϊκή ένωση για συχνότητα 50 Hz(83  $\mu\text{T}$  στα 60 Hz)και ακόμα μικρότερα σε απόσταση 1m και προφανώς για αποστάσεις μεγαλύτερες του 1 m οι τιμές είναι αμελητέες.



Σχήμα 1.1: Διακύμανση της μαγνητικής επαγωγής σε οικιακές ηλεκτρικές συσκευές ανάλογα με την απόσταση και το είδος της ηλεκτρικής συσκευής [2]

### **1.3 Κανονισμοί προστασίας έναντι των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων**

#### **1.3.1 Ιστορική αναδρομή**

Το 1977 η Διεθνής Εταιρεία Προστασίας έναντι Ακτινοβολίας (IRPA) σχημάτισε τη Διεθνή Επιτροπή Προστασίας έναντι μη Ιονίζουσας Ακτινοβολίας (INIRC). Η επιτροπή αυτή σε συνεργασία με το Περιβαλλοντικό Τμήμα της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας (WHO) δημοσίευσε το 1990 την εργασία "Προσωρινή οδηγία ορίων για την έκθεση σε ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο 50/60 Hz", η οποία εκπονήθηκε σε χρονικό διάστημα άνω των δέκα ετών, σε συνεργασία φορέων επιφορτισμένων με την προστασία της ανθρώπινης υγείας οι οποίοι στάθμισαν όλα τα επιδημιολογικά και εργαστηριακά δεδομένα σχετικά με την ενδεχόμενη επίπτωση των πεδίων συχνότητας 50/60 Hz στην υγεία. Στα πλαίσια της αρμοδιότητας αυτής η επιτροπή στη σύνοδο της 7 έως 12 Μαΐου 1993 εξέτασε τις πρόσθετες επιστημονικές εργασίες. Μετά τη στάθμιση όλων των σχετικών εργασιών η επιτροπή επαναβεβαίωσε στις 12.5.1993 την ισχύ της οδηγίας του 1990 και τα επιτρεπόμενα όρια εκθέσεως σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία βάσει της οδηγίας αυτής.

Το 1997 ολοκληρώθηκε η οδηγία της ICNIRP "Οδηγία για όρια εκθέσεως σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία", η οποία δημοσιεύθηκε τον Απρίλιο 1998. Για την εκπόνηση της οδηγίας αυτής εξετάστηκαν και σταθμίστηκαν επιπρόσθετα και όλες οι νεότερες σχετικές ερευνητικές εργασίες. Στην οδηγία αυτή, χωρίς τον

περιορισμό "προσωρινή οδηγία", παραμένουν αμετάβλητα τα όρια της προσωρινής οδηγίας του 1990 (5 kV/m και 100 μT για συνεχή έκθεση κοινού και 10kV/m και 500 μT για την επαγγελματική απασχόληση).

Τον Ιανουάριο του 1995 δημοσιεύθηκε το Προσωρινό Ευρωπαϊκό Πρότυπο της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης (CENELEC). Για την εκπόνηση του προτύπου αυτού, το οποίο ισχύει και στη Ελλάδα ως πρότυπο ΕΛΟΤ συνεργάστηκαν οι χώρες: Ελλάδα, Αυστρία, Βέλγιο, Γαλλία, Γερμανία, Δανία, Ελβετία, Ηνωμένο βασίλειο, Ιρλανδία, Ισλανδία, Ισπανία, Ιταλία, Λουξεμβούργο, Ολλανδία, Πορτογαλία, Σουηδία και Φιλανδία.

Το Δεκέμβριο του 1996 δημοσιεύθηκε το γερμανικό ομοσπονδιακό διάταγμα, στο οποίο θεσμοθετούνται τα επιτρεπόμενα όρια για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο για τη συνεχή έκθεση του κοινού. Τα όρια αυτά συμπίπτουν με τα όρια της οδηγίας.

Το 1999 δημοσιεύθηκε η σύσταση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, στην οποία υιοθετούνται τα όρια της οδηγίας.

Κανονισμοί Προστασίας	Όρια Πεδιακών Εντάσεων				Περιοχή			
	Με ελεγχόμενη παραμονή κοινού		Ελεγχόμενη επαγγελματική απασχόληση					
	E kV/m	B μT	E kV/m	B μT				
ΠΡΟΣΩΡΙΝΗ ΟΔΗΓΙΑ IRPA/INIRC 1990, ΟΔΗΓΙΑ ICNIRP 1998	5	100	10	500				
ΒΡΕΤΑΝΙΚΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ NRPB 1993	12	1600	12	1600				
CENELEC ENV 50166-1 1995	10	640	30	1600				

Πίνακας 1.5: Όρια πεδιακών εντάσεων στους κανονισμούς προστασίας των ανθρώπων έναντι ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων συχνότητας 50 Hz, για συνεχή έκθεση του κοινού και για έκθεση κατά την επαγγελματική απασχόληση [4].

Τα παραπάνω όρια εντάσεων των ηλεκτρικών και των μαγνητικών πεδίων στους κανονισμούς δεν είναι και όρια επικινδυνότητας, αλλά εμπεριέχουν πολύ μεγάλους συντελεστές ασφαλείας, ώστε να καλύπτονται οι ασάφειες από την περιορισμένη γνώση που υπάρχει σχετικά με την επίδραση των πεδίων και να πληρούται η απαίτηση για πρόληψη δυσμενών επιπτώσεων. Επομένως, υπάρχουν αποκλίσεις μεταξύ των οριακών τιμών των κανονισμών, επειδή οι συντελεστές ασφαλείας δεν είναι κοινοί για όλους τους κανονισμούς [4].

### **1.3.2 Σκοπός των προτύπων**

Σκοπός των προτύπων είναι η προστασία της ανθρώπινης υγείας. Έχουν καθιερωθεί πρότυπα για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, με σκοπό τον περιορισμό της υπέρβασης του ορίου έκθεσης σε αυτά που υπάρχουν στο περιβάλλον μας.

Οι ίδιες οι χώρες θέτουν τα δικά τους εθνικά όρια για την έκθεση στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ωστόσο, η πλειοψηφία αυτών των εθνικών προτύπων βασίζεται στις οδηγίες που ορίζονται από τη Διεθνή επιτροπή προστασίας από τη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection-ICNIRP).

	Συχνότητα ηλεκτρικού ρεύματος στην Ευρώπη		Συχνότητα σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας		Συχνότητα φούρνων μικροκυμάτων
	50 Hz	50 Hz	900 MHz	1,8 GHz	2,45 GHz
<b>Μετρούμενο μέγεθος</b>	Ηλεκτρικό πεδίο(V/m)	Μαγνητικό πεδίο(μΤ)	Πυκνότητα ισχύος(W/m <sup>2</sup> )	Πυκνότητα ισχύος (W/m <sup>2</sup> )	Πυκνότητα ισχύος (W/m <sup>2</sup> )
<b>Όρια έκθεση του κοινού</b>	5.000	100	4,5	9	10
<b>Όρια επαγγελματικής έκθεσης</b>	10.000	500	22,5	45	

Πίνακας 1.6: Σύνοψη των οδηγιών σχετικά με την έκθεση για τους τρεις τομείς στους οποίους εστιάζονται οι ανησυχίες του κοινού: ηλεκτρισμός στο σπίτι, σταθμοί βάσης της κινητής τηλεφωνίας και φούρνοι μικροκυμάτων. (Διεθνής επιτροπή προστασίας από τη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία, οδηγίες σχετικά με τα ΗΜΠ, έκδοση Health Physics 74, 494-522 (1998)) [1]

Πηγή	Τυπική μέγιστη έκθεση για το ευρύ κοινό	
	Ηλεκτρικό πεδίο (V/m)	Πυκνότητα μαγνητικής ροής (μΤ)
ΦΥΣΙΚΑ ΠΕΔΙΑ	200	70(μαγνητικό πεδίο γης)
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΣΕ ΣΠΙΤΙΑ, ΟΧΙ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ)	100	0,2
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΕΓΑΛΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ)	10000	20
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΤΡΑΙΝΑ ΚΑΙ TRAM	300	50
ΤΗΛΕΟΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΘΟΝΕΣ (ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ)	10	0,7

	Τυπική μέγιστη έκθεση για το ευρύ κοινό(W/m <sup>2</sup> )
ΤΗΛΕΟΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΠΟΜΠΟΙ	0,1
ΣΤΑΘΜΟΙ ΒΑΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ	0,1
ΡΑΝΤΑΡ	0,2
ΦΟΥΡΝΟΙ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ	0,5

Πίνακας 1.7: Τυπικά μέγιστα επίπεδα έκθεσης στο σπίτι και το περιβάλλον- Ευρωπαϊκό Περιφερειακό Γραφείο του ΠΟΥ [1]

Οι οδηγίες συνιστούν την πρόληψη της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία σε επίπεδα στα οποία αρχίζουν να ανιχνεύονται αλλαγές στη συμπεριφορά. Αυτό το οριακό επίπεδο για τη συμπεριφορά δεν είναι ίσο με το όριο της οδηγίας. Η Διεθνής επιτροπή προστασίας από τη μη ιοντίζουσα ακτινοβολία χρησιμοποιεί το συντελεστή ασφάλειας 10 για να καταλήξει στα όρια επαγγελματικής έκθεσης, και το συντελεστή 50 (50 φορές χαμηλότερα από το οριακό επίπεδο) για να ορίσει την τιμή της οδηγίας για το ευρύ κοινό [1].

Τα επίπεδα αναφοράς είναι τα μετρούμενα μεγέθη του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου και προκύπτουν από τους βασικούς περιορισμούς θεωρώντας τις δυσμενέστερες συνθήκες σύζευξης των πεδίων με το σώμα. Η χρήση των επιπέδων αναφοράς εισάγει δηλαδή στην πράξη έναν επιπλέον συντελεστή ασφαλείας [2].

### **1.3.3 Έκθεση του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων**

#### **1.3.3.1 Βιολογικές επιδράσεις**

Είναι αδιαμφισβήτητο γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπερβαίνουν κάποια όρια μπορούν να έχουν βιολογικές επιδράσεις. Πειράματα με υγιείς εθελοντές κατέδειξαν ότι η βραχυχρόνια έκθεση στα επίπεδα που υπάρχουν στο περιβάλλον ή στο σπίτι δεν προκαλούν προφανείς βλαβερές επιδράσεις. Η έκθεση σε υψηλότερα επίπεδα που μπορεί να είναι επιβλαβή, περιορίζεται από εθνικές και διεθνείς οδηγίες. Στις μέρες μας, ο προβληματισμός έχει επικεντρωθεί στο εάν η μακροχρόνια έκθεση σε χαμηλά επίπεδα μπορεί να προκαλέσει βιολογικές αντιδράσεις και να επηρεάσει την ποιότητα της υγείας [1].

#### **1.3.3.2 Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς για την έκθεση του κοινού - Ρεύμα επαφής και ρεύμα άκρων**

Ανάλογα με τη συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα φυσικά μεγέθη, για τον προσδιορισμό των βασικών περιορισμών:

- α) Για πυκνότητες από 0 έως 1 Hz προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για την μαγνητική επαγωγή στατικών μαγνητικών πεδίων (0Hz) και για την πυκνότητα ρεύματος χρονικά μεταβαλλόμενων πεδίων έως 1Hz, για την πρόληψη επιπτώσεων στο καρδιαγγειακό και κεντρικό νευρικό σύστημα.
- β) Για συχνότητες από 1Hz έως 10MHz προβλέπονται βασικοί περιορισμοί για την πυκνότητα ρεύματος, για την πρόληψη επιπτώσεων σε λειτουργίες του νευρικού συστήματος.

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

Πίνακας 1.8: Βασικοί περιορισμοί για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων [3]

Οι παραπάνω βασικοί περιορισμοί έχουν θεσπιστεί έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψιν οι αβεβαιότητες που σχετίζονται με την ατομική ευαισθησία, τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς και το γεγονός ότι η ηλικία και η κατάσταση της υγείας τους κοινού ποικίλει.

Ο βασικός περιορισμός της πυκνότητας ρεύματος αποσκοπεί στην προστασία από οξείες επιπτώσεις της έκθεσης σε ΗΜΠ των ιστών του κεντρικού νευρικού συστήματος (ΚΝΣ) της κεφαλής και του σώματος και εμπεριέχει έναν παράγοντα ασφαλείας. Οι βασικοί περιορισμοί για τα πεδία ιδιαίτερα χαμηλών συχνοτήτων βασίζονται στις διαπιστευμένες δυσμενείς επιπτώσεις που έχουν στο ΚΝΣ. Οι οξείες αυτές επιπτώσεις είναι σχεδόν ακαριαίες και δεν υπάρχουν επιστημονικές ενδείξεις που να συνηγορούν υπέρ της αλλαγής των βασικών περιορισμών για τη βραχυχρόνια έκθεση. Επειδή όμως αυτοί αναφέρονται σε δυσμενείς επιπτώσεις στο κεντρικό νευρικό σύστημα, ο συγκεκριμένος βασικός περιορισμός μπορεί να επιτρέπει και μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος σε άλλους ιστούς του σώματος υπό τις ίδιες συνθήκες έκθεσης. Οι πυκνότητες ρεύματος εκφράζονται ως μέσος όρος επί διατομής εμβαδού  $1\text{cm}^2$  κάθετης προς τη διεύθυνση του ρεύματος, λόγω της ηλεκτρικής ανομοιομορφίας του σώματος.

Για συχνότητες έως  $100\text{kHz}$  οι τιμές κορυφής της πυκνότητας ρεύματος υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την ενεργό τιμή (rms) επί  $\sqrt{2}$ . Για παλμούς διάρκειας  $t_p$ , η αντίστοιχη συχνότητα που θα πρέπει να εφαρμοστεί στους βασικούς περιορισμούς υπολογίζεται με τον τύπο  $f=1/(2t_p)$ . Επίσης, για συχνότητες έως  $100\text{Hz}$  και για παλμικά μαγνητικά πεδία, η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που προκύπτει από τους παλμούς υπολογίζεται από το χρόνο ανόδου/καθόδου και το μέγιστο ρυθμό αλλαγής της μαγνητικής επαγωγής. Η πυκνότητα του επαγόμενου ρεύματος στη συνέχεια συγκρίνεται με τον αντίστοιχο βασικό περιορισμό [3].

Τα επίπεδα αναφοράς αποτελούν τα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων. Η τήρηση όλων των επιπέδων αναφοράς εξασφαλίζει την τήρηση των βασικών περιορισμών. Για τις τιμές κορυφής ισχύουν τα ακόλουθα επίπεδα αναφοράς για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E(\text{V/m})$ , την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H(\text{A/m})$  και τη μαγνητική επαγωγή  $B(\mu\text{T})$ .

Ζώνη συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου $E$ (V/m)	Ένταση Μαγνητικού Πεδίου $H$ (A/m)	Μαγνητική Επαγωγή $B$ ( $\mu\text{T}$ )
0-1Hz	-	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
1-8 Hz	10000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$
8-25 Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$
0.025-0.8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$
0.8-3 kHz	$250 / f$	5	6,25
3-150 kHz	87	5	6,25

Πίνακας 1.9: Επίπεδα αναφοράς για ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων (τιμές rms) [3]

Δεν ορίζεται τιμή έντασης ηλεκτρικού πεδίου για συχνότητες  $<1\text{ Hz}$ , που είναι στην πραγματικότητα στατικά ηλεκτρικά πεδία. Για τους περισσότερους ανθρώπους, η ενοχλητική αίσθηση επιφανειακών ηλεκτρικών φορτίων δεν γίνεται αντιληπτή σε πεδία με ένταση μικρότερη από  $25\text{kV/m}$ . Επίσης, δεν ορίζονται μεγαλύτερα επίπεδα αναφοράς για τη

βραχυχρόνια έκθεση σε πεδία ιδιαίτερα χαμηλών συχνοτήτων λόγω των βασικών περιορισμών που προαναφέραμε. Σε πολλές περιπτώσεις που οι μετρούμενες τιμές υπερβαίνουν τα επίπεδα αναφοράς, δεν υφίσταται κατ' ανάγκη και υπέρβαση του βασικού περιορισμού. Εφόσον αποφεύγονται οι δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία και τις έμμεσες επιδράσεις της έκθεσης, είναι παραδεκτή η υπέρβαση των γενικών επιπέδων αναφοράς για το κοινό αρκεί να μην παραβιάζεται και ο βασικός περιορισμός για τη πυκνότητα ρεύματος.

Σε πολλές περιπτώσεις που απαντώνται στην πράξη, η έκθεση σε εξωτερικά πεδία ιδιαίτερα χαμηλών συχνοτήτων στα επίπεδα αναφοράς επάγει πυκνότητες ρεύματος στο ΚΝΣ με τιμές χαμηλότερες από τους βασικούς περιορισμούς. Αναγνωρίζεται ακόμα ότι ένας αριθμός κοινών εμπορικών συσκευών εκπέμπουν τοπικά πεδία που οι τιμές τους υπερβαίνουν τα επίπεδα αναφοράς. Ωστόσο, γενικά η περίπτωση αυτή λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες έκθεσης όπου δεν παρουσιάζεται υπέρβαση των βασικών περιορισμών λόγω ασθενούς σύζευξης μεταξύ των πεδίων αυτών και του ανθρώπινου σώματος.

#### Ρεύμα επαφής και ρεύμα άκρων

Για συχνότητες έως 100kHz και προκειμένου να αποφευχθούν οι κίνδυνοι που οφείλονται σε ρεύματα επαφής, συνιστώνται πρόσθετα επίπεδα αναφοράς.

Ζώνη συχνοτήτων	Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα επαφής (mA)
0-2,5 kHz	0,5
2,5kHz-100kHz	0,2f

Πίνακας 1.10: Επίπεδα αναφοράς για ρεύματα επαφής από αγωγικά σώματα (f σε kHz) [3]

#### **1.3.3.3 Έκθεση σε πηγές με πολλαπλές συχνότητες**

##### Βασικοί περιορισμοί

Στην περίπτωση ταυτόχρονης έκθεσης σε πεδία διαφορετικών συχνοτήτων, πρέπει να πληρείται το ακόλουθο κριτήριο για τους βασικούς περιορισμούς. Για το φαινόμενο της ηλεκτρικής διέγερσης σε συχνότητα από 1Hz έως 100 kHz, οι πυκνότητες του ρεύματος εξ επαγωγής πρέπει να προστίθενται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{100\text{kHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1$$

$J_i$  είναι η πυκνότητα ρεύματος σε συχνότητα  $i$

$J_{L,i}$  είναι ο βασικός περιορισμός για την πυκνότητα ρεύματος σε συχνότητα  $i$

##### Επίπεδα αναφοράς

Για την εφαρμογή των βασικών περιορισμών, εφαρμόζονται τα ακόλουθα κριτήρια, όσον αφορά τα επίπεδα αναφοράς για τις εντάσεις των πεδίων. Για τις πυκνότητες ρεύματος εξ

επαγωγής και τα φαινόμενα ηλεκτρικών διεγέρσεων που προκαλούνται από αυτά και εξετάζονται σε συχνότητες έως 150kHz, πρέπει να εφαρμόζονται οι ακόλουθες δύο απαιτήσεις:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{150\text{kHz}} \frac{H_i}{H_{L,i}} \leq 1 \quad \sum_{i=1\text{Hz}}^{150\text{kHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} \leq 1$$

$E_i$  είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε συχνότητα  $i$ ,

$E_{L,i}$  είναι το επίπεδο αναφοράς για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε συχνότητα  $i$

$H_i$  είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου σε συχνότητα  $i$ ,

$H_{L,i}$  είναι το επίπεδο αναφοράς για την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε συχνότητα  $i$

Για το ρεύμα των άκρων και για το ρεύμα επαφής αντίστοιχα, θα πρέπει να εφαρμόζονται οι ακόλουθες δύο απαιτήσεις:

$$\sum_{k=10\text{Hz}}^{100\text{kHz}} \left( \frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1 \quad \sum_{n>1\text{Hz}}^{100\text{kHz}} \left( \frac{I_n}{I_{C,n}} \right)^2 \leq 1$$

$I_k$  είναι η τιμή του ρεύματος άκρων σε συχνότητα  $k$ ,

$I_{L,k}$  είναι το επίπεδο αναφοράς για το ρεύμα άκρων, 45 mA,

$I_n$  είναι η τιμή του ρεύματος επαφής σε συχνότητα  $n$

$I_{C,n}$  είναι το επίπεδο αναφοράς για το ρεύμα επαφής σε συχνότητα  $n$

#### **1.3.4 Αρμόδιες Υπηρεσίες και έλεγχος συμμόρφωσης με τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας**

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε.) και το Υπ. Υγείας και Πρόνοιας είναι υπεύθυνοι για την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες και παρέχουν σχετική πληροφόρηση σε κάθε ενδιαφερόμενο. Η Ε.Ε.Α.Ε. πραγματοποιεί μετρήσεις και ελέγχους και με εγκύκλιους της καθορίζει τη διαδικασία και τους όρους για την εξουσιοδότηση των εργαστηρίων που πραγματοποιούν μετρήσεις και προσδιορίζει τη μεθοδολογία μετρήσεων στις χαμηλές συχνότητες.

Η Ε.Ε.Α.Ε. μεριμνά για την οργάνωση και πραγματοποίηση εκπαιδευτικών προγραμμάτων κατάρτισης του προσωπικού όλων των ενδιαφερομένων φορέων σε θέματα προστασίας του κοινού από ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες.

Οι συναρμόδιες υπηρεσίες των υπουργείων υγείας και πρόνοιας, καθώς και η Ε.Ε.Α.Ε. συνεργάζονται για την αποτελεσματική παρακολούθηση των διεθνών εξελίξεων και την εκπόνηση ερευνητικών μελετών σε θέματα προστασίας της υγείας από την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών.



Η τήρηση των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων ελέγχεται περιοδικά ή οποτεδήποτε κριθεί απαραίτητο, μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων από αρμόδιες υπηρεσίες όπως το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, το Υπουργείο Υγείας και Πρόνοιας, οι Νομαρχιακές - Περιφερειακές αυτοδιοικήσεις και από την Ε.Ε.Α.Ε. ή από άλλα εξουσιοδοτημένα από την Ε.Ε.Α.Ε. συνεργεία. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανακοινώνονται χωρίς καθυστέρηση στους ενδιαφερόμενους και στην Ε.Ε.Α.Ε. η οποία είναι υπεύθυνη για την κατανομή και τον συντονισμό των διενεργούμενων μετρήσεων από τους άλλους αρμόδιους φορείς και τα εξουσιοδοτημένα συνεργεία.

Σε περίπτωση που η Ε.Ε.Α.Ε. διαπιστώσει από τις μετρήσεις υπέρβαση των ορίων ασφαλούς έκθεσης, ενημερώνει την Υπηρεσία που χορήγησε την άδεια εγκατάστασης, η οποία στη συνέχεια ειδοποιεί εγγράφως τον κάτοχο του εξοπλισμού να προβεί στις εξής ενέργειες:

- Άμεση διακοπή λειτουργίας του εν λόγω εξοπλισμού και άμεση γνωστοποίηση της διακοπής στην Υπηρεσία που χορήγησε την άδεια εγκατάστασης
- Επαναλειτουργία του εξοπλισμού μόνο μετά τη διόρθωση της βλάβης που προκάλεσε τη δυσλειτουργία.
- Έγγραφη γνωστοποίηση της επανάληψης λειτουργίας του εξοπλισμού στην υπηρεσία που χορήγησε την άδεια εγκατάστασης, η οποία συνοδεύεται με έκθεση των αιτιών που προκάλεσαν την δυσλειτουργία.

Τέλος, μετά την γνωστοποίηση της επαναλειτουργίας του εξοπλισμού, οι αρμόδιες υπηρεσίες προβαίνουν σε επανέλεγχο για να διαπιστωθεί η συμμόρφωση της εγκατάστασης με τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Εάν οποτεδήποτε διαπιστωθεί ξανά από τις αρμόδιες υπηρεσίες υπέρβαση των ορίων ασφαλούς έκθεσης, τότε ανακαλείται οριστικά η άδεια λειτουργίας του εν λόγω εξοπλισμού [3].

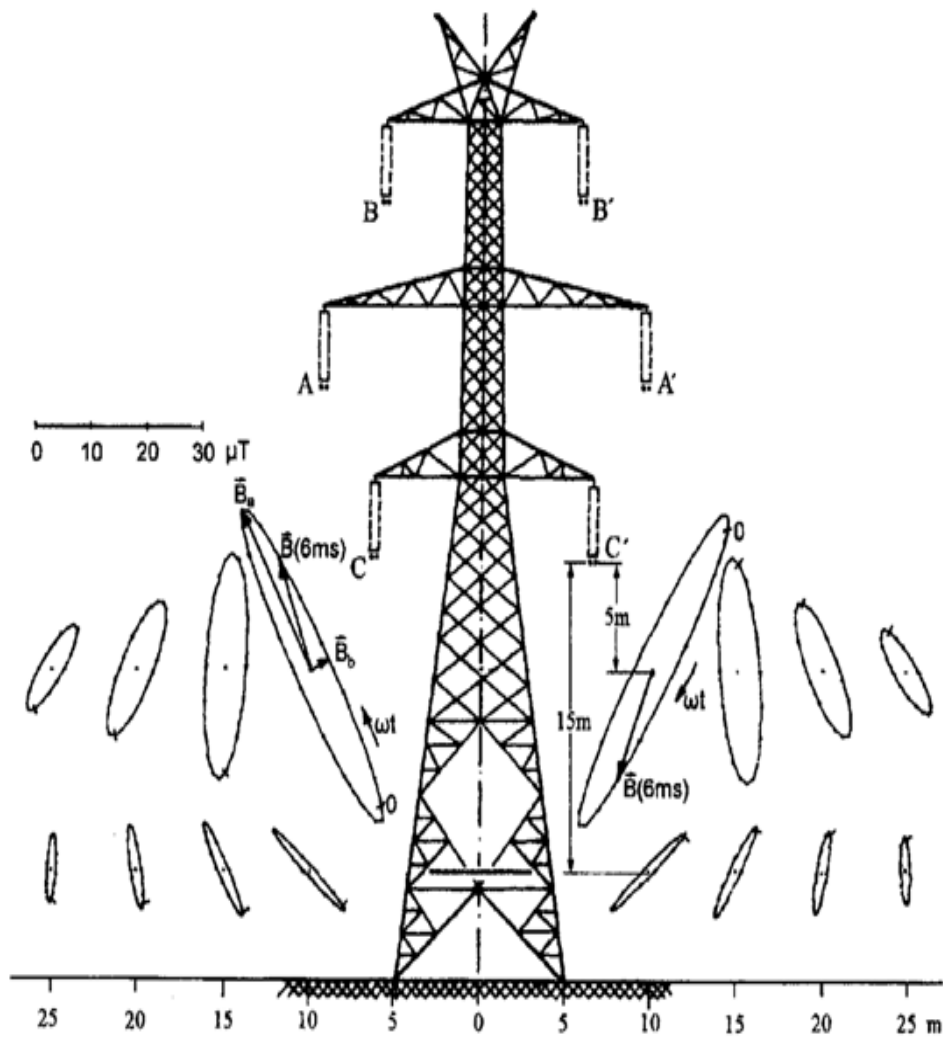
## **1.4 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

### **1.4.1 Χρονική μεταβολή των πεδιακών εντάσεων**

Τα μονοφασικά συστήματα τάσεων και εντάσεων δημιουργούν εναλλασσόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, αντίστοιχα. Ένα ή περισσότερα τριφασικά συστήματα δημιουργούν ένα στρεφόμενο ελλειπτικό ηλεκτρικό πεδίο και ένα στρεφόμενο ελλειπτικό μαγνητικό πεδίο. Τα στρεφόμενα διανύσματα των πεδιακών εντάσεων μεταξύ κέντρων και περιφερειών των ελλείψεων διαγράφουν πλήρεις τροχιές σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου (20 ms για την συχνότητα των 50Hz).

Από τους μεγάλους ημιάξονες  $B_a$  και  $E_a$  και τους μικρούς ημιάξονες  $B_b$  και  $E_b$  των ελλείψεων προκύπτουν τα χαρακτηριστικά μεγέθη των πεδίων όπως απεικονίζονται και στο Σχήμα 1.2:

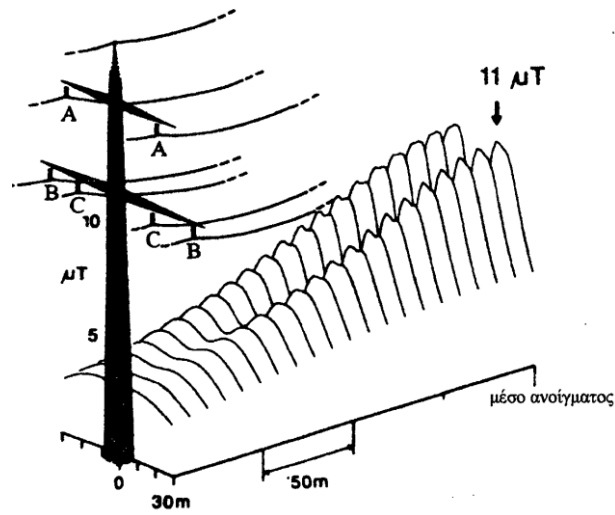
$$B = \sqrt{B_a^2 + B_b^2}, \quad E = \sqrt{E_a^2 + E_b^2}$$



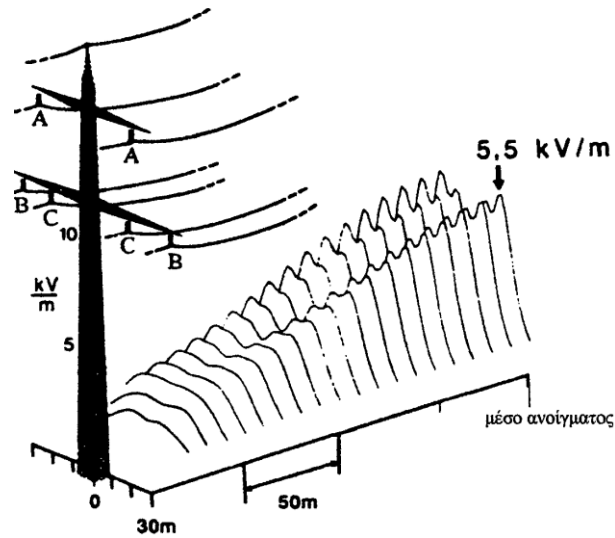
Σχήμα1.2: Στρεφόμενα διανύσματα μαγνητικής επαγωγής, γραμμής 400kVδιπλού κυκλώματος με φορτίο 1000A ανά κύκλωμα και φάση [4]

#### **1.4.2 Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, διατάξεις αγωγών και φάσεων και παράγοντες που επηρεάζουν το πεδίο**

Ακολουθεί μια σχηματική απεικόνιση της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο έδαφος κατά μήκος μιας διπλής γραμμής διέλευσης 380 kV. Η απόσταση μεταξύ των δύο πύργων (άνοιγμα) είναι 400 m. Το ύψος αναρτήσεως των κάτω αγωγών είναι 22m και στο μέσο του ανοίγματος η απόσταση των κάτω αγωγών από το έδαφος είναι 11m. Οι μέγιστες πεδιακές εντάσεις εμφανίζονται στο μέσο του ανοίγματος, όπου η απόσταση των αγωγών από το έδαφος αποκτά την μικρότερη τιμή της.



(α)



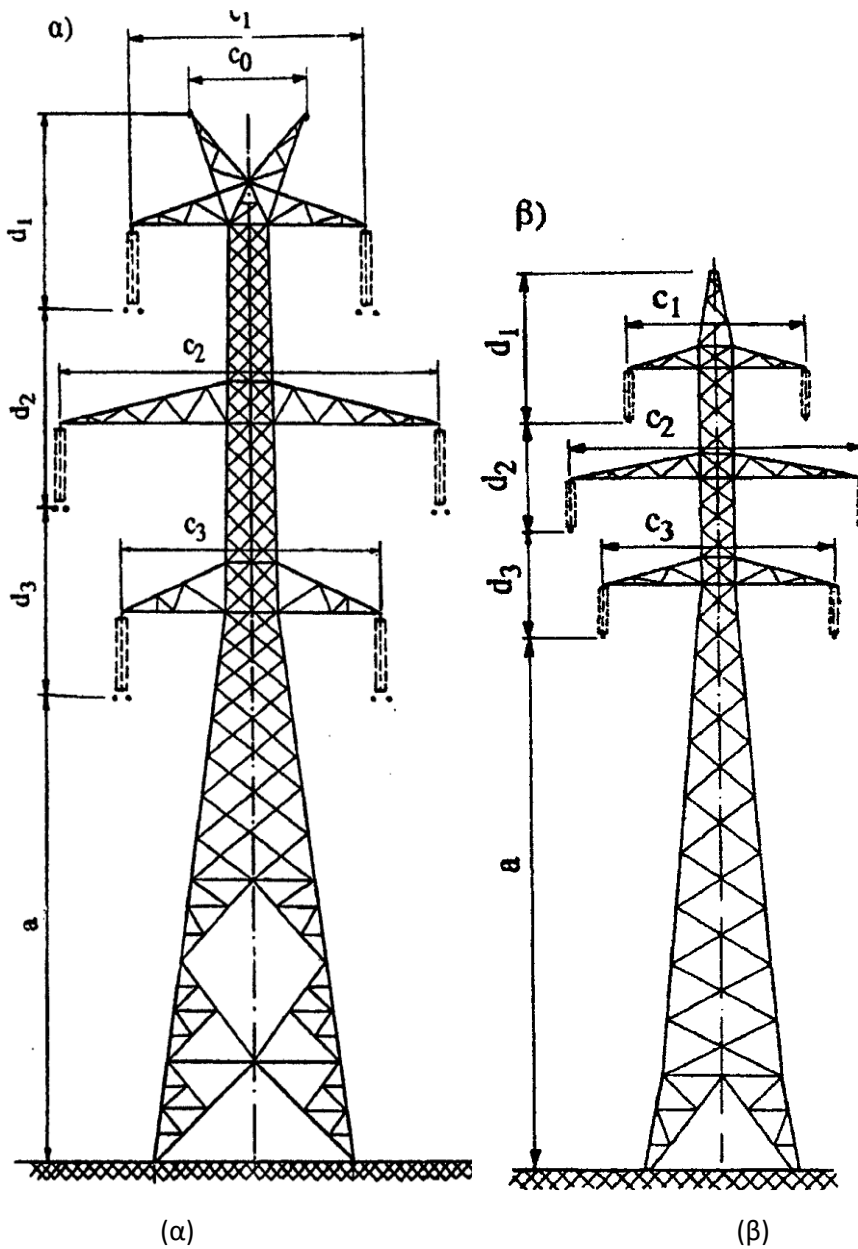
(β)

Σχήμα 1.3: Πεδιακές εντάσεις κατά μήκος γραμμής 380 kV διπλού κυκλώματος [4]

(α) Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (β) Μαγνητική επαγωγή για φόρτιση με 1000 A ανά φάση

Στον παρακάτω πίνακα 1.11 δίνονται οι βασικές αποστάσεις για δύο τυπικούς πύργους S5, S4 γραμμών κυκλώματος 400kV και 150 kV αντίστοιχα του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι απεικονίζονται στα Σχήματα 1.4(α) και 1.4 (β):

Πύργοι	Διαστάσεις							
	a (m)	C <sub>0</sub> (m)	C <sub>1</sub> (m)	C <sub>2</sub> (m)	C <sub>3</sub> (m)	d <sub>1</sub> (m)	d <sub>2</sub> (m)	d <sub>3</sub> (m)
S5 (400kV)	20,00	5,60	11,60	18,80	12,80	8,75	8,00	8,00
S4 (150kV)	19,95	-	6,30	10,30	8,10	5,25	3,90	3,90

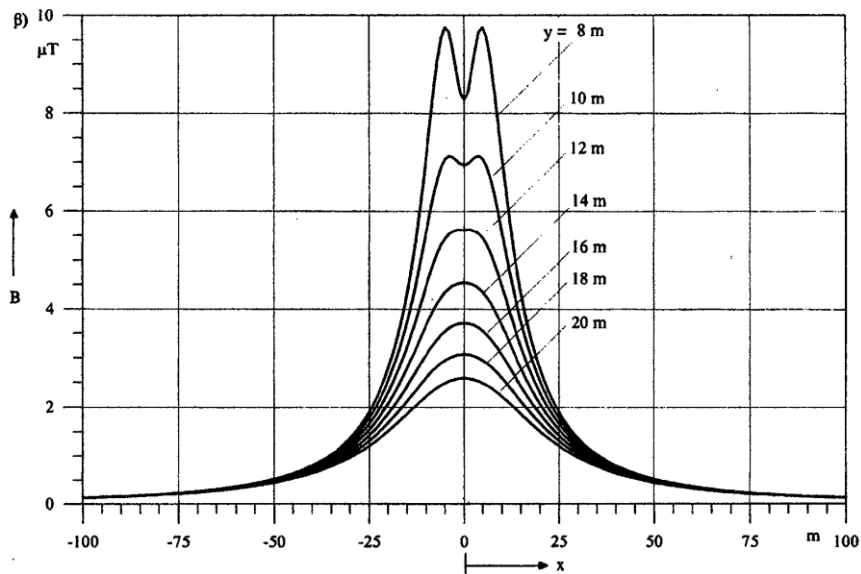
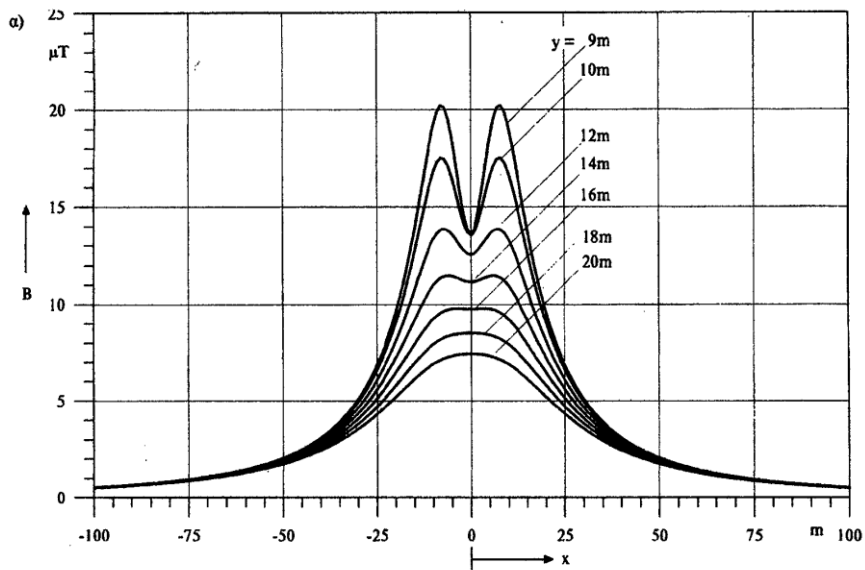


Σχήμα 1.4: Πύργοι γραμμών 400kV και 150kV διπλού κυκλώματος [4]

α) Πύργος S5 γραμμής 400 kV β) Πύργος S4 γραμμής 150kV

Οι ελάχιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις λόγω τάσεως μεταξύ των κάτω αγωγών και του εδάφους είναι 9 m για τις γραμμές 400 kV και 7m για τις γραμμές 150 kV. Ωστόσο, οι αποστάσεις που τηρούνται στη πράξη είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερες από τις οριακές τιμές.

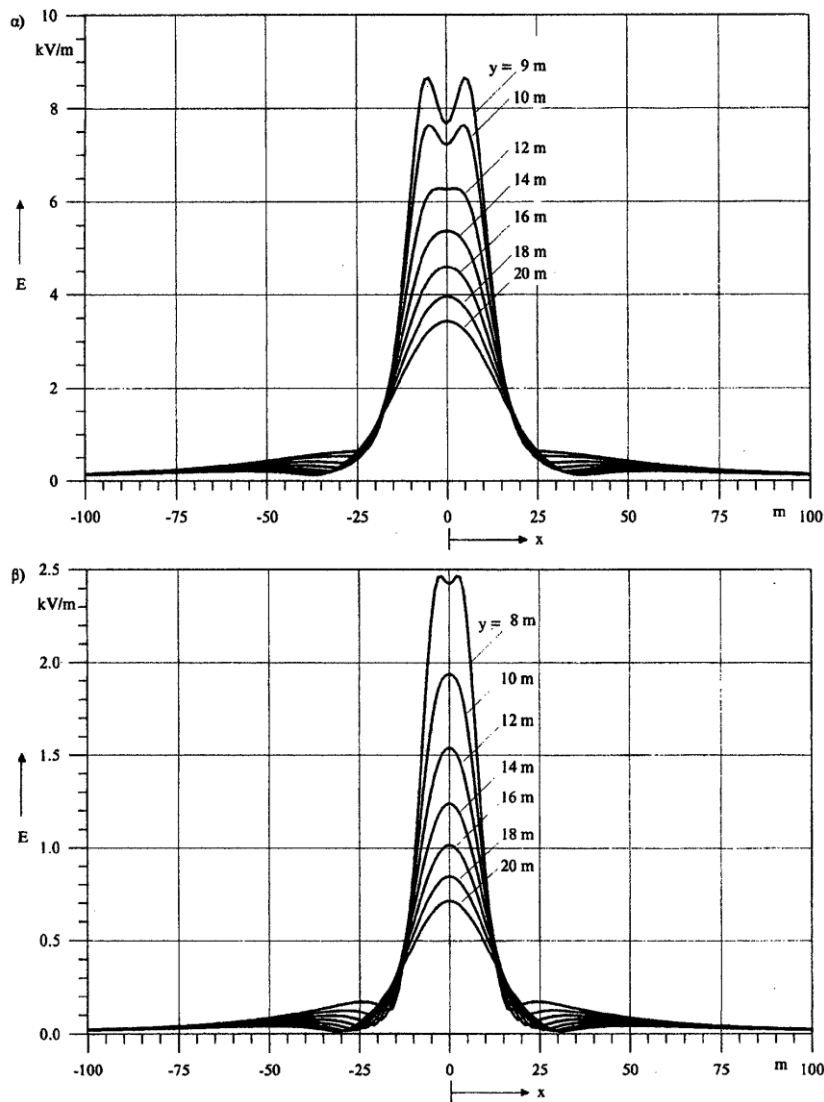
Το μαγνητικό πεδίο και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για τις άνωθεν γραμμές S4 και S5 φαίνονται στη συνέχεια:



**Σχήμα 1.5:** Μαγνητική επαγωγή εναέριων γραμμών διπλού κυκλώματος ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από τον άξονα των γραμμών και της απόστασης  $y$  των κάτω αγωγών από το έδαφος.  $B$  υπολογισμένο σε ύψος 2m από το έδαφος [4]

α) Γραμμή 400kV με πύργους S5, ένταση ρεύματος 1000A ανά κύκλωμα και φάση

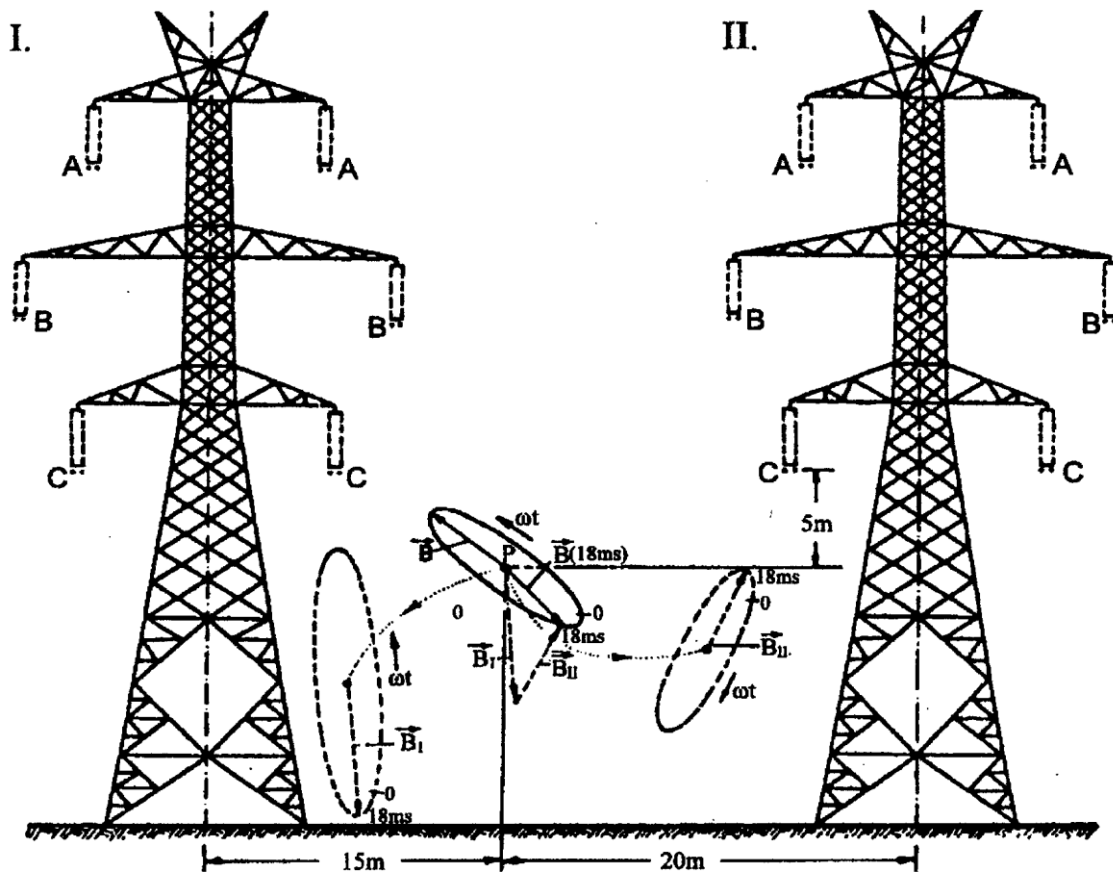
β) Γραμμή 150kV με πύργους S4, ένταση ρεύματος 500A ανά κύκλωμα και φάση



Σχήμα 1.6: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου εναέριων γραμμών διπλού κυκλώματος ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  από τον άξονα των γραμμών με παράμετρο  $y$  την απόσταση των κάτω αγωγών από το έδαφος.  $E$  υπολογισμένο σε ύψος 2m από το έδαφος [4]  
 α) Γραμμή 400kV με πύργους S5 β) Γραμμή 150kV με πύργους S4

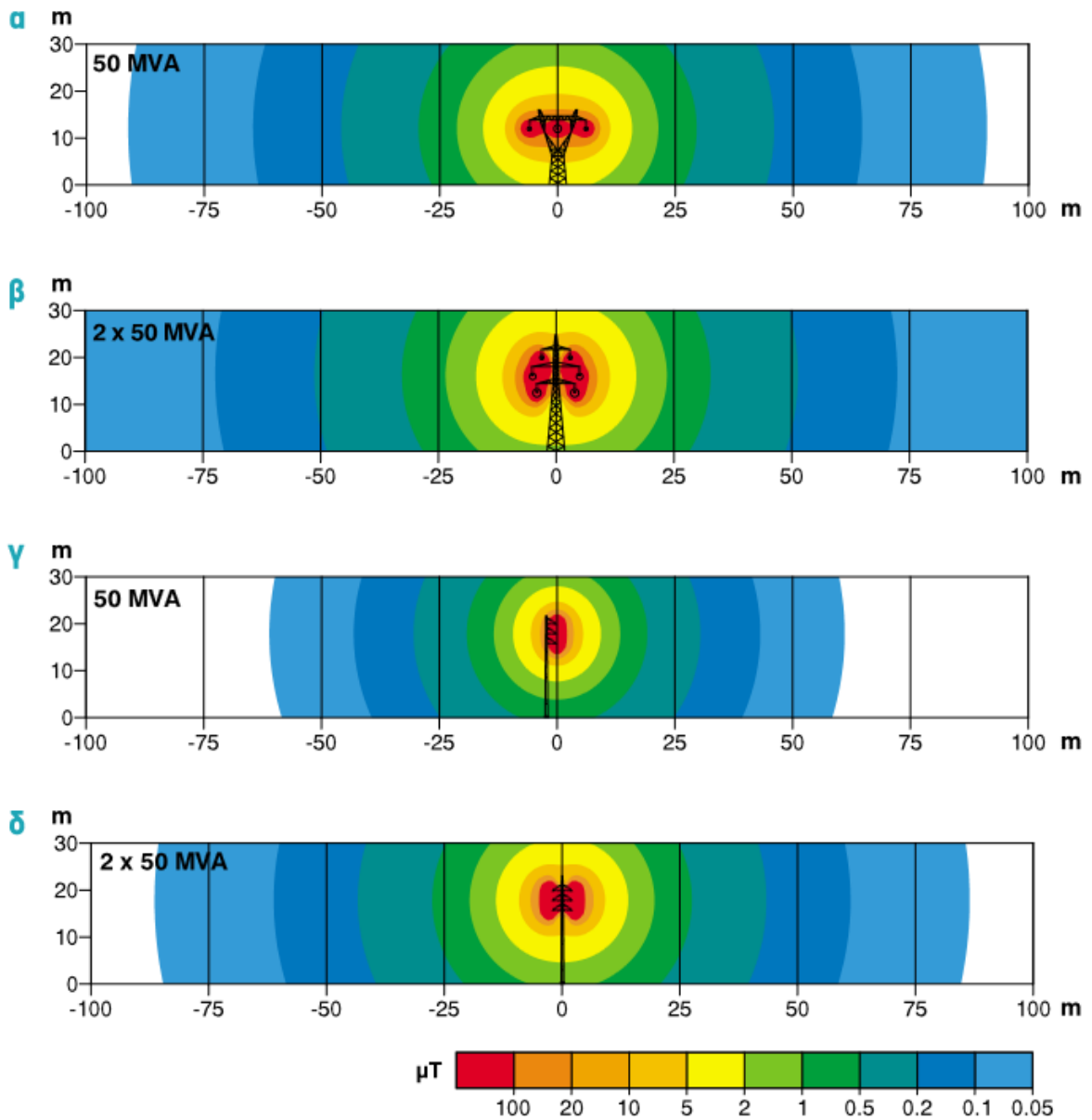
Η συσσώρευση περισσότερων γραμμών σε μια γεωγραφική περιοχή δεν προκαλεί κατ' ανάγκη αύξηση των μέγιστων τιμών των πεδιακών εντάσεων. Το κάθε τριφασικό σύστημα προκαλεί δικό του στρεφόμενο ελλειπτικό πεδίο. Η υπέρθεση των ελλειπτικών αυτών πεδίων για το σχηματισμό του συνισταμένου πεδίου γίνεται για την κάθε χρονική στιγμή. Στο Σχήμα 1.7 φαίνονται δύο παράλληλες οδεύουσες γραμμές 400 kV διπλού κυκλώματος. Όταν διαρρέεται μόνο η γραμμή αριστερά από ρεύμα, η μαγνητική επαγωγή στο σημείο P είναι  $B=16,6\mu T$ , ενώ όταν διαρρέεται μόνο η γραμμή δεξιά από ρεύμα η μαγνητική επαγωγή είναι  $B=10,7\mu T$ . Όταν διαρρέονται και οι δύο γραμμές από ρεύμα η μαγνητική επαγωγή στο σημείο P είναι  $B_{max}=10,6\mu T$ .

Γενικά, ισχύει ότι η παράλληλη όδευση περισσότερων ομοίων ισοφορτισμένων γραμμών διπλού κυκλώματος ή απλού κυκλώματος προκαλεί μικρή μείωση των μέγιστων τιμών των πεδιακών εντάσεων έναντι της περιπτώσεως μιας γραμμής. Συνεπώς, η συγκέντρωση περισσότερων ομοίων εναέριων παράλληλα οδευουσών γραμμών στην ίδια περιοχή δεν επιφέρει αύξηση της μέγιστης τιμής της μαγνητικής επαγωγής, έναντι της αντίστοιχης τιμής που προέρχεται από μια γραμμή, αλλά μικρή μείωση.



Σχήμα 1.7: Συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο δύο γραμμών 400kV διπλού κυκλώματος σε παράλληλη όδευση. Ένταση ρεύματος 1000 A ανά κύκλωμα και φάση [4]

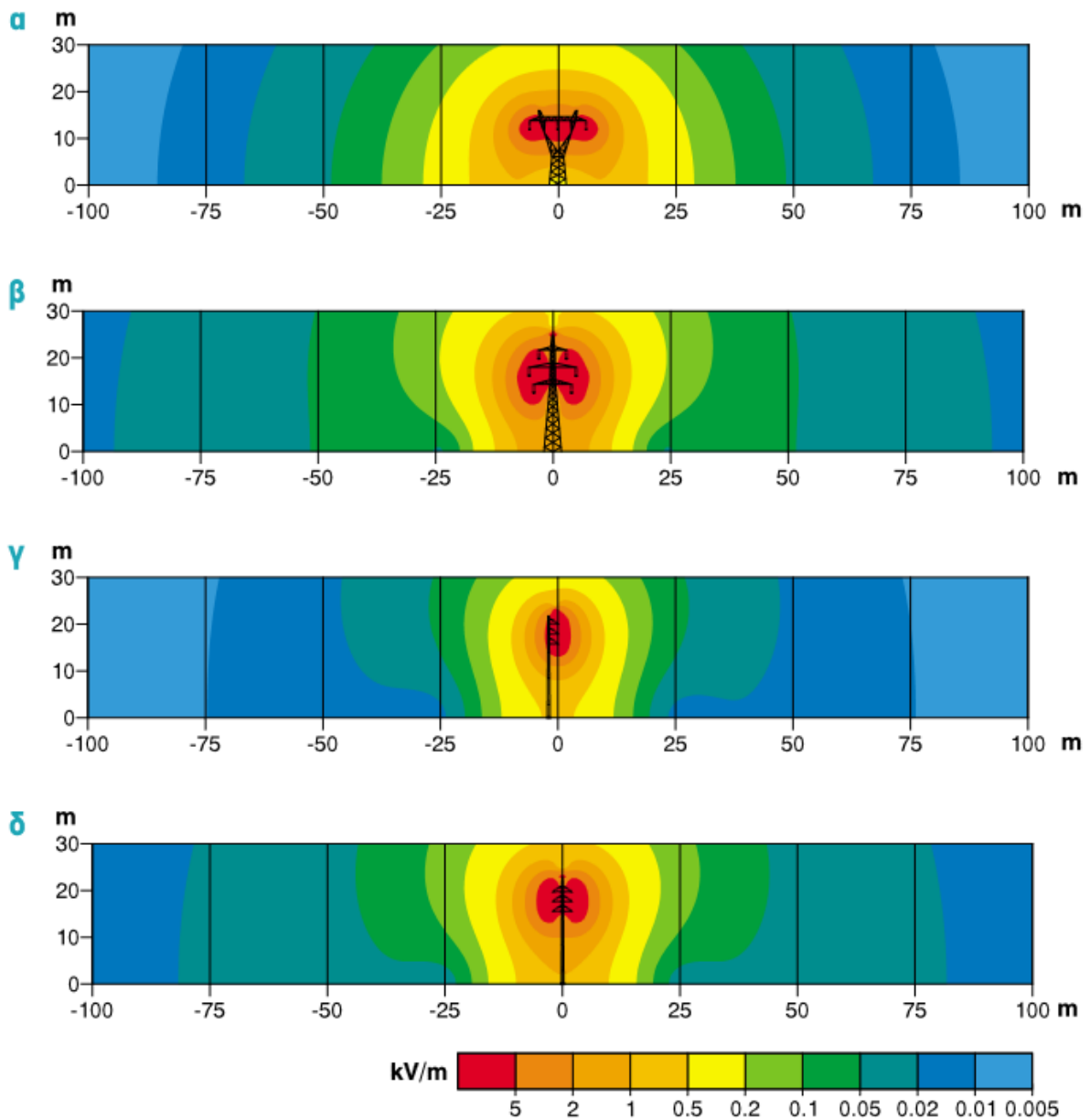
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων, σύμφωνα με την ΕΕΑΕ, της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν γραμμές μεταφοράς 150kV (τυπικό ύψος των κατώτερων αγωγών από το έδαφος είναι τα 12m στο ενδιάμεσο των δύο πυλώνων) και 400kV (τυπικό ύψος των κατώτερων αγωγών από το έδαφος είναι τα 15m στο ενδιάμεσο των δύο πυλώνων)



Σχήμα 1.8: Μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται από εναέριες γραμμές 150kV του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [2]

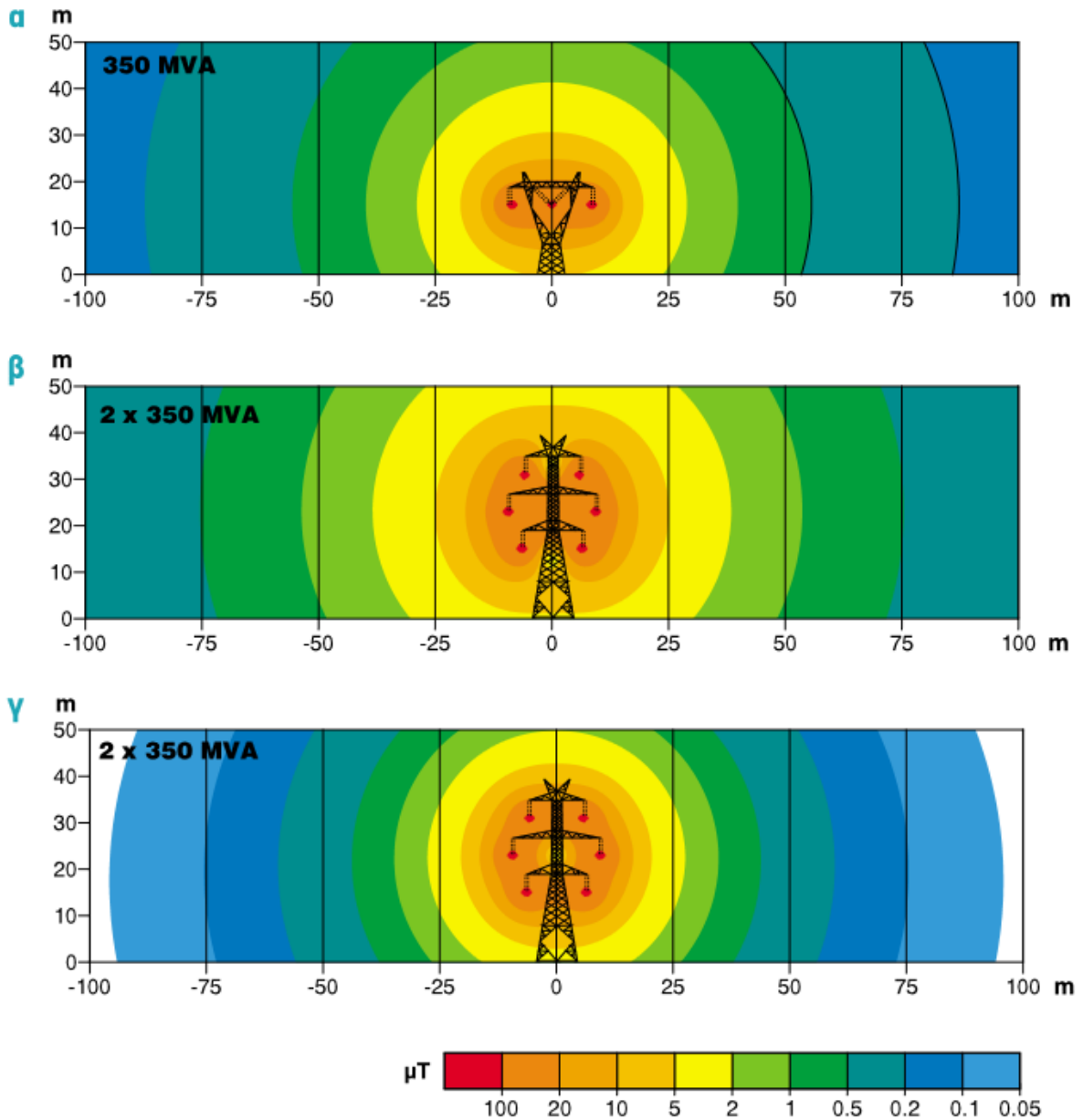
- α) γραμμή απλού κυκλώματος με μεταλλικά δικτύωματα κατά τη μεταφορά ισχύος 50MVA
- β) γραμμή διπλού κυκλώματος με μεταλλικά δικτύωματα κατά τη μεταφορά ισχύος 100MVA (2\*50MVA)
- γ) γραμμή απλού κυκλώματος με ιστούς κατά τη μεταφορά ισχύος 50MVA
- δ) γραμμή διπλού κυκλώματος με ιστούς κατά τη μεταφορά ισχύος 100MVA (2\*50MVA)





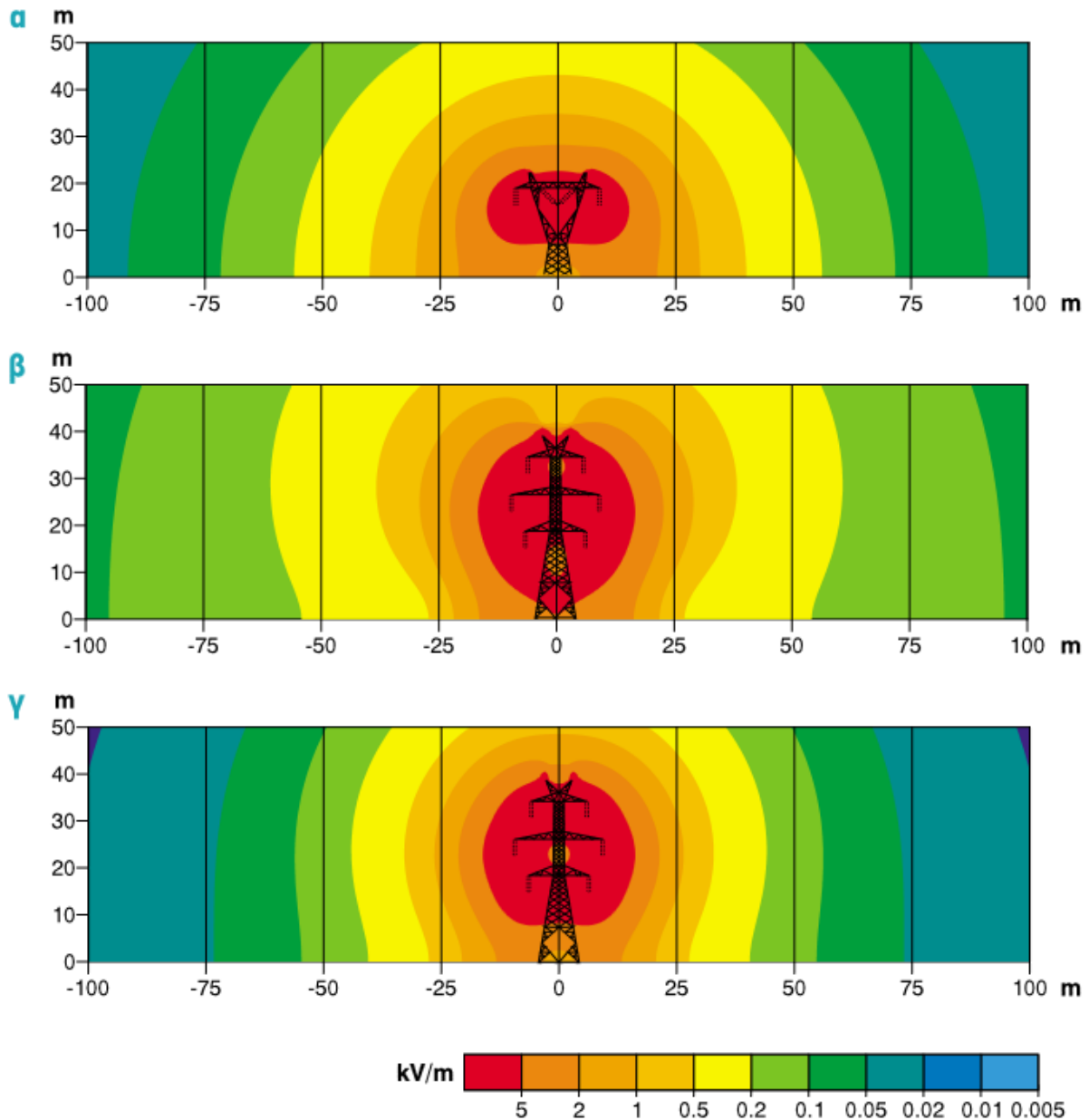
**Σχήμα 1.9:** Ένταση ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από εναέριες γραμμές 150kV του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [2]

- α) γραμμή απλού κυκλώματος με μεταλλικά δικτυώματα (ικανότητα μεταφοράς ισχύος 138MVA ή 202 MVA ανάλογα με τον τύπο)
- β) γραμμή διπλού κυκλώματος με μεταλλικά δικτυώματα (συνολική ικανότητα μεταφοράς ισχύος 404MVA)
- γ) γραμμή απλού κυκλώματος με ιστούς (ικανότητα μεταφοράς ισχύος 138MVA ή 202 MVA ανάλογα με τον τύπο)
- δ) γραμμή διπλού κυκλώματος με ιστούς (συνολική ικανότητα μεταφοράς ισχύος 404MVA)



Σχήμα 1.10: Μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται από εναέριες γραμμές 400kV του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [2]

- α) γραμμή απλού κυκλώματος κατά τη μεταφορά ισχύος 350MVA
- β) γραμμή διπλού κυκλώματος με τον παλιό τρόπο διάταξης φάσεων κατά τη μεταφορά ισχύος 700MVA (2\*350MVA)
- γ) γραμμή διπλού κυκλώματος με το νέο τρόπο διάταξης των φάσεων κατά τη μεταφορά ισχύος 700MVA (2\*350MVA)



Σχήμα 1.11: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από εναέριες γραμμές 400kV του Ελληνικού Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [2]

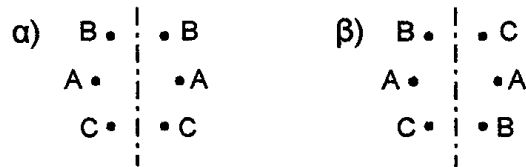
α) γραμμή απλού κυκλώματος (ικανότητα μεταφοράς ισχύος 1400MVA ή 2000 MVA ανάλογα με τον τύπο)

β) γραμμή διπλού κυκλώματος με τον παλιό τρόπο διάταξης των φάσεων (συνολική ικανότητα μεταφοράς ισχύος 2800MVA)

γ) γραμμή διπλού κυκλώματος με το νέο τρόπο διάταξης των φάσεων (συνολική ικανότητα μεταφοράς ισχύος 2800MVA)

### Διάταξη των αγωγών φάσεων

Όταν έχουμε βέλτιστη διάταξη των αγωγών των φάσεων μπορεί να επιτευχθεί δραστική μείωση των πεδιακών εντάσεων.



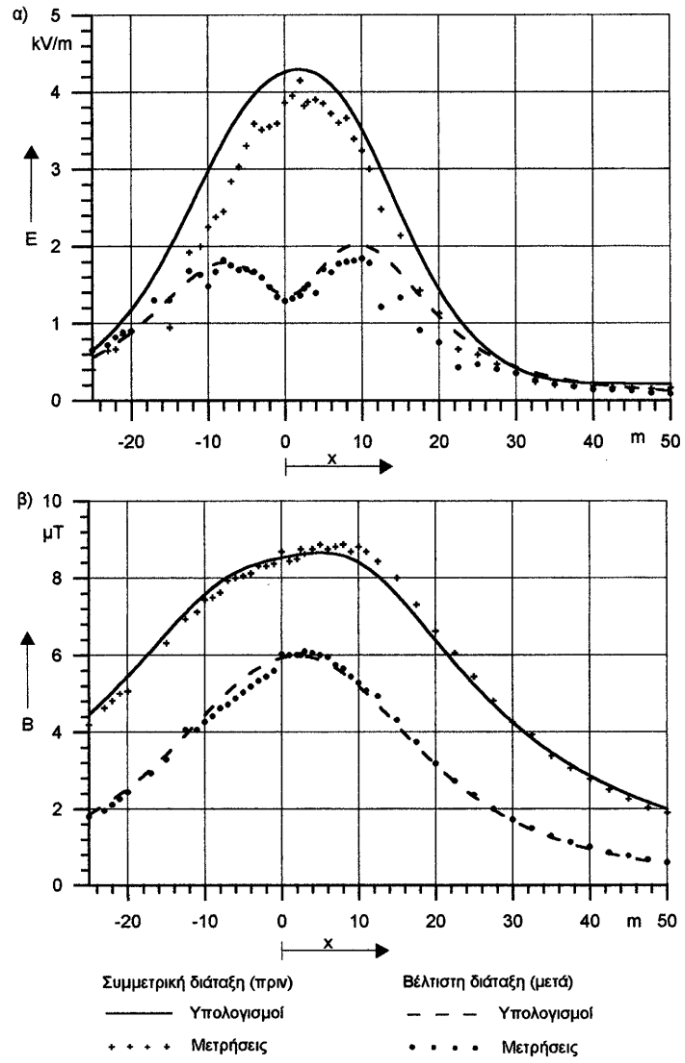
Σχήμα 1.12: α) Συνήθης συμμετρική διάταξη των φάσεων, β) βέλτιστη διάταξη των φάσεων

Για τον περιορισμό των πεδιακών εντάσεων των γραμμών διπλού κυκλώματος που υπάρχουν στο ελληνικό σύστημα μεταφοράς ενέργειας αποφασίστηκε η εφαρμογή της βέλτιστης διάταξης των αγωγών των φάσεων.

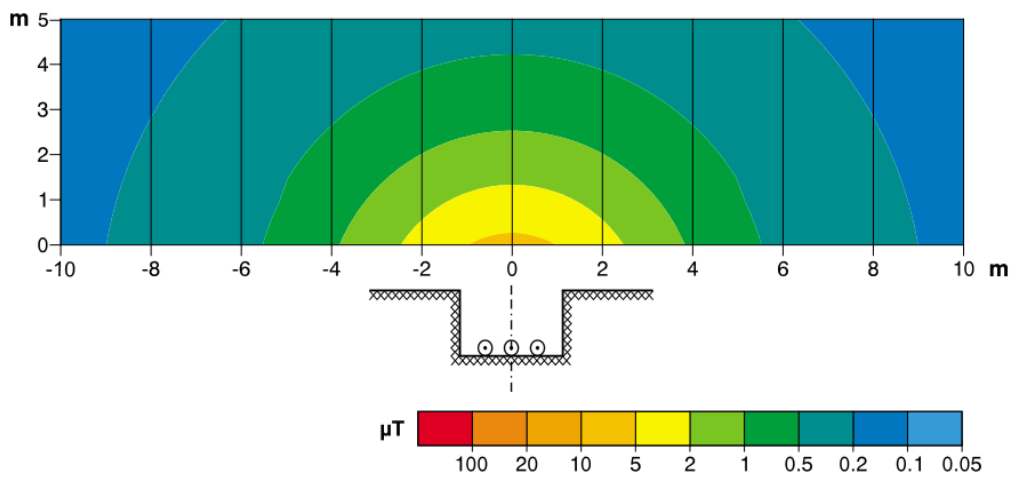
Για παράδειγμα σε μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε γραμμή διπλού κυκλώματος 400kV Άγιος Στέφανο - Λάρυμνα πριν και μετά την εφαρμογή της βέλτιστης διάταξης των αγωγών των φάσεων της γραμμής διαπιστώθηκε μεγάλη μείωση των τιμών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μετά την εφαρμογή της βέλτιστης διάταξης (Σχήμα 1.13). Στη θέση μέτρησης η απόσταση του κάτω αγωγού του ενός κυκλώματος από το έδαφος ήταν 17,7m και του αντίστοιχου αγωγού του άλλου κυκλώματος 16,7m λόγω κλίσεως του εδάφους. Οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί έγιναν σε ύψος 1,5m από το έδαφος. Τέλος έγινε αναγωγή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου σε ένταση ρεύματος 1000A (μέγιστη ένταση λειτουργίας), για την οποία έγιναν οι υπολογισμοί.

### Υπόγεια καλώδια- Πεδιακές εντάσεις υπόγειων καλωδίων

Εντός αστικών περιοχών, καλώδια υψηλής τάσης τοποθετούνται υπογείως σε βάθος της τάξης του ενός με δύο μέτρων κάτω από δρόμους και πεζοδρόμια. Στα υπόγεια καλώδια οι ρευματοφόροι αγωγοί είναι μονωμένοι και έτσι μπορούν να τοποθετηθούν πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, δημιουργώντας έτσι μικρότερα πεδία σε σχέση με τις αντίστοιχες διατάξεις εναέριων γραμμών. Παρόλα αυτά, στα σημεία που βρίσκονται ακριβώς πάνω τους δημιουργούνται σημαντικά μαγνητικά πεδία τα οποία όμως φθίνουν πολύ γρηγορότερα με την απόσταση σε σχέση με αυτά που δημιουργούνται από αντίστοιχες εναέριες γραμμές. Τα υπόγεια καλώδια δεν παράγουν ηλεκτρικά πεδία στις θέσεις που βρίσκονται οι άνθρωποι [2].



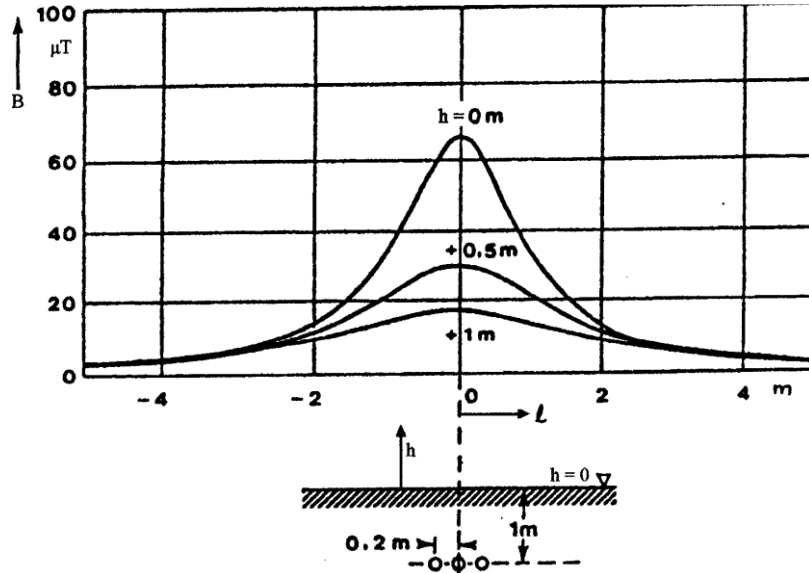
Σχήμα 1.13: α) Ηλεκτρικό πεδίο και β) μαγνητικό πεδίο πλησίον μιας γραμμής 400kV πριν και μετά την εφαρμογή της βέλτιστης διάταξης των αγωγών φάσεων [4]



Σχήμα 1.14: Μαγνητική επαγωγή που δημιουργείται από υπόγειο καλώδιο 150kV και μεταφορά ισχύος 50MVA (Αποτελέσματα προσομοιώσεων, σύμφωνα με την ΕΕΑΕ, της μαγνητικής επαγωγής που δημιουργείται από υπόγεια καλώδια) [2]

### Πλήθος καλωδίων:

Στην περίπτωση τριπολικών καλωδίων ή δεσμών μονοπολικών καλωδίων, τα οποία απαρτίζουν τριφασικά συστήματα, η μαγνητική επαγωγή σε σχετικά μικρή απόσταση από τα καλώδια έχει πολύ μικρές τιμές. Στην περίπτωση διατάξεων μονοπολικών καλωδίων, με τις συνήθεις αποστάσεις μεταξύ των καλωδίων η μαγνητική επαγωγή μπορεί να αποκτήσει σε περιοχές προσιτές στους ανθρώπους σχετικά υψηλές τιμές και μπορεί να είναι υψηλότερες από τις τιμές της μαγνητικής επαγωγής στο έδαφος κάτω από εναέριες γραμμές.



Σχήμα 1.15: Μαγνητική επαγωγή τριφασικού συστήματος τριών μονοπολικών καλωδίων με φόρτιση 1000A ανά καλώδιο με παράμετρο το ύψος  $h$  από το έδαφος [4]

Εν γένει, η υπογείωση γραμμών υψηλής τάσεως περιορίζει μεν το χώρο της εκθέσεως σε μαγνητικό πεδίο, αυξάνει όμως τις μέγιστες τιμές της μαγνητικής επαγωγής. Σε ύψος 1m από το έδαφος ένα υπόγειο καλώδιο υψηλής τάσης προκαλεί μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής κατά πολύ μεγαλύτερη από τη μέγιστη τιμή που μπορεί να προέλθει από την αντίστοιχη εναέρια γραμμή.

### 1.4.3 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ανάγκη δημιουργίας νέων γραμμών

Με τον όρο γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εννοούμε τις εναέριες γραμμές υψηλής τάσης (συνήθως 150kV, αν και υπάρχουν και γραμμές 66kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV), καθώς και τις υπόγειες γραμμές υψηλής τάσης. Οι γραμμές αυτές χαρακτηρίζονται ως γραμμές απλού ή διπλού κυκλώματος ανάλογα με το αν φέρουν ένα ή δύο τριφασικά κυκλώματα. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργεί η γραμμή οφείλονται στους ρευματοφόρους αγωγούς της και μειώνονται με την αύξηση της απόστασης από αυτούς. Κατ' αυτόν τον τρόπο οι μέγιστες τιμές των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στις εναέριες γραμμές εμφανίζονται ακριβώς κάτω από τους αγωγούς. Το μέγεθος του δημιουργούμενου μαγνητικού πεδίου στο περιβάλλον μιας γραμμής εξαρτάται από το ρεύμα στην γραμμή.

Οι γραμμές μέσης τάσης (20 kV), οι οποίες τροφοδοτούν τις γραμμές χαμηλής τάσης μέσω των υποσταθμών διανομής που περιλαμβάνουν μετασχηματιστές μέσης προς χαμηλή τάση, μπορεί να είναι εναέριες ή υπόγεια καλώδια. Οι εναέριες γραμμές δημιουργούν τόσο ηλεκτρικά όσο

και μαγνητικά πεδία, ενώ τα υπόγεια καλώδια μόνο μαγνητικά πεδία. Λόγω της ηλεκτρικής συνδεσμολογίας τους, οι γραμμές αυτές δεν εμφανίζουν τις ασυμμετρίες στα ρεύματα και άρα δεν έχουμε ανάπτυξη ρευμάτων επιστροφής.

Το μέγεθος του ρεύματος σε μία γραμμή δεν είναι σταθερό αλλά ποικίλει πολύ στη διάρκεια μιας μέρας, εμφανίζοντας ημερήσιους, εβδομαδιαίους, και ετήσιους κύκλους, προκαλώντας αντίστοιχη διακύμανση στο δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο. Οι μέγιστες τιμές του ρεύματος στη διάρκεια μιας μέρας και συνεπώς και οι μέγιστες τιμές του δημιουργούμενου μαγνητικού πεδίου από την γραμμή εξαρτώνται από το είδος των καταναλωτών που εξυπηρετεί η γραμμή (κατοικίες, εμπορικά καταστήματα, βιοτεχνίες, εργοστάσια, αγροτικές αρδεύσεις κλπ).

Για λόγους αξιοπιστίας του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας οι συνήθεις τιμές της μεταφερόμενης ενέργειας σε μια γραμμή είναι πολύ μικρότερες της μέγιστης δυνατής τιμής που μπορεί να αντέξει η γραμμή. Για παράδειγμα σε περιπτώσεις ανάγκης που κάποιος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βγαίνει εκτός λειτουργίας, πιθανότατα η γραμμή θα αναγκαστεί να μεταφέρει πολύ μεγαλύτερη ενέργεια απ' ό,τι συνήθως για να μην διακοπεί η ρευματοδότηση σε καταναλωτές.

Με την πάροδο των ετών η ενέργεια που καταναλώνεται αυξάνεται και έτσι αυξάνεται και η μεταφερόμενη ενέργεια. Αν δεν κατασκευάζονται νέες γραμμές τα μαγνητικά πεδία κάτω από τις υφιστάμενες γραμμές αυξάνονται ( η αξιοπιστία του δικτύου μειώνεται, μεγαλώνει ο κίνδυνος διακοπών ηλεκτρικής ενέργειας και έχουμε υψηλότερες απώλειες ενέργειας). Η συνολική ένταση του ρεύματος για την τροφοδότηση μιας περιοχής με ηλεκτρική ενέργεια προκύπτει από το φορτίο της περιοχής και είναι για δεδομένη τάση ανεξάρτητη από τον αριθμό των γραμμών [2].

#### **1.4.3.1 Επιπτώσεις από την καθυστέρηση κατασκευής νέων γραμμών**

Συχνά τίθεται το θέμα των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, μετά την προσθήκη στο σύστημα μιας νέας γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας. Σχεδόν πάντα θεωρείται ότι η λειτουργία μιας νέας γραμμής, προκαλεί πρόσθετη έκθεση σε μαγνητικό πεδίο και συνεπώς η καθυστέρηση ενάρξεως λειτουργίας της ή ακόμα και η ματαίωση της κατασκευής της, αποτελούν μια συμβολή στην προστασία της δημόσιας υγείας, βάσει της αρχής της πρόληψης. Η θεώρηση αυτή όσο εύλογη και αν φαίνεται είναι εσφαλμένη.

Η λειτουργία και δεύτερης όμοιας γραμμής με ισοκατανομή του φορτίου στις δύο γραμμές συνεπάγεται τη μείωση της μέγιστης τιμής της μαγνητικής επαγωγής στο ήμισυ της αρχικής τιμής, εφόσον η γραμμές βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Η μείωση αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη εάν οι γραμμές οδεύουν παράλληλα και σε μικρή απόσταση. Με την λειτουργία των δύο γραμμών επιτυγχάνεται επίσης μείωση της μέσης τιμής της μαγνητικής επαγωγής στο περιβάλλον των γραμμών. Η ίδια συμπεριφορά διαπιστώνεται και στην περίπτωση προσθήκης και τρίτης, τέταρτης κ.λ.π. γραμμής.

Προκύπτει λοιπόν ότι η λειτουργία νέας γραμμής δεν προκαλεί πρόσθετη περιβαλλοντική επιβάρυνση από πλευράς μαγνητικών πεδίων, αλλά στην πραγματικότητα επιφέρει συνολικά μείωση των πεδίων. (Αντίθετα με το μαγνητικό πεδίο, το ηλεκτρικό πεδίο παραμένει πρακτικά αμετάβλητο σε όσο διάστημα η γραμμή βρίσκεται υπό τάση [2, 4]).

## **2) Μαγνητικά πεδία που παράγονται από δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας**

### **2.1 Ιστορικό υπόβαθρο**

Σχετικά με τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF-EMFs), όπως τα πεδία συχνότητας ισχύος, από το 1980 η CIGRE έχει εκδώσει αρκετά τεχνικά φυλλάδια, που παρέχουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τον χαρακτηρισμό, τον υπολογισμό και τη μέτρηση του πεδίου. Αναλυτικότερα, κάποια δημοσιευμένα τεχνικά φυλλάδια είναι τα εξής:

- Το CIGRE TB 021 (1980) "Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που παράγονται από συστήματα μετάδοσης", παρά την αντιμετώπιση του μαγνητικού πεδίου ως δευτερεύοντος προβλήματος, περιέχει μια καλή στοιχειώδη εισαγωγή στις μεθόδους υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιώντας το νόμο του Ampere.
- Το CIGRE TB 074 (1993) "Μετάδοση Ηλεκτρικής Ενέργειας και Περιβάλλον": Πεδία, Θόρυβος και Παρεμβολές, το οποίο προοριζόταν να παράσχει εκπαιδευτικές γνώσεις σε όσους δεν είναι εξοικειωμένοι με τις τεχνικές πτυχές του προβλήματος μιας και περιέχει μια στοιχειώδη περιγραφή των εννοιών των μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων.
- Το CIGRE TB 320 (2007) "Χαρακτηρισμός μαγνητικών πεδίων ELF", το οποίο προοριζόταν για ασκούμενους μηχανικούς και επίσης για ρυθμιστικές αρχές και φορείς τυποποίησης, ασχολείται με τα προβλήματα χαρακτηρισμού της "έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο" και τον ορισμό των "μετρήσιμων ορίων έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο".
- Η GIGRE στο τεχνικό φυλλάδιο 795 δημοσίευσε μια σύντομη εισαγωγή στον υπολογισμό των μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας με βάση το νόμο του Biot-Savart εισάγοντας τη διάκριση μεταξύ δύο χρονικών κλιμάκων: περιοδικές χρονικές διακυμάνσεις και αργές χρονικές διακυμάνσεις, διάκριση που επιτρέπει την αξιολόγηση των "στατιστικών τιμών" του μαγνητικού πεδίου, ώστε να κρίνεται η μακροπρόθεσμη έκθεση σε μαγνητικό πεδίο.
- Το CIGRE TB 373 (2009) "Τεχνικές μετριάσμου των μαγνητικών πεδίων με συχνότητα ισχύος που προέρχονται από συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας" παρέχει μια καλή εισαγωγή στην έννοια του μαγνητικού πεδίου και περιέχει πολλά παραδείγματα πεδίων συχνότητας ισχύος, που παράγονται από τους αγωγούς ισχύος των εναέριων γραμμών, υπόγεια καλώδια και υποσταθμούς. Επίσης, παρέχει παραδείγματα της αλληλεπίδρασης αυτών των πεδίων με υλικά με ή χωρίς μαγνητικές ιδιότητες [7].

### **2.2 Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος που δημιουργούνται από ζεύξεις ισχύος γραμμών - Αναφορά στους παράγοντες που τα επηρεάζουν**

Τα μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος, που παράγονται από διασυνδέσεις ισχύος, εξαρτώνται από τη γεωμετρία όλων των γραμμικών αγωγών της διασύνδεσης ισχύος (τόσο ενεργών όσο και παθητικών) και από το ρεύμα κατά μήκος καθενός από αυτούς. Αυτές οι γεωμετρίες και τα ρεύματα χαρακτηρίζονται από πολλές παραμέτρους: μερικές από αυτές είναι χρονικά σταθερές (ή εξαρτώμενες από τη σχεδίαση), όπως η ονομαστική τάση, η γεωμετρία των μηχανικών στηριγμάτων, η διαδρομή της γραμμής και το τοπικό ανάγλυφο, ενώ άλλες ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου, όπως η φόρτιση, οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η γεωμετρία των ενεργών αγωγών ή "αγωγών ισχύος". Γενικά, λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι αγωγοί ισχύος και η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς θεωρείται ότι είναι περίπου ισορροπημένη. Σε αυτή την



περίπτωση, η φόρτιση μπορεί απλά να χαρακτηριστεί από το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα, το "ρεύμα γραμμής", το οποίο είναι βασικά το ρεύμα θετικής ακολουθίας στους αγωγούς. Οι μεταβλητές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τις εναέριες γραμμές και τα υπόγεια καλώδια είναι διαφορετικές:

- Για τις εναέριες γραμμές, η μεταβολή της φόρτισης μαζί με τις μεταβλητές συνθήκες περιβάλλοντος έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της γεωμετρίας των αγωγών ισχύος.
- Για τα υπόγεια καλώδια, τα οποία είναι σχετικά θωρακισμένα έναντι των μεταβλητών συνθηκών περιβάλλοντος, η γεωμετρία των αγωγών μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Επομένως, για αυτά η κατάσταση είναι σχετικά απλούστερη, επειδή υπάρχει μόνο μία μεταβλητή παράμετρος: η ροή ρεύματος γραμμής.

Σε αντίθεση με τα παραγόμενα ηλεκτρικά πεδία, τα μαγνητικά πεδία ισχύος που παράγονται από ζεύξεις ισχύος δεν μπορούν πάντα να θεωρηθούν ομοιόμορφα κατά μήκος των διαστάσεων ενός ανθρώπινου σώματος:

- Για εναέριες γραμμές μεταφοράς, όπου οι αγωγοί έχουν ύψος περίπου δέκα ή περισσότερα μέτρα, το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται ελαφρώς μεταξύ του επιπέδου του εδάφους και του ύψους των 2m, με διακύμανση της τάξης του 20 %.
- Για τα υπόγεια καλώδια, το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος του σημείου μέτρησης πάνω από το έδαφος. Μεταξύ του επιπέδου του εδάφους και ενός ύψους 2m, μπορεί να μειωθεί με συντελεστή 10.

Επομένως, καθώς στις κατευθυντήριες γραμμές της επιτροπής ICNIRP (International Commission on Non-Ionising Radiation Protection) "Guidelines for Limiting exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)" (1998) και "Guidelines for Limiting exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)" (2010), το μετρήσιμο όριο έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο δίνεται ως επίπεδο αναφοράς που προϋποθέτει ένα ομοιόμορφο πεδίο στις διαστάσεις ενός ανθρώπινου σώματος, η αξιολόγηση της έκθεσης δεν μπορεί να γίνει απευθείας μέσω μιας μέτρησης ενός μόνο σημείου.

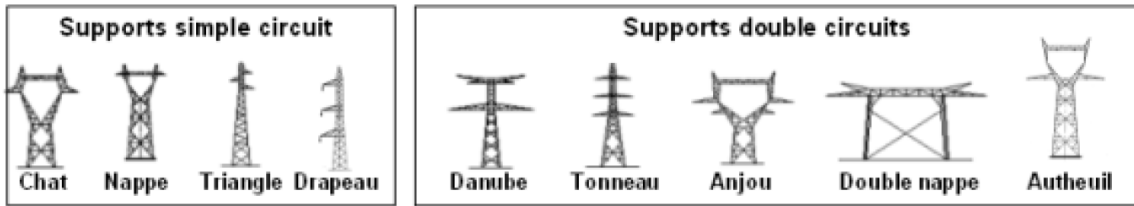
Απλές μέθοδοι δίνονται στο IEC 62110 για να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της έκθεσης σε αυτήν την πιο περίπλοκη κατάσταση, λαμβάνοντας μια τιμή που αντιστοιχεί σε έναν χωρικό μέσο όρο του μαγνητικού πεδίου σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα, που μπορεί να συγκριθεί με το επίπεδο αναφοράς [7].

## **2.2.1 Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος που δημιουργούνται από εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας**

### **2.1.1.1 Επιρροή των σταθερών ή εξαρτώμενων από το σχεδιασμό παραμέτρων σε εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας**

Τα εξαρτώμενα από τη σχεδίαση γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών γραμμής, των οποίων τα ρεύματα παράγουν μαγνητικό πεδίο, είναι:

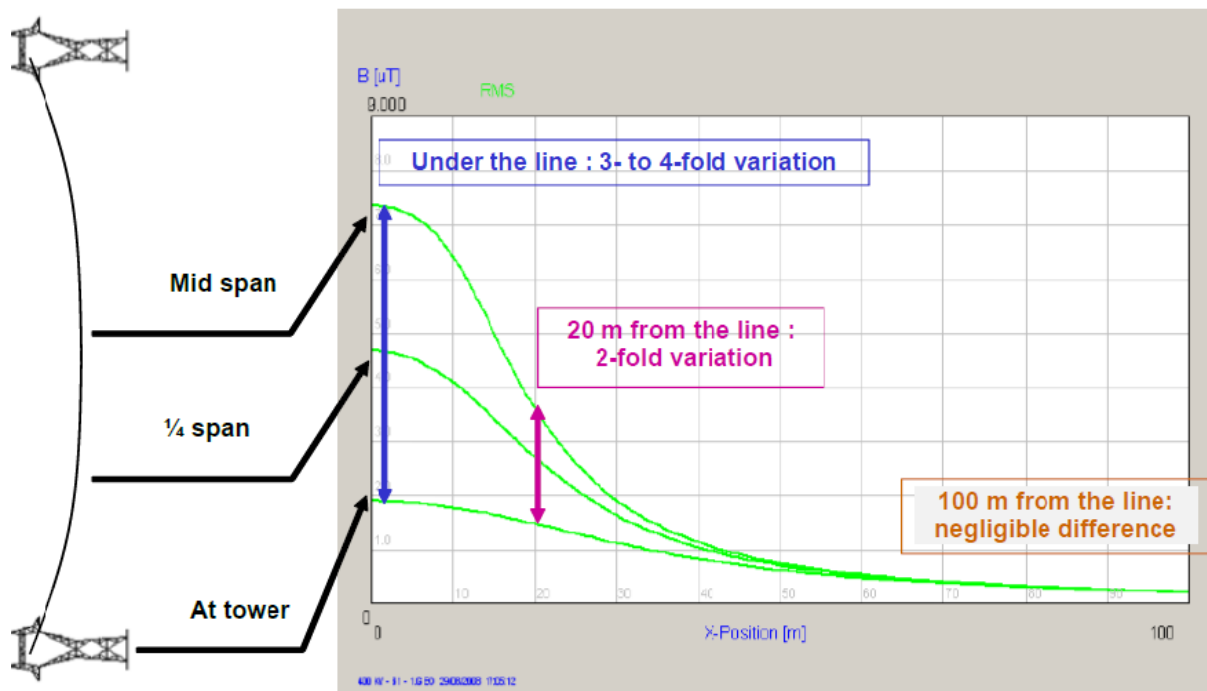
- α) Η σχετική θέση στο χώρο των αγωγών φάσης, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από:
- Την ονομαστική τάση. Όσο υψηλότερη είναι η τάση τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση μεταξύ των αγωγών φάσης και συνεπώς τόσο μεγαλύτεροι θα είναι οι πύργου.
  - Τον σχεδιασμό του πύργου. Ο σχεδιασμός του πύργου καθορίζει τη θέση στο χώρο των αγωγών φάσης. Πρέπει επίσης να υπογραμμιστεί ότι για ένα δεδομένο σχέδιο ενός πύργου υπάρχουν πολλές παραλλαγές, όπως οι γωνιακοί πύργου που είναι μηχανικά ενισχυμένοι. Μερικά παραδείγματα συνηθισμένων σχεδίων δίνονται στο σχήμα 2.1.



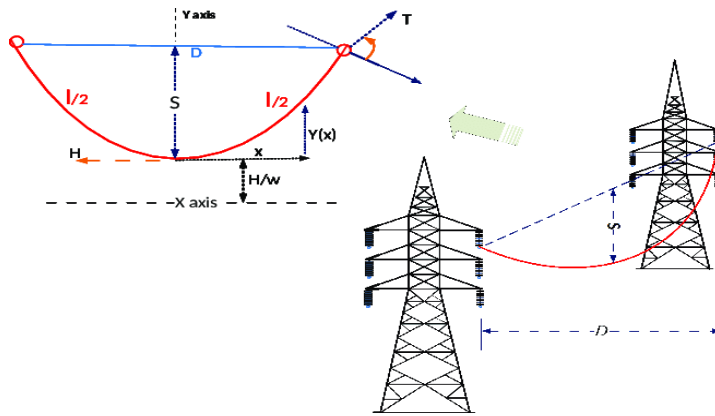
Σχήμα 2.1: Μερικά τυπικά σχέδια πύργων [7]

β) Το ύψος των αγωγών πάνω από το έδαφος. Στην πραγματικότητα, καθώς οι αγωγοί δεν είναι ευθύγραμμοι και το έδαφος δεν είναι πάντα επίπεδο και οριζόντιο, δεν είναι σταθερό το ύψος των αγωγών πάνω από το έδαφος. Στην περίπτωση ενός επίπεδου οριζόντιου εδάφους, το ύψος είναι ελάχιστο στο άνοιγμα στη μέση των αγωγών και μέγιστο στους πύργους. Κατά συνέπεια, οι τιμές του μαγνητικού πεδίου, στο επίπεδο του εδάφους ή 1 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους, είναι μέγιστες στο μέσο άνοιγμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η επίδραση του ύψους των αγωγών στις τιμές του μαγνητικού πεδίου είναι μεγάλη πολύ κοντά στη γραμμή, αλλά μειώνεται όταν η απόσταση από τη γραμμή αυξάνεται.

Το γεγονός ότι οι αγωγοί δεν είναι ευθύγραμμοι και παράλληλοι με το έδαφος εισάγει ακόμη μια σημαντική πτυχή που είναι ότι το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη φόρτιση, ακόμη και στην περίπτωση ισορροπημένης φόρτισης, εκτός από τις δύο συνηθισμένες ορθογώνιες συνιστώσες, θα παρουσιάζει επίσης μια μικρή αξονική συνιστώσα  $B_z$ .



Σχήμα 2.2: Επιρροή της θέσης στο άνοιγμα της γραμμής στο επίπεδο του μαγνητικού πεδίου. Υπολογισμός κατά μήκος ενός άξονα κάθετου στη γραμμή [7]

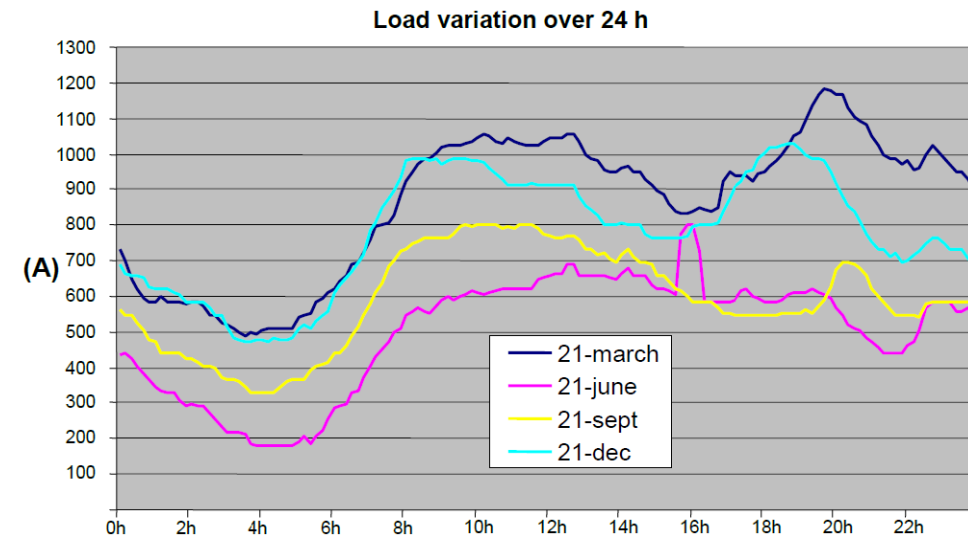


Σχήμα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση της χαλάρωσης που εμφανίζεται στη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [10]

- γ) Στην περίπτωση γραμμών διπλού κυκλώματος, μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο είναι η διάταξη των φάσεων. Είναι ευρέως γνωστό ότι μια βέλτιστη διάταξη των φάσεων μπορεί να μετριάσει εν μέρει το μέγεθος του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου, αλλά ανάλογα με τον σχεδιασμό του πύργου, μια μείωση μακριά από τη γραμμή μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση ακριβώς από κάτω. Είναι επίσης γνωστό ότι ο μετριάσμος του πεδίου είναι ακόμη πιο αποτελεσματικός, όταν τα φορτία στα δύο κυκλώματα είναι κοντά το ένα στο άλλο και ρέουν με τον ίδιο τρόπο.
- δ) Η διαδρομή του ηλεκτρικού ρεύματος έχει ευθύγραμμα τμήματα, αλλά και γωνίες. Κοντά σε έναν γωνιακό πύργο, η χωρική δομή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μπορεί να διαφέρει σημαντικά από εκείνες που βρίσκονται κοντά σε έναν πύργο ευθείας διαδρομής.
- ε) Το τοπικό ανάγλυφο και κυρίως η κλίση του εδάφους.
- ζ) Οι άλλες πηγές μαγνητικού πεδίου κοντά στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Μια πολύ συνηθισμένη κατάσταση είναι όταν αρκετές γραμμές ακολουθούν παράλληλες διαδρομές, με αποτέλεσμα έναν "διάδρομο γραμμής".
- η) Οι γειτονικές γραμμές επηρεάζουν προφανώς η μία τα μαγνητικά πεδία της άλλης, ωστόσο είναι ευρέως γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο μειώνεται ως το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης. Αυτός ο εμπειρικός νόμος ισχύει όποια και αν είναι η απόσταση σε ένα θαμμένο καλώδιο, αλλά γίνεται αληθινός μόνο "μακριά" (μερικές δεκάδες μέτρα) από εναέριες γραμμές με ισορροπημένη φόρτιση. Αυτή η μείωση σημαίνει ότι τα πεδία που δημιουργούνται από τις πιο απομακρυσμένες γραμμές είναι τις περισσότερες φορές αμελητέα σε σύγκριση με εκείνα που παράγονται από την πλησιέστερη γραμμή [7].

### 2.2.1.2 Επιρροή των μεταβλητών παραμέτρων στο μαγνητικό πεδίο σε εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας

- Η ροή του ρεύματος γραμμής είναι μια από τις μεταβλητές παραμέτρους, καθώς έχει ημερήσιες, εβδομαδιαίες και εποχιακές κυκλικές διακυμάνσεις.



Σχήμα 2.4: Καταγεγραμμένα φορτία 24 ωρών για 4 διαφορετικές ημέρες σε μια γραμμή 400 kV που τροφοδοτεί μια πυκνά αστικοποιημένη περιοχή [7]

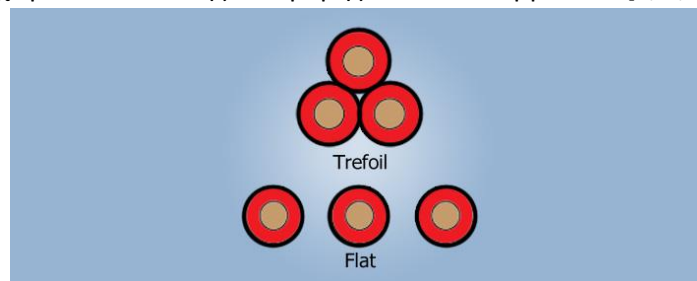
- Μια δεύτερη μεταβλητή παράμετρος είναι η γεωμετρία των αγωγών. Το ύψος των αγωγών πάνω από το έδαφος δεν μεταβάλλεται κοντά στους πύργους, αλλά ανάλογα με τη μεταβλητή φόρτιση και τις συνθήκες του περιβάλλοντος(μεταβλητό), διαφέρει σημαντικά από το ύψος των γραμμών μεταφοράς πλησίον των πυλώνων (ειδικά στο μέσο άνοιγμα). Αυτό το ύψος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των αγωγών και τη θερμοκρασία των αγωγών, η οποία είναι συνάρτηση τόσο του φορτίου όσο και των καιρικών συνθηκών. Η θερμοκρασία των αγωγών προκύπτει από το ισοζύγιο μεταξύ της εισροής θερμότητας από το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό (φαινόμενο joule), της εισροής θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία, της απαγωγής θερμότητας στο περιβάλλον, η οποία εξαρτάται αφενός μεν από τη διαφορά θερμοκρασίας του αέρα και των αγωγών και αφετέρου δε εξαρτάται επίσης από τον άνεμο (ισχύς και κατεύθυνση)και την απαγωγή θερμότητας από την υπέρυθη ακτινοβολία. Διευκρινίζεται ότι για μια δεδομένη φόρτιση, η μεγαλύτερη διακύμανση της πτώσης των αγωγών υπό θερμές καιρικές συνθήκες θα έχει ως αποτέλεσμα να σημειωθούν υψηλότερες τιμές του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου, στο επίπεδο του εδάφους, από ότι σε συνθήκες κρύου καιρού.
- Η μη ισορροπημένη φόρτιση μιας γραμμής μεταφοράς είναι ένας ακόμα μη σταθερός παράγοντας που επηρεάζει το μαγνητικό πεδίο. Παράγεται μαγνητικό πεδίο από τη γραμμή μεταφοράς, ιδιαίτερα μακριά από τον άξονα της γραμμής, που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας ή ακριβέστερα από την παρουσία ρευμάτων επιστροφής γείωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τα ισορροπημένα ρεύματα μειώνεται αρκετά μακριά από τη γραμμή με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης προς τον άξονα της γραμμής, ενώ το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ρεύματα μηδενικής ακολουθίας μειώνεται με το αντίστροφο της απόστασης από τους αγωγούς [7].

## 2.2.2 Μαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος που δημιουργούνται από υπόγεια καλώδια

### 2.2.2.1 Επιρροή των σταθερών ή εξαρτώμενων από το σχεδιασμό παραμέτρων σε υπόγεια καλώδια

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών, των οποίων τα ρεύματα παράγουν μαγνητικό πεδίο, εξαρτώνται από τις εξής παραμέτρους:

- Ο σχηματισμός των καλωδίων ή η σχετική θέση στο χώρο των αγωγών φάσης επηρεάζει τη μαγνητική επαγωγή. Τα καλώδια (μονού πυρήνα) τροφοδοσίας τοποθετούνται συνήθως σε τρίφυλλη διάταξη (trefoil formation) ή επίπεδο σχηματισμό ανάλογα με την περίπτωση. Ο τρίφυλλος (trefoil) σχηματισμός επιτρέπει μια καλή συμμετρία των φάσεων και δημιουργεί το χαμηλότερο δυνατό μοτίβο μαγνητικού πεδίου. Στην πραγματικότητα, τοποθετεί τις φάσεις στην ίδια απόσταση μεταξύ τους με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο και τα ρεύματα κυκλοφορίας να είναι ισοδύναμα για κάθε φάση καλωδίου. Χρησιμοποιείται πιο συχνά για εφαρμογές χαμηλής και μέσης τάσης έως 132 kV, λόγω της ευκολίας εγκατάστασης και της μικρής χωρητικότητας που έχει ο σχηματισμός σε όλο το σύστημα συγκράτησης που χρησιμοποιείται. Ωστόσο, η εγκατάσταση μονοπύρηνων καλωδίων σε τρίφυλλη (trefoil) διάταξη μπορεί να σημαίνει ότι τα καλώδια επαφής θα παρουσιάσουν χειρότερη απαγωγή θερμότητας σε σύγκριση με την επίπεδη διαμόρφωση, μειώνοντας επομένως την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος και συνεπώς δεν είναι πάντα δυνατή η εγκατάσταση των καλωδίων σε τρίφυλλο (trefoil) σχηματισμό, όταν απαιτείται πολύ υψηλή ικανότητα μεταφοράς ρεύματος (αφού χρειάζεται να γίνει θερμική απαγωγή και άρα απαιτείται κάποια απόσταση μεταξύ των αγωγών). Στην περίπτωση αυτή τα καλώδια τοποθετούνται με απόσταση δεκάδων εκατοστών μεταξύ των αξόνων των αγωγών σε τριγωνικό σχηματισμό ή σε επίπεδο σχηματισμό (συχνότερα).
- Ο επίπεδος σχηματισμός χρησιμοποιείται σπάνια σε τάσεις κάτω των 275 kV, επειδή τα κέντρα στερέωσης πρέπει να επιτρέπουν επαρκή απαγωγή θερμότητας. Στον επίπεδο σχηματισμό των καλωδίων η κεντρική φάση της τριφασικής σειράς επηρεάζεται δυσμενώς από τα μαγνητικά πεδία γειτονικών φάσεων, οδηγώντας σε υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας στην μεσαία φάση και μεταγενέστερα σε ανισορροπία τάσης. Η μεταφορά φάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτών των επιπτώσεων, αλλά ο απαραίτητος χώρος τοποθέτησης που απαιτείται για τέτοιες εγκαταστάσεις συνήθως αποκλείει τη χρήση τους στις περισσότερες βιομηχανικές/εμπορικές εγκαταστάσεις και έτσι οι επίπεδοι σχηματισμοί τείνουν να είναι λιγότερο αποδοτικοί λόγω της δυνητικής αύξησης του χώρου καλωδιακής διαδρομής που καταλαμβάνουν [6, 7, 8].



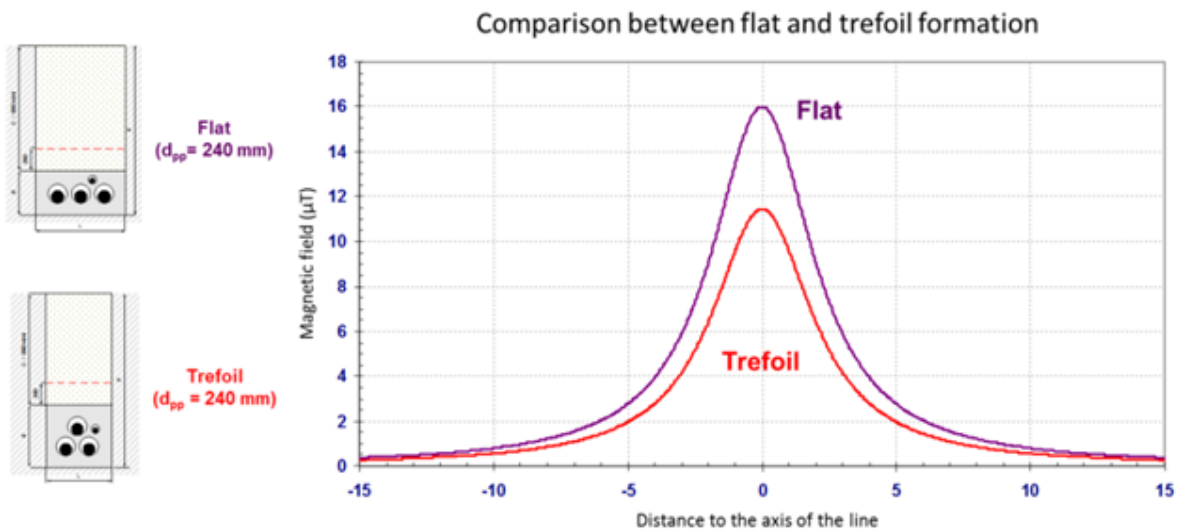
Σχήμα 2.5: Τρίφυλλη (trefoil) και επίπεδη διάταξη καλωδίων [8]

Λαμβάνοντας υπόψιν τις επίπεδες διατάξεις και τις τρίφυλλες, το μαγνητικό πεδίο σε μεγάλη απόσταση από τα καλώδια μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τους προσεγγιστικούς τύπους:

$$B_{flat}(r) = (\sqrt{3} \cdot d_{pp} \cdot I) / (5 \cdot r^2)$$

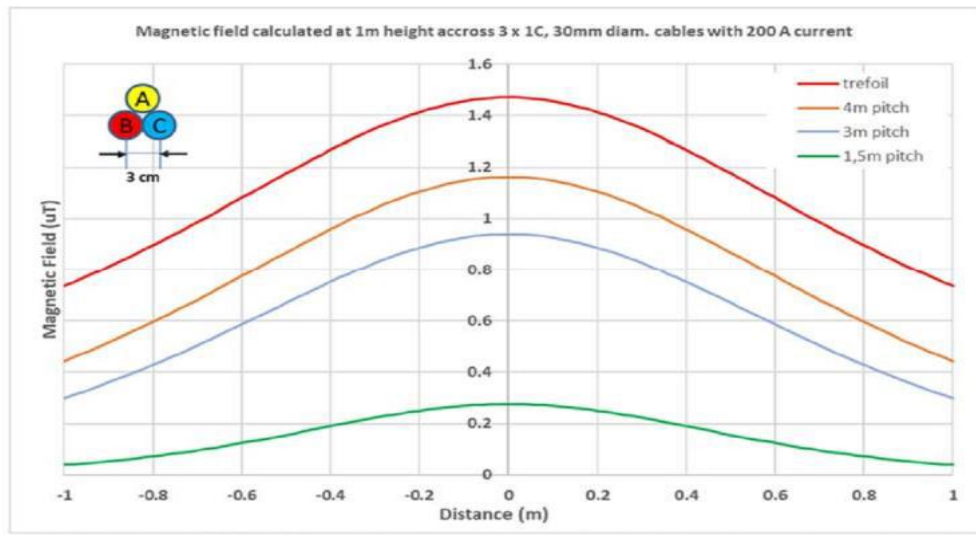
$$B_{trefoil}(r) = (\sqrt{6} \cdot d_{pp} \cdot I) / (10 \cdot r^2)$$

όπου  $d_{pp}$  είναι η απόσταση των φάσεων των αγωγών και  $r$  η απόσταση μεταξύ του γεωμετρικού κέντρου της γραμμής (για παράδειγμα, ο κεντρικός αγωγός για επίπεδες διαμορφώσεις) και του απομακρυσμένου σημείου υπολογισμού ( $r \gg d$ ). Αυτοί οι τύποι δείχνουν ξεκάθαρα ότι το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται γραμμικά από την απόσταση των φάσεων και ότι το πεδίο στην τρίφυλλη διάταξη είναι SQRT(2) μικρότερο απ' ό τι σε μια επίπεδη διάταξη όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6 [7].



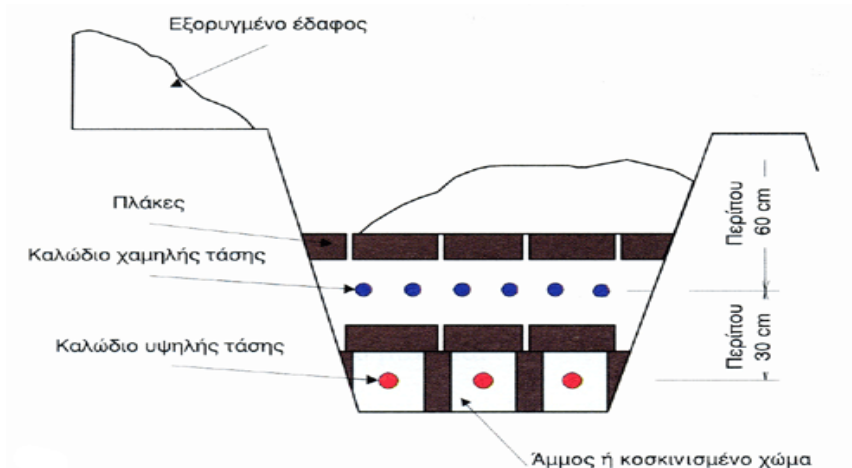
**Σχήμα 2.6:** Σύγκριση επίπεδων και τρίφυλλων(trefoil) σχηματισμών. Το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται ανά 1000 A σε 1 m πάνω από το έδαφος [7]

Η συμμετρία των φάσεων, ως προς το σημείο μέτρησης, μπορεί να βελτιωθεί, εάν οι αγωγοί φάσης αντί να είναι ευθύγραμμοι έχουν σπειροειδή (ελικοειδή) σχηματισμό. Τα καλώδια triplex είναι τρία συμβατικά μονοπύρρηνα καλώδια που παρέχονται προτυλιγμένα σε σχηματισμό τριφυλλιού (trefoil) από τον κατασκευαστή των καλωδίων, ενώ οι τρεις πυρήνες έχουν συστραφεί αργά μεταξύ τους κατά τη διαδικασία κατασκευής και παρέχονται σε ένα τύμπανο [7]. Στο σχήμα 2.7 φαίνονται οι τιμές του μαγνητικού πεδίου, υπολογισμένες σε ύψος 1 m πάνω από ένα υπόγειο καλώδιο triplex κατασκευασμένο από 3 x 1 C, μονωμένα καλώδια μονού πυρήνα διαμέτρου 30 mm, με ρεύμα 200 A, είτε με ευθύγραμμο τρίφυλλο (trefoil), είτε με σπειροειδή (ελικοειδή) διαφορετικού βήματος σχηματισμό [7, 8].

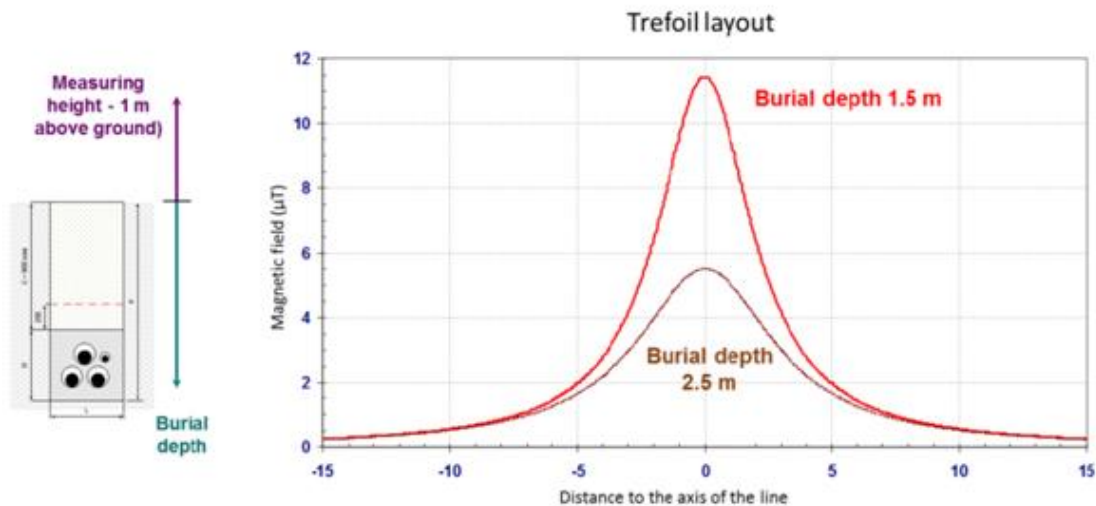


Σχήμα 2.7: Κατανομή μαγνητικού πεδίου σε ύψος 1 m εγκαρσίως τριπλού καλωδίου με πυρήνες (καλώδιο triplex) σε επίπεδο τρίφυλλο ή σπειροειδή σχηματισμό διαφορετικού βήματος [7]

- Το βάθος ταφής των καλωδίων έχει άμεση επίδραση στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στο έδαφος [7]. Η εγκατάσταση των καλωδίων στο έδαφος γίνεται μέσα σε ειδικά χαντάκια που ανοίγονται κατά μήκος των δρόμων. Αν στο χαντάκι οδεύουν και καλώδια χαμηλής τάσης, τότε τα καλώδια μέσης τάσης τοποθετούνται στο κάτω μέρος του χαντακιού και διαχωρίζονται από τα καλώδια χαμηλής τάσης με τσιμεντένιες πλάκες [8]. Η επιρροή είναι ιδιαίτερα αισθητή ακριβώς πάνω και σε κοντινή απόσταση από το καλώδιο, ενώ γίνεται αμελητέα, όταν η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της γραμμής είναι μεγάλη (ενδεικτικά σε αναλογία 3-4) σε σύγκριση με το βάθος ταφής [7].



Σχήμα 2.8: Διάταξη υπόγειων καλωδίων χαμηλής και υψηλής τάσης [9]

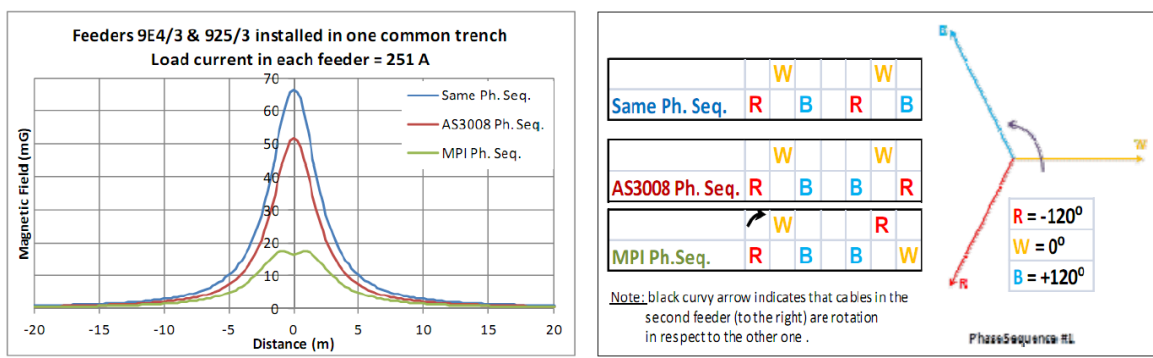


Σχήμα 2.9: Επίδραση του βάθους ταφής. Το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται σε ύψος 1 m πάνω από το έδαφος και η απόσταση από τα καλώδια είναι αντίστοιχα 2,5 και 3,5 m, ακριβώς πάνω από τα καλώδια [7]

- Παρουσία των υποδοχών σύνδεσης (joint bays). Στον υποδοχέα άρθρωσης, κάθε κύκλωμα αναδιατάσσεται από τον κανονικό του σχηματισμό (συνήθως trefoil) σε έναν επίπεδο σχηματισμό κατά κανόνα, έχοντας κρατήσει αποστάσεις μεταξύ των καλωδίων. Όταν τα καλώδια είναι τοποθετημένα σε μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους στην υποδοχή σύνδεσης του καλωδίων, παράγουν υψηλότερο μαγνητικό πεδίο συγκριτικά με το αυτό που παράγεται από τα καλώδια στο όρυγμα [7].

Για πολλαπλά κυκλώματα, εκτός από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών, το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από:

- Την ακολουθία φάσεων των πολλαπλών κυκλωμάτων σε μια τάφρο. Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου εγκαρσίως της τάφρου των καλωδίων σε ύψος 1m πάνω από το έδαφος για διάφορες διατάξεις των φάσεων των δύο κυκλωμάτων.

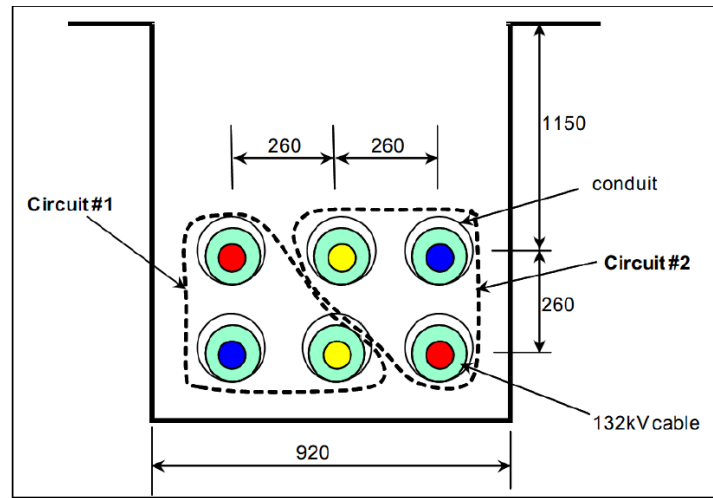


Σχήμα 2.10: Κατανομή του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου εγκαρσίως της τάφρου των καλωδίων, σε ύψος 1 m πάνω από το έδαφος, για διάφορες ακολουθίες των φάσεων [7]

Μια αιτία ανησυχίας στην περίπτωση των γραμμών διπλού κυκλώματος, ιδιαίτερα αυτών με βελτιστοποιημένη διάταξη φάσης (όπως η μετατεθειμένη ακολουθία φάσεων) και παράλληλη

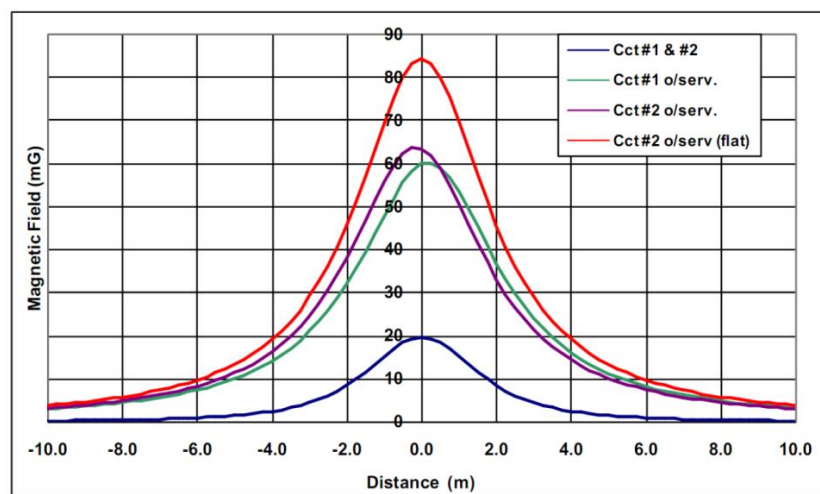


λειτουργία, είναι μια πιθανή διακοπή ενός κυκλώματος. Το σχήμα παρακάτω δείχνει μια διάταξη διπλής στοιβάς έξι καλωδίων με μετατεθειμένη ακολουθία φάσης:



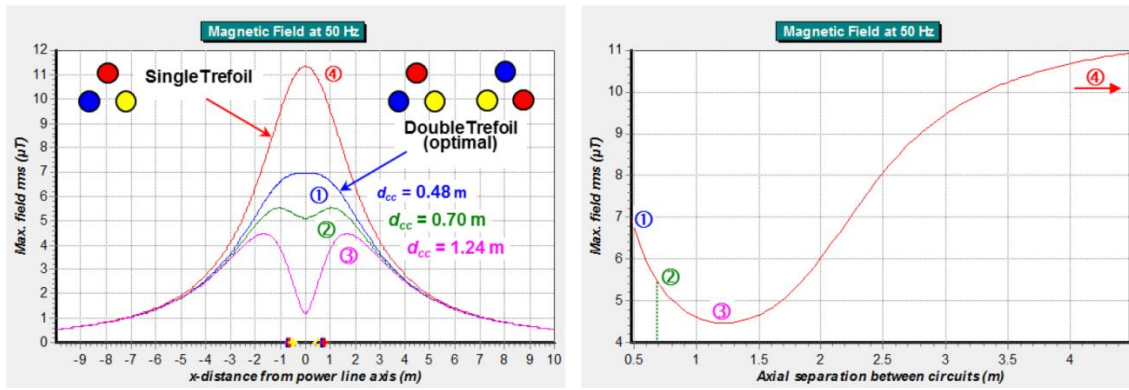
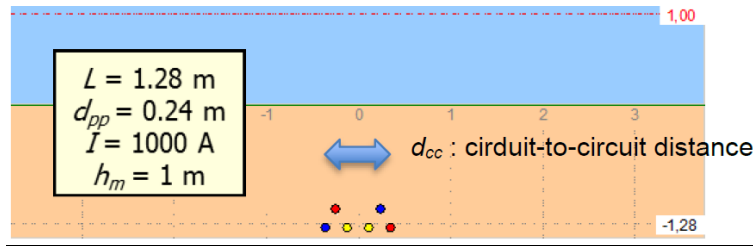
Σχήμα 2.11: Δύο κυκλώματα καλωδίων 132kV κατασκευασμένα από μονοπύρηνα καλώδια σε τριγωνική διάταξη (triangular formation) [7]

Το σχήμα 2.12 δείχνει τη σύγκριση των μαγνητικών πεδίων που προκύπτουν από τη διαμόρφωση διπλού κυκλώματος στην περίπτωση που ένα από τα δύο κυκλώματα είναι εκτός λειτουργίας και με το πεδίο που δημιουργείται από επίπεδο σχηματισμό.



Σχήμα 2.12: Μέγεθος μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της τάφρου των καλωδίων σε ύψος 1m πάνω από το έδαφος [7]

- Ο διαχωρισμός μεταξύ των κυκλωμάτων είναι μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει το πεδίο. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει πως επηρεάζεται το μαγνητικό πεδίο, από την απόσταση μεταξύ των κυκλωμάτων, πάνω από τα καλώδια (στο επίπεδο του εδάφους). Στον υπολογισμό που παρουσιάζεται, η βέλτιστη απόσταση είναι 1,24m, αλλά μια τέτοια απόσταση δημιουργεί μια διευρυμένη τάφρο και επομένως επιβαρύνει περισσότερο τις εργασίες εγκατάστασης [7].



Σχήμα 2.13: Τιμές μαγνητικού πεδίου για ένα καλώδιο διπλού κυκλώματος με διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των κυκλωμάτων (όλα υπολογισμένα 1 m πάνω από το έδαφος) [7]

### 2.2.3 Μη ομοιομορφία μαγνητικών πεδίων συχνότητας ισχύος

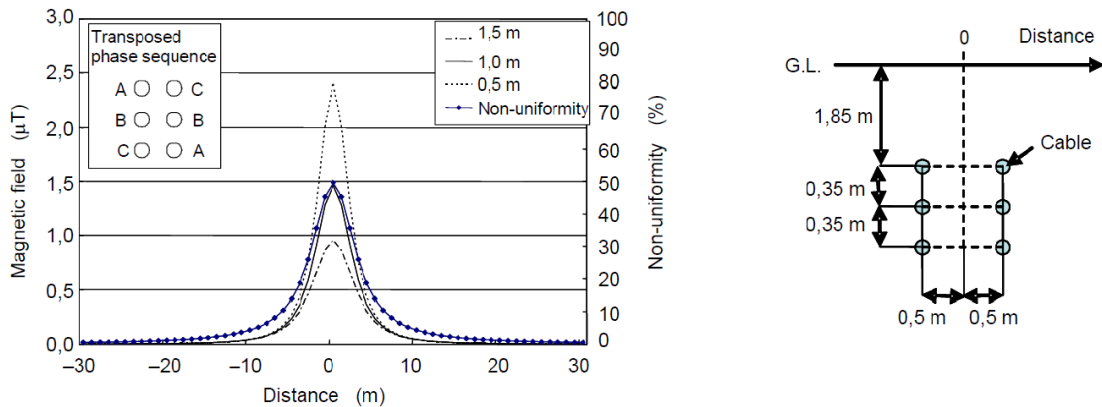
Ένα ομοιόμορφο διανυσματικό πεδίο δεν υπάρχει στη φύση αλλά είναι μια αφηρημένη απλοποιημένη έννοια που επιτρέπει την έκφραση ενός πεδίου σε όρους απλώς μιας ποσότητας. Στο πρόβλημα της έκθεσης των ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, η ιδέα του ομοιόμορφου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου έχει χρησιμοποιηθεί από τη διεθνή επιτροπή ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) για τον καθορισμό των ορίων έκθεσης που ονομάζονται "Επίπεδα Αναφοράς". Καθώς τα μαγνητικά πεδία, που παράγονται από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ειδικά αυτά που σχετίζονται με υπόγεια καλώδια, δεν μπορούν να θεωρηθούν ομοιόμορφα στις διαστάσεις ενός ανθρώπινου σώματος, το IEC 62110 ορίζει τη λεγόμενη "μη ομοιομορφία του μαγνητικού πεδίου", που είναι ένα κατά προσέγγιση μέτρο για την εκτίμηση του πόσο μακριά από την ομοιομορφία είναι το μαγνητικό πεδίο στο χέρι, μετρώντας στις διαστάσεις του ανθρώπινου σώματος, ως τη μέγιστη τιμή του  $\Delta B$  με

$$\Delta B = ([B_h - B_{avg}]) / B_{avg} \times 100 (\%), \text{ όπου}$$

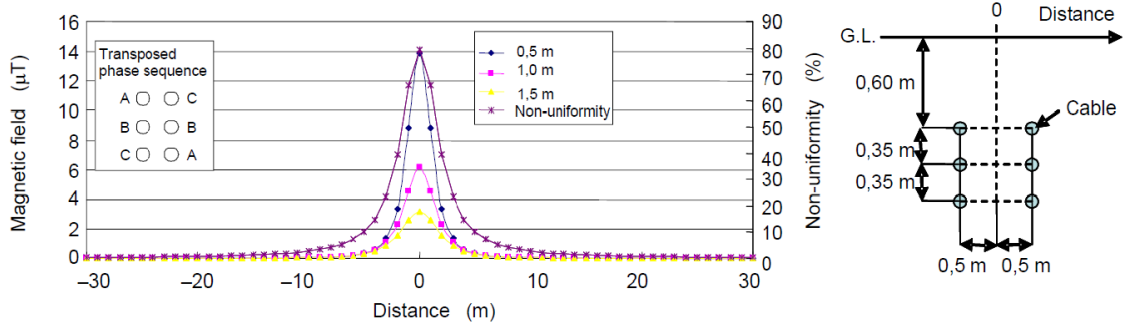
$B_h$ : Τιμή του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου σε ύψος 0,5 m, 1,0 m και 1,5 m πάνω από το έδαφος

$B_{avg}$ : Αριθμητικός μέσος όρος των τριών τιμών [7]

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η επίδραση του βάθους που έχουν τοποθετηθεί τα υπόγεια καλώδια στην ανομοιομορφία του πεδίου. Παρουσιάζεται το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα διπλό κύκλωμα υπόγειων καλωδίων με κατακόρυφη διαμόρφωση και μετατιθέμενης διάταξης φάσης



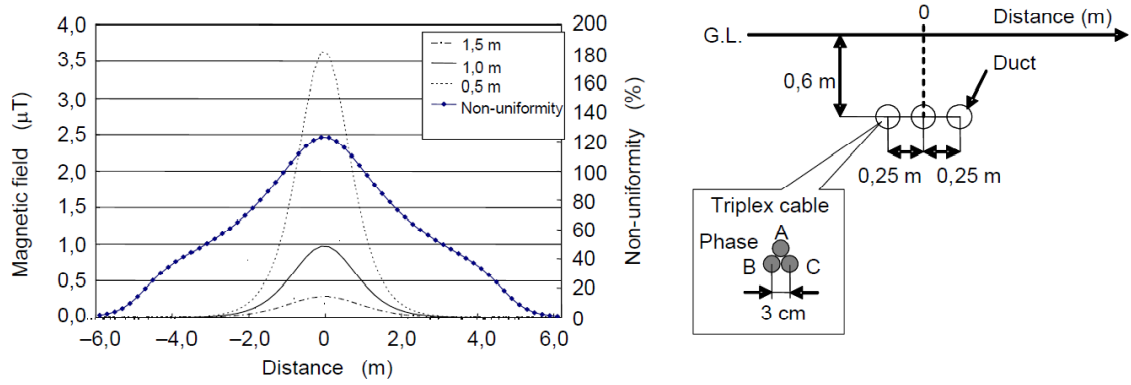
α) Βαθιά θαμμένα καλώδια-IEC 1635/09



β) Λιγότερο βαθιά θαμμένα καλώδια-IEC1636/09 (εν συγκρίσει με το άνω σχήμα)

Σχήμα 2.14: Τιμές του μαγνητικού πεδίου και της ανομοιομορφίας πάνω από υπόγεια καλώδια -Επίδραση του βάθους ταφής [7]

Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο των καλωδίων σε ύψη 0,5 m, 1,0 m και 1,5 m από το έδαφος. Το ρεύμα που διαρρέει το κάθε κύκλωμα θεωρείται ότι είναι 200 A και βρίσκεται σε ισορροπία. Επίσης υπολογίζεται η ανομοιομορφία και αποτυπώνεται στα σχήματα 2.14α και 2.14β, όπου γίνεται σύγκριση των τιμών του μαγνητικού πεδίου στις περιπτώσεις που έχουμε θαμμένα καλώδια τοποθετημένα σε μεγαλύτερο βάθος στην πρώτη περίπτωση και σε μικρότερο στην δεύτερη περίπτωση. Βλέποντας το σχήμα 2.15 γίνεται κατανοητή η επίδραση του διαχωρισμού των κυκλωμάτων στην ανομοιομορφία. Η χωρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από ένα τριπλό κύκλωμα υπόγειων καλωδίων, τα οποία αποτελούνται από τρία συνεστραμμένα σύρματα στα καλώδια (triplex cable) με σπειροειδές βήμα 3,0 m, φθίνει πολύ πιο γρήγορα. Το ρεύμα που διαρρέει το κάθε κύκλωμα θεωρείται ότι είναι 200 A. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου υπολογίζονται ως συνάρτηση της απόστασης από το κέντρο των καλωδίων σε ύψη 0,5 m, 1,0 m και 1,5 m από το έδαφος [7].



**Σχήμα 2.15:** Μέγεθος μαγνητικού πεδίου και ανομοιομορφία πάνω από υπόγεια καλώδια  
Επίδραση του διαχωρισμού μεταξύ των κυκλωμάτων-IEC 1637/09 [7]

### **3) Μετρήσιμα όρια έκθεσης και οι αντίστοιχες συνθήκες φόρτισης αναφοράς**

#### **3.1 Μετρήσιμα όρια έκθεσης σύμφωνα με τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις**

Τα καθορισμένα όρια έκθεσης, τα οποία έχουν συσταθεί σε διεθνές επίπεδο από τις επιτροπές εμπειρογνομόνων, όπως η διεθνής επιτροπή ICNIRP και το Ινστιτούτο IEEE, αποσκοπούν στην πρόληψη των έντονων ή βραχυπρόθεσμων επιπτώσεων στους ανθρώπους κατά την έκθεση τους σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας (δηλαδή αντιδράσεις στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, που εκδηλώνονται μέσα σε δευτερόλεπτα μετά την έναρξη της έκθεσης).

Τα μετρήσιμα όρια έκθεσης χαμηλής συχνότητας από την διεθνή επιτροπή ICNIRP "Guidelines for Limiting exposure to Time - Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)" δίνονται ως "Επίπεδα Αναφοράς", τα οποία εκφράζονται ως τιμές rms των ομοιόμορφων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Το Ινστιτούτο IEEE παρέχει "rms τιμές της μέγιστης επιτρεπόμενης έκθεσης" για διαφορετικές περιοχές του σώματος, καθορίζοντας το μέσο χρόνο για την εφαρμογή της rms τιμής του πεδίου, που εξαρτάται από τη συχνότητα. Καθώς οι οδηγίες της επιτροπής ICNIRP έχουν εγκριθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), οι περισσότεροι εθνικοί κανονισμοί έχουν υιοθετήσει αυτά τα όρια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αρχικές κατευθυντήριες γραμμές της επιτροπής ICNIRP του 1998 έχουν αντικατασταθεί από νέες του 2010, οι οποίες, μετά την ανάπτυξη της επιστημονικής γνώσης, καθώς και των ανθρώπινων προτύπων, έχουν προτείνει λιγότερο περιοριστικά επίπεδα αναφοράς.

Παραδείγματα τέτοιων νομοθεσιών ή εθνικών πολιτικών δίνονται παρακάτω:

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η σύσταση 1999/519/ΕΚ του συμβουλίου απευθύνθηκε στα κράτη μέλη προκειμένου να θεσπιστεί ένα κοινοτικό πλαίσιο, όσον αφορά την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία, με στόχο την προστασία του κοινού. Προτείνει στα κράτη μέλη να υιοθετήσουν ένα πλαίσιο βασικών περιορισμών και επιπέδων αναφοράς χρησιμοποιώντας τις κατευθυντήριες γραμμές του συμβουλίου ICNIRP του 1998, καθώς και να υλοποιήσουν μέτρα σχετικά με πηγές ή πρακτικές που προκαλούν ηλεκτρομαγνητική έκθεση του ευρύτερου κοινού, όταν ο χρόνος έκθεσης είναι σημαντικός. Η σύσταση σημειώνει ότι, ακόμη και αν αυτά τα όρια βασίζονται μόνο σε καθορισμένες βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις, δεδομένου ότι υπάρχουν συντελεστές ασφαλείας περίπου 50 μεταξύ των τιμών κατωφλίου για οξείες επιπτώσεις και των βασικών περιορισμών, αυτή η σύσταση καλύπτει σιωπηρά τις προτεινόμενες μακροπρόθεσμες επιπτώσεις σε ολόκληρο το εύρος συχνοτήτων.

Το Γαλλικό τεχνικό διάταγμα της 17ης Μαΐου 2001 αναφέρει ότι η σύσταση του Συμβουλίου δεν πρέπει να υπερβαίνει τα επίπεδα αναφοράς των 5 kV/m και 100  $\mu$ T (τιμές rms στα 50 Hz), σε μέρη που είναι συνήθως προσβάσιμα στο κοινό και σε "κανονικές συνθήκες λειτουργίας" των ηλεκτρικών γραμμών. Δεν υπάρχουν οδηγίες για το πως θα γίνεται η απόδειξη της συμμόρφωσης με τα καθορισμένα όρια. Επίσης, το 2011 δημοσιεύτηκε ένα νομοθετικό διάταγμα που καθόρισε ένα "Σχέδιο Ελέγχου και Επιθεώρησης" για τα ηλεκτρομαγνητικά

πεδία, το οποίο στοχεύει στην καλύτερη ενημέρωση του κοινού σχετικά με τα πραγματικά επίπεδα έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο κοντά σε γραμμές ισχύος άνω των 50 kV.

Το διάταγμα αυτό απαιτεί:

- Να γίνονται μετρήσεις σε κάθε αστικοποιημένη περιοχή που διασχίζεται από γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής τάσεως.
- Παρέκταση των μετρούμενων τιμών στη μέγιστη έκθεση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής ισχύος.
- Να δοθούν όλα τα αποτελέσματα στη Γαλλική Υπηρεσία Υγείας ANSES, η οποία δεσμεύεται να τα δημοσιεύσει.

Ο Ιταλικός νόμος 36/2001, συμπληρωμένος με το διάταγμα DPCM της 8ης Ιουλίου (50 Hz), 2003, σύμφωνα με τη σύσταση του συμβουλίου, καθορίζει ως όρια έκθεσης, που προορίζονται για την προστασία της ανθρώπινης υγείας από οξείες επιπτώσεις, τα επίπεδα αναφοράς των 5 kV/m και 100  $\mu$ T (τιμές rms στα 50 Hz), των οποίων δεν πρέπει να γίνεται υπέρβαση σε καμία περίπτωση έκθεσης. Η συμμόρφωση με τα όρια έκθεσης πρέπει να επαληθεύεται στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής και δεν απαιτείται παρέκταση σε άλλες συνθήκες.

Στη Βραζιλία, ο νόμος 11.934/2009 ορίζει ότι θα υιοθετηθούν τα όρια έκθεσης που συνιστά ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας. Ο ρυθμιστικός οργανισμός ANEEL με την πράξη RN αριθ. 398, συμπληρωμένη με τις πράξεις RN αριθμού 413 και 616, ορίζει ότι τα όρια έκθεσης θα είναι οι βασικοί περιορισμοί που συνιστώνται από τις οδηγίες του ICNIRP 2010 και ότι η συμμόρφωση με τα επίπεδα αναφοράς θα διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς. Η αξιολόγηση της συμμόρφωσης σε σχέση με τα επίπεδα αναφοράς (4,17 kV/m και 200  $\mu$ T (τιμές rms σε 60 Hz συχνότητα)) πρέπει να γίνεται με υπολογισμούς ή με μετρήσεις υπό "συνθήκη βαριάς φόρτισης" σε υψόμετρο 1,5 m πάνω από το έδαφος. Εάν οι μετρήσεις δεν μπορούν να γίνουν υπό συνθήκες βαριάς φόρτισης, επιτρέπεται η παρέκταση.

Στον Καναδά, τα όρια για τη γενική έκθεση του κοινού στα 60 Hz δεν νομοθετούνται άμεσα ομοσπονδιακά ή επαρχιακά. Ωστόσο, στα έργα ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία εμπλέκονται ομοσπονδιακές αρχές απαιτείται να ακολουθήσουν τον Καναδικό νόμο περί περιβαλλοντικής αξιολόγησης, επιπλέον του τοπικού επαρχιακού περιβαλλοντικού νόμου, που ισχύει πάντα. Έτσι, καθορίζονται ρυθμιστικές διαδικασίες, που απαιτούνται έργα ηλεκτρικής ενέργειας να έχουν περιβαλλοντική αδειοδότηση μέσω της περιβαλλοντικής αναθεώρησης (με βάση το μέγεθος του έργου, την κατηγορία τάσης κ.λπ.). Εκτός από πολλές άλλες πολυάριθμες προϋποθέσεις που τίθενται στο έργο, τα όρια στα επίπεδα πεδίου γραμμής μεταφοράς θα ζητούνται συνήθως με βάση τις υπάρχουσες προδιαγραφές, όπως αυτές που ορίζονται από τις κατευθυντήριες γραμμές της επιτροπής ICNIRP 2010 (4,17 kV/m, 200  $\mu$ T σε rms τιμές) και η ένωση CSA (Canadian Standards Association), που αναφέρεται στο IEEE Standards C95.6-2002, ενώ το Health Canada αναφέρεται στις κατευθυντήριες γραμμές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ) και του ICNIRP 2010. Τα κριτήρια για τη συμμόρφωση με οποιαδήποτε όρια υιοθετηθούν θα προσδιοριστούν από τη ρυθμιστική διαδικασία αδειοδότησης. Η αξιολόγηση της συμμόρφωσης τυπικά γίνεται με υπολογισμούς (προσομοιώσεις σε υπολογιστή) βασισμένους στις τελικές παραμέτρους σχεδιασμού υπό μέγιστη φόρτιση έκτακτης ανάγκης N-1 και στα όρια του δικαιώματος διέλευσης της γραμμής μεταφοράς, 1 m πάνω από το επίπεδο του εδάφους.

Στη Νότια Αφρική, τα όρια έκθεσης για το ευρύ κοινό σε συχνότητα 50 Hz, δίνονται από τα επίπεδα αναφοράς των κατευθυντήριων γραμμών της επιτροπής ICNIRP 2010: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου 5 kV/m και πυκνότητα μαγνητικής ροής 200  $\mu\text{T}$  rms τιμή και έχουν εγκριθεί από το Υπουργείο Υγείας της Νότιας Αφρικής και συνεπώς ισχύουν για όλες τις γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος (εναέριες και υπόγειες). Τα σχέδια της δημόσιας επιχείρησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Νότιας Αφρικής "Eskom" καλύπτουν αυτά τα επίπεδα αναφοράς σε ονομαστική τάση, ονομαστική θερμοκρασία σχεδιασμού και ελάχιστη πτώση του αγωγού, για συμμόρφωση. Τα όρια έκθεσης ισχύουν για όλες τις περιοχές που είναι προσβάσιμες στο κοινό υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας των γραμμών.

Ο εθνικός φορέας που εκπροσωπεί τις επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας στην Αυστραλία είναι ο Energy Networks Australia (ENA) και έχει εκδώσει ένα εγχειρίδιο διαχείρισης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με στόχο να παρέχει κοινές πληροφορίες σε όλη τη βιομηχανία για την αντιμετώπιση των ζητημάτων που ανακύπτουν από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Το εγχειρίδιο διαχείρισης αναφέρεται στους βασικούς περιορισμούς και στα επίπεδα αναφοράς, που καθορίζονται στο ICNIRP "Guidelines for Limiting exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)" (2010) και στο IEEE Std C95.6-2002 "Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz". Στην πράξη, το επίπεδο αναφοράς για τη γενική έκθεση του κοινού σε μαγνητικά πεδία των 200  $\mu\text{T}$  (rms τιμή σε συχνότητα 50 Hz) κανονικά θεωρείται συνήθως ως όριο. Καθώς, γενικά, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία από τα στοιχεία ηλεκτρικής ενέργειας θα είναι πολύ κάτω από το επίπεδο αναφοράς σε αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές, δεν θα απαιτούνται ειδικές αξιολογήσεις συμμόρφωσης. Οι επαληθεύσεις συμμόρφωσης ή η επικύρωση, όπου απαιτείται αξιολόγηση, θα μπορούσαν να έχουν τη μορφή μετρήσεων ή απλών υπολογισμών για να αποδειχθεί η συμμόρφωση με τα επίπεδα αναφοράς ή τη μοντελοποίηση της απόδειξης συμμόρφωσης έναντι των βασικών περιορισμών.

Τα ιαπωνικά τεχνικά πρότυπα σχετικά με τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις (τελευταία αναθεώρηση στις 31 Μαρτίου, 2017) αναφέρουν τα εξής:

- Για τις εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε 1 m πάνω από το έδαφος θα πρέπει να είναι μικρότερη από 3 kV/m, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (ορίστηκε το 1976),
- Για τον εξοπλισμό ηλεκτρικής ενέργειας και τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής και των υποσταθμών, η μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου θα πρέπει να είναι μικρότερη από 200  $\mu\text{T}$  σε 50/60 Hz συχνότητα, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (ορίστηκε στις 31 Μαρτίου 2011) [7].

### **3.1.1 Συνθήκες φόρτισης αναφοράς για παρέκταση μετρήσεων μαγνητικού πεδίου**

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι περισσότερες χώρες έχουν υιοθετήσει τα βραχυπρόθεσμα όρια έκθεσης σε μαγνητικά πεδία των κατευθυντήριων γραμμών της ICNIRP και τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς, αλλά έχουν ορίσει διαφορετικές συνθήκες έκθεσης ή διαφορετικές συνθήκες φόρτισης υπό τις οποίες ισχύουν αυτά τα όρια, καθώς και διαφορετικές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τα επίπεδα αναφοράς. Κατά συνέπεια, στις περιπτώσεις όπου απαιτείται παρέκταση των αποτελεσμάτων της μέτρησης, δεν υπάρχει μοναδικός ορισμός των συνθηκών φόρτισης αναφοράς για την παρέκταση των μετρήσεων

μαγνητικού πεδίου. Γενικά, ο υπολογισμός είναι η προτιμώμενη μέθοδος για την απόδειξη της συμμόρφωσης με τα επίπεδα αναφοράς, γιατί για καταστάσεις που περιλαμβάνουν απλά στοιχεία, όπως γραμμές ισχύος, επιτρέπει την αξιολόγηση μιας σειράς συνθηκών φόρτισης.

Από την άλλη πλευρά, οι μετρήσεις είναι χρήσιμες ή ακόμη και απαραίτητες, για την αξιολόγηση περίπλοκων καταστάσεων, όπως όταν υπάρχουν περισσότερες από μία πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, αλλά για να ληφθούν υπόψιν τα εύλογα αναμενόμενα μέγιστα δυνατά φορτία, απαιτείται παρέκταση.

Ως εκ τούτου, ως πρώτο βήμα, είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι συνθήκες φόρτισης αναφοράς για την παρέκταση. Στην πράξη, η φόρτιση μιας γραμμής μεταφοράς θεωρείται ότι είναι ισορροπημένη και συνήθως χαρακτηρίζεται από το ρεύμα γραμμής. Επομένως, οι συνθήκες φόρτισης αναφοράς συνήθως εκφράζονται απλώς ως ρεύμα αναφοράς.

### **3.1.2 Σχετικοί ορισμοί ρεύματος αναφοράς**

Ο στόχος του ορισμού του ρεύματος αναφοράς είναι να διαμορφωθεί μια καλή αξιολόγηση της εύλογα αναμενόμενης μέγιστης βραχυπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο. Λόγω της παρουσίας παραγόντων ασφαλείας μεταξύ των τιμών κατωφλίου για οξείες επιδράσεις και των βασικών περιορισμών, οι συνθήκες φόρτισης έκτακτης ανάγκης συνήθως εξαιρούνται από τη μελέτη και μόνο οι κανονικές συνθήκες εξυπηρέτησης θεωρούνται ως "ρεύμα αναφοράς" [7].

#### **3.1.2.1 Ονομαστικό ρεύμα**

Το ονομαστικό ρεύμα αγωγού ορίζεται ως το μέγιστο ηλεκτρικό ρεύμα, εκφρασμένο σε αμπέρ, που μπορεί να μεταφέρεται συνεχώς στους αγωγούς μιας γραμμής μεταφοράς. Το ευρωπαϊκό πρότυπο CENELEC EN 50341-1 έχει διαφορετικές εθνικές παραλλαγές, με αποτέλεσμα η ονομαστική μέγιστη θερμοκρασία για τους αγωγούς γραμμής να ποικίλλει από χώρα σε χώρα.

Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψιν τους τυπικούς αγωγούς Almelec, η ονομαστική μέγιστη θερμοκρασία στη Γαλλία είναι στην περιοχή 70 - 90°C. Το ονομαστικό ρεύμα αγωγού εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, άρα το μέγιστο επιτρεπόμενο μόνιμο φορτίο είναι σημαντικά υψηλότερο το χειμώνα απ' ό,τι το καλοκαίρι. Για παράδειγμα, ο αγωγός Almelec ASTER (570 mm<sup>2</sup> σε τομή), που χρησιμοποιείται στη Γαλλία, έχει, σε μέγιστη ονομαστική θερμοκρασία 90 °C, ονομαστικό ρεύμα αγωγού:

- 1600 A το χειμώνα σε ψυχρές περιοχές (όπως οι Γαλλικές Άλπεις)
- 1200 A το καλοκαίρι σε θερμές περιοχές (όπως η περιοχή των ακτών της Μεσογείου).

Το ονομαστικό ρεύμα κυκλώματος ορίζεται ως το μέγιστο ηλεκτρικό ρεύμα, εκφρασμένο σε αμπέρ, που μπορεί να μεταφέρεται αδιαλείπτως, όπως καθορίζεται από τον ιδιοκτήτη της εγκατάστασης.

Για παράδειγμα, για γραμμές ή καλώδια που συνδέουν νέους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ή βιομηχανικούς πελάτες στο δίκτυο, η τιμή του ρεύματος αναφοράς για την απόδειξη της συμμόρφωσης με τα όρια έκθεσης δίνεται από την ονομαστική παραγωγή ή κατανάλωση ενέργειας [7].



### **3.1.2.2 Μέγιστο ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας**

Όλοι οι διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς συμφωνούν στο γεγονός ότι μια γραμμή ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργεί με ονομαστικό ρεύμα αγωγού σε ένα πολυπαραγοντικό δίκτυο δεν λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες και γενικά δεν τηρεί τον N-1 κανόνα.

Ως εκ τούτου, είναι ευρέως αποδεκτό ότι η προέκταση των μετρούμενων τιμών του μαγνητικού πεδίου στο ονομαστικό ρεύμα του αγωγού θα είχε ως αποτέλεσμα μια πολύ συντηρητική (δηλαδή υπερεκτιμημένη) αξιολόγηση της έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο. Κατά συνέπεια, άλλοι ορισμοί του "μέγιστου ρεύματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας", είναι πιο χρήσιμοι για να δοθεί μια ρεαλιστική αξιολόγηση της μέγιστης βραχυπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, δεν υπάρχει μοναδικός ορισμός του "μέγιστου ρεύματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας". Επί παραδείγματι, στο Γαλλικό πλαίσιο, λαμβάνεται ως το "μόνιμο ρεύμα εξυπηρέτησης", όπως ορίζεται από το πρότυπο CENELEC EN 50341-1 "AC overhead lines over 145 kV".

Στη Γαλλία η εφαρμογή αυτού του προτύπου (αναφ. EN 50341- 3.8), ορίζεται ως το ρεύμα που ανεβάζει τη θερμοκρασία του αγωγού στους 40°C υπό κανονικές καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος 21°C, ηλιακή ακτινοβολία 900 W/m<sup>2</sup>, εγκάρσιος άνεμος 1 m/s).

Για τον αγωγό Almelec ASTER 570 mm<sup>2</sup>, προκύπτει μέγιστο ρεύμα κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας 740 A, το οποίο είναι περίπου το μισό του ονομαστικού ρεύματος του αγωγού (που κυμαίνεται μεταξύ 1200 και 1600 A ανάλογα με την περιοχή και την εποχή).

Για τις υπόγειες γραμμές, στις οποίες δεν εφαρμόζεται το πρότυπο CENELEC EN 50341-1, το ρεύμα που αντιστοιχεί στο "μέγιστο ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας" είναι αυτό που δεν υπερβαίνεται κατά το 95 % του χρόνου. Από προεπιλογή στρογγυλοποιείται στο 60% της ονομαστικής τιμής [7].

### **3.1.2.3 Τιμή P95**

Μια άλλη πιθανή προσέγγιση, που συνιστάται στο Technical Brochure 320 (2007) "Characterisation of ELF magnetic fields", είναι η χρήση του 95ου εκατοστημόριου της ετήσιας κατανομής φορτίου, δηλαδή μια τιμή φορτίου που δεν υφίσταται υπέρβαση κατά τη διάρκεια του 95 % του χρόνου (ή που ξεπεράστηκε μόνο στο 5 % του χρόνου) [7].

## **3.2 Μετρήσιμα όρια έκθεσης σύμφωνα με τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις**

Διαφορετικές χώρες έχουν υιοθετήσει διαφορετικά μετρήσιμα όρια έκθεσης για την αντιμετώπιση των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων που αποδίδονται σε μαγνητικά πεδία και ορισμένες από αυτές έχουν υιοθετήσει τα ίδια όρια που έχουν καθοριστεί για τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις στηριζόμενες απλώς στην παρουσία άφθονων παραγόντων ασφαλείας μεταξύ των τιμών κατωφλίου για οξείες επιπτώσεις και των βασικών περιορισμών. Άλλες χώρες πάλι λαμβάνοντας υπόψιν μια προληπτική προσέγγιση έχουν υιοθετήσει στην εθνική τους νομοθεσία ή πολιτική ή σε επίπεδο δημοτικών αρχών σχεδιασμού, χαμηλότερα μετρήσιμα όρια για μακροπρόθεσμη έκθεση σε μαγνητικά πεδία από εκείνα που προτείνονται

για βραχυπρόθεσμη έκθεση από την επιτροπή ICNIRP και το Ινστιτούτο IEEE. Ωστόσο, οι μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό της μακροχρόνιας έκθεσης διαφέρουν από χώρα σε χώρα, οι οποίες έχουν καθορίσει ειδικές συνθήκες έκθεσης που σχετίζονται με αυτά τα εγκεκριμένα όρια.

Μερικά παραδείγματα νομοθεσιών ή εθνικών πολιτικών θα δοθούν παρακάτω.

Στην Ιταλία ο νόμος 36/2001 συμπληρωμένος με το διάταγμα DPCM της 8ης Ιουλίου 2003 για τις εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας συχνότητας ισχύος (50 Hz)(γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας και υποσταθμοί), εκτός από τα όρια έκθεσης (με βάσει τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις), καθιερώνει για την έκθεση σε μαγνητικά πεδία τα εξής:

- Κρίσιμες τιμές (10  $\mu$ T): Δεν πρέπει ποτέ να ξεπεραστούν σε σπίτια, σχολεία και σε χώρους όπου οι άνθρωποι παραμένουν για τουλάχιστον 4 ώρες την ημέρα, ώστε να προστατεύονται από τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις, που έχουν σχέση με τα μαγνητικά πεδία σύμφωνα με την αρχή της προφύλαξης. Ορίζονται ως η μέση τιμή 24 ωρών, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και εφαρμόζονται σε οποιαδήποτε υπάρχουσα κατάσταση έκθεσης.
- Στόχοι ποιότητας (3 $\mu$ T): Τιμές που σταδιακά ελαχιστοποιούν την έκθεση σε μαγνητικά πεδία σε χώρους όπως τα σπίτια, τα σχολεία και γενικώς σε τόπους όπου η ανθρώπινη παρουσία είναι διαρκείας (παραμένουν στο ίδιο μέρος τουλάχιστον για 4 ώρες την ημέρα). Ορίζονται ως η μέση τιμή 24 ωρών αλλά εφαρμόζονται μόνο σε νέες καταστάσεις έκθεσης όπως είναι η κατασκευή νέων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας κοντά σε υπάρχοντα κτίρια ή το αντίστροφο δηλαδή νέα κτίρια κοντά σε υπάρχουσες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις κρίσιμες τιμές και τους στόχους ποιότητας, οι αρχές ελέγχου ακολουθούν τις λειτουργικές ενδείξεις του διατάγματος DM 29/05/08 "Έγκριση των διαδικασιών μέτρησης και αξιολόγησης της μαγνητικής επαγωγής", που ορίζει μια μεθοδολογία για την παρέκταση της τιμής της μαγνητικής επαγωγής που αντιστοιχεί στη μέγιστη ημερήσια διάμεση τιμή του ρεύματος  $I_{MAX}$  σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (με διαθεσιμότητα της γραμμής), βάσει ιστορικών καταγεγραμμένων τιμών του ρεύματος λαμβάνοντας υπόψιν μια περίοδο 365 ημερών πριν την ημέρα των μετρήσεων. Η μεθοδολογία αποκλείει καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, που πρέπει να δηλωθούν από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η μέθοδος παρέκτασης επιτρέπεται μόνο εάν επαληθευτεί ότι την ημέρα των μετρήσεων οι μετρούμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου και οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος που καταγράφονται συσχετίζονται καλά (συντελεστής συσχέτισης τουλάχιστον 0,9).

Στην Αυστραλία, ενώ δεν υπάρχουν ειδικές εθνικές κατευθυντήριες γραμμές που να καθορίζουν τα όρια μακροχρόνιας έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος, εάν ένας κατασκευαστής σχεδιάζει να χτίσει μια νέα κατοικία ή εμπορικό κτίριο κοντά σε γραμμή υψηλής τάσης ως μέρος της διαδικασίας έγκρισης είναι η υποβολή μιας έκθεσης αξιολόγησης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας στη δημοτική ή κρατική Πολεοδομική Αρχή. Οι Δημοτικές Αρχές Σχεδιασμού σε διαφορετικές πολιτείες της Αυστραλίας θέτουν τα δικά τους χαμηλά όρια έκθεσης σε μαγνητικά πεδία για νέα οικιστικά και εμπορικά κτίρια κοντά σε γραμμές υψηλής τάσεως (HV - high voltage) και υπερυψηλής τάσεως (EHV-Extra high

voltage). Τα χαμηλά όρια έκθεσης σε μαγνητική επαγωγή συνηθίζονται (0,4μT για συχνότητα 50 Hz).

Η συμμόρφωση συνήθως ελέγχεται υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας με την ολοκλήρωση ενός νέου έργου γραμμής ισχύος και δεν υπάρχει καθορισμένο εθνικό πλαίσιο που να θέτει τις απαιτήσεις για περιοδική ανασκόπηση της μακροπρόθεσμης έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία από τις υπάρχουσες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας.

Συχνά επιβάλλονται αυστηρές απαιτήσεις έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία από τις αρχές σχεδιασμού, για τον σχεδιασμό και την κατασκευή νέων γραμμών ισχύος τάσεως 110 kV και υψηλότερης, ακόμη και για μερικά υπόγεια καλώδια σε παλιά και καλά εδραιωμένα οικιστικά προάστια μεγάλων πόλεων της Αυστραλίας. Οι μετρούμενες τιμές της πυκνότητας της μαγνητικής ροής συσχετίζονται ευθέως με το ηλεκτρικό ρεύμα στη γραμμή ισχύος. Τα αποτελέσματα συνήθως παρεκτείνονται, για να προσδιοριστεί η πυκνότητα της μαγνητικής ροής κατά μήκος της ζώνης δουλείας της γραμμής μεταφοράς σε μέσες συνθήκες φόρτισης και η μέγιστη τιμή τους ρεύματος ή της ισχύος της εναέριας γραμμής μελλοντικά.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες δεν υπάρχουν εθνικοί κανονισμοί για την έκθεση σε μαγνητικά πεδία. Ωστόσο χρησιμοποιώντας μια προληπτική προσέγγιση, ορισμένες πολιτείες έχουν υιοθετήσει όρια έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία με σκοπό να διασφαλίσουν ότι οι τιμές του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στα όρια του δικαιώματος διέλευσης μιας μελλοντικής μεγάλης μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, δεν θα είναι ισχυρότερες από τις μέγιστες τυπικές τιμές των υπάρχουσών εγκαταστάσεων, οι οποίες λήφθηκαν με παρέκταση των μετρούμενων τιμών του μαγνητικού πεδίου στο μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας σε χειμερινή περίοδο.

Παραδείγματα τέτοιων νομοθεσιών ή πολιτικών είναι ακόλουθα:

Στη Νέα Υόρκη η μέγιστη μαγνητική ροή είναι τα 200 mG (20μT) σύμφωνα με το ANSI/IEEE Standard 644-1994 "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines", 1m πάνω από το έδαφος, στο όριο του δικαιώματος διέλευσης, χρησιμοποιώντας τη μέτρηση σε χειμερινό-κανονικό αγωγό.

Στη Φλόριντα σε κανονική λειτουργία (όλες οι συνθήκες λειτουργίας εκτός από τις συνθήκες φορτίου έκτακτης ανάγκης), το μέγιστο μαγνητικό πεδίο, σύμφωνα με το IEEE 644, στο όριο του δικαιώματος διέλευσης της γραμμής, 1 m πάνω από το έδαφος, δίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	Όρια Ιδιοκτησίας σε νέο υποσταθμό	Όρια δικαιώματος διέλευσης της Γραμμής Μεταφοράς
<=230 kV	2.00 kV/m & 150 mG (15 μT)	2.00 kV/m & 150 mG (15 μT)
<=500 kV & > 230 kV	2.00 kV/m & 200 mG (20 μT)	2.00 kV/m & 200 mG (20 μT)
>500 kV	5.50 kV/m & 250 mG (25 μT)	5.50 kV/m & 250 mG (25 μT)

Πίνακας 3.1: Νέα πρότυπα γραμμών και υποσταθμών στη Φλόριντα [7]

### **3.2.1 Συνθήκες φόρτισης αναφοράς για την παρέκταση των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου**

Σε αυτήν την περίπτωση, ο σκοπός των συνθηκών φόρτισης αναφοράς είναι να επιτευχθεί μια καλή αξιολόγηση της μέγιστης μακροπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικά πεδία.

Η rms τιμή του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από μια γραμμή μεταφοράς ποικίλλει στην αργή χρονική κλίμακα "τ" της διακύμανσης φόρτισης, οπότε υπάρχουν αρκετές πιθανές μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό της μακροπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο.

Όπως προαναφέρθηκε, διαφορετικές χώρες έχουν υιοθετήσει διαφορετικές μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό της μακροπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικά πεδία και συνεπώς δεν είναι δυνατόν να δοθεί ένας μοναδικός ορισμός των "συνθηκών φόρτισης αναφοράς" για την παρέκταση των μετρήσεων μαγνητικού πεδίου και επίσης δεν είναι δυνατόν να δοθεί ένας μοναδικός ορισμός της ποσότητας που χαρακτηρίζει το αποτέλεσμα των επεκτεινόμενων μετρήσεων των μαγνητικών πεδίων, η οποία πρέπει να συγκριθεί με τη μετρήσιμη οριακή τιμή. Επίσης, σε αυτή την περίπτωση, κανονικά θεωρείται ότι η φόρτιση μιας γραμμής μεταφοράς είναι περίπου ισορροπημένη και αντί για "συνθήκες φόρτισης αναφοράς" ορίζεται "ρεύμα αναφοράς". Όμως, καθώς οι τιμές του μαγνητικού πεδίου που παράγονται από μια γραμμή μεταφοράς, στα όρια της του δικαιώματος διέλευσης της γραμμής, οι οποίες είναι σημαντικές για τη δημόσια έκθεση, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας, που παράγονται από μια μη ισορροπημένη φόρτιση, η οποία εξαρτάται επίσης από τη διακύμανση της φόρτισης, η παρέκταση στο "ρεύμα αναφοράς" επιτρέπεται μόνο στην περίπτωση που επαληθευτεί ότι την ημέρα των μετρήσεων οι μετρούμενες τιμές του μαγνητικού πεδίου και οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος που καταγράφονται συσχετίζονται καλά [7].

### **3.2.2 Ρεύμα αναφοράς**

Ο ορισμός του ρεύματος αναφοράς αποσκοπεί στην απόκτηση μιας καλής εκτίμησης της μέγιστης μακροπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο.

#### **3.2.2.1 Πρακτική των ΗΠΑ**

Στις Ηνωμένες πολιτείες της Αμερικής, καθώς τα όρια έκθεσης σε μαγνητική επαγωγή είχαν σκοπό να διασφαλίσουν ότι οι τιμές του μαγνητικού πεδίου, στα όρια του δικαιώματος διέλευσης των μελλοντικών μεγάλων εγκαταστάσεων μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, δεν είναι μεγαλύτερες από τις τυπικές τιμές των μέγιστων πεδίων που παράγονται εκείνη την στιγμή από τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, υιοθέτησαν ως "ρεύμα αναφοράς" τον όρο "χειμερινή- κανονική μέτρηση".

Αν και τα κυκλώματα μεταφοράς σπάνια (λιγότερο από 0.1% του χρόνου λειτουργίας) βρίσκονται σε ονομαστική λειτουργία τη χειμερινή περίοδο, είναι το μέγιστο που μπορούν να αντέξουν οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς για παρατεταμένο χρονικό διάστημα και συνεπώς αυτή η ονομαστική τιμή θα παράγει το μέγιστο μαγνητικό πεδίο που μπορεί να διατηρηθεί παρατεταμένα. Η μέτρηση σε χειμερινό-κανονικό αγωγό ορίζεται το μέγιστο ηλεκτρικό ρεύμα, εκφρασμένο σε αμπέρ, που μπορεί να μεταφερθεί συνεχώς στους αγωγούς μιας γραμμής

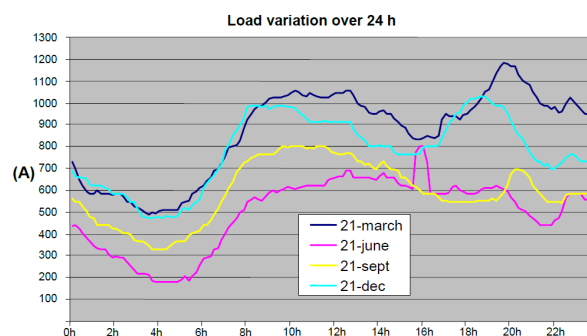
μεταφοράς, οι οποίοι σε αυτήν την περίπτωση λειτουργούν, υπό "χειμερινές συνθήκες περιβάλλοντος", στη "μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας" [7].

### 3.2.2.2 Πρακτική στην Ιταλία

Για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις οριακές τιμές και τους στόχους ποιότητας (που ορίζονται ως μέση τιμή 24 ωρών, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας), το ρεύμα αναφοράς που υιοθετείται για την παρέκταση είναι " $I_{MAX}$ " δηλαδή η μέγιστη ημερήσια μέση τιμή του ρεύματος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, που προέκυψε από τις καταχωρημένες τιμές του ρεύματος λαμβάνοντας υπόψιν μια περίοδο 365 ημερών πριν από την ημέρα των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου [7].

### 3.2.3 Στατιστικές μετρήσεις για μακροπρόθεσμη έκθεση

Αρκετές στατιστικές μετρήσεις για τη μακροχρόνια έκθεση μπορούν να βρεθούν στο CIGRE TB 320 "Characterisation of ELF magnetic fields", όπου οι κύριες μετρήσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι κεντρικές τάσεις των παραμέτρων. Λόγω της διακύμανσης της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι περισσότερες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν κυκλικό (ψευδό-περιοδικό) φορτίο σε μία ημέρα, αλλά και εβδομαδιαίες και εποχιακές διακυμάνσεις.



Σχήμα 3.1: Ημερήσια (24ωρη) διακύμανση του ηλεκτρικού φορτίου σε ενδεικτικές ημερομηνίες (ανά τρίμηνο) εντός του έτους [7]

#### 3.2.3.1 Μέση τιμή

Καθώς η τιμή rms του ρεύματος γραμμής ποικίλλει σε μια αργή χρονική κλίμακα "τ", η μέση τιμή ή μέσος όρος του ρεύματος, σε μια δεδομένη χρονική περίοδο T ορίζεται από τον τύπο:

$$\langle I \rangle \equiv \frac{1}{T} \int_0^T I(\tau) d\tau$$

Στο τεχνικό φυλλάδιο 320 της CIGRE αναφέρεται ότι πιθανώς η καλύτερη εκτίμηση για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο από μια γραμμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι να ληφθεί υπόψιν το μέσο ετήσιο φορτίο. Όσον αφορά την παρέκταση των μετρήσεων, ο συνήθης τρόπος υπολογισμού του ετήσιου μέσου ρεύματος είναι να χρησιμοποιηθούν τα καταγεγραμμένα ρεύματα κατά τη διάρκεια του έτος πριν την έναρξη των μετρήσεων. Ωστόσο, το ετήσιο μέσο ρεύμα μπορεί να διαφέρει σημαντικά από το ένα έτος στο

άλλο, ανάλογα με τη ζήτηση των πελατών και την ανάπτυξη του δικτύου. Επομένως, το ετήσιο μέσο ρεύμα είναι μια μεταβλητή αναφορά, η οποία θα πρέπει να ανακαταγράφεται τακτικά [7].

### 3.2.3.2 Διάμεση Τιμή

Η διάμεση τιμή του ρεύματος, σε μια δεδομένη χρονική περίοδο T, δίνεται από το 50ο εκατοστημόριο της κατανομής ρεύματων κατα την περίοδο T. Οι μέσες και διάμεσες τιμές είναι συνήθως πολύ κοντά.

Ορισμένοι εθνικοί κανονισμοί υιοθετούν ως φορτίο αναφοράς τη διάμεση τιμή του ρεύματος σε χρονικό διάστημα 24 ωρών.

Όσον αφορά την παρέκταση των μετρήσεων, ο συνήθης τρόπος είναι η χρήση ιστορικών δεδομένων της μέγιστης ημερήσιας διαμέσου του ρεύματος σε κανονική κατάσταση λειτουργίας, βάσει δεδομένων που καταγράφονται σε μια περίοδο 365 ημερών πριν από την ημέρα των μετρήσεων. Ωστόσο, τα στατιστικά στοιχεία του μέγιστου ημερήσιου διάμεσου ρεύματος μπορούν ποικίλλουν σημαντικά ανάλογα με τη ζήτηση των πελατών και την ανάπτυξη του δικτύου. Επομένως, αυτά τα στατιστικά στοιχεία θα πρέπει να επανακαθορίζονται συχνά [7].

### 3.2.3.3 P<sub>95</sub> τιμή

Μια άλλη πιθανή προσέγγιση που προτείνεται στο Technical Brochure 320 (2007) "Characterisation of ELF magnetic fields" είναι η χρήση του 95ου εκατοστημορίου της κατανομής του ετήσιου φορτίου (που ονομάζεται P<sub>95</sub> στο τεχνικό φυλλάδιο) δηλαδή μια τιμή του φορτίου που δεν υφίσταται υπέρβαση κατά το 95% του χρόνου(ή που ξεπεράστηκε μόνο κατά το 5% του χρόνου).Οι λόγοι μεταξύ ονομαστικού,P<sub>95</sub> και μέσου ετήσιου φορτίου έχουν υπολογιστεί από ορισμένες εθνικές στατιστικές αρχές ως εξής:

Ετήσιος λόγος φορτίου	Συντηρητικός	Πολύ συντηρητικός
95 %/ονομαστικό	0,5	0,7
Διάμεσος/ 95 % ή Μέση τιμή/ 95%	0,5	0,7
Διάμεσος ή Μέση τιμή	$0.5 \times 0.5 = 0.25$	$0.7 \times 0.7 = 0.5$

Πίνακας 3.2: Συντηρητικές αναλογίες για αξιολογήσεις μακροπρόθεσμης έκθεσης [7]

## **4) Απαιτήσεις των διαδικασιών μέτρησης όσον αφορά τις ανάγκες παρέκτασης**

### **4.1 Βασικές έννοιες για τις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου**

Η διαδικασία για τη μέτρηση των τιμών του μαγνητικού πεδίου συχνότητας ισχύος ή της έντασης πεδίου σε ένα δεδομένο σημείο, είναι καλά εδραιωμένη. Ωστόσο είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η έξοδος των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου συχνότητας ισχύος, οι λεγόμενοι μετρητές μαγνητικού πεδίου, είναι απλώς η τιμή rms του μαγνητικού πεδίου σε ένα δεδομένο σημείο, επειδή δεν προορίζονται για τη μέτρηση παροδικών χρονικών διακυμάνσεων.

Ο αισθητήρας είναι ευαίσθητος στον χωρικό μέσο όρο της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στην μικρή περιοχή του και ο ανιχνευτής επεξεργάζεται το σήμα από τον αισθητήρα, ενώ η έξοδος του μετρητή μαγνητικού πεδίου (κάθετα στην περιοχή του αισθητήρα) υποδηλώνει την τιμή rms της συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61786-2 αυτά τα όργανα μέτρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαδικασίες μέτρησης που χαρακτηρίζουν τις χωρικές ή/και τις χρονικές διακυμάνσεις του πεδίου προκειμένου να επιτευχθούν καθορισμένοι στόχοι, που αφορούν την ανθρώπινη έκθεση. Αυτοί οι διαφορετικοί στόχοι μπορούν να προκύψουν, για παράδειγμα, λόγω των διαφορετικών μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό και τον περιορισμό της έκθεσης σε μαγνητικά πεδία.

Θεωρούμε ότι όλες οι μετρήσεις μαγνητικού πεδίου, οι οποίες προορίζονται για τη μέτρηση του λεγόμενου μη διαταραγμένου μαγνητικού πεδίου, ακολουθούν καλές πρακτικές, όπως παρέχονται σε τεχνικούς οδηγούς όπως το CIGRE TB 375 και πρότυπα όπως τα IEC 61786, IEC 62110 και ANSI/IEEE 644. Αυτές οι καλές πρακτικές και οι τεχνικές απαιτήσεις στοχεύουν στη διεξαγωγή μετρήσεων ακριβείας και τη δημιουργία τυποποιημένων μετρήσεων αναφοράς.

Σε ορισμένες χώρες έχουν αναπτυχθεί εθνικά πρότυπα για μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, αλλά γενικά υιοθετείται το πρότυπο IEC 61786. Για παράδειγμα:

- Στην Ιταλία, υπάρχει το ιταλικό τεχνικό πρότυπο CEI 211-6 με θέμα "Οδηγός μέτρησης και αξιολόγησης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στη συχνότητα 0 Hz έως 10 kHz, με αναφορά στην ανθρώπινη έκθεση", πρώτη έκδοση, 2001, βασίζεται στο IEC 61786:1998-08.
- Στη Βραζιλία, το εθνικό τεχνικό πρότυπο ABNTNBR 15415, "Μέθοδοι μέτρησης και επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία 50 Hz και 60 Hz" (πρώτη έκδοση 2006), ήταν βασισμένο επίσης στο IEC 61786:1998, αλλά αντικαταστάθηκε με το βραζιλιάνικο τεχνικό πρότυπο ABNTNBR 25415 "Μέθοδοι μέτρησης και επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία 50 Hz και 60 Hz" (πρώτη έκδοση 2016), που βασίζεται στο IEC 61786-1 και IEC 61786-2.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση μετρήσεων μαγνητικών πεδίων σε ή κοντά στο επίπεδο του εδάφους δεν είναι πάντα εύκολος ο εντοπισμός των πηγών των μαγνητικών πεδίων.

Ιδιαίτερα, κατά τη μέτρηση χαμηλών τιμών του μαγνητικού πεδίου, το πεδίο υποβάθρου, λόγω της παρουσίας άλλων πηγών που λειτουργούν σε συχνότητα ισχύος (πέρα από το ρεύμα γραμμής) μπορεί εύκολα να προκαλέσει σύγχυση στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Για να καταστεί δυνατή η παρέκταση των μετρούμενων τιμών πεδίου πρέπει να καταγράφονται πρόσθετα δεδομένα κατά την διάρκεια των μετρήσεων, τα οποία θα παρατεθούν παρακάτω.

#### **4.1.1 Βασικές απαιτήσεις σχετικά με τις μετρήσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων**

Βασικές προϋποθέσεις για ποιοτική μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι καταρχάς, η συσκευή μέτρησης να ελέγχεται και να βαθμονομείται τακτικά, κατά δεύτερον η τοποθεσία μέτρησης μαζί με τα σημεία μέτρησης πρέπει να περιγράφονται με ακρίβεια (εντοπισμός συντεταγμένων - GPS) και τρίτον το ύψος ή τα ύψη μέτρησης πάνω από το έδαφος πρέπει να προσδιορίζονται επακριβώς.

Λόγω της αργής χρονικής μεταβολής του φορτίου, που στην πράξη χαρακτηρίζεται από το στιγμιαίο ρεύμα rms που ρέει στις διασυνδέσεις ισχύος, η καταγραφή του χρόνου κατά τον οποίο πραγματοποιήθηκε κάθε μέτρηση είναι μείζονος σημασίας, προκειμένου να επιτραπεί η διαπίστωση της συσχέτισης μεταξύ των μετρούμενων τιμών του μαγνητικού πεδίου και των αντίστοιχων στιγμιαίων τιμών ρεύματος rms (με το όργανο μέτρησης μετράμε rms τιμή όμως λόγω της μεταβολής του φορτίου μεταβάλλεται το ρεύμα και συνεπώς και το μαγνητικό πεδίο).

Επίσης, πρέπει να καθοριστεί η συχνότητα των μετρήσεων ή ισοδύναμα ο αριθμός των μετρήσεων που χρειάζεται να πραγματοποιηθούν κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης για να χαρακτηριστεί σωστά η αργή χρονική διακύμανση του μαγνητικού πεδίου και αυτό γιατί αλλάζει το φορτίο του δικτύου ενέργειας που συνεπάγεται μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κάθε χρονική στιγμή και μας οδηγεί να παίρνουμε αρκετές μετρήσεις στο ίδιο σημείο (ο αριθμός των μετρήσεων αποφασίζεται επί τόπου με συμφωνία των εμπλεκόμενων μερών). Τέλος, πρέπει οι αβεβαιότητες των μετρήσεων να αναφέρονται στην αναφορά μέτρησης.

#### **4.1.2 Πρόσθετες συστάσεις σχετικά με τις μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων**

Επιπρόσθετες συστάσεις σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά κατά την μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που πρέπει να ληφθούν υπόψιν είναι τα εξής: Χρειάζεται ένας αισθητήρας μέτρησης τριών αξόνων, ο οποίος θα βρίσκεται σε σταθερό ύψος (χρήση τρίποδου στήριξης) πάνω από το έδαφος, για τη μέτρηση της τιμής rms (ή της προκύπτουσας τιμής του πεδίου), καθώς απλοποιεί πολύ το πρωτόκολλο μέτρησης. Όταν μετράται η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου αυτός ο κανόνας ενδέχεται να μην είναι εφαρμόσιμος.

Καθώς οι ροές ρεύματος στις γραμμές μεταφοράς έχουν γενικά χαμηλό ρυθμό αρμονικών συνιστωσών η συσκευή μέτρησης αρκεί να μετράει σε συχνότητα ισχύος 50 έως 60 Hz (φίλτρο στενής ζώνης), αλλιώς αν οι αρμονικές έχουν υψηλό ρυθμό το φίλτρο της συσκευής μέτρησης πρέπει να υπολογίζει σε συχνότητες ευρείας ζώνης, π.χ. 20 με 1000Hz [7].



#### **4.2) Απαιτήσεις διαδικασιών μέτρησης, για έλεγχο συμμόρφωσης, με μετρήσιμα όρια εκφραζόμενα σε στιγμιαίες RMS τιμές**

Η απλούστερη περίπτωση είναι όταν οι μετρήσεις προορίζονται να χαρακτηρίσουν ένα μαγνητικό πεδίο, που υποτίθεται ότι είναι ομοιόμορφο σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα, όπως είναι το επίπεδο αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή, σύμφωνα με τα πρότυπα IEC Standard 61786-2:2014-12 "Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings. – Part 2: Basic standard for measurements" και ANSI/IEEE Standard 644-1994 "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines", η μέτρηση πρέπει να γίνεται σε καθορισμένο ύψος πάνω από το επίπεδο του εδάφους.

Στόχος του προγράμματος μέτρησης σε αυτή την περίπτωση είναι να χαρακτηρίσει αυτό που τα πρότυπα μέτρησης αποκαλούν "επίπεδο πεδίου", το οποίο εξετάζεται ειδικά στο IEC 61786-2 στο σημείο 4.1.2 "Χαρακτηρισμός των επιπέδων πεδίου για συμμόρφωση με τα πρότυπα ασφαλείας" και στο ANSI/IEEE 644 στο σημείο 7.1 "Διαδικασία μέτρησης του μαγνητικού πεδίου κοντά σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας".

Όταν το μαγνητικό πεδίο δεν μπορεί να θεωρηθεί ομοιόμορφο σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα, ο στόχος του προγράμματος μέτρησης είναι να χαρακτηρίσει τη χωρική διακύμανση του μαγνητικού πεδίου και στο σημείο 4.1.3 του IEC 61786-2 "Χαρακτηρισμός των χωρικών παραλλαγών" δίνονται πιθανές μέθοδοι για την επίτευξή του.

Στο IEC 62110 παρέχεται ένας ορισμός της ανομοιομορφίας και χαρακτηρίζει πόσο μακριά από την ομοιομορφία είναι το μαγνητικό πεδίο στο χέρι (το οποίο ανακαλείται στο IEC 61786-2) και παρέχει συστάσεις για τη μετρητική διαδικασία για τη λήψη μιας τιμής πεδίου που αντιστοιχεί σε έναν χωρικό μέσο όρο σε ολόκληρο το ανθρώπινο σώμα [7].

##### **4.2.1 Απαιτήσεις σχετικά με τις ανάγκες παρέκτασης**

Η παρέκταση του μαγνητικού πεδίου, που παράγεται από ένα υπόγειο καλώδιο, στην περίπτωση της ισορροπημένης ροής ρεύματος και απουσίας μαγνητικών υλικών εκεί κοντά, δεν αποτελεί τεχνικό ζήτημα καθώς η μόνη μεταβλητή παράμετρος είναι το πλάτος του ρεύματος γραμμής που ρέει στο καλώδιο, το οποίο σχετίζεται γραμμικά με το μαγνητικό πεδίο. Έπειτα με βάση το ρεύμα αναφοράς μπορεί εύκολα να γίνει παρέκταση.

Για μια εναέρια γραμμή με σχεδόν ισορροπημένο φορτίο και με χαμηλό ρυθμό αρμονικών συνιστωσών, το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τη γραμμή, εκτός από την εξάρτηση του από το ρεύμα γραμμής που ρέει στους αγωγούς θα εξαρτάται επίσης και από τη διακύμανση της γεωμετρίας των αγωγών. Ειδικότερα, το ύψος των αγωγών δεν είναι μια σταθερή τιμή και θα προκύψει μια διακύμανση που εξαρτάται από τη θερμοκρασία των αγωγών. Επομένως, η ακριβής μέτρηση του ύψους των αγωγών στη θέση μέτρησης, κατά τη διάρκεια της μέτρησης του μαγνητικού πεδίου, πρέπει να συσχετίζεται με την καταγραφή των περιβαλλοντικών παραμέτρων της περιοχής μέτρησης.

Ορισμένες από αυτές τις πρόσθετες παραμέτρους που επηρεάζουν τη θερμοκρασία των αγωγών όπως η θερμοκρασία περιβάλλοντος, η υγρασία, το μέγεθος του ηλιακού φωτός κ.λπ. μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι μετρήσεις

γίνονται στο επίπεδο του εδάφους, αν και ορισμένες περιβαλλοντικές παράμετροι θα έπρεπε να καταγράφονται στο ύψος των αγωγών, όπως για παράδειγμα ο άνεμος και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Άλλες παράμετροι είναι πιο δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια, όπως είναι η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, που εξαρτάται από το συντελεστή ανάκλασης του φωτός και αφορά τον αγωγό και μπορεί να έχει διακυμάνσεις ανάλογα με τις συνθήκες επιφάνειας του αγωγού: καθαρός, σκονισμένος, φωτεινός, παλιός κλπ. Ωστόσο, δεν έχουν όλες οι παράμετροι την ίδια βαρύτητα στην θερμική εξίσωση των αγωγών και ορισμένες από αυτές δεν χρειάζονται υψηλή ακρίβεια, αλλά αρκεί μια ποιοτική καταγραφή με την προϋπόθεση ότι οι αντίστοιχες αβεβαιότητες αξιολογούνται σωστά [7].

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΤΙΜΗ
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ	Χωρίς Άνεμο	1.3 m/s
	Ασθενής άνεμος (αίσθηση ανέμου στο πρόσωπο)	3 m/s
	Άνεμος (κινούνται φύλλα και μικρά κλαδιά )	6 m/s
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΑΝΕΜΟΥ	Παράλληλα στη γραμμή	
	Γωνία των 45°	
	Κάθετος	
ΗΛΙΑΚΟ ΦΩΣ	Ωραίος καιρός (χωρίς σύννεφα)	900 W/m <sup>2</sup>
	Μέσος καιρός (ελαφριά / υψηλά σύννεφα)	400 W/m <sup>2</sup>
	Συννεφιά / βροχερός καιρός	200 W/m <sup>2</sup>

Πίνακας 4.1: Ποιοτικός χαρακτηρισμός ορισμένων παραμέτρων περιβάλλοντος [7]

#### **4.3 Απαιτήσεις διαδικασιών μέτρησης που αποσκοπούν στον έλεγχο της συμμόρφωσης με μετρήσιμα όρια εκφρασμένα σε στατιστικές τιμές**

Ο στόχος του προγράμματος μέτρησης, σε αυτή την περίπτωση, είναι να χαρακτηρίσει την αργή χρονική διακύμανση του μαγνητικού πεδίου και το πρότυπο IEC 61786-2 στο σημείο 4.1.4 "Χαρακτηρισμός της χρονικής διακύμανσης", δίνει τις δυνατές μεθόδους για την επίτευξή του.

Για παράδειγμα, στην Ιταλία, το διάταγμα DM 29/05/08 "Εγκριση διαδικασιών μέτρησης και αξιολόγησης μαγνητικής επαγωγής" καθόρισε τη μεθοδολογία για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τις "κρίσιμες τιμές" και τους "στόχους ποιότητας".

Η μεθοδολογία αναφέρεται στο Ιταλικό τεχνικό πρότυπο CEI 211-6, "Οδηγός για μέτρηση και αξιολόγηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο εύρος συχνοτήτων 0 Hz - 10 kHz, με αναφορά στην ανθρώπινη έκθεση", πρώτη έκδοση, 2001 (η οποία βασίζεται στο IEC 61786:1998-08). Η Μεθοδολογία ορίζει ότι είναι απαραίτητο να υπάρξει τουλάχιστον μία μετρούμενη τιμή ανά λεπτό για τουλάχιστον 24 ώρες, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Η τιμή που πρέπει να συγκριθεί με το όριο είναι η διάμεσος των καταγεγραμμένων τιμών [7].

#### **4.3.1 Απαιτήσεις σχετικά με τις ανάγκες παρέκτασης**

Στην περίπτωση των μετρήσεων που προορίζονται για την επαλήθευση της συμμόρφωσης με τα όρια έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο εκφρασμένα σε στατιστικές τιμές, εκτός από τις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν για τις μετρήσεις που γίνονται για να επιβεβαιώσουν τη συμμόρφωση με όρια έκθεσης σε μαγνητικά πεδία, που εκφράζονται σε στιγμιαίες τιμές rms, υπάρχουν και άλλες απαιτήσεις.

Η μετρούμενη τιμή του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου έχει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης, πιθανώς ακολουθώντας τη μεταβολή της τιμής rms του ρεύματος γραμμής. Για να ελεγχθεί εάν αυτή η ερμηνεία των μετρήσεων είναι θεμελιωδώς σωστή, είναι απαραίτητο να διαπιστωθεί ότι οι μετρούμενες τιμές του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου και οι αντίστοιχες τιμές του ρεύματος που καταγράφονται από τον χειριστή συσχετίζονται καλά.

Αυτό είναι απαραίτητο για να ελεγχθεί ότι η επιρροή του πεδίου υποβάθρου που παράγεται από άλλες πηγές ισχύος ή από άλλους διεγερμένους αγωγούς, που δεν λαμβάνονται υπόψη στις μετρήσεις του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου, είναι πράγματι αμελητέα.

Ο επιτρεπόμενος συντελεστής συσχέτισης και ο αριθμός των τιμών του ρεύματος που πρέπει να συσχετιστούν με τις τιμές του μαγνητικού, μπορεί να διαφέρουν από χώρα σε χώρα.

Για παράδειγμα, η Ιταλική μεθοδολογία προβλέπει την αξιολόγηση της μαγνητικής επαγωγής μέσω μιας μεθόδου παρέκτασης, που βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα του ρεύματος στη γραμμή. Καθορίζει τη συχνότητα καταχώρισης των τρεχουσών τιμών που απαιτούνται στο διαχειριστή συστημάτων μεταφοράς (ΔΣΜ). Υποδεικνύεται να συσχετίζονται τουλάχιστον εκατό τιμές ρεύματος με τις αντίστοιχες τιμές της μαγνητικής επαγωγής και ο συντελεστής συσχέτισης πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,9, για να μπορεί να γίνει παρέκταση των τιμών (σε περίπτωση που αποδειχθεί καλή συσχέτιση των μεγεθών), ενώ θα πρέπει να καταγράφονται οι τρέχουσες τιμές τουλάχιστον κάθε 15 λεπτά κατά τη διάρκεια της ημέρας [7].

## **5) Εφαρμογές παρέκτασης σε Γαλλία, Ιταλία και Ηνωμένες Πολιτείες**

Παρακάτω θα συμπεριλάβουμε τρία εμβληματικά παραδείγματα παρέκτασης των μετρήσεων του μαγνητικού πεδίου.

- Η Γαλλία απαιτεί μετρήσεις και παρέκταση των τιμών με σκοπό να ενημερώσει το κοινό για τα επίπεδα έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο κοντά σε υποδομές ηλεκτρικών δικτύων AC.
- Στην Ιταλία, η οποία απαιτεί μετρήσεις και παρεκτάσεις για την αξιολόγηση της συμμόρφωσης με τις "Οριακές Τιμές" και τους "Στόχους Ποιότητας", βάζει κάποιους υποχρεωτικούς στόχους που ορίζονται σε προληπτικό επίπεδο με βάση τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις από μαγνητικά πεδία, που παράγονται από γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας σε 50 Hz.
- Στις Ηνωμένες Πολιτείες έγιναν μετρήσεις και παρέκταση των τιμών μέτρησης για τον καθορισμό των ορίων έκθεσης σε μαγνητικό πεδίο και αποτελούν τη βάση των κανονισμών, που εκδόθηκαν από τις πολιτείες της Νέας Υόρκης και της Φλόριντας.

### **5.1 Η περίπτωση της Γαλλίας**

#### **5.1.1 Νομοθετικό πλαίσιο: Όρια έκθεσης στη Γαλλία**

Η Γαλλική νομοθεσία για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz σχετίζεται άμεσα με το ευρωπαϊκό πλαίσιο, δηλαδή τη σύσταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης που εγκρίθηκε το 1999 (αναφορά 1999/519/ΕΚ). Η Γαλλική νομοθεσία περιλαμβάνει ένα τεχνικό διάταγμα που εφαρμόζεται στα ηλεκτρικά δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο αναφέρει στο σύντομο άρθρο 12β τα εξής:

"Η υποδομή ηλεκτρικών δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει να βρίσκεται σε θέση που να διασφαλίζει ότι σε σημεία που είναι προσβάσιμα στο κοινό, το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει δεν υπερβαίνει τα 5 kV/m και το μαγνητικό πεδίο επίσης δεν υπερβαίνει τα 100μT σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας". Αυτό είναι εφαρμόσιμο μόνο σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας που κατασκευάστηκαν (ή τροποποιήθηκαν σημαντικά) μετά τη δημοσίευση του τεχνικού διατάγματος (Μάιος του 2001) και δεν υπάρχουν ειδικές οδηγίες σχετικά με τον τρόπο απόδειξης της συμμόρφωσης με αυτά όρια. Στην πράξη αρκεί να δοθεί ένας υπολογισμός του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των έργων ανάπτυξης δικτύων.

Ένα ιδιαίτερο σημείο που πρέπει να εξηγηθεί είναι οι κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Στο Γαλλικό πλαίσιο, θεωρείται ότι "κανονικό" σημαίνει ότι τηρείται το κριτήριο n-1, επομένως το αντίστοιχο ρεύμα που ρέει στη γραμμή είναι σημαντικά χαμηλότερο από την ονομαστική τιμή, δηλαδή τη μέγιστη τιμή. Είναι ισοδύναμο με το "μόνιμο ρεύμα εξυπηρέτησης", όπως ορίζεται από το πρότυπο CENELEC EN 50341-1.

Στη Γαλλική εφαρμογή αυτού του προτύπου (παραπομπή EN 50341-3.8), ορίζεται ως το ρεύμα που ανεβάζει τη θερμοκρασία του αγωγού στους 40 °C υπό κανονικές καιρικές συνθήκες.

Για να γίνει σύγκριση αναφοράς, οι νέες γραμμές με κλασσικούς αγωγούς είναι σχεδιασμένες, γενικά, έτσι ώστε να αντέχουν μέγιστες θερμοκρασίες στην περιοχή από 70°C έως 90°C ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.

Για τα καλώδια που δεν ισχύει το πρότυπο CENELEC, το ρεύμα που αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι αυτό που δεν ξεπερνιέται κατά το 95 % του χρόνου. Επιλέγεται να στρογγυλοποιείται στο 60% της ονομαστικής τιμής.

Σημειώνεται ότι για γραμμές ή τα καλώδια που συνδέουν νέους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή τους βιομηχανικούς πελάτες στο δίκτυο, η τιμή του ρεύματος αναφοράς, για την απόδειξη της συμμόρφωσης με τα όρια έκθεσης, δίνεται από την ονομαστική ισχύ παραγωγής ή κατανάλωσης.

### **5.1.2 Νομοθετικό Πλαίσιο: Ενημέρωση του κοινού**

Ένα νομοθετικό διάταγμα, που δημοσιεύθηκε το 2011, ορίζει ένα σχέδιο ελέγχου και επιθεώρησης για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία και στοχεύει στην καλύτερη ενημέρωση του κοινού, σχετικά με τα επίπεδα έκθεσης σε πραγματικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία πλησίον των γραμμών ισχύος άνω των 50 kV.

Το πλαίσιο αναφέρει τα εξής:

- Να γίνονται μετρήσεις σε κάθε αστικοποιημένη περιοχή, που διασχίζεται από γραμμή ηλεκτρικού ρεύματος υψηλής τάσεως
- Να γίνονται μετρήσεις από ανεξάρτητα διαπιστευμένα εργαστήρια, που θα εφαρμόζουν ένα Γαλλικό τυποποιημένο πρωτόκολλο μέτρησης, το οποίο ακολουθεί τις συνιστώμενες πρακτικές που δίνονται από το CIGRE TB 375 και είναι επίσης συνεπές με τα διεθνή πρότυπα, όπως το IEC 62110 και 61786.
- Να γίνεται παρέκταση των μετρούμενων τιμών στη μέγιστη έκθεση υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Να πραγματοποιούνται όλες οι μετρήσεις και οι παρεκτάσεις μέσα σε μια περίοδο 5 ετών και να ελέγχεται εντός 10 ετών αν οι συνθήκες έκθεσης έχουν αλλάξει ή όχι (αν δεν έχουν αλλάξει οι συνθήκες τότε δεν απαιτούνται νέες μετρήσεις).
- Να δοθούν όλα τα αποτελέσματα στη Γαλλική υπηρεσία υγείας ANSES, η οποία θα τα δημοσιεύσει.

Σημειώνεται ότι πρέπει να ληφθούν υπόψιν μόνο οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που διασχίζουν αστικοποιημένες περιοχές και επιπλέον λαμβάνονται υπόψιν μόνο γραμμές μεγάλης ισχύος.

Το κριτήριο είναι ότι το ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας πρέπει να υπερβαίνει τα 400A.

Τελικά περισσότερες από 2100 γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν επιλεγεί από το γαλλικό δίκτυο και περισσότερες από 5000 μετρήσεις έγιναν στο υπάρχον δίκτυο μεταξύ των ετών 2013 και 2018. Καθώς το διάταγμα ισχύει και για τις νέες γραμμές, πραγματοποιούνται μερικές δεκάδες νέες μετρήσεις και παρεκτάσεις κάθε χρόνο.

### 5.1.3 Απαιτήσεις μετρήσεων και μέθοδος παρέκτασης

Το διάταγμα καθιστά σαφές ότι στην αξιολόγηση των συνθηκών μέγιστης έκθεσης, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στο μέσον του ανοίγματος, δηλαδή στις πλησιέστερες θέσεις των αγωγών γραμμής προς το έδαφος. Αυτή η θέση είναι επίσης εκείνη, όπου οι διακυμάνσεις της πτώσης θα έχουν την πιο κρίσιμη επίδραση στις μετρήσεις και στα αποτελέσματα της παρέκτασης.

Η απαίτηση του γαλλικού διατάγματος σχετικά με την παρέκταση είναι: "Τα μη επεξεργασμένα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων διορθώνονται, ιδίως τα αποτελέσματα της διακύμανσης του ρεύματος που ρέει στα καλώδια, προκειμένου να δείχνουν την πιο επιβαρυντική κατάσταση έκθεσης, που μπορεί να επιτευχθεί υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής".

Στην πράξη, οι προεκτεινόμενες μέγιστες τιμές  $B_{max}$  προέρχονται από τις μετρούμενες τιμές  $B_{meas}$  χρησιμοποιώντας δύο συντελεστές διόρθωσης:

$$B_{max} = K_i \cdot K_s \cdot B_{meas}$$

όπου

- $K_i$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για το ρεύμα, επομένως ίσος με την αναλογία μεταξύ της τιμής του μετρούμενου ρεύματος ( $I_{meas}$ ) και του μέγιστου ρεύματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής που ονομάζεται "ρεύμα κανονικών συνθηκών λειτουργίας" ( $I_{noc}$ )
- $K_s$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη διακύμανση της πτώσης του αγωγού, η οποία οφείλεται στη μεταβολή της θερμοκρασίας του αγωγού μεταξύ των συνθηκών μέτρησης και των συνθηκών παρέκτασης. Ο υπολογισμός του  $K_s$  είναι το κρίσιμο μέρος της διαδικασίας παρέκτασης για εναέριες γραμμές (για υπόγειες καλωδιώσεις  $K_s=1$ ) [7].

Υπολογισμός του  $K_s$ :

Το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του αγωγού κατά την διάρκεια των συνθηκών μέτρησης που απαιτείται να συλλεχθούν τα εξής δεδομένα:

- Το ρεύμα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ( $I_{meas}$ )
- Οι θερμικές παράμετροι του αγωγού (αντίσταση, ανάκλαση κλπ)
- Οι καιρικές συνθήκες. Στην πράξη η θερμοκρασία αγωγού δεν είναι πολύ ευαίσθητη στον άνεμο και στην ηλιακή ροή και για την επιτόπια καταγραφή αρκεί μια ποιοτική αξιολόγηση όπως π.χ. ως "όχι, ελαφρύς ή μέτριος προς υψηλός" άνεμος.

Στη θερμική εξίσωση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αγωγού, αυτές οι ποιοτικές εκτιμήσεις μετατρέπονται σε ποσότητες σύμφωνα με τις τυπικές τιμές του Πίνακα 4.1.

Από την θερμοκρασία του αγωγού κατά την διάρκεια των μετρήσεων, υπολογίζεται η διαφορά  $\Delta T$  έως  $40^\circ C$ . Η χαλάρωση  $\Delta h$  υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν μια απλοποιημένη γραμμική σχέση:

$$\Delta h = K \cdot \Delta T$$

όπου  $K$  είναι μια σταθερή παράμετρος που εξαρτάται μόνο από το μήκος και τη χαλάρωση του ανοίγματος και από μερικά χαρακτηριστικά του αγωγού, όπως η γραμμική μάζα, ο γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής και το τμήμα του αγωγού.

Στη συνέχεια, το  $K_s$  υπολογίζεται από έναν απλό τύπο, ο οποίος λαμβάνει υπόψιν τη μείωση του μαγνητικού πεδίου ως το τετράγωνο της απόστασης  $x$  προς τον άξονα της ευθείας:

$$K_s = \frac{(h^2 + x^2)}{(h - \Delta h)^2 + x^2}$$

Εάν η παρέκταση περιορίζεται στις τιμές που μετρώνται ακριβώς κάτω από την εναέρια γραμμή (ή λίγο πάνω από ένα θαμμένο καλώδιο), το  $x$  είναι ίσο με 0 και ο τύπος απλοποιείται ως εξής:

$$K_s = \frac{h^2}{(h - \Delta h)^2}$$

Οι αβεβαιότητες της συνολικής μεθόδου έχουν υπολογιστεί σε 10%, με την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμα όλα τα περιγραφικά στοιχεία της γραμμής που απαιτούνται για τους υπολογισμούς.

## 5.2 Η περίπτωση της Ιταλίας

Ο Ιταλικός νόμος 36/20017, συμπληρωμένος με το διάταγμα DPCM της 8ης Ιουλίου (50 Hz), 20038, αφορά τις πιθανές μακροπρόθεσμες επιπτώσεις από μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη συχνότητα των 50 Hz και σε προληπτικό επίπεδο καθορίζεται ως κρίσιμη τιμή τα 10  $\mu T$  και στόχος ποιότητας τα 3  $\mu T$  (κρίσιμες τιμές που ορίζονται ως η διάμεση τιμή των μετρήσεων που προκύπτουν εντός 24 ωρών υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας) σε χώρους με την παρουσία ανθρώπων για μεγάλο χρονικό διάστημα (μεγαλύτερο ή ίσο με 4 ώρες) και δεν πρέπει να γίνεται υπέρβαση σε οικιστικό ιστό, σχολεία και σε χώρους με παρατεταμένη ανθρώπινη παρουσία.

Για την επαλήθευση της συμμόρφωσης, οι αρχές ελέγχου ακολουθούν τις ενδείξεις λειτουργίας του διατάγματος DM 29/05/08 "Εγκριση διαδικασιών μέτρησης και αξιολόγησης μαγνητικής επαγωγής", η οποία ορίζει μια μεθοδολογία για παρέκταση μιας μετρούμενης τιμής της διάμεσης τιμής 24 ωρών της μαγνητικής επαγωγής σε ένα ορισμένο σημείο του χώρου σε αυτήν που παράγεται από τη μέγιστη ημερήσια διάμεσο του ρεύματος  $I_{MAX}$  σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, με βάση τις ιστορικά καταχωρημένες τιμές του ρεύματος, λαμβάνοντας υπόψιν μια περίοδο 365 ημερών πριν από την ημέρα των μετρήσεων.

Για τις μετρήσεις, οι διαδικασίες αναφέρονται στο τεχνικό πρότυπο CEI 211-6 " Guide for measurement and evaluation of electric and magnetic field in the frequency 0 Hz - 10 kHz, with reference to human exposure", first edition, 2001-01 (το οποίο βασίζεται στο IEC 61786:1998-08 "Measurement of low frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings. - Special requirements for instruments and guidance for measurements"). Στόχος της δημοσίευσης, ως Διατάγματος, είναι η προσαρμογή της διαδικασίας αξιολόγησης από φορείς ελέγχου και των δεδομένων που απαιτούνται να καταγράψει ο διαχειριστής της γραμμής για την αξιολόγηση από φορείς ελέγχου.

Στη συνέχεια περιγράφονται διαδικασίες μετρήσεων και παρεκτάσεων:

- Για τις εναέριες γραμμές η μεθοδολογία ορίζει μέτρηση με το όργανο σε ύψος 100-150cm(λαμβανομένου υπόψιν του ομογενούς πεδίου), ενώ διαφορετικό ύψος μπορεί να θεωρηθεί σύμφωνα με τον προορισμό χρήσης των κτιρίων.

- Είναι απαραίτητο να καταγράφεται τουλάχιστον μια μέτρηση ανά λεπτό για τουλάχιστον 24 ώρες σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας(με διαθεσιμότητα των γραμμών),ενώ η αβεβαιότητα της μέτρησης πρέπει να είναι μικρότερη από 10% (Ιταλικό τεχνικό πρότυπο CEI 211-6, "Οδηγός για μέτρηση και αξιολόγηση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στη συχνότητα 0 Hz - 10 kHz, με αναφορά στην ανθρώπινη έκθεση", πρώτη έκδοση, 2001-01).
- Η τιμή που πρέπει να συγκριθεί με το όριο είναι η διάμεσος της καταγεγραμμένης μέτρησης.

Εάν αυτή η διάμεση τιμή είναι μεγαλύτερη του 50% του ορίου που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, τότε συνιστάται η επανάληψη της μέτρησης σε διαφορετικές περιόδους του έτους.

Καθώς τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξαρτώνται από την κατάσταση της γραμμής την ημέρα που επιλέχθηκε, μπορεί να είναι χρήσιμο να παρεκταθούν οι μετρούμενες τιμές μαγνητικής επαγωγής για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, που προκύπτουν από τα ιστορικά δεδομένα του ρεύματος που έχει καταχωρίσει ο χειριστής. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μόνο στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο που μετρήθηκε και το αντίστοιχο ρεύμα που καταγράφηκε συσχετίζονται καλά με συντελεστή συσχέτισης τουλάχιστον 0,9 και αυτό προκύπτει αφού πρώτα ο χειριστής έχει καταχωρήσει τις τιμές του ρεύματος με συχνότητα ανά 15 λεπτών ώστε να διευκολύνεται η συσχέτιση τουλάχιστον εκατό τιμών ρεύματος με τις αντίστοιχες τιμές της μαγνητικής επαγωγής.

Αν αποδειχθεί καλή συσχέτιση τότε επιτρέπεται η παρέκταση μιας τιμής μαγνητικής επαγωγής, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ημερήσια διάμεσο του ρεύματος  $I_{max}$  σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας λαμβάνοντας μια περίοδο 365 ημερών πριν από την ημέρα των μετρήσεων.

Σε περίπτωση που οι συνθήκες λειτουργίας δεν είναι κανονικές(μη διαθεσιμότητα των γραμμών) δηλώνεται από τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς(TSO -Transmission System Operator).

Οι ημέρες που κάποιες γραμμές δεν είναι διαθέσιμες δημιουργούν έκτακτες συνθήκες και δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις 18 ανά έτος.

Ο χειριστής του δικτύου είναι υποχρεωμένος να κοινοποιεί τα προκύπτοντα αποτελέσματα στους φορείς ελέγχου κάθε τρίμηνο και συγκεκριμένα τις περιόδους μη διαθεσιμότητας των γραμμών και αν απαιτείται πρέπει να κάνει γνωστές τις τιμές του στιγμιαίου ρεύματος που καταγράφονται με ελάχιστη συχνότητα καταγραφής τα 15 λεπτά, καθώς και τις ημερήσιες διάμεσες τιμές αυτών των τιμών για τις 365 ημέρες πριν από την απαιτούμενη ημέρα.

Επίσης, ανάλογα με την κατάσταση της γραμμής την ημέρα των μετρήσεων μπορεί να γίνει παρέκταση των μετρούμενων τιμών της μαγνητικής επαγωγής για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας με βάσει τα ιστορικά δεδομένα του ρεύματος.

Η αβεβαιότητα των δεδομένων πρέπει να είναι μικρότερη από 10% [7].

### **5.3 Ηνωμένες πολιτείες**

Η πολιτεία της Νέας Υόρκης μέσω της Επιτροπής Δημόσιων Υπηρεσιών εξέδωσε μια ανακοίνωση προσωρινής πολιτικής ("Statement of interim policy on magnetic fields of major electric transmission facilities" – Issued and Effective: September 11, 1990) συμπεριλαμβανομένου ενός προσωρινού προτύπου μαγνητικών πεδίων με σκοπό να



διασφαλίσει ότι τα δικαιώματα διέλευσης στις μελλοντικές μεγάλες εγκαταστάσεις μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν θα υπερβαίνουν τα τυπικά πεδία, που υπάρχουν σε πολλές γραμμές των 345 kV σε λειτουργία στο κράτος.

Για να είναι γνωστές οι τυπικές τιμές των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από τις υπάρχουσες γραμμές των 345 kV, που λειτουργούν σε ολόκληρη την πολιτεία, πραγματοποιήθηκε μια πανεθνική έρευνα για τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται γύρω από τα κυκλώματα των 345 kV.

Καθώς οι τιμές των μαγνητικών πεδίων ποικίλουν ανάλογα με το φορτίο, υπολογίστηκαν ή έγινε παρέκταση στις τιμές τους υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, εκτός από τον υπολογισμό της μεταβλητότητας του πεδίου κατά μήκος των δικαιωμάτων διέλευσης της γραμμής.

Οι συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς περιελάμβαναν τρία καθορισμένα φορτία από την Power Pool της Νέας Υόρκης: Τη χειμερινή κανονική λειτουργία κυκλώματος, τη χειμερινή κανονική λειτουργία αγωγού και τη χειμερινή δεκαπεντάλεπτη λειτουργία αγωγού έκτακτης ανάγκης

Για τον καθορισμό του ορίου, υιοθετήθηκε η λειτουργία χειμερινού-κανονικού αγωγού, επειδή, αν και τα κυκλώματα μεταφοράς σπάνια (λιγότερο από το 0,1% των περιπτώσεων) λειτουργούν με την κανονική τους χειμερινή τιμή, είναι το μέγιστο που μπορούν να "ανεχθούν" οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς για μεγάλο χρονικό διάστημα. Έτσι, αυτή η εκτίμηση θα παράγει το μέγιστο μαγνητικό πεδίο που μπορεί να διατηρηθεί συνεχώς.

Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν για τα 83 κυκλώματα που μελετήθηκαν έδειξαν ότι η μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου, στα άκρα των δικαιωμάτων διέλευσης, που υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον "χειμερινό κανονικό αγωγό" εκτιμάται για όλα τα κυκλώματα ότι ήταν περίπου 200 milligauss (mG) δηλαδή  $2,0 \times 10^{-5}$  Tesla [T]. Έπειτα, σε μελλοντικές γραμμές μεταφοράς η τιμή 200 mG θεωρείται τυπική τιμή του μαγνητικού πεδίου που μπορεί να παραχθεί από τις υπάρχουσες γραμμές των 345 kV σε όλη την πολιτεία και επιλέχθηκε ως το ενδιάμεσο τυπικό όριο. Συνεπώς με τη χρήση του χαρακτηρισμού της χειμερινής κανονικής λειτουργίας του αγωγού, στους υπολογισμούς συμμόρφωσης θα πρέπει να θεωρείται η πτώση του αγωγού "χειμερινής-κανονικής μέτρησης" [7].

## **6) Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε γραμμές μέσης και υψηλής τάσης**

### **6.1 Σκοπός των μετρήσεων**

Οι πηγές πεδίων χαμηλής συχνότητας απαντώνται ευρέως στη σύγχρονη κοινωνία. Όλα τα καλώδια ή οι συσκευές που μεταφέρουν ή χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια δημιουργούν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (1-100Hz), αλλά μειώνονται με το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Επιπλέον, δεδομένου ότι λίγες πηγές που βρίσκονται συνήθως στην κοινωνία χρησιμοποιούν συχνότητες μεταξύ 100Hz και 100kHz, υπάρχουν λιγότερες μελέτες για αυτές τις συχνότητες. Μεγάλη πυκνότητα μαγνητικής ροής υπάρχει κοντά σε καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος και κοντά σε εξοπλισμό που χρησιμοποιεί ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα, αλλά και σε κτίρια με μη ισορροπημένα ρεύματα επιστροφής ή σε εσωτερικούς σταθμούς μετασηματιστών. Για δεκαετίες, επιδημιολογικές καθώς και πειραματικές μελέτες έχουν αντιμετωπίσει πιθανές επιπτώσεις στην υγεία από τη μακροπρόθεσμη ή βραχυπρόθεσμη έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Υπάρχουν επιστημονικά τεκμηριωμένες οξείες επιδράσεις στη λειτουργία του νευρικού συστήματος που μπορεί να εμφανιστούν σε υψηλά επίπεδα ELF/MF.

Ο κύριος στόχος της διεθνούς επιτροπής ICNIRP είναι η προστασία των ανθρώπων και του περιβάλλοντος από την επιβλαβή έκθεση σε όλες τις μορφές μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας (NIR).

Για το σκοπό αυτό, η ICNIRP παρέχει συμβουλές και καθοδήγηση αναπτύσσοντας και διαδίδοντας κατευθυντήριες γραμμές για την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία με βάση τη διαθέσιμη επιστημονική έρευνα. Η έρευνα στο εύρος των χαμηλών συχνοτήτων ξεκίνησε πριν από περισσότερα από 40 χρόνια και δεδομένης της βιβλιογραφίας που καταρτίστηκε η επιτροπή ICNIRP έθεσε τις κατευθυντήριες γραμμές προστασίας από ηλεκτρομαγνητικά πεδία.

Σκοπός των μετρήσεων είναι να λάβουμε τιμές για τα επίπεδα των μεγεθών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούνται από τις γραμμές μεταφοράς, μέσης και υψηλής τάσης, ώστε να αποφανθούμε, αν τηρούνται τα επιτρεπτά όρια έκθεσης που ορίζονται από την επιτροπή ICNIRP, αυτή την στιγμή με την τελευταία ισχύουσα αναθεώρησή τους το 2010.

Επομένως, οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας δεν θα κριθούν με βάση τα όρια ασφαλούς λειτουργίας, που ορίζονται στην ελληνική νομοθεσία και συγκεκριμένα στην κοινή υπουργική απόφαση (Κ.Υ.Α.) με αριθμό 3060 (ΦΟΡ) 238 [ύστερα από σύσταση του συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης -Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)(1999/519/EC)] και θέμα "Τα μέτρα προφύλαξης του κοινού από την λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων", (Φ.Ε.Κ. Αρ. 512 -Δεύτερο τεύχος της 25<sup>ης</sup> Απριλίου του έτους 2002), αλλά θα αξιολογηθούν σύμφωνα με τα όρια της ICNIRP που εκδόθηκαν το 2010, που είναι τα πιο πρόσφατα επικαιροποιημένα και ισχύουν και στην Ελλάδα, ενώ εφαρμόζονται τόσο σε γραμμές υψηλής τάσης όσο και σε γραμμές μέσης τάσης.

Έτσι, εν προκειμένου η διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι το όριο ασφαλούς λειτουργίας για το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής αντί για 100μT αλλάζει σε 200μT ενώ το όριο της

έντασης του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει ίδιο και ίσο με 5000V/m (τιμές rms στα 50Hz)σε σχέση με τις προηγούμενες συστάσεις της ICNIRP το 1998.

Διεθνής Οργανισμός	Όρια κοινού		Όρια Εργαζομένων	
	Ηλεκτρικό	Μαγνητικό	Ηλεκτρικό	Μαγνητικό
ICNIRP (2010) για 50 Hz	5 kV/m	200 μT	10 kV/m	1000 μT
ICNIRP (1998) για 50 Hz	5 kV/m	100 μT	10 kV/m	500 μT
ICNIRP (1998) για 60 Hz	4,2 kV/m	83 μT	8,3 kV/m	420 μT
IEEE (2019) για 50 / 60 Hz	5 kV/m	904 μT	20 kV/m	2710 μT

Πίνακας 6.1: Τα όρια ασφαλείας(για υψηλή και μέση τάση) για την έκθεση του κοινού και των εργαζομένων σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδίων (50 Hz) σύμφωνα με το ICNIRP και το IEEE [5]

Μερικά από τα κριτήρια που θα πρέπει να αξιολογούνται πριν αποφανθούμε για τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι η διάρκεια έκθεσης, τα εκτεθειμένα μέρη του σώματος, η ηλικία και η κατάσταση υγείας του κοινού. Ως κοινό νοούνται τα άτομα του γενικού πληθυσμού πλην των ατόμων που απασχολούνται με σχέση εξαρτήσεως εργασίας ή αυτόνομα κατά την διάρκεια απασχόλησης τους σε χώρους όπου υπάρχουν διατάξεις εκπομπής χαμηλών συχνοτήτων.

Στο πλαίσιο της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (ΗΜΠ) χαμηλών συχνοτήτων μετριοούνται τα κάτωθι φυσικά μεγέθη:

- α) Το μέτρο της Έντασης του ηλεκτρικού πεδίου(E), που είναι διανυσματικό μέγεθος και αντιστοιχεί στη δύναμη που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο, ανεξάρτητα από την κίνησή του στον χώρο. Εκφράζεται σε (V/m).
- β) Το μέτρο της Μαγνητικής Επαγωγής,που είναι διανυσματικό μέγεθος (B) από το οποίο εξαρτάται η δύναμη που ασκείται σε κινούμενα φορτία και εκφράζεται σε τέσλα (T).Στον κενό χώρο και στα βιολογικά υλικά, μπορεί να γίνει μετατροπήτης μαγνητικής επαγωγής σε ένταση του μαγνητικού πεδίου και αντίστροφα βάσει του τύπου  $1(A/m)^{-1}=4\pi 10^{-7}(T)$

Στο σημείο αυτό θα διευκρινίσουμεπως ορίζονται οι βασικοί περιορισμοί και τα επίπεδα αναφοράς.

Ως βασικούς περιορισμούς ορίζουμε τους περιορισμούς έκθεσης σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά, μαγνητικά και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που βασίζονται άμεσα σε αποδεδειγμένες επιδράσεις στην υγεία και σε βιολογικές μελέτες. Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν αυτούς τους περιορισμούς στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων είναι η μαγνητική επαγωγή και η πυκνότητα ρεύματος.

Τα επίπεδα αναφοράς είναι τα ανώτερα επιτρεπτά όρια έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων. Τα επίπεδα αυτά

χρησιμοποιούνται για την πρακτική εκτίμηση της έκθεσης, προκειμένου να ελεγχθεί το ενδεχόμενο υπέρβασης των βασικών περιορισμών. Ορισμένα επίπεδα αναφοράς προέρχονται από σχετικούς βασικούς περιορισμούς, με τη χρήση μετρήσεων και/ή διαδικασιών υπολογισμού, ενώ άλλα σχετίζονται με την άμεση αντίληψη τους από τον εκτιθέμενο και τις δυσμενείς έμμεσες επιπτώσεις της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα φυσικά μεγέθη που εξετάζονται είναι η ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική επαγωγή και το ρεύμα των άκρων. Το ρεύμα που σχετίζεται με την αντίληψη του εκτιθεμένου και άλλες έμμεσες επιδράσεις είναι το ρεύμα επαφής.

## **6.2 Μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διεξαγωγή των μετρήσεων**

Ως όργανο μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων χρησιμοποιείται το μοντέλο PMM 8053A, της εταιρείας Narda. Είναι μια φορητή ψηφιακή μονάδα μέτρησης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για ισοτροπικές και μη μετρήσεις, με εύρος φάσματος μετρήσεων στην περιοχή των 5Hz - 40GHz. Τα μετρήσιμα μεγέθη είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) σε V/m και η μαγνητική επαγωγή (B) σε μT. Για την μέτρηση των δύο μεγεθών προσαρμόζεται στο όργανο μέτρησης ένας αισθητήρας ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων (ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ANALYZER) τύπου EHP-50B που έχει την δυνατότητα να εντοπίζει ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο φάσμα συχνοτήτων από 5 Hz – 100 kHz.

Επιπλέον, μπορούμε να προβούμε σε αρμονική ανάλυση καθώς όπως και σε φασματική ανάλυση μέσω γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Η αποθήκευση των μετρούμενων τιμών και δεδομένων σε όλα τα σημεία μέτρησης μπορεί να γίνεται με την βοήθεια ενός φορητού υπολογιστή, ο οποίος ελέγχει το όργανο μέτρησης μέσω κατάλληλου λογισμικού (8053 LOGGER INTERFACE software της Narda-STs), έχοντας ρυθμίσει όλες τις παραμέτρους λειτουργίας και χρησιμοποιώντας έναν προσαρμογέα εισόδου διπλής οπτικής ίνας σε θύρα RS232.

Αναλυτικά τα στοιχεία των μετρητικών οργάνων παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

α/α	Στοιχεία Εξοπλισμού	Εύρος μετρούμενου μεγέθους
1	Μετρητικό όργανο PMM 8053A (Narda Safety Test Solutions), Serial Number- 152WK50252	5Hz - 40GHz
2	Ανιχνευτής (probe) Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου EHP-50B, Serial Number-242WM40220	5Hz-100kHz 0.01V/m-100kV/m 1nT-10mT

Πίνακας 6.2: Προδιαγραφές εξοπλισμού μέτρησης

## **6.3 Σημεία Μέτρησης-Περιγραφή**

### **6.3.1 Μετρήσεις σε γραμμή Μέσης Τάσης 20kV**

Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται ακολούθως πραγματοποιήθηκαν κάτω από γραμμή μέσης τάσης 20kV στην οδό Ηρώων Πολυτεχνείου, προς το εσωτερικό της Πολυτεχνειούπολης. Σε

κάθε σημείο λαμβάνονται 5 συνολικά μετρήσεις ακριβώς κάτω από τη γραμμή μέσης τάσης και ανάμεσα στους δύο σύλους, ξεκινώντας σε ύψος 1,5m από το έδαφος και με βήμα 1m αυξάνεται η απόσταση μέτρησης από το έδαφος.

Στον πίνακα 6.3 παρατίθενται οι περιγραφές των θέσεων μέτρησης και τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο κάτω από γραμμές μέσης τάσης. Πέρα από τις μετρήσεις που λήφθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας το 2022, παρατίθενται και οι καταγραφές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ακριβώς στην ίδια θέση μέτρησης το 2009, ενώ προκειμένου να γίνει πιο άμεση η σύγκριση μεταξύ των παλαιών και των νέων μετρήσεων έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχοι λόγοι.

α/α	Περιγραφή θέσης	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ 2009 [11]		ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ 2022		$B_{2022}/B_{2009}$	$E_{2022}/E_{2009}$
	Ύψος (m)	Μαγνητική Επαγωγή $B_{2009}$ (μΤ)	Ένταση Ηλ. Πεδίου $E_{2009}$ (V/m)	Μαγνητική Επαγωγή $B_{2022}$ (μΤ)	Ένταση Ηλ. Πεδίου $E_{2022}$ (V/m)		
1	1,5	0,391	21,3	0,512	21,37	1,31	1,00
2	2,5	0,465	29,67	0,605	30,08	1,30	1,01
3	3,5	0,563	38,9	0,756	39,82	1,34	1,02
4	4,5	0,634	39,1	0,856	40,94	1,35	1,05
5	5,5	1.035	74,54	1.351	74,78	1,31	1,00

Πίνακας 6.3: Μετρήσεις του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου κάτω από γραμμή μέσης τάσης 20kV, παράλληλης της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου, προς το εσωτερικό της Πολυτεχνειούπολης



Φωτογραφία 6.1: Τα σημεία μέτρησης της γραμμής μέσης τάσης 20kV, παράλληλης της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου, προς το εσωτερικό της Πολυτεχνειούπολης εντός της Πολυτεχνειούπολης

### **6.3.2 Μετρήσεις σε Γραμμή Υψηλής τάσης διπλού κυκλώματος 150kV**

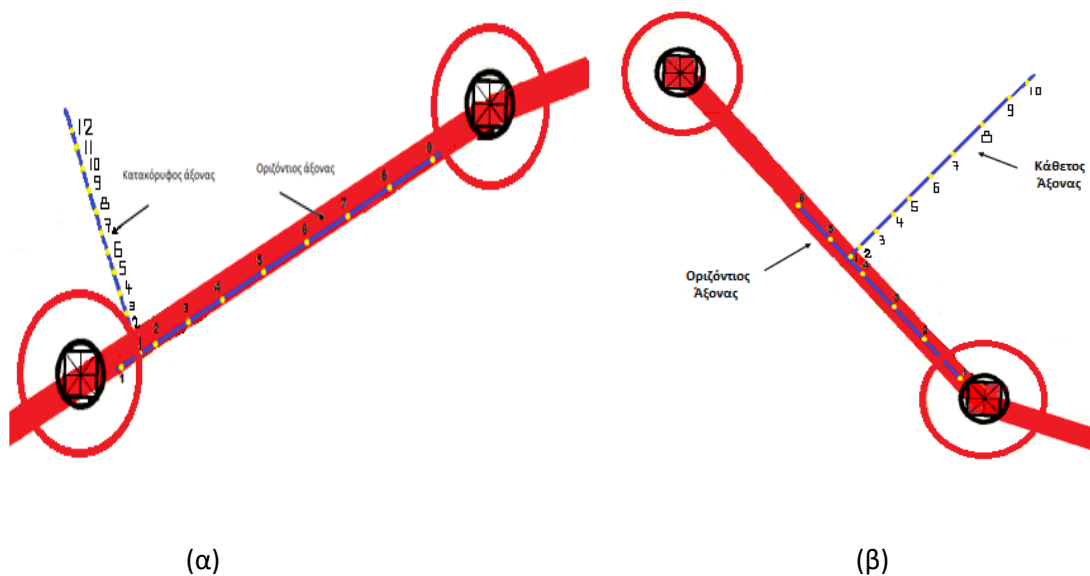
Η επιλογή των σημείων μέτρησης κάτω από γραμμή διπλού κυκλώματος 150kV έγινε ώστε να καταγραφούν και οι θέσεις έκθεσης με το μέγιστο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο στον υπό εξέταση χώρο. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις καταγράφηκαν ως εξής:

Φάση α) Αρχικά λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση σε απόσταση 10m από τον πυλώνα της αριστερής διέλευσης και συνεχίζοντας με βήμα περίπου 50m καταγράφονται οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής και του ηλεκτρικού πεδίου μέχρι τα 390m.

Έπειτα ξεκινώντας πάλι πλησίον του αριστερού πυλώνα, σε απόσταση λίγο μεγαλύτερη των 10m, ανάμεσα στους δύο πυλώνες, λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση και ακολούθως κινούμενοι παραπλεύρως των πυλώνων και κάθετα στον άξονα αυτών καταγράφονται διαδοχικά οι υπόλοιπες μετρήσεις, για την μαγνητική επαγωγή και το ηλεκτρικό πεδίο, με βήμα αρχικά 3m και κατόπιν αυξάνοντας το βήμα σε 5m και 10m.

Φάση β) Αρχικά λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση σε απόσταση 10m από τον πυλώνα της δεξιάς διέλευσης και καταγράφονται οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής και του ηλεκτρικού πεδίου μέχρι τα 375m. Έτσι λαμβάνονται έξι διακριτές τιμές για το μαγνητικό πεδίο και έξι για το ηλεκτρικό πεδίο.

Κινούμενοι πάνω στην μεσοκάθετο του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει ιδεατά τους δύο πυλώνες ξεκινώντας από το μέσον του (αρχή έναρξης μετρήσεων για  $x=0m$ ) και συνεχίζοντας με βήματα 3, 5, 10 m σημειώνονται 10 διακριτές τιμές για το ηλεκτρικό πεδίο και άλλες τόσες για την μαγνητική επαγωγή.



**Σχήμα 6.1:** Αποτύπωση της κάτοψης των πυλώνων υψηλής τάσης με τις θέσεις μέτρησης που ακολουθήθηκαν

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το ρεύμα κυμάνθηκε από 309 έως 329 Α. Πρόκειται για το μέτρο του ρεύματος μιας φάσης με "διπλό" αγωγό.

α/α	Θέση Μέτρησης	Ένταση μαγνητικού πεδίου (μΤ)	B / 200μΤ (%)
1	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (10m)	6,281	3,14%
2	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (50m)	6,658	3,33%
3	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (100m)	6,560	3,38%
4	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (150m)	6,505	3,25%
5	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (200m)	5,954	2,98%
6	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (250m)	5,210	2,61%
7	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (300m)	5,006	2,50%
8	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (350m)	5,231	2,62%
9	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (390m)	5,807	2,90%

10	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (0m)	6,330	3,17%
11	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (3m)	6,067	3,03%
12	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (6 m)	5,493	2,75%
13	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (9m)	4,729	2,36%
14	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (12m)	3,651	1,83%
15	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (15m)	2,947	1,47%
16	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (20m)	2,123	1,06%
17	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (25m)	1,607	0,80%
18	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (30m)	1,264	0,63%
19	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (35m)	1,012	0,51%
20	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (40m)	0,824	0,41%
21	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (45m)	0,681	0,34%

Πίνακας 6.4:Μεγέθη της μαγνητικής επαγωγής, όπως προέκυψαν κατά μήκος της ζώνης διέλευσης των πυλώνων (η απόσταση είναι από τον αριστερό πυλώνα) και κάθετα σε αυτήν (Σχήμα 6.1.α)



α/α	Θέση Μέτρησης	Ένταση μαγνητικού πεδίου ( $\mu\text{T}$ )	B / 200 $\mu\text{T}$ (%)
1	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (10m)	5,964	2,98%
2	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (75m)	6,672	3,34%
3	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (150m)	7,473	3,74%
4	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (250m)	6,984	3,49%
5	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (300m)	6,452	3,23%
6	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (375m)	6,489	3,24%
7	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (0m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	7,334	3,67%
8	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (3m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	7,642	3,82%
9	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (6m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	7,105	3,55%
10	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (9m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	6,210	3,11%
11	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (12m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	5,145	2,57%
12	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (15m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	4,160	2,08%
13	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (20m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	2,944	1,47%
14	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (30m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	1,712	0,86%
15	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (40m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	1,200	0,60%
16	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (50m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	0,911	0,46%

Πίνακας 6.5: Μεγέθη της μαγνητικής επαγωγής, όπως προέκυψαν κατά μήκος της ζώνης διέλευσης των πυλώνων (η απόσταση είναι από τον δεξιό πυλώνα) και στη μεσοκάθετο (Σχήμα 6.1.β)

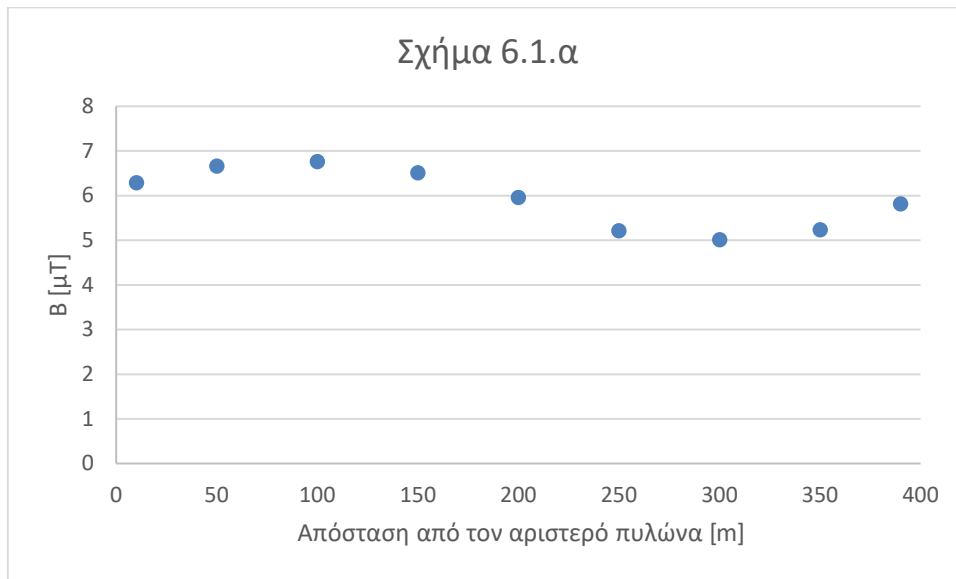
α/α	Θέση Μέτρησης	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)	E / 5000V/m (%)
1	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (10m)	233,4	4,7%
2	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (50m)	1040,0	20,8%
3	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (100m)	1010,1	20,2%
4	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (150m)	526,7	10,5%
5	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (200m)	903,4	18,1%
6	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (250m)	506,9	10,1%
7	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (300m)	553,9	11,1%
8	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (350m)	853,3	17,1%
9	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (390m)	399,3	8,0%
10	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (0m)	974,2	19,5%
11	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (3m)	979,9	19,6%
12	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (6m)	725,4	14,5%
13	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (9m)	463,7	9,3%
14	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (12m)	247,9	5,0%
15	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (15m)	90,6	1,8%
16	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (20m)	39,7	0,8%
17	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (25m)	37,7	0,8%
18	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (30m)	34,8	0,7%
19	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (35m)	27,2	0,5%
20	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (40m)	23,1	0,5%
21	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (45m)	21,9	0,4%

Πίνακας 6.6: Μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως προέκυψαν κατά μήκος της ζώνης διέλευσης των πυλώνων (η απόσταση είναι από τον αριστερό πυλώνα) και κάθετα σε αυτήν (Σχήμα 6.1.α)

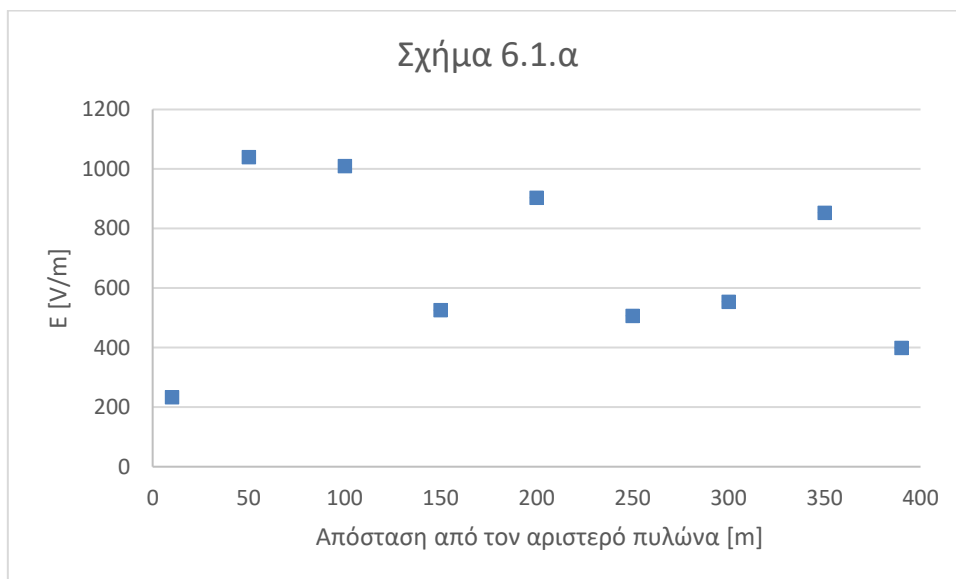
α/α	Θέση Μέτρησης	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (V/m)	E / 5000V/m (%)
1	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (10m)	232,0	4,64%
2	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (75m)	1010,6	20,21%
3	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (150m)	1202,7	24,05%
4	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (250m)	1191,1	23,82%
5	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (300m)	894,1	17,88%
6	Ανάμεσα στους δύο πυλώνες (375m)	607,3	12,15%
7	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (0m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	994,8	19,90%
8	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (3m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	1194,8	23,90%
9	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (6m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	1070,9	21,42%
10	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (9m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	843,2	16,86%
11	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (12m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	539,1	10,78%
12	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (15m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	280,9	5,62%
13	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (20m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	129,2	2,58%
14	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (30m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	92,2	1,84%
15	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (40m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	68,1	1,36%
16	Κάθετη απόσταση από άξονα δύο πυλώνων (50m) και σε ίση απόσταση από τους μεταλλικούς πυλώνες	46,9	0,94%

Πίνακας 6.7: Μεγέθη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, όπως προέκυψαν κατά μήκος της ζώνης διέλευσης των πυλώνων (η απόσταση είναι από τον δεξιό πυλώνα) και στη μεσοκάθετο (Σχήμα 6.1.β)

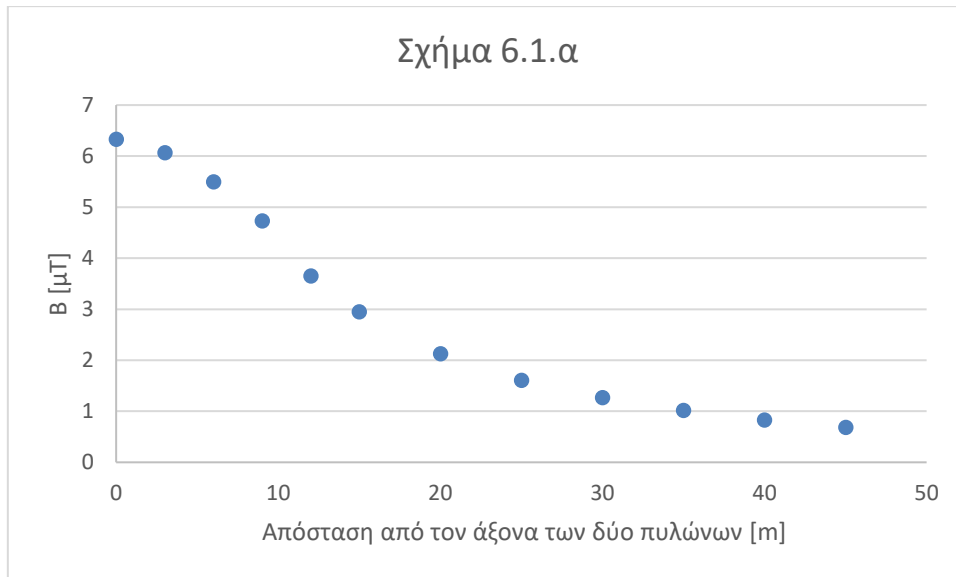
Γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων



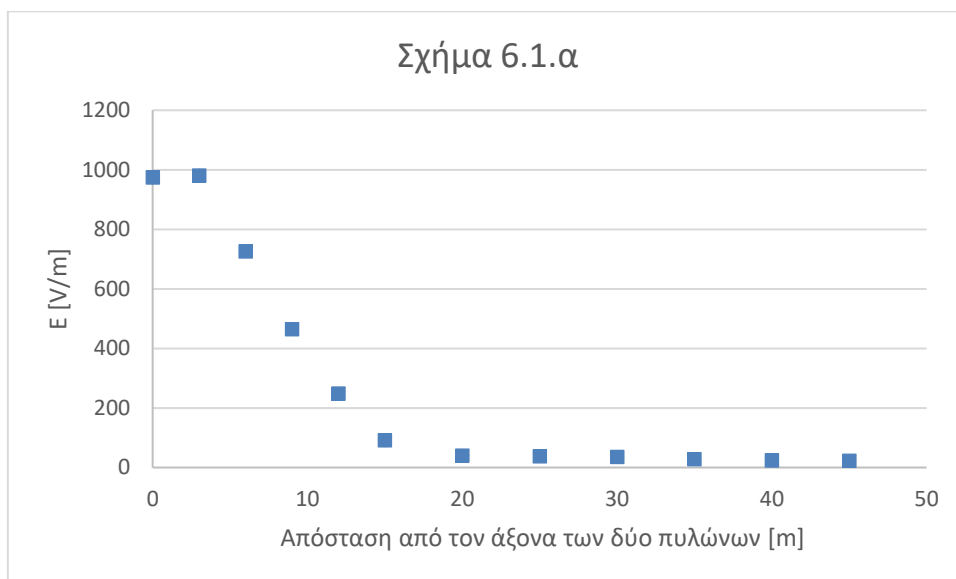
Σχήμα 6.2: Μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ανάμεσα στους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.α



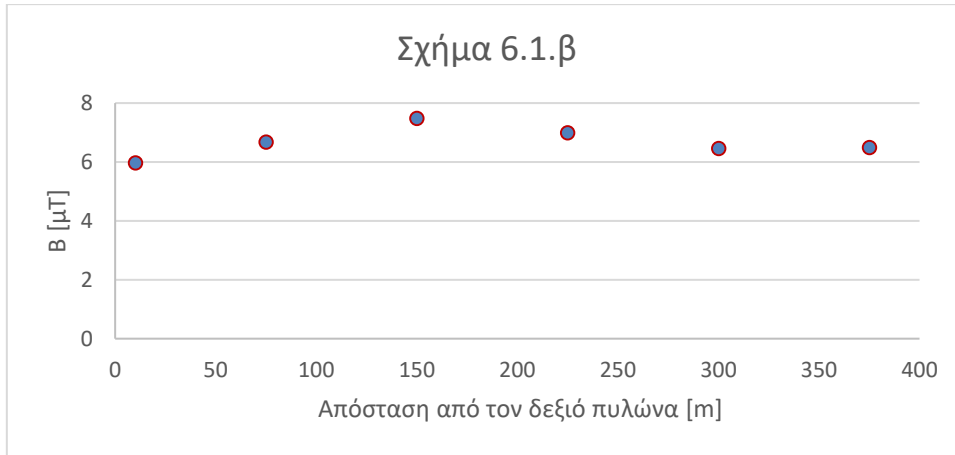
Σχήμα 6.3: Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.α



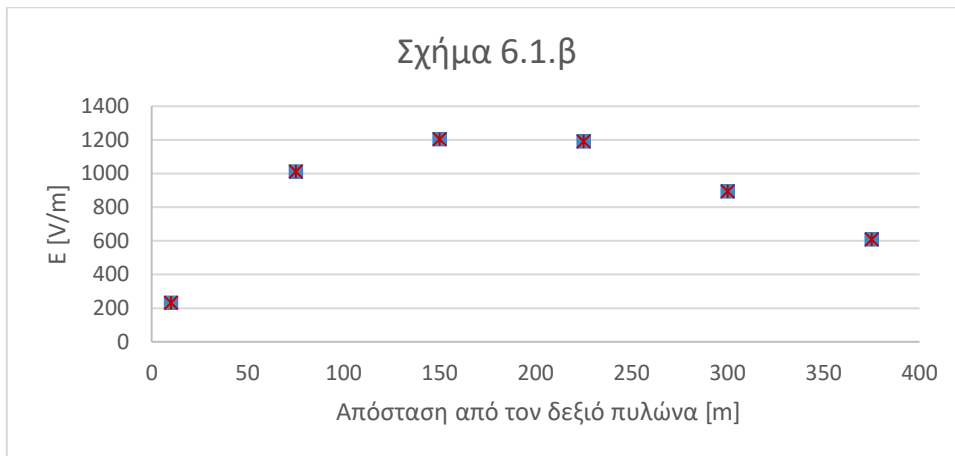
**Σχήμα 6.4:** Μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κάθετο της ευθείας, που συνδέει τους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.α



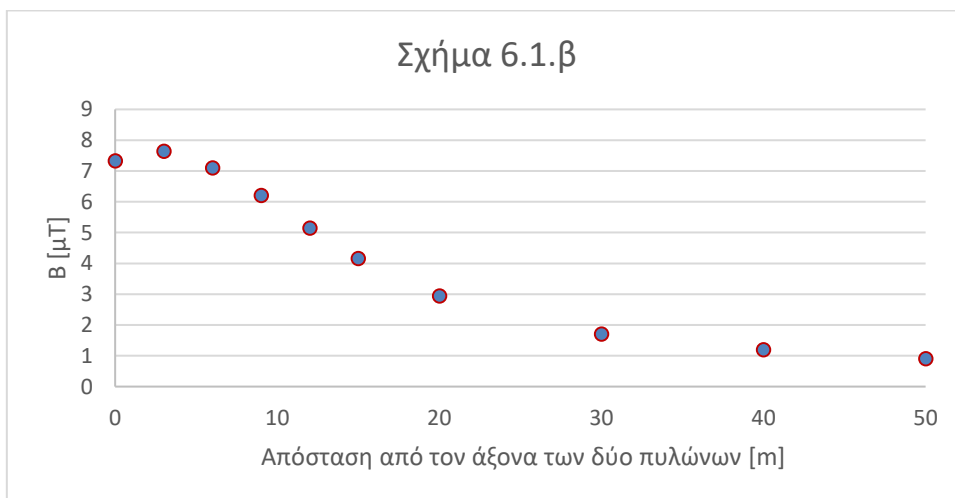
**Σχήμα 6.5:** Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κάθετο της ευθείας, που συνδέει τους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.α



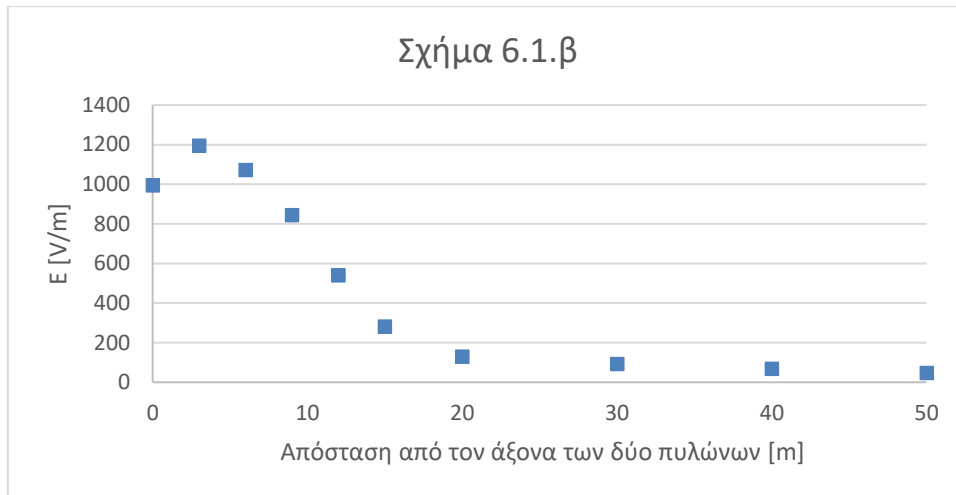
Σχήμα 6.6: Μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής ανάμεσα στους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.β



Σχήμα 6.7: Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα στους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.β



Σχήμα 6.8: Μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κάθετο της ευθείας, που συνδέει τους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.β



**Σχήμα 6.9:** Μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κάθετο της ευθείας, που συνδέει τους δύο πυλώνες του Σχήματος 6.1.β

#### **6.4 Παρατηρήσεις επί των μετρήσεων**

Μετρήσεις στη γραμμή μέσης τάσης 20kV επί της οδού Ηρώων Πολυτεχνείου:

Από τη σύγκριση των δεδομένων που συλλέξαμε από τις μετρήσεις του 2022 με αυτές του 2009 προκύπτει μια μικρή αύξηση στο ηλεκτρικό πεδίο, η οποία κυμαίνεται από 0% έως 5% και στη μαγνητική επαγωγή της τάξεως του 30%. Εκτιμάται ότι αφενός μεν η μεταβολή στην μαγνητική επαγωγή οφείλεται στην αύξηση του ρεύματος περίπου κατά ~30%, καθώς και ότι η θέση μέτρησης δεν ήταν ακριβώς η ίδια στις δύο περιπτώσεις και αφετέρου δε η μικρή μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου οφείλεται στο γεγονός ότι το τρίποδο μέτρησης δεν ήταν στην ίδια ακριβώς θέση (οπότε αλλάζει η απόσταση αισθητήρα μέτρησης-αγωγών).

Παρατηρήσεις επί των μετρήσεων στη γραμμή διπλού κυκλώματος υψηλής τάσης 150kV:

- Στη φάση α (σχήμα 6.1.α) έχουμε τα εξής αποτελέσματα:
  - Κατά την μετακίνησή μας πάνω στον άξονα των πυλώνων λαμβάνουμε (Σχήμα 6.2)  $B_{max}=6,658\mu T$  στη θέση  $\chi=50m$ . Ωστόσο, πολύ κοντά σε αυτήν την τιμή είναι και οι μετρήσεις στις θέσεις  $\chi=100m$ ,  $\chi=150m$ ,  $\chi=200m$  ( μέσο ) με  $B=6,560\mu T$ ,  $B=6,505\mu T$ ,  $B=5,954\mu T$ , αντίστοιχα. Θεωρητικά σε ένα επίπεδο έδαφος το  $B_{max}$  εμφανίζεται στο μέσο της γραμμής δηλαδή εν προκειμένω στη θέση  $\chi=200m$ , αφού εκεί έχουμε το μέγιστο βέλος κάμψης. Το έδαφος στο υπό εξέταση τμήμα της εναέριας γραμμής μεταφοράς 150kV δεν μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο (έχει πολύ μικρή ανομοιομορφία). Το γεγονός, λοιπόν, ότι ισχύει  $B_{50m} > B_{100m} > B_{150m} > B_{200m}$  μπορεί να οφείλετε αφενός στην αβεβαιότητα της μέτρησης και αφετέρου στις ανομοιομορφίες τους εδάφους (ύπαρξη μικρών κοιλοτήτων) που μεταβάλλουν την απόσταση από τη γραμμή. Πλησίον του δεξιού πυλώνα στη θέση 390m λαμβάνουμε ίδια περίπου τιμή μαγνητικού πεδίου με τη θέση  $\chi=10m$ , που είναι απόλυτα λογικό, αφού σε συμμετρικές θέσεις ως προς το μέσο των γραμμών περιμένουμε ίδιες τιμές πεδίων. Ωστόσο, αν και οι θέσεις ενδιαφέροντος είναι αυτές που μεγιστοποιείται το πεδίο οφείλουμε να πούμε ότι το  $B_{min}$  σημειώνεται στη θέση  $\chi=300m$  και όχι στις θέσεις πλησίον των πυλώνων, όπως αναμενόταν, κάτι που οφείλεται στην κοίλη επιφάνεια του εδάφους. Η ποσοστιαία

μεταβολή της χωρικής διακύμανσης του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της γραμμής είναι περίπου 11%, κάτι που δείχνει ότι το μαγνητικό πεδίο επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, που έχουν εξηγηθεί σε στο κεφάλαιο 2 αυτής της εργασίας.

- Το  $E_{\max}=1040 \text{ V/m}$  εμφανίζεται (Σχήμα 6.3) στη θέση  $\chi=50 \text{ m}$ , ενώ στις θέσεις  $\chi=100 \text{ m}$ ,  $\chi=150 \text{ m}$ ,  $\chi=200 \text{ m}$  (μέσο),  $\chi=250 \text{ m}$ ,  $\chi=300 \text{ m}$  παρατηρούμε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές με αυξομειώσεις (μια διακύμανση τιμών - σχήμα 6.3). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πυκνή βλάστηση (φωτογραφία 6.2) στην περιοχή μέτρησης επηρεάζει πολύ το ηλεκτρικό πεδίο μειώνοντας το μέγεθος του. Η χωρική διακύμανση του ηλεκτρικού πεδίου είναι 35%, που οφείλεται αφενός στο "βύθισμα" των γραμμών μεταφοράς και αφετέρου στην ύπαρξη πυκνής βλάστησης. Θεωρητικά σε ένα σχεδόν επίπεδο έδαφος χωρίς αντικείμενα θα περιμέναμε να έχουμε μεγιστοποίηση του ηλεκτρικού πεδίου στο μέσον της γραμμής, όπως συμβαίνει και στο μαγνητικό πεδίο, δηλαδή η θέση μεγίστου για τα δύο πεδία να είναι ίδια και να προσδιορίζεται στο μέσον του άξονα των δύο πυλώνων (Νόμος των Biot-Savart και εφαρμογή του Νόμου του Coulomb για την ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου).
- Κατά τη μετακίνηση μας στον κάθετο άξονα (Σχήμα 6.4) πλησίον του αριστερού πυλώνα παρατηρούμε ότι για  $\chi>0\text{m}$  το μαγνητικό πεδίο διαρκώς μειώνεται,  $B=6,33\mu\text{T}$  έως  $B=0,681 \mu\text{T}$  (σχήμα 6.4) καθώς αυξάνεται η απόσταση κάτι που ήταν αναμενόμενο, ενώ λαμβάνουμε τιμές μαγνητικού πεδίου κοντά τους στόχους ποιότητας ( $3\mu\text{T}$ ) για  $\chi\geq 15\text{m}$ . Επιπλέον, το μαγνητικό πεδίο αποκτά τιμές μικρότερες της μονάδας σε μεγάλη απόσταση από τις γραμμές μεταφοράς ενέργειας ( $\chi=25\text{m}$ ), ενώ μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης για  $\chi\geq 45\text{m}$  (πολύ μακριά από τις γραμμές μεταφοράς).
- Όσον αφορά το ηλεκτρικό πεδίο(σχήμα 6.5), μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τις γραμμές μεταφοράς ενώ για  $\chi>25 \text{ m}$  μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση λαμβάνοντας τιμές από  $E=37,7 \text{ V/m}$  έως  $E=21,9 \text{ V/m}$  αντίστοιχα.
- Στη φάση (α) δεν ακολουθήσαμε την μεσοκάθετο του άξονα των γραμμών ενέργειας (γιατί υπήρχε πυκνή βλάστηση και επομένως δυσκολία στην πρόσβαση) αλλά μια κάθετη απόσταση από τον άξονα όπου υπήρχε αφενός επίπεδο έδαφος και αφετέρου απουσία βλάστησης (χωματόδρομος - φωτογραφία 6.3). Οι τιμές που λαμβάνουμε τόσο για το ηλεκτρικό πεδίο όσο και για το μαγνητικό πεδίο δεν είναι οι μέγιστες δυνατές στα σημεία μέτρησης (Σχήμα 2.2).
- Στη φάση β (σχήμα 6.1.β) έχουμε τα εξής αποτελέσματα:
  - Κατά την μετακίνηση μας παράλληλα με τον άξονα των πυλώνων ,το  $B_{\max}= 7,473\mu\text{T}$  καταγράφεται στη θέση  $\chi=150\text{m}$  πλησίον της θέσης  $\chi=200\text{m}$  (μέσο) και στην ίδια θέση έχουμε  $E_{\max}=1202,7 \text{ V/m}$ . Οι μετρήσεις και για τα δύο πεδία συμφωνούν απόλυτα με τα θεωρητικά δεδομένα.
  - Κατά την μετακίνηση μας στη μεσοκάθετο του άξονα των πυλώνων ,παρατηρούμε (σχήμα 6.8 & σχήμα 6.9), ότι στις θέσεις:  $\chi=0$  έχουμε  $B=7,334\mu\text{T}$  και για  $\chi=3\text{m}$  έχουμε  $B=7,642\mu\text{T}$  δηλαδή  $B_{\chi=0} < B_{\chi=3\text{m}}$  και αντίστοιχα για το ηλεκτρικό πεδίο  $E_{\chi=0} < E_{\chi=3\text{m}}$ . Για την αποφυγή παρερμηνειών οφείλουμε να πούμε ότι κατά την μετακίνηση μας στην μεσοκάθετο  $3\text{m}$  συνεχίζουμε να βρισκόμαστε κάτω από τις γραμμές υψηλής τάσεως, καθώς πρόκειται για διπλού κυκλώματος γραμμή (σχήμα 1.3).



- Γενικά:
  - Όλες οι μετρήσεις που καταγράφηκαν, τόσο στην μέση τάση όσο και στην υψηλή, ήταν εντός των επιτρεπτών ορίων ασφαλείας και σίγουρα εντός των επιπέδων αναφοράς.
  - Οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής και του ηλεκτρικού πεδίου δεν καταγράφονται ταυτόχρονα αλλά αφού τελειώσουμε με τις μετρήσεις για την μαγνητική επαγωγή έπονται οι μετρήσεις για το ηλεκτρικό πεδίο.
  - Οι μετρήσεις διεξήχθησαν τον Σεπτεμβρίου του 2022.
  - Η χρονική διάρκεια συνολικά των μετρήσεων που ελήφθησαν ήταν περίπου μια ώρα ανά άξονα και είδος (ηλεκτρικό ή μαγνητικό) πεδίου, ενώ η λήψη κάθε μέτρησης γινόταν ανά εξάλεπτο (με το όργανο μέτρησης να κάνει λήψεις ανά δευτερόλεπτο και να εμφανίζει στην οθόνη την μέση τιμή τους). Έτσι, καταφέραμε να πετύχουμε διακύμανση στο ρεύμα της τάξεως του 3% από την τιμή των 319A (εύρος ρεύματος (309 έως 329A) ) και λόγο  $309/329=0,93 > 0,90$  (άρα δεν υπάρχουν πολλαπλές πηγές )
  - Δεν κάναμε παρέκταση των μετρήσεων μας στο μέγιστο ρεύμα λειτουργίας σε κανονικές συνθήκες.
  - Ο αισθητήρας μέτρησης είναι τοποθετημένος πάνω σε ένα τρίποδο στήριξης ύψους 1,5m (1m κατά το καθιερωμένο πρότυπο από την ICNIRP, για να τηρηθεί ένα σημείο αναφοράς μετρήσεων διεθνώς).
  - Η αβεβαιότητα των μετρήσεων μας είναι μικρότερη του 6% .



Φωτογραφία 6.2: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου πλησίον του πυλώνα



Φωτογραφία 6.3: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου στον κάθετο άξονα μεταξύ των πυλώνων

Οι φωτογραφίες δείχνουν πυλώνες αιολικών πάρκων στην περιοχή της Νότιας Εύβοιας, κοντά στην Κάρυστο.

Ως προς την γεωμετρία της διάταξης:

Οι δικτυωτοί πυλώνες υψηλής τάσεως που απεικονίζονται, στη φωτογραφία 6.3, είναι τύπου ευθυγραμμίας, οι γραμμές μεταφοράς είναι διπλού κυκλώματος βαρέως τύπου, ενώ η διάταξη των αγωγών φάσεων είναι κατακόρυφη και υπάρχει ένας αγωγός προστασίας.

## Παράρτημα

### A) Αργά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία

Ένα μαγνητικό πεδίο σε κάθε χρονική στιγμή είναι ένα τρισδιάστατο διανυσματικό πεδίο, που η τιμή του σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου είναι ένα διάνυσμα με μέτρο και κατεύθυνση (προσδιορίζεται από μοναδιαίο διάνυσμα). Σε έναν ελεύθερο χώρο καθώς και σε μη μαγνητικά υλικά, το μαγνητικό πεδίο μπορεί να συμβολιστεί ως "πυκνότητα μαγνητικής ροής" (B) ή "μαγνητική επαγωγή" ή από ένα πεδίο που ονομάζεται "ένταση μαγνητικού πεδίου". Σε αυτήν την περίπτωση, για πεδία που μεταβάλλονται αργά στο χρόνο (πεδία χαμηλής συχνότητας), τη στιγμή  $t$  και για ένα σημείο  $r$  για το οποίο η καθυστέρηση μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρή, οι τιμές αυτών των πεδίων δίνονται από τον νόμο του Biot-Savart

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0/4\pi \int \mathbf{J}(\mathbf{r}', t) dV' \times (\mathbf{r}-\mathbf{r}') / |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = 1/4\pi \int \mathbf{J}(\mathbf{r}', t) dV' \times \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|^3}$$

όπου, το πεδίο ολοκλήρωσης είναι ολόκληρος ο χώρος, το " $\mu_0$ " είναι η μαγνητική σταθερά και το " $\mathbf{J}(\mathbf{r}', t)$ " είναι η "πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος" του πεδίου στο σημείο " $\mathbf{r}'$ ", την ίδια στιγμή " $t$ ".

Η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος ( $\mathbf{J}$ ) μας δίνει μια πληροφορία της χωρικής δομής της του μαγνητικού πεδίου, το οποίο εξαρτάται από τον σχεδιασμό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλά κυρίως από την κατάσταση φόρτισης.

Οι αγωγοί στους οποίους η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος του πεδίου είναι συγκεντρωμένη θεωρούνται γραμμικοί. Σε αυτή την περίπτωση το " $\mathbf{J}(\mathbf{r}', t) dV'$ " αντικαθίσταται από το στοιχειώδες ρεύμα " $I(t) dr$ " όπου το " $I(t)$ " είναι το ηλεκτρικό ρεύμα κατά μήκος της διατομής του γραμμικού αγωγού και το " $dr$ " είναι το στοιχειώδες μήκος του γραμμικού αγωγού.

Στη συνέχεια, δίνεται η τιμή του μαγνητικού πεδίου, στο σημείο " $\mathbf{r}$ " και στη στιγμή " $t$ ":

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mu_0/4\pi \sum_k \int \mathbf{I}_k(t) d\mathbf{r}_k \times (\mathbf{r}-\mathbf{r}_k) / |\mathbf{r}-\mathbf{r}_k|^3$$

Στην εξίσωση, η οποία είναι η έκφραση του νόμου του Biot-Savart, φαίνεται η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τα δίκτυα ισχύος από δύο παράγοντες: Το ρεύμα στους αγωγούς και τη γεωμετρία των αγωγών. Σε πραγματικές συνθήκες, υπάρχει ένας πολύ σημαντικός αγωγός, ο οποίος είναι κοντά στον άνθρωπο και δεν μπορεί να θεωρηθεί γραμμικός αγωγός, και αυτή είναι η Γη. Η συμβολή της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος πεδίο εντός της Γης, στο μαγνητικό πεδίο, είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση ύπαρξης ενός μη ισορροπημένου ρεύματος στους αγωγούς ισχύος, που πρέπει να επιστρέψει μέσω του εδάφους, των καλωδίων γείωσης ή του περιβλήματος των καλωδίων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τις τιμές του μαγνητικού πεδίου στο ή κοντά στο επίπεδο του εδάφους.

Μια άλλη περίπτωση, όπου η εύρεση της ηλεκτρικής πυκνότητας ρεύματος είναι σημαντική για τον υπολογισμό της πυκνότητας της μαγνητικής ροής πεδίου, αποτελεί η σχεδίαση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα στις υπόγειες ηλεκτρικές ζεύξεις, κατά

την οποία χρησιμοποιούνται μαγνητικά και αγωγή υλικά με σκοπό τον μετριάσμο της τιμής του μαγνητικού πεδίου σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Παρόλα αυτά, κανονικά, στην περίπτωση των εναέριων γραμμών στο σημείων των ζεύξεων ισχύος, προκειμένου να συνεχιστεί η χρήση της έννοιας του ρεύματος (για γραμμικούς αγωγούς), η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος του πεδίου στη γη, σε σημεία μακριά από τα σημεία έγχυσης ρεύματος στη γη, αντικαθίσταται από ένα σύνολο αγωγών σύρματος. Συνήθως, για εναέριες γραμμές πάνω από κανονικό έδαφος (μέση ειδική αντίσταση 100Ωm ή περισσότερο), η συνεισφορά της ηλεκτρικής πυκνότητας ρεύματος του μαγνητικού πεδίου στη Γη θεωρείται αμελητέα.

Υπογραμμίζεται, ότι η χωρική διακύμανση του μεγέθους του  $B(r,t)$  μακριά από τον άξονα μιας γραμμής ισχύος, που παράγεται από τις συνιστώσες ισορροπημένου ρεύματος της γραμμής, είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης από τον άξονα, ενώ αυτή που παράγεται από τη συνιστώσα του μη ισορροπημένου ρεύματος της γραμμής είναι ακριβώς αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Επίσης, η χρονική διακύμανση της τιμής του διανύσματος  $B(r,t)$  χαρακτηρίζεται, γενικά, από μια μεταβολή του μεγέθους του διανύσματος και επίσης από μια μεταβολή του μοναδιαίου προσανατολισμού του διανύσματος, επομένως, γενικά, δεν είναι γραμμικά πολωμένο.

## B) Αρμονικές-χρόνου του πεδίου

Από τον μετασχηματισμό Fourier του μαγνητικού πεδίου και της πυκνότητας του ηλεκτρικού ρεύματος λαμβάνουμε,

$\infty \infty$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 1/2\pi \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{B}(\mathbf{r}, \omega) e^{j\omega t} d\omega \right\} \quad \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) = 1/2\pi \text{Re} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega) e^{j\omega t} d\omega \right\}$$

όπου  $B(r,\omega)$  και  $J(r,\omega)$  είναι σύνθετα διανύσματα.

Αυτός ο μετασχηματισμός Fourier είναι ισοδύναμος με την αναπαράσταση των διανυσματικών πεδίων  $B(r, t)$  και  $J(r, t)$ , ως άθροισμα περιοδικών αρμονικών στο πεδίο του χρόνου των διανυσματικών πεδίων ή "ημιτονοειδή πεδία" και κάθε ένα από αυτά χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα  $f = \omega/2\pi$ .

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν σχεδιαστεί για να παράγουν όσο το δυνατόν ημιτονοειδή πεδία σταθερής κατάστασης σε συχνότητα ισχύος (50 ή 60 Hz).

Επίσης, οι βασικοί περιορισμοί της διεθνούς επιτροπής ICNIRP για την έκθεση του ανθρώπου σε ημιτονοειδή ηλεκτρομαγνητικά πεδία, συχνότητας "f" δίνονται ως προς τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή  $r_{mst}$  του πεδίου.

Καθώς το ανθρώπινο σώμα είναι μη μαγνητικό, η έκθεση σε χρονικά μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία εσωτερικών ηλεκτρικών πεδίων που παράγονται με επαγωγή.

Όσον αφορά τις αρμονικές συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου, η μαγνητική επαγωγή εξαρτάται από τη συχνότητα, τα επίπεδα αναφοράς για τη γενική έκθεση του κοινού σε

χρονομεταβλητά μαγνητικά πεδία δίνονται ως προς τη "μέγιστη επιτρεπόμενη rms τιμή" για ένα χρονικά αρμονικό μαγνητικό πεδίο συχνότητας "f".

Η τιμή του αρμονικού περιεχομένου του μαγνητικού πεδίου συχνότητας "f", στο σημείο "r" και στη στιγμή "t", μπορεί να εκφραστεί όπως:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{B}}_{\omega}(\bar{\mathbf{r}}, t) &= \text{Re}\{\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{r}}, \omega) e^{j\omega t}\} \\ &= B_{\omega x}(\bar{\mathbf{r}}) \cos(\omega t + \alpha_{\omega x}) \bar{\mathbf{i}} + B_{\omega y}(\bar{\mathbf{r}}) \cos(\omega t + \alpha_{\omega y}) \bar{\mathbf{j}} + B_{\omega z}(\bar{\mathbf{r}}) \cos(\omega t + \alpha_{\omega z}) \bar{\mathbf{k}}\end{aligned}$$

Η χρονική διακύμανση της διανυσματικής τιμής, στο σημείο "r", κάνει την άκρη του διανύσματος να κινείται σε ένα μόνο επίπεδο περιγράφοντας, γενικά, μια έλλειψη.

Σε ειδικές περιπτώσεις, η έλλειψη εκφυλίζεται σε ένα τμήμα (γραμμική πόλωση) ή ακολουθεί κυκλική μορφή (κυκλική πόλωση).

Μια τιμή αντιπροσωπευτική του μεγέθους αυτού του περιοδικού χρονικά μεταβαλλόμενου διανύσματος, της συχνότητας "f", στο το σημείο "r", είναι η "τιμή rms" του που ορίζεται ως

$$B_{\omega}^{rms}(\bar{\mathbf{r}}) \equiv \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} |\bar{\mathbf{B}}_{\omega}(\bar{\mathbf{r}}, t)|^2 dt} = \sqrt{\frac{(B_{\omega x}(\bar{\mathbf{r}}))^2 + (B_{\omega y}(\bar{\mathbf{r}}))^2 + (B_{\omega z}(\bar{\mathbf{r}}))^2}{2}}$$

Όπως φαίνεται, το  $B_{\omega}^{rms}$ , στο σημείο "r" είναι ένα μονόμετρο μέγεθος.

## Γ) Μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από ζεύξεις ισχύος

Τα μαγνητικά πεδία που παράγεται από τα δίκτυα ισχύος, λόγω των διακυμάνσεων του φορτίου, παρουσιάζει αργές χρονικές διακυμάνσεις, καθιστώντας τα να μην είναι πραγματικά περιοδικά. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις, τα πεδία παραμορφώνονται από αρμονικές συνιστώσες της συχνότητας ισχύος, οι οποίες κατανέμονται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων.

Το "μαγνητικό πεδίο συχνότητας ισχύος", που δημιουργείται από μια σύνδεση ισχύος κατά τη διάρκεια μόνιμης λειτουργίας (όχι σε μεταβατικό στάδιο), παρουσιάζεται σε δύο σημαντικές χρονικές κλίμακες: περιοδική χρονική διακύμανση και αργή χρονική διακύμανση και θεωρείται ως χρονο-αρμονικό πεδίο που ταλαντώνεται με συχνότητα "f" με αργά χρονικά μεταβαλλόμενο πλάτος και φάση:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{B}}_{\omega}(\bar{\mathbf{r}}, t, \tau) &= \text{Re}\{\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{r}}, \omega, \tau) e^{j\omega t}\} \\ &= B_{\omega x}(\bar{\mathbf{r}}, \tau) \cos(\omega t + \alpha_{\omega x}(\tau)) \bar{\mathbf{i}} + B_{\omega y}(\bar{\mathbf{r}}, \tau) \cos(\omega t + \alpha_{\omega y}(\tau)) \bar{\mathbf{j}} + B_{\omega z}(\bar{\mathbf{r}}, \tau) \cos(\omega t + \alpha_{\omega z}(\tau)) \bar{\mathbf{k}}\end{aligned}$$

Όπου το "τ" είναι μια αργή χρονική κλίμακα πολλών περιόδων της συχνότητας ισχύος, λόγω των κανονικών διακυμάνσεων του φορτίου. Με άλλα λόγια, το μαγνητικό πεδίο θεωρείται ένα πραγματικό περιοδικό χρονικό-αρμονικό πεδίο κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος "Δt", που μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερός χρόνος "τ". Η τιμή rms του μεγέθους του μαγνητικού πεδίου, στο σημείο "r" και τη στιγμή "t", δίνεται από τη σχέση

$$B_{\omega}^{rms}(\vec{r}, \tau) \equiv \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} |\vec{B}_{\omega}(\vec{r}, t, \tau)|^2 dt} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi} \sum_{i=x}^z \int_{-\frac{\pi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega}} (B_i(\vec{r}, t, \tau))^2 dt} =$$

$$= \sqrt{\frac{(B_{\omega x}(\vec{r}, \tau))^2 + (B_{\omega y}(\vec{r}, \tau))^2 + (B_{\omega z}(\vec{r}, \tau))^2}{2}}$$

Η τιμή του  $B_{\omega}$  (rms) στο σημείο " $r$ " και τη στιγμή " $t$ ", που ονομάζεται "στιγμιαία τιμή rms" του μέγεθος του μαγνητικού πεδίου ή της "προκύπτουσας τιμής μαγνητικού πεδίου", είναι μονόμετρο μέγεθος, ανεξάρτητο από τις φάσεις των συνιστωσών του διανύσματος  $B_{\omega}(r,t,\tau)$  και είναι επίσης ανεξάρτητο από τη γρήγορη χρονική κλίμακα " $t$ ". Τότε, το βαθμωτό πεδίο  $B_{\omega}$  (rms) ποικίλλει χρονικά μόνο σε αργή χρονική κλίμακα. Μια εναλλακτική γενική αναπαράσταση αυτού του είδους χρονο-αρμονικού πεδίου, στο σημείο " $r$ ", είναι ένα διάνυσμα που περιστρέφεται στη γρήγορη χρονική κλίμακα " $t$ " σε ένα επίπεδο που περιλαμβάνει το σημείο " $r$ ", όπου, σε σταθερό χρόνο " $\tau$ ", η άκρη του περιγράφει μια έλλειψη, της οποίας ο ημικύριος άξονας αντιπροσωπεύει το μέγεθος και την κατεύθυνση της "μέγιστης τιμής του πεδίου".

## Βιβλιογραφία

- 1) WHO-Fact Sheets on Electromagnetic Fields and Public Health
- 2) [http://www.eeae.gr/gr/docs/president/\\_xamilosixna.pdf](http://www.eeae.gr/gr/docs/president/_xamilosixna.pdf), (ΕΕΑΕ-ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΤΟΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ)
- 3) Εφημερίς της κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, τεύχος δεύτερο, αρ. φύλλου 512, 25 Απριλίου 2002
- 4) Δημήτριος Τσανάκας: "Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας ως περιβαλλοντικοί παράγοντες"
- 5) ICNIRP Statement, Gaps in Knowledge Relevant to the "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz)", Health Physics 2010, 118(5), 533-542,
- 6) ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ, Κατασκευαστικά Στοιχεία Εναέριων Γραμμών Μεταφοράς, Λαμπρίδης Δημήτριος, Ανδρέου Γεώργιος
- 7) Cigre-Extrapolation of measured values of power-frequency magnetic fields in the vicinity of power links. Reference 795
- 8) <https://www.etscablecomponents.com/blog/2013/11/single-core-cables-laid-trefoil-flat-formations-advantages-disadvantages/>
- 9) [https://www.tisoft.com/el/support/help/electricaldesign/knowledgebase/middlevoltage/panelcad\\_kalwdia/panelcad\\_egkatastash\\_kalwdiwn\\_meshs\\_tashs\\_mesa\\_sto\\_edafos](https://www.tisoft.com/el/support/help/electricaldesign/knowledgebase/middlevoltage/panelcad_kalwdia/panelcad_egkatastash_kalwdiwn_meshs_tashs_mesa_sto_edafos)
- 10) [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-sagging-occurring-in-the-Electric-Power-Transmission-line\\_fig1\\_341717672](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-sagging-occurring-in-the-Electric-Power-Transmission-line_fig1_341717672)
- 11) Μέτρηση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας - διπλωματική εργασία Ιωάννης Ν. Ζτούπης
- 12) ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics 1998, 74, 494-522
- 13) IEEE C95.1-2019, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz