



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μέτρηση και Υπολογισμός Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου
σε Γραμμές Μεταφοράς Υψηλής Τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λουκάς Δ. Μπινιάρης

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας
Μεταδιδακτορικός Ερευνητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μέτρηση και υπολογισμός Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου
σε Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Λουκά Μπινιάρη

Καθηγητής: Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Δρ.-Μηχ. Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας

Μεταδιδακτορικός Ερευνητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9^η Οκτωβρίου 2023.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος

(Υπογραφή)

.....
ΜΠΙΝΙΑΡΗΣ ΛΟΥΚΑΣ

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

Copyright© Μπινιάρης Λουκάς, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Περίληψη

Η μέτρηση και η αξιολόγηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που παράγονται από γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης που λειτουργούν με χαμηλές συχνότητες είναι ένα θέμα μεγάλης σημασίας στην Ελλάδα. Λόγω της μεγάλης σημασίας που έχει, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε συγκεκριμένες εκτιμήσεις και τεχνικές που εμπλέκονται στην ακριβή μέτρηση αυτών των πεδίων στον Ελλαδικό χώρο. Οι παράμετροι που απασχολούν είναι η σημασία των μέτρων ασφαλείας, των κατάλληλων συσκευών μέτρησης, των θεμάτων συχνότητας, των παρεμβολών πεδίου, των σχετικών προτύπων και κανονισμών και των μεθόδων ανάλυσης δεδομένων που απαιτούνται για μια ολοκληρωμένη κατανόηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που περιβάλλουν τις γραμμές μεταφοράς στην Ελλάδα. Συνεπώς, υπάρχει ανάγκη για τη μελέτη αυτών των πεδίων και για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη διαφορετικών τύπων γραμμών μεταφοράς όσον αφορά το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο γύρω από τις γραμμές μεταφοράς, τόσο σε μέτρηση πεδίου με κατάλληλα διακριβωμένα όργανα όσο και με ένα λογισμικό προσομοίωσης. Για την υλοποίηση αυτή πρώτα έγιναν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικούς τύπους πυλώνων στο πεδίο με διακριβωμένα όργανα του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Έγινε επιλογή συγκεκριμένων περιοχών κατόπιν μελέτης, ιδανικών για τέτοιες μετρήσεις και διεξήχθησαν μελέτες στο πεδίο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αξιολογούνται μέσω μιας ανάλυσης ως προς τις παραμέτρους που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα.

Επιπλέον, διεξήχθησαν προσομοιώσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου COMSOL Multiphysics και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις που ελήφθησαν στο πεδίο, σχηματίζοντας μια πλήρη εικόνα για τη μορφή και την ένταση των πεδίων στον ευρύτερο χώρο γύρω από τις γραμμές μεταφοράς.

Τέλος, σχολιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα τόσο των μετρήσεων όσο και των προσομοιώσεων, εξάγοντας συμπεράσματα ως προς το κατά πόσο αυτά τα πεδία μπορούν να επιβαρύνουν ή όχι τον άνθρωπο καθώς και το οικοσύστημα που υπάρχει γύρω από τις γραμμές μεταφοράς.

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτρικό Πεδίο, Μαγνητικό Πεδίο, Γραμμές Μεταφοράς, Πυλώνας, Προσομοίωση, Υψηλές Τάσεις, Χαμηλή Συχνότητα, Μετρητές Ηλεκτρικού Πεδίου, Μετρητές Μαγνητικού Πεδίου, COMSOL Multiphysics.

Abstract

The measurement and evaluation of electric and magnetic fields produced by high voltage transmission lines operating at low frequencies is a matter of great importance in Greece. Due to the great importance that has been given to specific considerations and techniques involved in the accurate measurement of these fields in the Hellenistic area. The parameters concerned are the importance of safety precautions, appropriate measuring devices, frequency issues, field interference, relevant standards and regulations, and data analysis methods required for a comprehensive understanding of the electric and magnetic fields surrounding transmission lines in GREECE. Therefore, there is a need to study these areas to draw conclusions.

The subject of this diploma is the study of different types of transmission lines in terms of the electric and magnetic field around the transmission lines both in field measurement with accredited instruments and with a simulation program. For this implementation, measurements were first made for three different types of pylons in the field with accredited instruments of the NTUA's High Voltage Laboratory. Specific areas were selected after study, ideal for such measurements, and field studies were conducted. The measurement results are evaluated through an analysis of the parameters characterized by uncertainty.

In addition, some simulations were conducted through the COMSOL Multiphysics Software, where the measurements made in the field were simulated to make various changes in order to see if there is a tolerance in the limits provided to not create problems and distortions.

Finally, the results of both measurements and simulations are commented and compared, drawing conclusions as to whether or not these fields can burden humans as well as the ecosystem that exists around the transmission lines.

KEYWORDS

Extremely low frequency EMF, Power Lines, Safety exposure limits, International Standard IEC 61786, IEEE Std 644 an IEC 62110, Measurement uncertainty, EM Field simulation.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της Διπλωματικής μου Εργασίας σηματοδοτεί το πέρας των σπουδών μου στη Σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου(ΕΜΠ).

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου αυτό το πολύ ενδιαφέρον θέμα, τις γνώσεις που μου μετέδωσε και τη συνεχή καθοδήγηση του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω ιδιαίτερος στον κ. Βασίλειο Π. Ανδροβιτσανέα, Μεταδιδακτορικό Ερευνητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, για την άψογη συνεργασία μας, την επιμονή του και τη διαρκή και ειλικρινή διάθεση του να βοηθήσει σε οποιαδήποτε δυσκολία παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής μου Εργασίας. Του εύχομαι, πραγματικά, τα καλύτερα στη συνέχεια της επαγγελματικής και ακαδημαϊκής του πορείας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	15
1. Εισαγωγή.....	15
1.1 Η Ηλεκτρική Ενέργεια	15
1.2 Το Ελληνικό ΣΗΕ.....	16
1.3 Το Ελληνικό Δίκτυο Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	18
1.4 Υψηλές τάσεις	23
1.6 Υλικά Εναέριων Αγωγών Υψηλής Τάσης.....	27
1.7 Πυλώνες στήριξης αγωγών	31
1.8 Θερμικές απώλειες αγωγών.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	36
Εισαγωγή στα χαμηλόσυχνα ΗΜΠ.....	36
2.1 Εισαγωγή.....	36
2.2 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας.....	36
2.3 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος.....	37
2.4 Πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων συχνότητας ισχύος	38
I. Κριτήρια για ασφαλή όρια έκθεσης	44
II. Όρια Έκθεσης στην Ελλάδα.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	51
Βιολογική Επίδραση των Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ.....	51
3.1 Βραχυχρόνιες επιδράσεις	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	60
Μετρητές Εξαιρετικά Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ	60
4.1 Κατηγοριοποίηση μετρητών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.....	60
4.2 Διακρίβωση μετρητών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	74
Αβεβαιότητα Μετρήσεων Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ	74
5.1 Εισαγωγή στην Αβεβαιότητα	74
5.2 Συστηματικά και τυχαία σφάλματα.....	75
5.3 Διάδοση σφάλματος μέτρησης	78
5.4 Κατηγοριοποίηση Αβεβαιοτήτων (Τύπου Α & Τύπου Β)	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	87
Μετρήσεις Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ	87
6.1 Προπαρασκευή Μετρήσεων	87
6.2 Διαδικασία Μέτρησης.....	90

6.3 Αναφορά των αποτελεσμάτων μέτρησης.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	108
2. Το πακέτο λογισμικού COMSOL Multiphysics	108
7.1 Οι δυνατότητες του Λογισμικού – Ροή Εργασίας.....	108
7.2 Ορισμός του Model Wizard.....	108
7.3 Διαστάσεις του Μοντέλου	109
7.4 Επιλογή Κλάδων Φυσικής	109
7.5 Επιλογή Μελέτης.....	111
7.6 Model Builder	111
7.6.1 Ορισμός Παραμέτρων.....	112
7.6.2 Ορισμός Γεωμετρίας	113
7.6.3 Ορισμός των Υλικών.....	113
7.6.4 Ορισμός Συναρτήσεων.....	114
7.6.5 Ορισμός του κλάδου λειτουργίας του προγράμματος	115
7.6.5.1 Electric Currents Interface.....	115
7.6.5.2 Magnetic Fields Interface	118
7.6.5.3 Heat Transfer In Solids Interface	121
7.6.5.4 Multiphysics Interface	121
7.6.6 Ορισμός Πλέγματος (Mesh)	123
7.6.7 Ορισμός Μελέτης	127
7.6.7.1 Μέθοδοι Επίλυσης.....	127
7.6.7.2 Επίλυση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου για δύο περιόδους	128
7.6.7.3 Επίλυση θερμικού μοντέλου για 48 ώρες.....	128
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....	130
Προσομοίωση των χαμηλόσυχνων ΗΜΠ.....	130
8.1 Υπολογισμός των Ηλεκτρικών και των Μαγνητικών Πεδίων	130
8.2 Μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών του δικτύου και του χώρου μέτρησης.....	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.....	164
Σύνοψη και συμπεράσματα.....	164
9.1 Υπολογισμός των Ηλεκτρικών και των Μαγνητικών Πεδίων	164
9.2 Συμπεράσματα και αξιολόγηση	165
9.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.....	167
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	169
1. Εναέριες γραμμές μεταφοράς	169
2. Γραμμή Μεταφοράς 150kV - Δικτυωτοί Πυλώνες	170

3. Γραμμή Μεταφοράς 150kV - Συμπαγείς Πυλώνες.....	172
4. Γραμμή μεταφοράς 400kV.....	173
B. Θεωρητικό Υπόβαθρο για την Προσομοίωση	175
Βιβλιογραφία.....	188

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1.1: Μήκη Εγκατεστημένων Γραμμών Μεταφοράς (μήκος όδευσης) [9].	19
Πίνακας 1.2: Μετασχηματιστές Υψηλής Τάσης συνδεδεμένων με το Σύστημα Μεταφοράς [9].	19
Πίνακας 1.3: Βαθμίδες Τάσεων κατά IEC [15].	24
Πίνακας 2.1: Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από κοινές ηλεκτρικές συσκευές και εργαλεία [3].	39-40
Πίνακας 2.2: Βασικοί περιορισμοί νομοθεσίας για τα ΗΜΠ χαμηλών συχνοτήτων [27].	47
Πίνακας 2.3: Επίπεδα αναφοράς της ελληνικής νομοθεσίας για τα ΗΜΠ χαμηλών συχνοτήτων [27].	47
Πίνακας 2.4: Επίπεδα αναφοράς για ρεύματα επαφής από αγωγίμα σώματα (f σε kHz) [27].	48
Πίνακας 4.1: Κανονικοποιημένες τιμές πεδίου E στο μέσο μεταξύ των πλακών και στις επιφάνειες των πλακών [4].	68
Πίνακας 6.1: Εξοπλισμός μέτρησης ΗΜΠ Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.	88
Πίνακας 6.2: Στοιχεία των προς μέτρηση τμημάτων της γραμμής ΚΛΣ 55 – ΚΛΣ 54 (Περιοχή Α) και ΑΡΚ 60 -ΑΡΚ 59 (Περιοχή Β).	93
Πίνακας 6.3: Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα στο μέσο του διπλού κυκλώματος των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.	96
Πίνακας 6.4: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα που απέχει 30m από το μέσον των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.	96-97
Πίνακας 6.5: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα που απέχει 150m από το μέσον των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.	97
Πίνακας 6.6: Στοιχεία του τμήματος της γραμμής ΣΑ 93 – ΣΑ 92.	99
Πίνακας 6.7: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΣΑ93-ΣΑ92.	101
Πίνακας 6.8: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στα +25m από τον Πυλώνα ΣΑ93 της γραμμής ΣΑ93-ΣΑ92.	101
Πίνακας 6.9: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στα +30m από τον Πυλώνα ΣΑ92 της γραμμής ΣΑ93-ΣΑ92.	101-102
Πίνακας 6.10: Στοιχεία των προς μέτρηση τμήματος της γραμμής ΣΑ 93 – ΣΑ 92.	103
Πίνακας 6.11: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα κατά μήκος της γραμμής ΑΑ228/61-ΑΑ228/60.	105
Πίνακας 6.12: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσια στο μέσο της γραμμής ΑΑ228/61-ΑΑ228/60.	105
Πίνακας 7.1: Οι διαφορές της Ευθείας με την Επαναληπτική μέθοδο.	127
Πίνακας Α.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγών ΑCSR των γραμμών μεταφοράς.	168-169
Πίνακας Α.2: Χαλύβδινοι δικτυωτοί τύποι πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV.	169
Πίνακας Α.3: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς 150 kV για δικτυωτούς πύργους.	169
Πίνακας Α.4: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV διπλού κυκλώματος.	170
Πίνακας Α.5: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV απλού κυκλώματος.	170
Πίνακας Α.6: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς 150 kV για συμπαγείς πύργους.	171
Πίνακας Α.7: Γενικές διαστάσεις συμπαγών πύργων γραμμών μεταφοράς 150 kV.	171-172
Πίνακας Α.8: Χαλύβδινοι δικτυωτοί τύποι πύργων γραμμών μεταφοράς 400 kV.	172
Πίνακας Α.9: Χαρακτηριστικά γραμμών μεταφοράς 400 kV για δικτυωτούς πύργους.	172
Πίνακας Α.10: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 400 kV απλού κυκλώματος.	173
Πίνακας Α.11: Γενικές διαστάσεις πύργων γραμμών μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος.	174
Πίνακας Β.1: Εξισώσεις του Maxwell[26].	175
Πίνακας Δ.1: Αναλύσεις στο COMSOL [6].	182
Πίνακας Δ.2: Δυνατές μελέτες με βάση την φυσική [6].	183

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1.1: Γενική δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [3].	17
Εικόνα 1.2: Εναέρειες Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [13].	20
Εικόνα 1.3: Υπόγειες Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [14].	23
Εικόνα 1.4: Αγωγοί Χαλκού [18].	28
Εικόνα 1.5: AAC [18].	28
Εικόνα 1.6: Αγωγοί AAAC [18].	29
Εικόνα 1.7: Αγωγοί ACSR [18].	29
Εικόνα 4.1: Πεδιόμετρο Narda EFA-300.	65
Εικόνα 4.2: Αισθητήρες (α) Μαγνητικού και (β) Ηλεκτρικού Πεδίου.	65
Εικόνα 4.3: Σύνδεση οργάνου μέτρησης με τους αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου (αριστερά) και μαγνητικού πεδίου (δεξιά).	66
Εικόνα 4.4: Πεδιόμετρο PWM 8053A και όλος ο εξοπλισμός.	66
Εικόνα 6.1: Απεικόνιση των γραμμών μεταφοράς από τον Χάρτη Γραμμών Μεταφοράς του ΑΔΜΗΕ [12].	93
Εικόνα 6.2: Απεικόνιση του διπλού κυκλώματος και ονομασία των πυλώνων μέσω της εφαρμογής Google Earth.	94
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση της γραμμής μεταφοράς στο AutoCAD (Πάνω αριστερά είναι ο Πυλώνας ΚΛΣ54 ακριβώς από κάτω είναι ο Πυλώνας ΑΡΚ59 και στη δεξιά μεριά πάνω είναι ο Πυλώνας ΚΛΣ55 και ακριβώς από κάτω ο Πυλώνας ΑΡΚ60).	94
Εικόνα 6.4: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΑΡΚ59/60 – ΚΛΣ54/ΚΛΣ55 για την κατά μήκος μέτρηση	95
Εικόνα 6.5: Εγκάρσιος άξονας μέτρησης σε απόσταση 30m από το μέσο των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.	95
Εικόνα 6.6: Εγκάρσιος άξονας μέτρησης σε απόσταση 150m από το μέσο των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.	95
Εικόνα 6.7: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου στον εγκάρσιο άξονα που απέχει 150 m από το μέσον των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.	98
Εικόνα 6.8: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.	98
Εικόνα 6.9: Απεικόνιση της γραμμής μεταφοράς από το Χάρτη Γραμμών Μεταφοράς του ΑΔΜΗΕ [12].	99
Εικόνα 6.10: Απεικόνιση της γραμμής μεταφοράς στο AutoCAD.	99
Εικόνα 6.11: Απεικόνιση του διπλού κυκλώματος και ονομασία των πυλώνων μέσω της εφαρμογής Google Earth.	100
Εικόνα 6.12: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΣΑ92-ΣΑ93 για την κατά μήκος μέτρηση.	100
Εικόνα 6.13: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΣΑ92-ΣΑ93 για τον εγκάρσιο άξονα που απέχει 25m από τον Πυλώνα ΣΑ 93.	100
Εικόνα 6.14: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΣΑ92-ΣΑ93 για τον εγκάρσιο άξονα που απέχει 30m από τον Πυλώνα ΣΑ 92.	100
Εικόνα 6.15: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα.	102
Εικόνα 6.16: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου και μαγνητικού πεδίου κατά μήκος του άξονα.	102
Εικόνα 6.17: Απεικόνιση της γραμμής μεταφοράς από το Χάρτη Γραμμών Μεταφοράς του ΑΔΜΗΕ [12].	103
Εικόνα 6.18: Απεικόνιση της γραμμής ΑΑ228 μέσω του AutoCAD.	103
Εικόνα 6.19: Απεικόνιση των Πυλώνων της γραμμής ΑΑ228 μεταξύ των οποίων επιλέχθηκαν οι θέσεις μέτρησης του πεδίου.	104
Εικόνα 6.20: Θέσεις μέτρησης κατά μήκος της γραμμής ΑΑ228.	104
Εικόνα 6.21: Θέσεις μέτρησης για τον εγκάρσιο άξονα που βρίσκεται στο μέσο του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΑΑ228.	104
Εικόνα 6.22: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς.	106
Εικόνα 6.23: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς.	106
Εικόνα 7.1: Model Wizard / Blank Model COMSOL Multiphysics.	108
Εικόνα 7.2: Επιλογή διαστάσεων του μοντέλου COMSOL Multiphysics.	109
Εικόνα 7.3: Κλάδοι Φυσικής του μοντέλου COMSOL Multiphysics.	109
Εικόνα 7.4: AC/DC module COMSOL Multiphysics.	110
Εικόνα 7.5: Heat Transfer module COMSOL Multiphysics.	110
Εικόνα 7.6: Πακέτα Φυσικής που επιλέχθηκαν στο COMSOL Multiphysics.	111
Εικόνα 7.7: Επιλογή Μελέτης COMSOL Multiphysics.	111
Εικόνα 7.8: Model Builder COMSOL Multiphysics.	112
Εικόνα 7.9: Παράμετροι του μοντέλου COMSOL Multiphysics.	112
Εικόνα 7.10: Μοντέλα πυλώνων γραμμών μεταφοράς του Ελληνικού δικτύου στο λογισμικό AutoCAD.	113

Εικόνα 7.11: Ιδιότητες του Aluminium (Αλουμινίου).	114
Εικόνα 7.12: Ιδιότητες του STEEL AISI 4340 (Χάλυβα).	114
Εικόνα 7.13: Ιδιότητες του Soil (Εδάφους).	114
Εικόνα 7.13: Ιδιότητες του Air (Αέρα).	114
Εικόνα 7.14: Current Conservation 1 COMSOL.	116
Εικόνα 7.15: Electric Insulation 1 COMSOL.	116
Εικόνα 7.16: Initial Value 1 COMSOL.	117
Εικόνα 7.17: Ground (Γείωση)1 COMSOL.	117
Εικόνα 7.18: Electric Potential (Φάση 1) 1 COMSOL.	117
Εικόνα 7.19: Electric Potential (Φάση 2) 1 COMSOL.	118
Εικόνα 7.20: Electric Potential (Φάση 3) 1 COMSOL.	118
Εικόνα 7.21: Ampere's law 1 COMSOL.	118
Εικόνα 7.22: Magnetic Insulation 1 COMSOL.	119
Εικόνα 7.23: Initial Values 1 COMSOL.	119
Εικόνα 7.24: Ampere's Law, Magnetostrictive 1 COMSOL.	119
Εικόνα 7.25: Coil (Φάση 1) 1 COMSOL.	119
Εικόνα 7.26: Coil (Φάση 2) 2 COMSOL.	120
Εικόνα 7.27: Coil (Φάση 3) 3 COMSOL.	120
Εικόνα 7.28: Coil (Γείωση) 4 COMSOL.	120
Εικόνα 7.29: Ορισμός της συνάρτησης Q_0 .	120
Εικόνα 7.30: Ορισμός της συνάρτησης Q_b .	121
Εικόνα 7.31: Οι σύνδεσμοι των κλάδων που χρησιμοποιήθηκαν για τα μοντέλα.	121
Εικόνα 7.32: Ο σύνδεσμος που περιλαμβάνει τις ηλεκτρομαγνητικές απώλειες του μοντέλου.	122
Εικόνα 7.33: Οι σύνδεσμοι των κλάδων που χρησιμοποιήθηκαν για τα μοντέλα.	122
Εικόνα 7.34: Δομημένο και Αδόμητο Πλέγμα από Manual COMSOL Multiphysics [1].	123
Εικόνα 7.35: Προσαρμοστικό Πλέγμα σε μη Δομημένα Πλέγματα από Manual COMSOL Multiphysics [1].	123
Εικόνα 7.36: Πλέγματα που παρέχει το πρόγραμμα προσομοίωσης «Πλέγματα».	124
Εικόνα 7.37: Εργαλεία που παρέχονται για τη δημιουργία ατομικών πλεγμάτων.	124
Εικόνα 7.38: Fine Mesh COMSOL Multiphysics από την προσομοίωση που «έτρεξε» στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.	125
Εικόνα 7.39: Extra Fine Mesh COMSOL Multiphysics από την προσομοίωση που «έτρεξε» στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.	125
Εικόνα 7.40: Extremely Fine Mesh Comsol Multiphysics που «έτρεξε» στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.	126
Εικόνα 7.41: Ο Ευθύς Αλγόριθμος PARDISO.	128
Εικόνα 7.42: Ο Ευθύς Αλγόριθμος PARDISO	128
Εικόνα Β.1: Το επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγούς [4].	176
Εικόνα Β.2: Συνάρτηση $\delta(f)$ για διάφορα υλικά.	176
Εικόνα Γ.1: Μαγνητικό πεδίο μέσα και έξω από αγωγό.	178

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Κατανομή παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα για το 2022, ανά πηγή [2].	16
Σχήμα 1.2: Διατάξεις των αγωγών των φάσεων γραμμής διπλού κυκλώματος: α) Συμμετρική και β) Βέλτιστη διάταξη.	22
Σχήμα 1.3: Παράδειγμα Ακτινικού Δικτύου Μέσης Τάσης [16].	26
Σχήμα 1.4: Παράδειγμα Βροχοειδούς Δικτύου Μέσης τάσης [16].	27
Σχήμα 1.5: Φαινόμενο Θέρμανσης Joule [19].	33
Σχήμα 2.1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [1].	37
Σχήμα 2.2: Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από οικιακές ηλεκτρικές συσκευές [3].	39
Σχήμα 2.3: Αλληλοεξουδετέρωση των μαγνητικών πεδίων στις εσωτερικές καλωδιώσεις [3].	41
Σχήμα 2.4: Μηχανισμός δημιουργίας των ρευμάτων επιστροφής στη γη [4].	41
Σχήμα 4.1: Σχηματική συνήθης δομή μετρητικών διατάξεων.	60
Σχήμα 4.2: Κανονικοποιημένο πεδίο E στην επιφάνεια της πλάκας και στο μέσο μεταξύ των πλακών [4].	68
Σχήμα 4.3: Κανονικοποιημένο πεδίο E στην επιφάνεια της πλάκας και στη μέση μεταξύ των πλακών [2].	69
Σχήμα 4.4: Έλεγχος τρέχουσας βαθμονόμησης έγχυσης [2].	69
Σχήμα 4.5: Σύστημα συντεταγμένων για βρόχο που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο Bz (στα αριστερά). Ποσοστό αναχώρησης του Bz από το Bz (0,0,0) για θέσεις στο επίπεδο ενός τετραγώνου βρόχου ρεύματος 1m × 1m και 3cm πάνω και κάτω από το επίπεδο (στα δεξιά).	71
Σχήμα 4.6: Σχηματικό κύκλωμα βαθμονόμησης μετρητή μαγνητικού πεδίου.	72
Σχήμα 5.1: Σύγκριση αβεβαιότητας και σφάλματος της τιμής του μετρούμενου μεγέθους [10].	75
Σχήμα 5.2: Σφάλμα και αβεβαιότητα [10].	76
Σχήμα 8.1: Μοντέλο του τμήματος της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	134
Σχήμα 8.2: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	135
Σχήμα 8.3: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	135
Σχήμα 8.4: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	137
Σχήμα 8.5: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	137
Σχήμα 8.6: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	139
Σχήμα 8.7: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.	139
Σχήμα 8.8: Πανοραμική όψη του μοντέλου του τμήματος της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	140
Σχήμα 8.9: Μοντέλο των τμημάτων των γραμμών ΣΑ92 και ΣΑ93.	140
Σχήμα 8.10: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	141
Σχήμα 8.11: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	141
Σχήμα 8.12: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	142
Σχήμα 8.13: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	142
Σχήμα 8.14: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	143
Σχήμα 8.15: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.	143
Σχήμα 8.16: Διαφορά Δυναμικού για $t=0,025s$.	144
Σχήμα 8.17 : Διαφορά Δυναμικού για $t=0,031s$.	144
Σχήμα 8.18: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για επίπεδα (0m, 1,5m, 1,8m).	146
Σχήμα 8.19: Ηλεκτρικό πεδίο για τη χρονική στιγμή $t=0,0055s$.	146
Σχήμα 8.20: Γραμμές ροής ηλεκτρικού πεδίου.	147
Σχήμα 8.21: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 2m έως 10m.	148
Σχήμα 8.22: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 11 m έως 19 m.	148
Σχήμα 8.23: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 21 m έως 30 m.	149
Σχήμα 8.24: Μαγνητικό πεδίο για $t=0,0015s$.	150

Σχήμα 8.25: Γραμμές ροής του μαγνητικού πεδίου.	151
Σχήμα 8.26: Πλευρικά προφίλ μαγνητικού πεδίου για επίπεδα (0 m , 1,5 m , 1,8 m).	151
Σχήμα 8.27: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 2 m έως 10 m.	151
Σχήμα 8.28: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 11 m έως 19 m.	152
Σχήμα 8.29: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 21 m έως 30 m.	153
Σχήμα 8.30: Πανοραμική όψη του μοντέλου του τμήματος της γραμμής AA228/60 και AA228/61.	153
Σχήμα 8.31: Μοντέλο των τμημάτων των γραμμών AA228/60 και AA228/61.	154
Σχήμα 8.32: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής AA228/60 και AA228/61.	154
Σχήμα 8.33: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής AA228/60 και AA228/61.	155
Σχήμα 8.34: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής AA228/60 και AA228/61.	156
Σχήμα 8.35: Υπολογισμένες και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ 93 και ΣΑ 92.	157
Σχήμα 8.36: Ηλεκτρικό πεδίο για $t=0,0385$.	157
Σχήμα 8.37: Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου κοντά στην εναέρια γραμμή μεταφοράς.	158
Σχήμα 8.38: Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην εναέρια επιφάνεια γραμμή μεταφοράς με υπέρταση.	158
Σχήμα 8.39: Γράφημα επιφάνειας (Surface) για το Μαγνητικό Πεδίο.	159
Σχήμα 8.40: Μέτρηση του Μαγνητικού πεδίου κοντά στην εναέρια γραμμή μεταφοράς.	159
Σχήμα 8.41: Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου με βραχυκύκλωμα μιας ηλεκτρικής φάσης.	159
Σχήμα Α.1: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 150 kV διπλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.	170
Σχήμα Α.2: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 150 kV απλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.	171
Σχήμα Α.3: Συμπαγείς πύργοι γραμμών μεταφοράς 150 kV ελληνικού δικτύου.	172
Σχήμα Α.4: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 400 kV απλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.	173
Σχήμα Α.5: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 400 kV απλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.	174

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. Εισαγωγή

1.1 Η Ηλεκτρική Ενέργεια

Η Ηλεκτρική Ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας που μεταφέρει το ηλεκτρικό ρεύμα, η οποία αναφέρεται στην προσανατολισμένη κίνηση των ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα) σε ένα αγώγιμο μέσο, λόγω της ύπαρξης δυναμικού στα άκρα του αγωγού. Είναι μια πολύ χρήσιμη μορφή ενέργειας, γιατί μπορεί εύκολα και αποδοτικά να μετατραπεί σε άλλες μορφές [1].

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί με διάφορα μέσα, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων, οι πυρηνικές αντιδράσεις και οι ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στη συνέχεια μεταδίδεται και διανέμεται μέσω ενός δικτύου γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας και μετασχηματιστών σε σπίτια, επιχειρήσεις και άλλους καταναλωτές.

Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται και καταναλώνεται τυπικά μετρείται σε κιλοβατώρες (kWh). Μία κιλοβατώρα είναι ίση με την ποσότητα ενέργειας που καταναλώνει μια συσκευή ισχύος 1kW για μία ώρα. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως υπολογίζεται με βάση τον αριθμό των κιλοβατωρών που χρησιμοποιούνται.

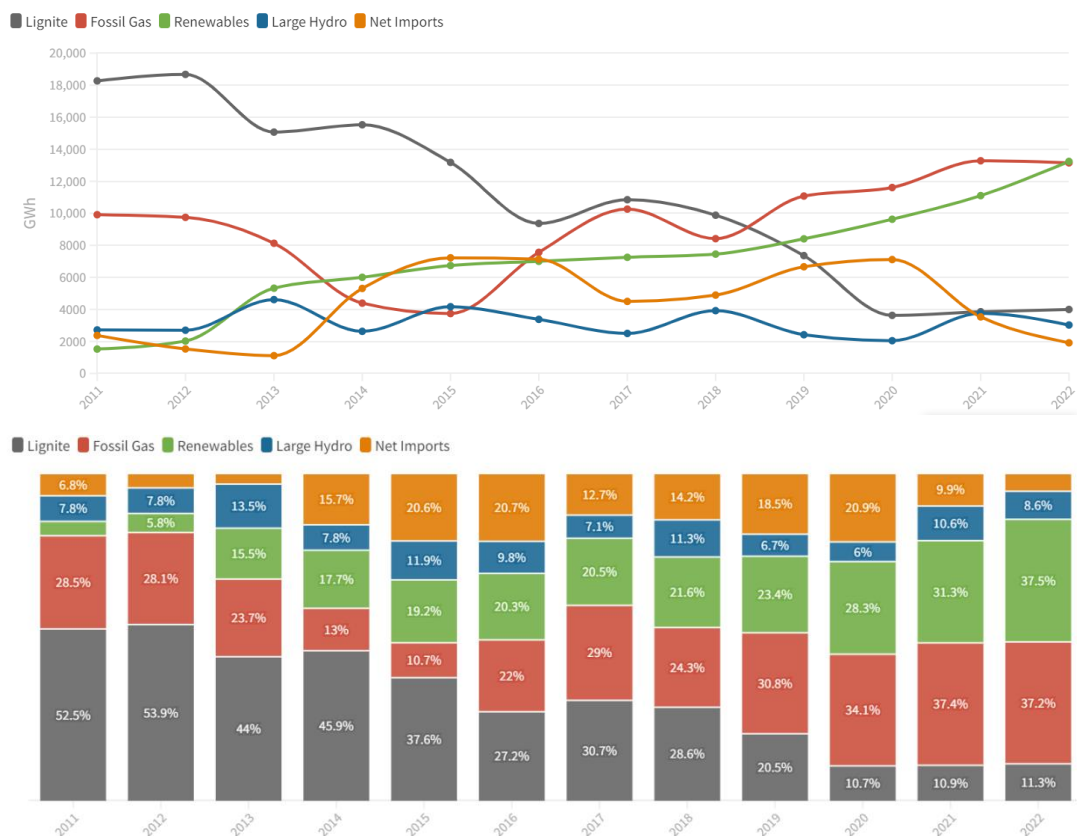
Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης της τροφοδοσίας ηλεκτρονικών συσκευών, συστημάτων θέρμανσης και ψύξης ηλεκτροκινητήρων. Μπορεί επίσης να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας, όπως φως, ήχος και μηχανική κίνηση. Για παράδειγμα, οι λαμπτήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική σε φωτεινή ενέργεια, ενώ τα ηχεία μετατρέπουν την ηλεκτρική σε ηχητική ενέργεια.

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει μεταμορφώσει τη σύγχρονη κοινωνία, επιτρέποντας την ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών και βελτιώνοντας την ποιότητα ζωής για δισεκατομμύρια ανθρώπους σε όλο τον κόσμο. Ωστόσο, η παραγωγή και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η ρύπανση του αέρα και των υδάτων και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, καταβάλλονται προσπάθειες για τη μετάβαση σε πιο βιώσιμες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες. Επιπλέον, η χρήση έξυπνων δικτύων και συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της απόδοσης και αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας ταυτόχρονα τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις.

Στην Ελλάδα η παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια σημαντική πτυχή της οικονομίας και της καθημερινής ζωής της χώρας. Η ηλεκτρική ενέργεια στη χώρα παράγεται κυρίως από ορυκτά καύσιμα, με το φυσικό αέριο και τον λιγνίτη (φαιό άνθρακας) να είναι οι κύριες πηγές. Άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν την υδροηλεκτρική, την αιολική και την ηλιακή ενέργεια.

Η παραγωγή της στην Ελλάδα αλλά και Παγκόσμια στηρίζεται κυρίως στην καύση ορυκτών πόρων και φυσικού αερίου. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια γίνονται εντατικές προσπάθειες να ενισχυθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ώστε

να γίνει φιλικότερη προς το περιβάλλον. Αναλυτικότερα από τα τελευταία δεδομένα για το 2022 στην Ελλάδα το 37,5% προήλθε από τις ανανεώσιμες πηγές, το 37,2% από την καύση ορυκτών μειώνοντας το ποσοστό του για πρώτη φορά από το 2017, το 11,3% προήλθε από την καύση λιγνίτη, το 8,6% προήλθε από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς και τέλος το 5,4% από καθαρές εισαγωγές [2].



Source: ADMIE

Σχήμα 1.1: Κατανομή παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα για το 2022, ανά πηγή [2].

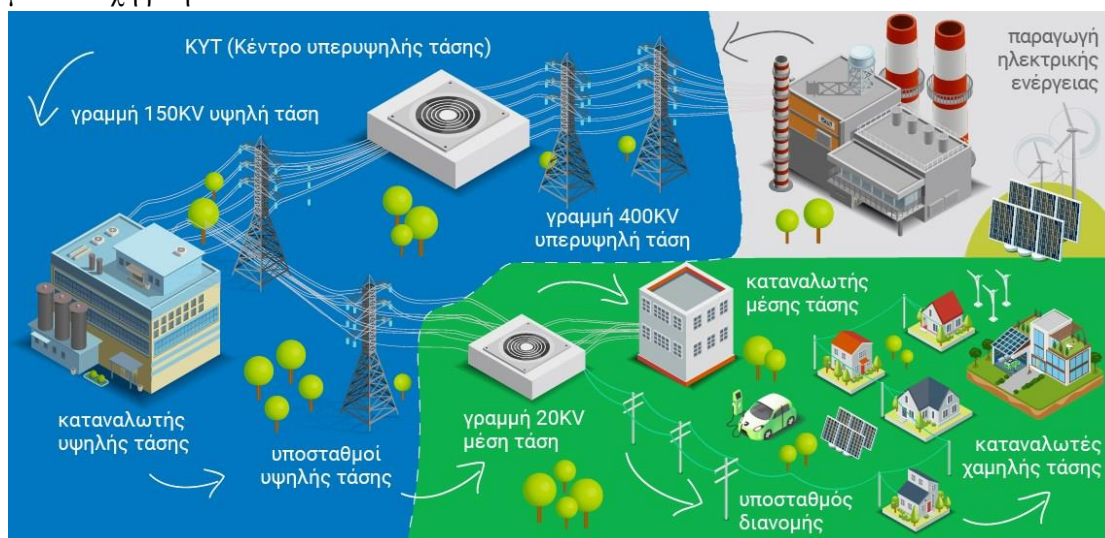
Το μεγαλύτερο πρόβλημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πως είναι δύσκολη η μακροχρόνια αποθήκευση της και, για να επιτευχθεί αυτό πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε κάποια άλλη μορφή (χημική, δυναμική κλπ.). Έτσι, σημειώνονται απώλειες ενέργειας και είναι προτιμότερη η άμεση κατανάλωση της καθώς παράγεται.

Για τον λόγο αυτόν έχει δημιουργηθεί ένα παγκόσμιο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) το οποίο αποτελείται από ένα πλέγμα μικρότερων εθνικών ηλεκτρικών δικτύων ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να μεταφέρεται άμεσα και εύκολα από την παραγωγή στην κατανάλωση [1].

1.2 Το Ελληνικό ΣΗΕ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων καθώς και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [1].

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος: την παραγωγή, τη μεταφορά, και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή.



Εικόνα 1.1: Γενική δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [3].

Στην Ελλάδα ο κύριος παραγωγός της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού Α.Ε. (ΔΕΗ). Έχει περίπου 5,7 εκ. πελάτες και διαθέτει εγκαταστάσεις ορυχείων λιγνίτη, παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατέχει περίπου το 68,7% της εγκατεστημένης ισχύος της χώρας (λιγνιτικοί, υδροηλεκτρικοί, πετρελαϊκοί σταθμοί, φυσικού αερίου, μονάδες ΑΠΕ) [4]. Μετά από οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης 2009/72/ΕΚ και τον νόμο Ν. 4001/2011 δημιουργήθηκαν δύο 100% θυγατρικές εταιρίες της ΔΕΗ, ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) και ο ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) [5].

Ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) συστάθηκε σύμφωνα με τον Ν. 4001/2011, οργανώθηκε και λειτουργεί ως Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς κατά τις διατάξεις της Οδηγίας 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η εταιρεία ασκεί τις αρμοδιότητες και εκτελεί τα καθήκοντα του Κυρίου και Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος και την άδεια διαχείρισης του ΕΣΜΗΕ. Ο σκοπός του ΑΔΜΗΕ είναι η λειτουργία, ο έλεγχος, η συντήρηση και η ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ, ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια με τρόπο επαρκή, ασφαλή, αποδοτικό και αξιόπιστο καθώς και η λειτουργία της Αγοράς Εξισορρόπησης και του διασυνοριακού εμπορίου, σύμφωνα με τις αρχές της διαφάνειας της ισότητας και του ελεύθερου ανταγωνισμού. Λόγω του προαναφερθέντος κομβικού ρόλου της Εταιρείας, έχουν ληφθεί όλα τα αναγκαία μέτρα και έχουν οργανωθεί όλες εκείνες οι απαραίτητες διαδικασίες για να διασφαλιστεί η ανεξαρτησία της, η απαρτέγκλιτη τήρηση της αρχής της «ίσης μεταχείρισης» για όλους τους χρήστες του συστήματος και τους συμμετέχοντες στην Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας, η διαφάνεια στη λειτουργία της και η τήρηση της αρχής της εμπιστευτικότητας των πληροφοριών που ο ΑΔΜΗΕ διαχειρίζεται [6].

Ο ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας) συστάθηκε με την απόσχιση του κλάδου Διανομής της ΔΕΗ Α.Ε. σύμφωνα με τον Ν. 4001/2011 και σε συμμόρφωση με την οδηγία 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης, σχετικά με την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να αναλάβει τα καθήκοντα του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής. Σήμερα το μετοχικό κεφάλαιο της εταιρείας

ανήκει κατά 51% στη ΔΕΗ Α.Ε. και κατά 49% στη Macquarie Asset Management. Ως έργο έχει τη λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και τη διασφάλιση της διαφανούς και αμερόληπτης πρόσβασης των καταναλωτών και γενικότερα όλων των χρηστών του δικτύου [7].

Εκτός από τη ΔΕΗ, καθήκοντα που συνδέονται άμεσα με το Ελληνικό ΣΗΕ έχουν ακόμα δύο οργανισμοί που δραστηριοποιούνται στο χώρο της αγοράς ενέργειας, η ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Αγοράς) και ο ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε. (Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης).

Η ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας) είναι ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή, η οποία συστήθηκε με τον Ν. 2773/1999 στο πλαίσιο εναρμόνισης με τις οδηγίες 2003/54/ΕΚ και 2003/55/ΕΚ για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο, με κύρια αρμοδιότητα της να εποπτεύει την εγχώρια αγορά ενέργειας, σε όλους τους τομείς της, εισηγούμενης προς τους αρμόδιους φορείς της Πολιτείας και λαμβάνοντας η ίδια μέτρα για την επίτευξη του στόχου της απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Τα κύρια καθήκοντα της είναι τα ακόλουθα:

- Χορήγηση αδειών παραγωγής
- Παρακολούθηση και εποπτεία της αγοράς ενέργειας
- Προστασία των καταναλωτών
- Παρακολούθηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας
- Χορήγηση αδειών
- Εποπτεία επί των Ανεξάρτητων Διαχειριστών Μεταφοράς
- Έγκριση τιμολογίων μη ανταγωνιστικών δραστηριοτήτων
- Χορήγηση εξαιρέσεων από υποχρεώσεις παροχής πρόσβασης τρίτων
- Παρακολούθηση πρόσβασης στις ενεργειακές διασυνδέσεις
- Λήψη ρυθμιστικών μέτρων για την εύρυθμη λειτουργία των ενεργειακών αγορών [8]

Ο ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε. (Διαχειριστής Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης) διαχειρίζεται τις ΑΠΕ και τη Συμπαρογωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης(ΣΗΘΥΑ) του Εθνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος, καθώς και τις Εγγυήσεις Προέλευσης ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν παραχθεί από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ. Είναι ο εκπλειστηριαστής των δικαιωμάτων ρύπων στην Ελλάδα, ενώ παράλληλα λειτουργεί και ως Φορέας Σωρευτικής Εκπροσώπησης (ΦΟΣΕ) παραγωγών ΑΠΕ. Αποτελεί την μετεξέλιξη του Λειτουργού Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ Α.Ε.) και δημιουργήθηκε με σκοπό να ικανοποιήσει τις σύγχρονες προκλήσεις στον χώρο των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ενώ παράλληλα αποτελεί τον μεγαλύτερο μέτοχο στο Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας (ΕΧΕ) και τον δεύτερο μεγαλύτερο πωλητή μετά τη ΔΕΗ στην Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας (Η.Ε.) που λειτουργεί το ΕΧΕ.

1.3 Το Ελληνικό Δίκτυο Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ειδικότερα στον Ελλαδικό χώρο το δίκτυο μεταφοράς (ΕΣΜΗΕ) αποτελείται από γραμμές μεταφοράς των 400kV (συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος), των 150kV και 66kV το μήκος των οποίων ανέρχεται σε 12.583,08 km.

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται τα μήκη των οδεύσεων Υ.Τ.

Πίνακας 1.1: Μήκη Εγκατεστημένων Γραμμών Μεταφοράς (μήκος όδευσης) [9].

ΤΥΠΟΣ ΓΡΑΜΜΩΝ	400kV	Σ.Π. 400kV	150kV	66kV	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ	2760,48	106,95	8242,64	39,05	11149,11
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΚΑΛ. ΓΡΑΜΜΕΣ			941,82	72,2	1014,02
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ ΚΑΛ. ΓΡΑΜΜΕΣ (Υ/Γ τμήμα)			28,1	2,8	30,90
ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ	31,45		357,60		389,05
ΣΥΝΟΛΟ	2791,92	106,95	9570,17	114,04	12583,08

Όσον αφορά τους μετασχηματιστές υψηλής τάσης που ανήκουν ή συνδέονται στο ΕΣΜΗΕ, το πλήθος τους ανέρχεται σε 780 και οι χρήστες τους είναι ο ΑΔΜΗΕ, παραγωγοί, ΔΕΔΔΗΕ, ΔΕΗ/ορυχεία και πελάτες Υ.Τ. όπως καταδεικνύεται και από τον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1.2: Μετασχηματιστές Υψηλής Τάσης συνδεδεμένων με το Σύστημα Μεταφοράς [9].

ΤΥΠΟΣ Υ/Σ	ΤΑΣΗ(kV)	ΠΛΗΘΟΣ Μ/Σ	ΙΣΧΥΣ ΜVA	ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣ/ΧΡΗΣΤΗΣ
ΑΜΣ	400/150/30	62	16.940	ΑΔΜΗΕ
ΑΜΣ	150/66	1	50	
Μ/Σ ΣΤΑΘΜΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ	400	1	597	
Μ/Σ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ	150/66	2	50	
Μ/Σ SVC	150/20	2	150	
ΣΥΝΟΛΟ		68	17787	
ΑΝΥΨΩΣΗΣ (ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΥΗΣ	400	21	7106	ΠΑΡΑΓΩΓΟΙ
	150	50	6029	
ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΩΝ ΑΠΕ	20	2	7	
	150	98	5617	
ΣΥΝΟΛΟ		171	18760	
ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ	150/20	412	17454	ΔΕΔΔΗΕ
	66/20	3	75	
ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ	150/20	5	212	ΠΑΡΑΓΩΓΟΙ
ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΙ	150	21	966	
ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ	150/20	13	650	ΔΕΗ/ΟΡΥΧΕΙΑ
ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ	150/MT	87	2531	ΠΕΛΑΤΕΣ ΥΤ
ΣΥΝΟΛΟ		541	21887	
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ		780	58434	

Το Ελληνικό Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα. Η παράλληλη αυτή λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω της διασύνδεσης γραμμών μεταφοράς, κυρίως 400kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας και της Τουρκίας. Επιπροσθέτως, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρύχιου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος τάσης 400kV) με την Ιταλία. [9].

Το δίκτυο διανομής αποτελείται από γραμμές Μέσης Τάσης (Μ.Τ.) που αντιστοιχούν στα 113.358km, καθώς και γραμμές Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ.) που αντιστοιχούν στα 128.211km. Δηλαδή το συνολικό Δίκτυο ανέρχεται στα 241.569km. Υπάρχουν 165.290 Υποσταθμοί Μέσης Τάσης προς Χαμηλή Τάση (Υ/Σ ΜΤ/ΧΤ). Επίσης υπάρχουν 993km Δικτύου Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.) εκ των οποίων γίνεται διαχωρισμός σε 218km στην Αττική και 775km στα μη διασυνδεδεμένα νησιά [11].

Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι υποσταθμοί υψηλής τάσης συνθέτουν το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3.1 Εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας [11,12] στην Ελλάδα αποτελούνται από τις εναέριες γραμμές της υψηλής τάσης (150kV), καθώς επίσης και από τις γραμμές της υπερυψηλής τάσης (400kV). Οι γραμμές αυτές διαχωρίζονται ακόμη ως γραμμές απλού ή διπλού κυκλώματος ανάλογα με το αν φέρουν ένα ή δύο τριφασικά κυκλώματα. Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται εκτενώς οι γραμμές μεταφοράς στον ελλαδικό χώρο και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 1.2: Εναέριες Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [13].

1.3.1 Μεταβλητές που επιδρούν στο μέγεθος του παραγόμενου Ηλεκτρικού και Μαγνητικού Πεδίου

Το Ηλεκτρικό και το Μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μια γραμμή μεταφοράς εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων που περιλαμβάνουν τη φόρτιση της γραμμής, τον σχεδιασμό και τη δομή της γραμμής, τις καιρικές συνθήκες και τη μορφολογία και δομή του εδάφους. Οι παράγοντες αυτοί είναι καθοριστικοί στο μέγεθος του πεδίου και λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό μιας νέας γραμμής.

Η φόρτιση της γραμμής αλλάζει διαρκώς καθ' όλη τη χρονική διάρκεια του έτους. Η φόρτιση εμφανίζει κύκλους ημερήσιους, εβδομαδιαίους και ετήσιους και με αυτόν τον τρόπο προκαλεί αντίστοιχη διακύμανση στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται. Οι συνθήκες φόρτισης συνδέονται με το είδος των καταναλωτών που τροφοδοτούνται από τη γραμμή, ενώ ενέχει και παροδικές υπερφορτίσεις που οδηγούν στη δημιουργία μαγνητικού πεδίου με τιμές πολύ μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια της κανονικής λειτουργίας της γραμμής. Έτσι, για μια υφιστάμενη γραμμή μεταφοράς συνήθως μπορεί να προκύπτουν διαφορετικές γραφικές παραστάσεις του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της εγκάρσιας τομής της γραμμής, που

αναφέρονται σε αρκετούς παράγοντες. Για τη σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στην έκθεση στο πεδίο μιας γραμμής αρκεί, θεωρητικά, η καμπύλη μέγιστης φόρτισης.

Ο σχεδιασμός της γραμμής είναι ένα ακόμη μέγεθος ιδιαίτερα σημαντικό για την επιρροή στο μαγνητικό πεδίο. Η δομή, το υλικό και η γεωμετρία του αγωγού γης αλλά και των αγωγών φάσεων, οι ηλεκτρικές παράμετροι και ο τύπος των αγωγών γης και φάσεων, η ελάχιστη απόσταση αυτών από το έδαφος, το πραγματικό και το ισοδύναμο άνοιγμα της γραμμής και η ειδική αντίσταση, καθώς και η μορφολογία του εδάφους είναι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές των πεδίων. Όσον αφορά την επίδραση του εδάφους, αυτή είναι πολύπλοκη, αν ληφθεί υπόψη ότι σε μια πραγματική περίπτωση η μορφολογία του εδάφους τόσο κάτω από μια γραμμή μεταβάλλεται κατά μήκος αυτής όσο και εγκάρσια προς αυτήν, ενώ παράλληλα η τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους μεταβάλλεται και κατά τη διάρκεια του έτους.

Η απόσταση από το έδαφος (Ground clearance) στις γραμμές μεταφοράς είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αναφέρεται στην κατακόρυφη απόσταση μεταξύ του χαμηλότερου σημείου των αγωγών και της επιφάνειας του εδάφους. Καθορισμένο από τους κανονισμούς, το επίπεδο τάσης, το μέγεθος του αγωγού, τα χαρακτηριστικά κλίσης και το έδαφος, αποτρέπει την τυχαία επαφή, το ηλεκτρικό τόξο και εξασφαλίζει πρόσβαση στη συντήρηση. Η επαρκής απόσταση από το έδαφος είναι απαραίτητη για τον μετριασμό των κινδύνων που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις του εδάφους, τι περιβαλλοντικές συνθήκες και τους πιθανούς κινδύνους. Διενεργούνται μηχανολογικές μελέτες και υπολογισμού για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης απόστασης, λαμβάνοντας υπόψη την ασφάλεια, την ηλεκτρική απόδοση και τις δραστηριότητες συντήρησης. Οι τιμές απόστασης από το έδαφος ποικίλλουν ανάλογα με τον σχεδιασμό της γραμμής μεταφοράς και τους τοπικούς κανονισμούς, διασφαλίζοντας τη συνολική ακεραιότητα και αποτελεσματικότητα του συστήματος μεταφοράς.

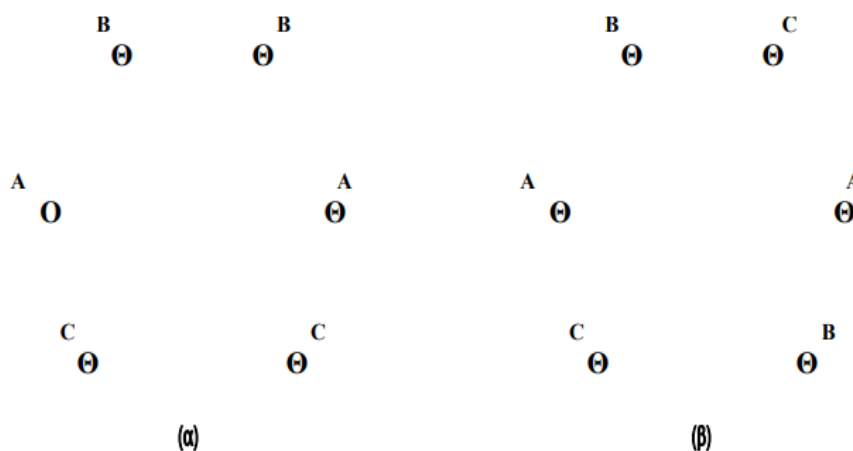
Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας είναι και η απόσταση μεταξύ των ρευματοφόρων αγωγών της γραμμής (subconductor spacing). Σε γραμμές υψηλής τάσης που κατασκευάζονται με συμπαιγείς μονωτήρες ανάρτησης, οι αποστάσεις μεταξύ των ρευματοφόρων αγωγών είναι αρκετά μικρότερες από αυτές των συνήθων γραμμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο στις γραμμές αυτές να είναι πολύ μικρότερο από αυτό των γραμμών κανονικών διαστάσεων στην περίπτωση γραμμών απλού κυκλώματος, αλλά και στην περίπτωση γραμμών διπλού κυκλώματος, ακόμη και όταν οι τελευταίες είναι κατασκευασμένες με τη βέλτιστη διάταξη φάσεων [24-31].

Η βέλτιστη διάταξη των αγωγών των φάσεων (optimum conductor phasing) σε περιπτώσεις γραμμών πολλαπλών κυκλωμάτων δίνει την δυνατότητα να μειωθούν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στο περιβάλλον τους. Και σε αυτήν την περίπτωση, η βέλτιστη φασική διάταξη μειώνει την πεδιακή έκθεση λόγω της μερικής αλληλεξουδετέρωσης, που εμφανίζεται σε τριφασικά συστήματα.

Στη γραμμή διπλού κυκλώματος, που είναι και η μοναδική περίπτωση πολλαπλού κυκλώματος που συναντάμε στην Ελλάδα, η συνήθης διάταξη των αγωγών στο χώρο, η οποία καλείται και συμμετρική, περιλαμβάνει δύο κυκλώματα τοποθετημένα κάθετα στο οριζόντιο επίπεδο με συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ των αγωγών τους στα οποία οι φάσεις είναι τοποθετημένες με την ακολουθία B-A-C, ξεκινώντας από τον αγωγό φάσης που βρίσκεται ψηλότερα, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.

Εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των μαγνητικών ροών των δύο κυκλωμάτων, με την εναλλαγή των θέσεων των φάσεων Β' και C' σε ένα από τα δύο κυκλώματα, το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο της γραμμής μειώνεται. Η διάταξη που προκύπτει με τον τρόπο αυτό, με τους αγωγούς τοποθετημένους στα δύο κυκλώματα με τη σειρά B-A-C

και C'-A'-B' αντίστοιχα ξεκινώντας από τον ψηλότερα αναρτημένο, αποδεικνύεται ότι είναι και η βέλτιστη διάταξη ως προς το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο της γραμμής. Οι γραμμές υπερυψηλής τάσης των 400kV κατασκευάζονται πλέον στη χώρα μας με τη βέλτιστη αυτή διάταξη φάσεων, ενώ δεν ισχύει το ίδιο για τις γραμμές υψηλής τάσης των 150kV [23].



Σχήμα 1.2: Διατάξεις των αγωγών των φάσεων γραμμής διπλού κυκλώματος: α) Συμμετρική και β) Βέλτιστη διάταξη.

1.3.2 Υπόγεια καλώδια

Η υπόγεια καλωδίωση αναφέρεται στην εγκατάσταση καλωδίων τροφοδοσίας κάτω από το επίπεδο του εδάφους, ως εναλλακτική λύση στις εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα, η χρήση υπόγειων καλωδίων αυξάνεται τα τελευταία χρόνια λόγω των αισθητικών πλεονεκτημάτων της και των χαμηλότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σύγκριση με τις εναέριες γραμμές.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της υπόγειας καλωδίωσης είναι η αισθητική τους αξία. Οι εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί συχνά να θεωρηθούν αντιαισθητικές και μπορεί να έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Θάβοντας τα καλώδια τροφοδοσίας υπόγεια, κρύβονται από το οπτικό πεδίο και μπορούν να ενσωματωθούν πιο απρόσκοπτα στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιοχές φυσικής ομορφιάς ή πολιτιστικής σημασίας, όπου η διατήρηση της αισθητικής αξίας αποτελεί προτεραιότητα [19,20].

Ένα άλλο πλεονέκτημα της υπόγειας καλωδίωσης είναι ο μειωμένος περιβαλλοντικός αντίκτυπος τους. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στο περιβάλλον, όπως η αποδάσωση ή η καταστροφή οικοτόπων, κατά την κατασκευή και τη συντήρησή τους. Η υπόγεια καλωδίωση, από την άλλη πλευρά, έχει μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και είναι λιγότερο πιθανό να διαταράξει το φυσικό περιβάλλον. Επιπλέον, οι υπόγειες καλωδιώσεις είναι λιγότερο επιρρεπείς σε ζημιές από φυσικές καταστροφές, όπως ισχυροί άνεμοι ή κεραυνοί, που μπορεί να προκαλέσουν διακοπές ρεύματος και ζημιές σε εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας [21,22].

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης ορισμένες προκλήσεις που σχετίζονται με την υπόγεια καλωδίωση. Μια από τις κύριες προκλήσεις είναι το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης σε σύγκριση με τις εναέριες γραμμές. Η εγκατάσταση της υπόγειας καλωδίωσης απαιτεί πιο πολύπλοκο και ακριβό εξοπλισμό, όπως μηχανήματα διάνοιξης σήραγγας, που

μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος του έργου [19,22]. Η συντήρηση των υπόγειων καλωδίων μπορεί επίσης να είναι πιο δύσκολη και χρονοβόρα, καθώς είναι κρυμμένα από το οπτικό πεδίο και τυχόν σφάλματα μπορεί να μην είναι άμεσα εμφανή.

Μια άλλη πρόκληση είναι η περιορισμένη χωρητικότητα της υπόγειας καλωδίωσης σε σύγκριση με τις εναέριες γραμμές. Τα υπόγεια καλώδια έχουν χαμηλότερη θερμική βαθμολογία από τις εναέριες γραμμές, που σημαίνει ότι είναι λιγότερο ικανά να χειριστούν υψηλά επίπεδα ηλεκτρικού ρεύματος [20,21]. Αυτό μπορεί να μεταδοθεί μέσω υπόγειων καλωδίων και μπορεί να απαιτήσει την εγκατάσταση πρόσθετων καλωδίων για την κάλυψη της ζήτησης.

Όσον αφορά τα υπόγεια καλώδια στον Ελλαδικό χώρο είναι μόλις το 11% του δικτύου, όταν στην Ευρώπη ο μέσος όρος είναι 50% και σε αναπτυγμένες ευρωπαϊκές χώρες κυμαίνεται σε ποσοστά 70% ή 80%, τις περισσότερες φορές εντός αστικών περιοχών, σε μικρό βάθος που δεν ξεπερνά τα ένα με δύο μέτρα κάτω από δρόμους και πεζοδρόμια.

Συμπερασματικά, η χρήση υπόγειων καλωδίων στην Ελλάδα αυξάνεται τα τελευταία χρόνια λόγω των αισθητικών και περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της. Ενώ υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που σχετίζονται με την υπόγεια καλωδίωση, η Ελλάδα έχει θέσει στόχο να αυξήσει το μερίδιο στο εθνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ως μέρος των προσπαθειών της για μετάβαση σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Ως εκ τούτου, η υιοθέτηση της υπόγειας καλωδίωσης είναι πιθανό να συνεχίσει να αυξάνεται στην Ελλάδα τα επόμενα χρόνια.



Εικόνα 1.3: Υπόγειες Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [14].

1.4 Υψηλές τάσεις

Οι Υψηλές Τάσεις υπάρχουν στη φύση από την στιγμή της δημιουργίας του σύμπαντος. Πάντα ο άνθρωπος ένιωθε δέος σε φαινόμενα υψηλών τάσεων, όπως για παράδειγμα του κεραυνού, αλλά άργησε πάρα πολύ στο να μπορέσει να τα κατανοήσει. Μόλις στις αρχές του 20^{ου} αιώνα άρχισαν οι Υψηλές Τάσεις να αποτελούν μια νέα επιστημονική περιοχή στην οποία ο άνθρωπος πλέον όχι μόνο κατανόησε το φαινόμενο των Υψηλών Τάσεων, αλλά παράλληλα μπόρεσε να τις δημιουργεί από μόνος του και επιπλέον να τις χρησιμοποιεί στην καθημερινή του ζωή σε πλήθος εφαρμογών [15].

Η υψηλή τάση αναφέρεται στη διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ δύο σημείων που είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το τυπικό επίπεδο τάσης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Ο ακριβής ορισμός της υψηλής τάσης ποικίλλει ανάλογα με το πλαίσιο και τη συγκεκριμένη βιομηχανία ή εφαρμογή, αλλά γενικά χρησιμοποιείται για να περιγράψει ηλεκτρικά συστήματα και εξοπλισμό που λειτουργούν σε τάσεις πάνω από 1000 Volts (1kV) [23]. Τα συστήματα

υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται σε ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανόμενης της μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, των βιομηχανικών διεργασιών και της επιστημονικής έρευνας.

Τα θέματα που πραγματεύονται οι Υψηλές Τάσεις είναι ποικίλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εφαρμογές Υψηλών Τάσεων με έμφαση κυρίως σε αυτές που απαιτούνται στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία γραμμών μεταφοράς και η ανθρώπινη υγεία. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (International Electrotechnical Committee-IEC), αλλά και τις υπόλοιπες επιτροπές (IET, IEEE, VDE, κλπ) ως Υψηλή Τάση ορίζεται για το εναλλασσόμενο ρεύμα κάθε τάση, η οποία είναι μεγαλύτερη από 1000V, ενώ για το συνεχές ρεύμα κάθε τάση η οποία είναι μεγαλύτερη από 1500V.

Η μετάδοση και διανομή ισχύος είναι μια από τις πιο κοινές εφαρμογές της υψηλής τάσης. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μεταδίδεται συνήθως σε μεγάλες αποστάσεις για να φτάσει στους καταναλωτές και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση γραμμών υψηλής τάσης. Αυτές οι γραμμές ισχύος μπορούν να λειτουργούν σε εξαιρετικά υψηλές τάσεις, που κυμαίνονται από 100kV έως 1200kV ή περισσότερο, ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη θέση του συστήματος μεταφοράς [23]. Οι γραμμές υψηλής τάσης έχουν σχεδιαστεί για να ελαχιστοποιούν τις απώλειες ισχύος και να μεγιστοποιούν την απόδοση και χρησιμοποιούν μια ποικιλία τεχνολογιών και υλικών για την επίτευξη αυτών των στόχων.

Κάθε δίκτυο Υψηλής Τάσης χαρακτηρίζεται από τρεις τιμές τάσης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60071-1 1993:

- **Ονομαστική τάση συστήματος U_n :** Είναι η κατάλληλα ορισμένη τάση που χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και τον καθορισμό του συστήματος.
- **Υψηλή Τάση λειτουργίας U_h :** Είναι η ενεργός τιμή της μέγιστης τάσης που μπορεί να εμφανιστεί στο σύστημα σε οποιαδήποτε στιγμή κατά την κανονική λειτουργία του.
- **Υψίστη Τάση λειτουργίας εξοπλισμού U_m :** Είναι η ενεργός τιμή της υψηλότερης τάσης που μπορεί να αντέξει ο εξοπλισμός που θα συνδεθεί στο δίκτυο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας [15].

Υπάρχουν τυποποιημένες βαθμίδες τάσης που λειτουργεί ο εξοπλισμός ενός ΣΗΕ. Αυτές οι τιμές έχουν οριστεί από την τυποποίηση της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC) και παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί [15].

Πίνακας 1.3: Βαθμίδες Τάσεων κατά IEC [15].

1-50 KV	Μέση Τάση (MV)
50-345 KV	Υψηλή Τάση (HV)
345-765 KV	Υπερυψηλή Τάση (EHV)
765 KV και άνω	Ιδιαίτερα Υψηλή Τάση (UHV)

Οι τάσεις που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους τόσο για τα εναλλασσόμενης όσο και για τα συνεχούς τάσης συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρονται στην κανονική κατάσταση λειτουργίας. Ωστόσο πολλές φορές παρουσιάζονται υπερτάσεις στα ηλεκτρικά δίκτυα και για διάφορους άλλους λόγους με αποτέλεσμα να πρέπει οι μηχανικοί να έχουν λάβει υπόψη τους τον σωστό σχεδιασμό της μόνωσης των δικτύων αυτών. Οι υπερτάσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στους ακόλουθους λόγους:

1. **Υπερτάσεις χειρισμών ή εσωτερικές υπερτάσεις:** Αυτές οφείλονται σε χειρισμούς όπως η διακοπή χωρητικού ρεύματος (γραμμή μεταφοράς ή αφόρτιστο καλώδιο) ή σε ενεργοποίηση και επανάρθρωση μιας γραμμής μεταφοράς με ανοικτό άκρο ή σε διακοπή

μικρών επαγωγικών ρευμάτων ή διακοπή ρευμάτων βραχυκύκλωσης (έως και 7.5 α.μ.), αλλά συνήθως το εύρος δεν ξεπερνά τα 4 α.μ.

2. Υπερτάσεις από κεραυνούς: Αυτές οφείλονται σε απευθείας πτώση κεραυνών πάνω στις γραμμές μεταφοράς, οι οποίες εμφανίζονται με τη μορφή οδοντών κυμάτων και αποτελούν τον κύριο κίνδυνο για τις γραμμές μεταφοράς έως 400kV.
3. Υπερτάσεις από υπερπηδήσεις: Αυτές οφείλονται στη διάσπαση της μόνωσης ανάμεσα σε δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσης, οπότε το κύκλωμα με τη μικρότερη τάση ξαφνικά βρίσκεται υπό μεγαλύτερη τάση από την τάση λειτουργίας του.

Προκειμένου λοιπόν να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα και να εξασφαλιστεί η ασφαλής, εύρυθμη και οικονομική λειτουργία των συστημάτων αυτών θα πρέπει:

- a) Να είναι γνωστές οι τάσεις, που επικρατούν κατά μήκος ενός δικτύου, τόσο στη μόνιμη, όσο και στη μεταβατική του κατάσταση (περίπτωση υπερτάσεων). Αυτό επιτυγχάνεται, τόσο με τη θεωρητική μελέτη των δικτύων, όσο και με τη διεξαγωγή μετρήσεων στα δίκτυα αυτά.
- b) Να είναι γνωστή η μορφή του ηλεκτρικού πεδίου εντός των διαφόρων συσκευών και η θέση, όπου υφίσταται ο κίνδυνος καταστροφής τους. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο με τη θεωρητική μελέτη του ηλεκτροστατικού πεδίου διαφόρων διατάξεων και των μέτρων με τα οποία καθίστανται δυνατή η ευνοϊκή διαμόρφωση του, όσο και μέσω μετρήσεων.
- c) Να είναι γνωστή η αντοχή των μονωτικών υλικών στις καταπονήσεις τις οποίες υφίστανται. Αυτό εξασφαλίζεται, είτε μέσω θεωρητικής μελέτης επί των φαινομένων των προεκκενώσεων και της ηλεκτρικής διάσπασης των εν λόγω υλικών, είτε μέσω μετρήσεων σε συγκεκριμένες διατάξεις.

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Αυτές οι πηγές ενέργειας απαιτούν συνήθως γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από απομακρυσμένες περιοχές στα αστικά κέντρα. Για την αντιμετώπιση αυτής της ανάγκης, η ελληνική κυβέρνηση έχει επενδύσει στην ανάπτυξη νέων γραμμών και υποσταθμών μεταφοράς υψηλής τάσης για να υποστηρίξει την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της χώρας.

Συνολικά, η μετάδοση υψηλής τάσης διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παραγωγή και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Καθώς η χώρα οδεύει προς ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, η ανάπτυξη και η συντήρηση υποδομών υψηλής τάσης θα συνεχίσει να αποτελεί σημαντικό επίκεντρο για την ενεργειακή πολιτική και τις επενδύσεις.

1.5 Τύποι Δικτύωσης

Στο Ελληνικό ΣΗΕ υπάρχουν δύο είδη δικτύωσης ώστε να τροφοδοτούνται οι καταναλωτές με ηλεκτρική ενέργεια. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι τα ακτινικά και τα βροχοειδή δίκτυα.

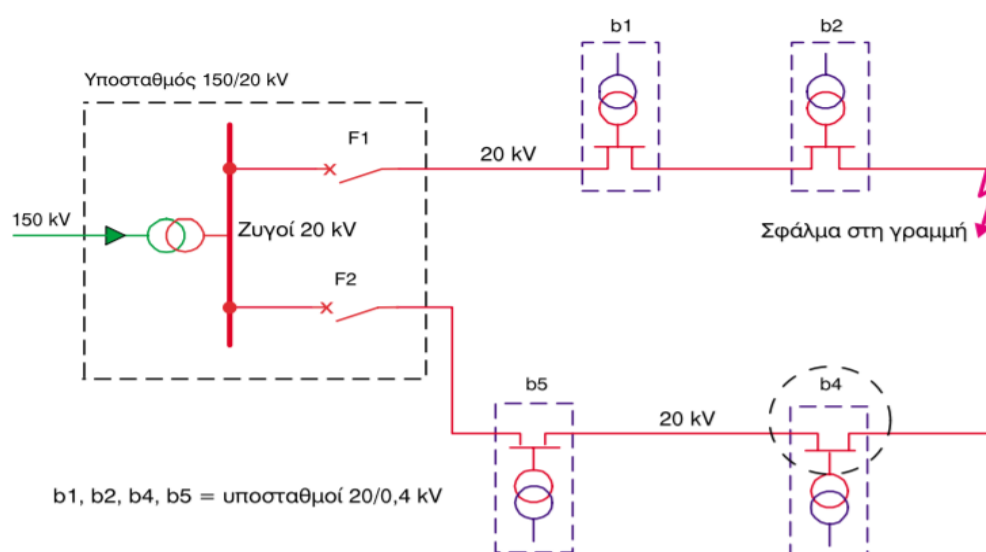
Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, τα ακτινικά δίκτυα χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρά νησιά τα οποία δεν είναι διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό σύστημα καθώς και σε αγροτικές περιοχές. Στα ακτινικά δίκτυα οι γραμμές των 20kV (συνήθως εναέριες) αναχωρούν από τον κεντρικό υποσταθμό 150/20kV του ΑΔΜΗΕ και απλώνονται σαν τις ακτίνες ενός κύκλου, απ' όπου προκύπτει και το όνομα τους, δηλαδή ακτινικά. Κατά μήκος κάθε γραμμής συνδέονται οι καταναλωτές Μέσης Τάσης. Κάθε καταναλωτής Μέσης Τάσης πρέπει να διαθέτει το δικό του ιδιωτικό υποσταθμό για να μπορέσει να συνδεθεί με ασφάλεια στο δίκτυο Μέσης Τάσης. Βασικό μειονέκτημα των ακτινικών δικτύων είναι ότι σε περίπτωση σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, ο διακόπτης ισχύος (circuit-breaker) που υπάρχει στην αρχή της γραμμής ανοίγει

με αποτέλεσμα όλοι οι καταναλωτές που υπάρχουν κατά μήκος της γραμμής να μείνουν εκτός τάσης.

Οι συνέπειες της απώλειας της μέσης τάσης για τους καταναλωτές είναι κρίσιμες και, πολλές φορές, επικίνδυνες. Στην περίπτωση εγκαταστάσεων με ηλεκτρικά φορτία που δεν πρέπει να μείνουν πολύ χρόνο εκτός λειτουργίας π.χ νοσοκομεία, στρατιωτικές εγκαταστάσεις, ψυγεία, χημικές βιομηχανίες κλπ., η απώλεια της μέσης τάσης αντιμετωπίζεται με την ύπαρξη ενός τοπικού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους (ντιζελομηχανή και γεννήτρια 400V). Το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει τα κρίσιμα φορτία της εγκατάστασης, μέχρι την αποκατάσταση του σφάλματος και την επαναφορά της μέσης τάσης στο δίκτυο του ΑΔΜΗΕ [16].

Για τον λόγο αυτόν τα ακτινικά δίκτυα δεν είναι πολύ διαδεδομένα στη μέση τάση. Αντίθετα, στη χαμηλή τάση, το σύνολο των δικτύων είναι ακτινικού τύπου [16].

Όλα τα παραπάνω γίνονται κατανοητά στο Σχήμα που ακολουθεί.



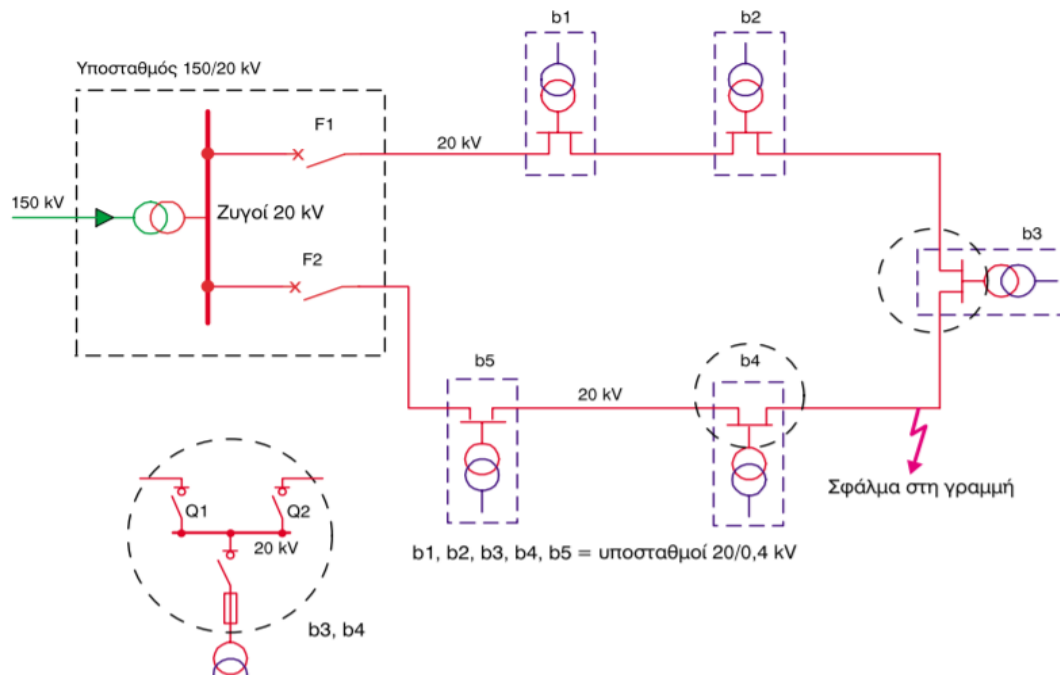
Σχήμα 1.3: Παράδειγμα Ακτινικού Δικτύου Μέσης Τάσης [16].

Στον αντίποδα των ακτινικών δικτύων βρίσκονται τα βροχοειδή δίκτυα τα οποία έρχονται να αντιμετωπίσουν τα μειονεκτήματα του ακτινικού δικτύου. Το συγκεκριμένο είδος δικτύου συναντάται κυρίως σε πόλεις και πυκνοκατοικημένες περιοχές όπου οι καταναλωτές έχουν μεγάλες απαιτήσεις.

Οι γραμμές των 20kV (εναέριες ή υπόγεια καλώδια) που αναχωρούν από τον κεντρικό υποσταθμό 150/20kV του ΑΔΜΗΕ, σχηματίζουν ένα κλειστό βρόχο που καταλήγει ξανά στους ζυγούς των 20kV του υποσταθμού 150/20kV.

Κατά μήκος του βρόχου συνδέονται οι καταναλωτές. Ο βρόχος προστατεύεται στις δύο άκρες του με τους διακόπτες ισχύος. Στην περίπτωση σφάλματος σε κάποιο σημείο του βρόχου ενεργοποιούνται οι προστασίες των διακοπών, οι διακόπτες ανοίγουν και ο βρόχος μένει χωρίς τάση. Αφού εντοπιστεί η θέση του σφάλματος ανοίγουν οι διακόπτες φορτίου. Ξανακλείνουν οι διακόπτες ισχύος και επανέρχεται η μέση τάση στο δίκτυο. Είναι φανερό πως το βροχοειδές δίκτυο τώρα λειτουργεί σαν δύο ακτινικά δίκτυα [16].

Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται συνοπτικά στο ακόλουθο Σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Παράδειγμα Βροχοειδούς Δικτύου Μέσης τάσης [16].

1.6 Υλικά Εναέριων Αγωγών Υψηλής Τάσης

Οι εναέριες γραμμές υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς παραγωγής ενέργειας σε σπίτια, επιχειρήσεις και βιομηχανίες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των γραμμών είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας, της αντοχής και της αποτελεσματικότητάς τους.

1.6.1 Αγωγός

Η κατασκευή των αγωγών Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.) γίνεται κυρίως από χαλκό, αλουμίνιο και χάλυβα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες αγωγών, αυτοί που είναι κατασκευασμένοι εξ' ολοκλήρου από χαλκό ή από αλουμίνιο ή από χάλυβα αλλά και αυτοί που συνδυάζουν το αλουμίνιο και τον χάλυβα [17].

Οι αγωγοί αυτοί δε διαθέτουν κάποιου είδους μόνωσης γιατί χρησιμοποιούν σαν μονωτικό τον ατμοσφαιρικό αέρα αλλά και τους μονωτήρες των πυλώνων. Αποτελούνται από πολύκλιωνα συρματόσχοινα για λόγους ευκαμψίας και μηχανικής αντοχής. Στη συνήθη τυποποίηση ένας κεντρικός κλώνος περιβάλλεται από αριθμό διαδοχικών στρωμάτων, καθένα από τα οποία αποτελείται από πολλούς όμοιους κλώνους. Κάθε ένα στρώμα είναι εναλλάξ συνεστραμμένο κατά την αντίθετη φορά. Έτσι στον πλήρη αγωγό οι κλώνοι συγκρατούνται στέρεα μεταξύ τους όμως επιτυγχάνεται πολύ μεγαλύτερη ευκαμψία απ' ό τι αν ο αγωγός ήταν συμπαγής της ίδιας διατομής.

1.6.1.1 Αγωγοί Χαλκού

Αυτός ο τύπος αγωγού έχει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς και μερικά μειονεκτήματα. Αναλυτικότερα, οι αγωγοί από χαλκό έχουν μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από όλα τα μέταλλα, εκτός του πολύ ακριβότερου αργύρου. Ακόμη είναι γνωστοί για την καλή μηχανική αντοχή καθώς επίσης και για τη δύσκολη διάβρωση τους σε παραθαλάσσιες περιοχές. Αντ' αυτού έχουν αρκετά μεγάλο ειδικό βάρος καθώς και αρκετά υψηλό κόστος. Γενικά οι αγωγοί από χαλκό πλέον χρησιμοποιούνται σχεδόν μόνο σε γραμμές τροφοδότησης ηλεκτρικών τρένων, όπου χρειάζεται συνδυασμός καλής αγωγιμότητας και μηχανικής αντοχής [18].



Εικόνα 1.4: Αγωγοί Χαλκού [18].

1.6.1.2 Αγωγοί Χάλυβα

Οι αγωγοί που είναι κατασκευασμένοι εξ' ολοκλήρου από χάλυβα βρίσκουν χρήση στους αγωγούς προστασίας που είναι τοποθετημένοι πάνω από τους αγωγούς φάσης. Αυτοί οι αγωγοί χρησιμοποιούνται ως προστασία από τους κεραυνούς ώστε να μην υπάρχει κεραυνικό πλήγμα πάνω σε αγωγό φάσης, καθώς οι συνέπειες ενός τέτοιου συμβάντος προκαλούν πολλά προβλήματα στην εύρυθμη λειτουργία του δικτύου. Η διατομή τους κυμαίνεται συνήθως από 35 έως 90mm² και ειδικά στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται διατομές 70mm² στα 150kV και 120mm² στα 400kV. Αυτοί οι αγωγοί έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή όμως έχουν σχετικά μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα η οποία όμως κρίνεται αρκετή για την οδήγηση κευρανικών πληγμάτων στη γη [18].

1.6.1.3 Αγωγοί ACSR, AAAC, AAC

Οι αγωγοί All Aluminum Conductor χρησιμοποιούνται αρκετά στη διανομή και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας λόγω των δύο σημαντικών τους πλεονεκτημάτων. Ειδικότερα, οι συγκεκριμένοι αγωγοί σε σχέση με τους αγωγούς από χαλκό έχουν χαμηλότερο κόστος, όπως επίσης και μικρότερο ειδικό βάρος. Πιο συγκεκριμένα έχουν 3,3 φορές μικρότερο ειδικό βάρος σε σχέση με του χαλκού. Αντίθετα έχουν χαμηλή αγωγιμότητα 61% σε σχέση με αυτή του χαλκού, έχουν μικρή μηχανική αντοχή και διαβρώνονται αρκετά εύκολα, επειδή υφίστανται επιφανειακή οξείδωση σε παραθαλάσσιες περιοχές. Οι συγκεκριμένοι αγωγοί χρησιμοποιούνται σήμερα σε γραμμές διανομής (δίκτυα MT και XT). Γενικότερα η χρήση αγωγών αλουμινίου οδηγεί σε οικονομικότερη κατασκευή των πυλώνων [18].



Εικόνα 1.5: AAC [18].

Οι αγωγοί All Aluminum Alloy Conductor (AAAC) αποτελούνται από ένα κράμα αλουμινίου και κάποιων μετάλλων όπως για παράδειγμα το μαγνήσιο, το πυρίτιο και τον σίδηρο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αυξημένη μηχανική αντοχή και αγωγιμότητα παραπλήσια με εκείνη του αλουμινίου. Επιπροσθέτως επειδή το υλικό είναι ομοιογενές αποφεύγονται προβλήματα ηλεκτρολυτικής διαβρώσεως. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε

γραμμές διανομής μέσης και χαμηλής τάσης. Γενικά σε σχέση με τους αγωγούς AAC έχουν 86-93% μικρότερη αγωγιμότητα αλλά 55-84% μεγαλύτερη μηχανική αντοχή [18].



Εικόνα 1.6: Αγωγοί AAAC [18]

Ο αγωγός αλουμινίου ενισχυμένος με ατσάλι (ACSR) είναι ένας τύπος κλώνου αγωγού υψηλής χωρητικότητας, υψηλής αντοχής που χρησιμοποιείται συνήθως από εναέριες γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εξωτερικοί κλώνοι είναι αλουμίνιο υψηλής καθαρότητας, που επιλέγονται για την καλή του αγωγιμότητα, το χαμηλό βάρος, το χαμηλό κόστος, την αντοχή στη διάβρωση και την αξιοπρεπή αντοχή στη μηχανική καταπόνηση. Ο κεντρικός κλώνος είναι χάλυβας για πρόσθετη αντοχή που βοηθά στη στήριξη του βάρους του αγωγού. Ο χάλυβας είναι υψηλότερης αντοχής από το αλουμίνιο, γεγονός που επιτρέπει την εφαρμογή αυξημένης μηχανικής τάσης στον αγωγό. Ο χάλυβας έχει επίσης χαμηλότερη ελαστική και ανελαστική παραμόρφωση (μόνιμη επιμήκυνση) λόγω μηχανικής φόρτισης (π.χ. άνεμος και πάγος) καθώς και χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής από φόρτιση ρεύματος. Αυτές οι ιδιότητες επιτρέπουν στον ACSR να κρεμάει σημαντικά λιγότερο από τους αγωγούς αλουμινίου. Χρησιμοποιούνται πάντα σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Επίσης, ο συγκεκριμένος τύπος αγωγού θα χρησιμοποιηθεί στη μοντελοποίηση των γραμμών υψηλής τάσης στα επόμενα κεφάλαια [18].



Εικόνα 1.7: Αγωγοί ACSR [18].

1.6.2 Μονωτές

Οι μονωτές χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τον αγωγό από τη δομή στήριξης και να αποτρέψουν τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στη δομή. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα μονωτικά υλικά για εναέριες γραμμές υψηλής τάσης είναι το γυαλί, η πορσελάνη και τα συνθετικά υλικά. Οι μονωτήρες από γυαλί και πορσελάνη είναι παραδοσιακά υλικά που χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια λόγω της αντοχής τους, της αντοχής τους στις καιρικές συνθήκες, της

ρύπανσης και της καλής ηλεκτρικής τους απόδοσης. Οι συνθετικοί μονωτήρες, από την άλλη πλευρά, είναι σχετικά νέοι και έχουν κερδίσει δημοτικότητα λόγω του ελαφρού βάρους, των χαμηλών απαιτήσεων συντήρησης και της εξαιρετικής τους απόδοσης σε μολυσμένα περιβάλλοντα.

1.6.3 Υποστηρικτικές Δομές

Οι δομές στήριξης χρησιμοποιούνται για να συγκρατούν τους αγωγούς και τους μονωτές στη θέση τους και να παρέχουν ένα μονοπάτι για τη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατασκευές στήριξης για εναέριες γραμμές υψηλής τάσης είναι οι χαλύβδινοι στύλοι και οι πύργοι πλέγματος. Οι χαλύβδινοι στύλοι χρησιμοποιούνται συχνά για γραμμές χαμηλής τάσης, ενώ οι πυλώνες δικτύματος χρησιμοποιούνται για γραμμές υψηλής τάσης. Οι δικτυωτοί πυλώνες προτιμώνται από τους χαλύβδινους πυλώνες για γραμμές υψηλής τάσης καθώς προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή, σταθερότητα και αντοχή στον άνεμο και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες.

1.6.4 Αγωγή Επιχρίσματα

Στην επιφάνεια των αγωγών εφαρμόζονται αγωγή επιχρίσματα για τη μείωση της εκκένωσης κορώνας και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της γραμμής. Η εκκένωση κορώνας συμβαίνει όταν το ηλεκτρικό ρεύμα που ρέει μέσω του αγωγού ionίζει τον περιβάλλοντα αέρα, παράγοντας μια ορατή λάμψη και προκαλώντας απώλειες ισχύος. Οι αγωγιμες επικαλύψεις μειώνουν την εκκένωση κορώνας, αυξάνοντας την επιφανειακή αγωγιμότητα του αγωγού και μειώνοντας τον ιονισμό του αέρα.

1.6.5 Εξοπλισμός Γείωσης

Ο εξοπλισμός γείωσης χρησιμοποιείται για την προστασία ανθρώπων και εξοπλισμού από ηλεκτρικούς κινδύνους για να διασφαλιστεί ότι το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει με ασφάλεια μέσω της εναέριας γραμμής. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός γείωσης για εναέριες γραμμές υψηλής τάσης περιλαμβάνει καλώδια γείωσης, ράβδους γείωσης και απαγωγείς υπερτάσεων. Τα καλώδια γείωσης χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση της γραμμής με το έδαφος, ενώ οι ράβδοι γείωσης χρησιμοποιούνται για την παροχή μιας διαδρομής χαμηλής αντίστασης προς το έδαφος. Οι απαγωγείς υπερτάσεων χρησιμοποιούνται για την προστασία της γραμμής από υπερτάσεις και μπορεί να συμβούν κατά τη διάρκεια κεραυνών και άλλων ηλεκτρικών διαταραχών.

1.6.6 Αγωγοί αντικεραυνικής προστασίας

Χρησιμοποιούνται για την προστασία της εναέριας γραμμής από κεραυνούς και για τη μείωση των ηλεκτρικών παρεμβολών με άλλο εξοπλισμό. Εγκαθίστανται πάνω από τους αγωγούς φάσεων και γειώνονται στη δομή στήριξης για να παρέχουν μια διαδρομή χαμηλής αντίστασης για στο κεραυνικό ρεύμα. Μειώνουν επίσης τις ηλεκτρικές παρεμβολές δημιουργώντας μια θωράκιση γύρω από τους αγωγούς που εμποδίζει τα ανεπιθύμητα ηλεκτρικά σήματα.

Συμπερασματικά, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις εναέριες γραμμές υψηλής τάσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της απόδοσης του συστήματος μεταφοράς. Αγωγοί αλουμινίου και χαλκού, γυαλί, πορσελάνη και συνθετικοί μονωτήρες, χαλύβδινοι στύλοι και πυλώνες δικτύωματος, αγωγίμες επιστρώσεις και εξοπλισμός γείωσης είναι μερικά από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά για εναέριες γραμμές υψηλής τάσης. Η επιλογή αυτών των υλικών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το επίπεδο τάσης, την απόσταση μεταφοράς, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη σχέση κόστους – αποτελεσματικότητας. Με την προσεκτική επιλογή και συντήρηση αυτών των υλικών, μπορούμε να διασφαλίσουμε ότι οι εναέριες γραμμές υψηλής τάσης λειτουργούν με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα για πολλά χρόνια στο μέλλον.

1.7 Πυλώνες στήριξης αγωγών

Οι πυλώνες χρησιμοποιούνται για τη στήριξη γραμμών μεταφοράς, είναι κατασκευασμένοι συνήθως από χάλυβα και είναι γενικά ψηλές κατασκευές από 15 έως 55 μέτρα. Χρησιμοποιούνται σε δίκτυα υψηλής τάσης AC και DC ενώ το σχήμα και το ύψος τους ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή.

Γενικά οι πυλώνες κατηγοριοποιούνται με βάση την γεωμετρία τους και τον αριθμό των κυκλωμάτων τους. Στην Ελλάδα υπάρχουν πυλώνες απλού (66kV, 150kV) και διπλού κυκλώματος (150kV, 400kV) [3,5]. Ανάλογα με την γεωμετρία τους και τη θέση τους στο χώρο μπορούν να μπουν στις εξής κατηγορίες:

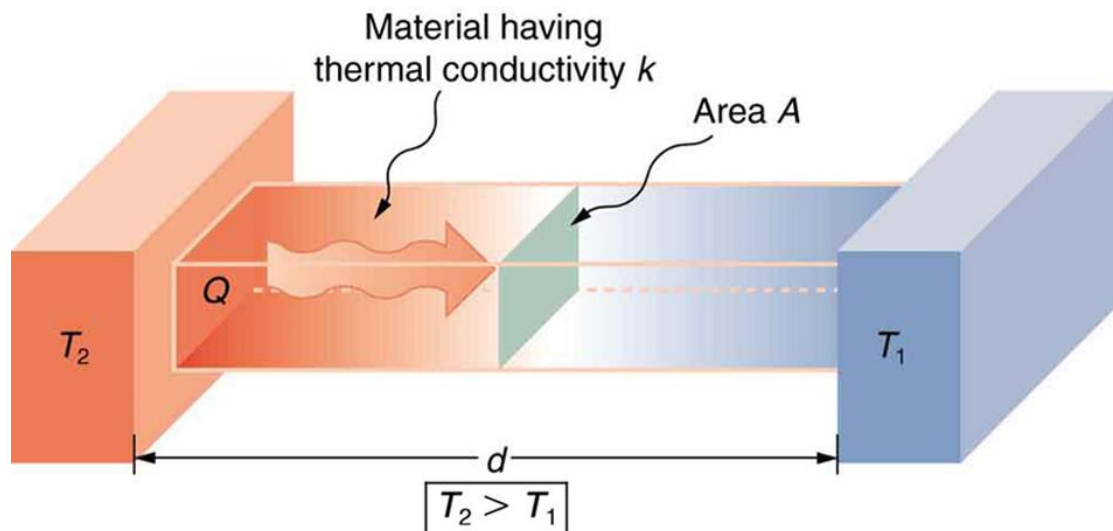
- **Πυλώνες ευθυγράμμου πορείας**
Αυτά τα στηρίγματα μεταφέρουν τους αγωγούς σε ευθεία γραμμή και δεν μεταφέρουν δυνάμεις τάνυσης των αγωγών στα στηρίγματα και έτσι μπορούν να είναι σχετικά ελαφρές κατασκευές. Για αυτόν τον λόγο μέσα σε ένα σύστημα επιδιώκεται η χρήση τους όσο γίνεται περισσότερο [3,6].
- **Πυλώνες ευθυγράμμου πορείας-γωνίας**
Αυτοί οι πυλώνες χρησιμοποιούνται όταν αλλάζει κατεύθυνση η γραμμή μεταφοράς από 0° έως 20° και βρίσκουν χρήση κυρίως για κυκλώματα μέχρι 110kV [3,5]. Σε περίπτωση μεγαλύτερης τάσης προκύπτει μια δυσμενής γεωμετρία του άνω μέρους του πυλώνα και για αυτόν τον λόγο πρέπει να εξετάζεται αν συμφέρει οικονομικά η χρήση του σε σχέση με τους πυλώνες γωνίας.
- **Πυλώνες γωνίας**
Οι πυλώνες αυτοί μεταφέρουν τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών κατά την γωνία εκτροπής αυτών. Σε σχέση με τους πυλώνες ευθυγραμμίας-γωνίας είναι εξοπλισμένοι με αλύσεις μονωτήρων τάνυσης. Επειδή όμως μπορεί να εμφανιστούν ανομοιόμορφες δυνάμεις τάνυσης των αγωγών σε γειτονικούς πυλώνες (π.χ. λόγω πάγου) δεν προτιμώνται σε περιοχές που υπάρχει έντονος σχηματισμός πάγου. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με του πυλώνες γωνίας-τομής [3,5,6].

- **Πυλώνες τομής και γωνίας-τομής**
Οι πυλώνες τομής και γωνίας-τομής μεταφέρουν τις δυνάμεις τάνυσης των αγωγών κατά την κατεύθυνση της γραμμής ή κατά τη συνιστάμενη κατεύθυνση αντίστοιχα. Σχεδιάζονται για δυνάμεις τάνυσης αγωγών που διαφέρουν στις δύο κατευθύνσεις της γραμμής και εξασφαλίζουν την προστασία των αγωγών. Σύνηθες είναι να τοποθετούνται τέτοιοι πυλώνες σε κάθε γωνιακό σημείο της γραμμής, καθώς έτσι διευκολύνεται και η τοποθέτηση των αγωγών [6]. Σε μακρά ευθεία τμήματα της γραμμής παρεμβάλλονται τέτοιοι πυλώνες ανά 5-10km για να υπάρχουν άκαμπτα σημεία στη γραμμή και να περιορίζουν τις αλυσιδωτές βλάβες που μπορεί να συμβούν στους πυλώνες ευθυγραμμίας.
- **Πυλώνες τέρματος**
Οι πυλώνες αυτοί μεταφέρουν τις συνολικές δυνάμεις τάνυσης των αγωγών κατά την κατεύθυνση της γραμμής στη μια πλευρά. Συχνά οι πυλώνες αυτοί φορτίζονται επιπρόσθετα από αγωγούς που πάνε προς τους υποσταθμούς, οι οποίοι έχουν συνήθως μεγάλη γωνία ως προς τον οριζόντιο άξονα και εμφανίζουν μεγάλες δυνάμεις τάνυσης λόγω της μικρής απόστασης από τον υποσταθμό[3]. Για αυτόν τον λόγο πρέπει να εξεταστεί ο σχεδιασμός και η περαιτέρω ενίσχυση ορισμένων τμημάτων του πυλώνα αφού η φόρτιση θεωρείται ιδιαίτερα δυσμενής.

1.8 Θερμικές απώλειες αγωγών

Είναι γνωστό πως στις γραμμές που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια εμφανίζονται απώλειες ισχύος που οφείλονται σε διάφορους παράγοντες. Μια ιδανική περίπτωση θα ήταν η μεταφορά όλης της ισχύος κατευθείαν από την πηγή στην κατανάλωση χωρίς καμία απώλεια, κάτι τέτοιο όμως στην πράξη δεν είναι εφικτό. Λόγω της ωμικής αντίστασης των αγωγών ένα ποσό από την πραγματική ισχύ χάνεται και απελευθερώνεται στο περιβάλλον με τη μορφή θερμότητας. Επίσης μία ποσότητα της ισχύος αναλώνεται στη δημιουργία του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου (αέργος ισχύς), η οποία δεν είναι εκμεταλλεύσιμη και αξιοποιήσιμη για την τροφοδοσία φορτίων, καθώς κανένα κύκλωμα δεν είναι απαλλαγμένο από χωρητικές και επαγωγικές συνιστώσες. Το αποτέλεσμα της εμφάνισης της αέργου ισχύος τόσο στα επαγωγικά όσο και στα χωρητικά στοιχεία ενός κυκλώματος είναι η ταλάντωση ρευμάτων στους αγωγούς μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος που τελικά καταναλώνεται στις ωμικές αντιστάσεις και τις πραγματικές συνιστώσες των σύνθετων αντιστάσεων του κυκλώματος [19].

Το παραπάνω φαινόμενο εξηγείται από τον νόμο του Joule. Πιο συγκεκριμένα, ο πρώτος νόμος του Joule γνωστός και σαν νόμος Joule-Lenz καταδεικνύει πως η ισχύς της θερμότητας που παράγεται από μια ηλεκτρική αντίσταση είναι ανάλογη της αριθμητικής τιμής της αντίστασης σε Ohm και του τετραγώνου της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος.



Σχήμα 1.5: Φαινόμενο Θέρμανσης Joule [19].

Σε επίπεδο μικροσκοπίας διαπιστώνεται πως η θέρμανση Joule προκαλείται από αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φορέων φορτίου (συνήθως ηλεκτρονίων) και του σώματος του αγωγού. Μία διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ δύο σημείων ενός αγωγού δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο που επιταχύνει τους φορείς φορτίου προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου, δίνοντας τους κινητική ενέργεια. Όταν τα φορτισμένα σωματίδια συγκρούονται με τα οριζοντιώδη σωματίδια στον αγωγό (δηλαδή τις κανονικές κβαντισμένες, ιοντικές ταλαντώσεις πλέγματος στην αρμονική προσέγγιση ενός κρυστάλλου), η ενέργεια μεταφέρεται από τα ηλεκτρόνια στο πλέγμα (με τη δημιουργία περαιτέρω ταλαντώσεων πλέγματος). Οι ταλαντώσεις των ιόντων είναι η προέλευση της ακτινοβολίας («θερμική ενέργεια») που μετράει κανείς σε ένα τυπικό πείραμα.

Όσον αφορά το συνεχές ρεύμα (DC), ο πιο θεμελιώδης τύπος της θερμικής ισχύος Joule είναι η γενικευμένη εξίσωση ισχύος $P=I \cdot V=I^2 \cdot R=V^2/R$. Σχέση η οποία προκύπτει έχοντας κάνει την υπόθεση ότι το στοιχείο συμπεριφέρεται ως τέλεια αντίσταση και ότι η ισχύς μετατρέπεται πλήρως σε θερμότητα χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm $V=I \cdot R$ [19].

Σε ένα σύστημα με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), δηλαδή όταν το ρεύμα εναλλάσσεται ισχύει η σχέση $P_{avg}=U_{rms} \cdot I_{rms}=I_{rms}^2 \cdot R=U_{rms}^2/R$. Η σχέση αυτή ισχύει στην περίπτωση καθαρά ωμικού φορτίου, καθώς ισχύει ότι $\cos\phi=1$. Στην περίπτωση μη ωμικού φορτίου ισχύει η σχέση $P_{avg}=U_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos\phi$ [19].

Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Αυτές οι γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μη μηδενική αντίσταση και επομένως υπόκεινται στο φαινόμενο Joule, το οποίο προκαλεί απώλειες μεταφοράς. Η κατανομή ισχύος μεταξύ των απωλειών μετάδοσης (φαινόμενο Joule στις γραμμές μεταφοράς) και του φορτίου (ωφέλιμη ενέργεια που παρέχεται στον καταναλωτή) μπορεί να προσεγγιστεί από έναν διαιρέτη τάσης. Για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες μετάδοσης, η αντίσταση των γραμμών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη σε σύγκριση με το φορτίο (αντίσταση καταναλωτικών συσκευών). Η αντίσταση της γραμμής ελαχιστοποιείται με τη χρήση χάλκινων αγωγών, αλλά οι προδιαγραφές αντίστασης και παροχής ρεύματος των συσκευών κατανάλωσης είναι σταθερές. Συνήθως, ένας μετασχηματιστής τοποθετείται μεταξύ των γραμμών και της κατανάλωσης. Όταν ένα ρεύμα υψηλής τάσης και χαμηλής έντασης στο πρωτεύον κύκλωμα (πριν από τον μετασχηματιστή) μετατρέπεται σε ρεύμα χαμηλής τάσης και υψηλής έντασης στο δευτερεύον κύκλωμα (μετά τον μετασχηματιστή), η ισοδύναμη αντίσταση του δευτερεύοντος κυκλώματος γίνεται

υψηλότερη και οι απώλειες μετάδοσης μειώνονται αναλογικά. Κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης των ρευμάτων, οι εγκαταστάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν μετασχηματιστές για να μειώσουν τις απώλειες γραμμής λόγω του φαινομένου Joule, με κόστος υψηλότερης τάσης στις γραμμές μεταφοράς, σε σύγκριση με εγκαταστάσεις συνεχούς ρεύματος [19].

Υπάρχουν διάφορες πηγές θερμικών απωλειών σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως:

- a) Αντίσταση στις γραμμές μεταφοράς: Οι γραμμές μεταφοράς είναι κατασκευασμένες από υλικά με κάποια αντίσταση, όπως ο χαλκός ή το αλουμίνιο, γεγονός που κάνει μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας να μετατρέπεται σε θερμότητα καθώς ρέει μέσα από τις γραμμές.
- b) Απώλειες μετασχηματιστή: Οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για την αύξηση ή μείωση της τάσης της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς μεταδίδεται μέσω του συστήματος ισχύος. Ωστόσο, οι μετασχηματιστές έχουν επίσης κάποιες απώλειες λόγω της αντίστασης των περιελίξεων του μετασχηματιστή και του πυρήνα, με αποτέλεσμα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας να μετατρέπεται σε θερμότητα.
- c) Απώλεια υποσταθμών: Οι υποσταθμοί χρησιμοποιούνται για τη μεταγωγή, τον έλεγχο και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας εντός του συστήματος ισχύος. Ωστόσο, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε υποσταθμούς, όπως διακόπτες φορτίου, διακόπτες ισχύος και ασφάλειες, έχει επίσης κάποιες απώλειες λόγω της αντίστασης τους.
- d) Απώλειες αέργου ισχύος: Η άεργος ισχύς που απαιτείται για τη διατήρηση των επιπέδων τάσης στο σύστημα ισχύος. Ωστόσο, η άεργος ισχύς προκαλεί επίσης απώλειες λόγω της αντίστασης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και την κατανάλωση άεργου ισχύος.

Συνολικά, οι θερμικές απώλειες σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση του συστήματος και μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερο ενεργειακό κόστος και αυξημένες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Επομένως, η μείωση των θερμικών απωλειών είναι ένας σημαντικός στόχος για τους διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και στρατηγικές όπως η βελτίωση του σχεδιασμού των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών, η χρήση αποδοτικότερου εξοπλισμού και η βελτιστοποίηση της χρήσης αέργου ισχύος μπορούν να βοηθήσουν στην ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών.

Βιβλιογραφία

- [1] Βουρνάς Κ., Κονταξής Γ., (2010) Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, Αθήνα.
- [2] <https://www.statista.com/statistics/1235419/greece-distribution-of-electricity-production-by-source/>
- [3] <https://deddie.gr>
- [4] Έκθεση Βιώσιμης Ανάπτυξης 2020 ΔΕΗ
- [5] <https://www.dei.gr>
- [6] <https://www.admie.gr>
- [7] <https://deddie.gr>
- [8] <https://www.rae.gr>
- [9] Δεδομένα Διαχείρισης Παγίων/Τα βασικά δεδομένα Εξοπλισμού του Συστήματος Μεταφοράς <https://www.admie.gr/systema/perigrafi/dedomena-diaheirisis-pagion> 30/09/2021.
- [10] Βασικά μεγέθη 2020 του δικτύου διανομής ηλεκτρισμού <https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/vasika-megethi-tou-diktou-ilektrismou/>.
- [11] Ενημερωτικό έντυπο της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), “Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία: Πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων - Βιολογικές επιπτώσεις - Έλεγχος από την ΕΕΑΕ”, (2005).
- [12] Ε. Καραμπέτσος, “Ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Νομοθετικό πλαίσιο, όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού, αποτελέσματα ελέγχων”, Πρακτικά Ημερίδας: «Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία: Μύθοι και πραγματικότητα», Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών 1-6-2005, σελ. 57-70.
- [13] <https://www.indiamart.com>
- [14] <https://www.worldenergynews.gr>
- [15] Λ. Οικονόμου, Γ. Φώτης, Χ. Χριστοδούλου «Υψηλές Τάσεις», 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2020, Αθήνα.
- [16] <http://edume.myds.me>
- [17] <https://www.cablel.com>
- [18] Δ. Λαμπρίδης, Γ. Ανδρέου “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας ΙΙ”, Ανοιχτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα ΑΠΘ.
- [19] Δ. Καρακώστας, «Μελέτη ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε εγκαταστάσεις υπόγειων καλωδίων υψηλής τάσης», Πάτρα.
- [20] Σ. Πηξάρης, «Μελέτες Κατασκευής Δικτύων Διανομής», Καβάλα, 2005.
- [21] Κ. Μαυρή, «Συγκριτική αξιολόγηση των μεθοδολογιών και των οργάνων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση βλαβών σε υπόγεια καλώδια ισχύος», Αιγάλεω, 2017.
- [22] Μ. Ζουράκη, «Υπολογισμός μεταφερόμενης ισχύος σε υπόγειο καλώδιο μέσης τάσης», Αθήνα, 2012.
- [23] Ι. Α. Σταθόπουλος «ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ Ι», , ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ Αθήνα, 1997.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Εισαγωγή στα χαμηλόσυχα ΗΜΠ

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη ζήτησή της έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη ενός μεγάλου δικτύου μεταφοράς. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα πλεονεκτήματα των εναέριων γραμμών μεταφοράς, δηλαδή η απλότητα και το χαμηλό κόστος κατασκευής τους αλλά και οι υποσταθμοί ΥΤ με τα κέντρα υψηλής τάσης (ΚΥΤ) παραμένουν ακόμα και σήμερα ο αποδοτικότερος τρόπος που πραγματοποιείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαφορά δυναμικού που επικρατεί στα διάφορα τμήματα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και η ένταση του ρεύματος ροής σε αυτά αποτελούν τις αιτίες δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (ΗΜΠ) γύρω από τα στοιχεία και τις διατάξεις του. Η ύπαρξη αυτών των πεδίων έχει προσελκύσει το ισχυρό ενδιαφέρον για μελέτη από τη μεριά των επιστημόνων και των μηχανικών, όσον αφορά τη φύση τους και την επίδρασή τους στον ανθρώπινο οργανισμό. Σε αυτό το κεφάλαιο θα θεμελιωθεί το θεωρητικό υπόβαθρο για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

2.2 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας

Τα εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (extremely low frequency - ELF) ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF) καταλαμβάνουν το κάτω μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στην περιοχή συχνοτήτων 0–3kHz. Σε συνδυασμό με τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, την υπέρυθη και την υπεριώδη ακτινοβολία συγκροτούν αυτό που ονομάζεται φάσμα των μη ιονιζουσών ακτινοβολιών (non ionizing radiation – NIR). Τα ELF EMF προκύπτουν από ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια. Τα πεδία που βρίσκονται σε αυτό το φάσμα συχνοτήτων χαρακτηρίζονται από μικρή ενέργεια και δεν προκαλούν άμεσα ιονισμό, αλλά μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρικές, θερμικές ή χημικές επιδράσεις στα κύτταρα, άλλοτε ωφέλιμες και άλλοτε ζημιογόνες για τη λειτουργία τους. Η δημιουργία αυτών των πεδίων, τα οποία υπάρχουν παντού στον χώρο, είναι είτε φυσική είτε τεχνητή. Η προέλευση είναι φυσική όταν προέρχεται για παράδειγμα από το γήινο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και το ηλιακό φως. Από την άλλη είναι τεχνητή όταν προέρχεται από οικιακές ηλεκτρικές συσκευές, από τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας κλπ. [1].

Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ανεξαρτήτως συχνότητας περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell. Άρα, και τα πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας θα εκφράζονται από τις εξισώσεις που ακολουθούν:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \quad [2.1]$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j} \quad [2.2]$$

όπου:

\mathbf{E} η ηλεκτρική πεδιακή ένταση

\mathbf{H} η μαγνητική πεδιακή ένταση

μ η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου

σ η ηλεκτρική επιτρεπτότητα του μέσου

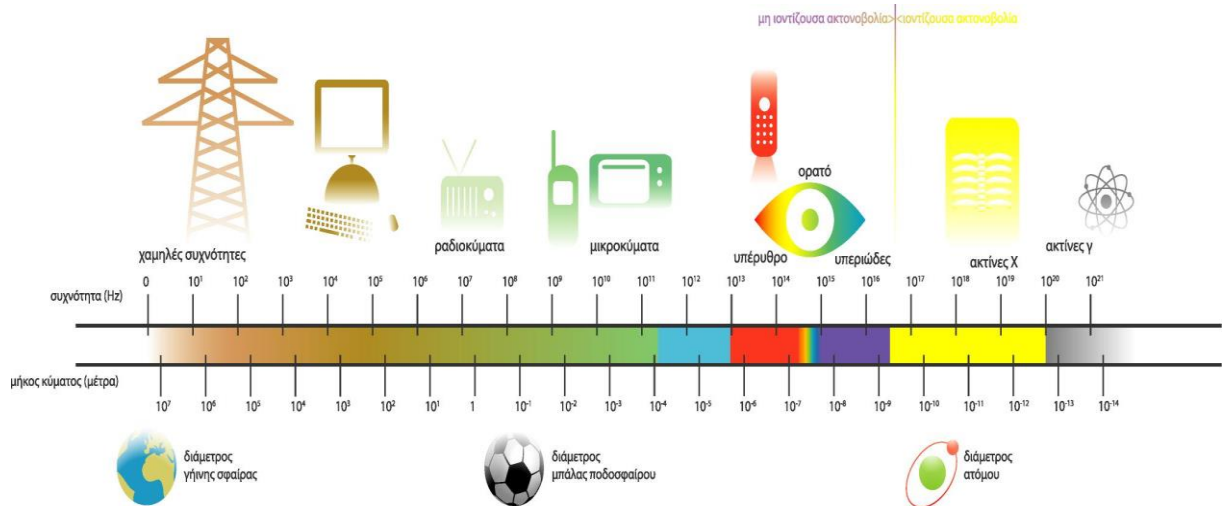
\mathbf{j} η ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου

Αν τα παραπάνω πεδία διαδίδονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, τότε για τις σταθερές των δύο εξισώσεων του Maxwell ισχύουν τα εξής:

$$\epsilon = 8.854 \times F/m$$

$$\mu = 4\pi \times H/m$$

$$\sigma \approx 0 \text{ S/m}$$



Σχήμα 2.1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [1].

2.3 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξ' ορισμού αποτελούνται από δύο ξεχωριστά πεδία, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο. Συγκεκριμένα, τα πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας που θα γίνει αναφορά είναι τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, συσκευές ή άλλες εγκαταστάσεις των 50Hz ή 60Hz [2].

Το ηλεκτρικό πεδίο σχετίζεται με το μέγεθος της τάσης λειτουργίας των ενεργών αγωγών σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση. Η δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου οφείλεται στις επικρατούσες στους αγωγούς μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης τάσεις, ανεξαρτήτως αν οι αγωγοί αυτοί διαρρέονται από ρεύμα ή όχι. Το μέγεθος και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου εκφράζονται με την τιμή του E (V/m), που ονομάζεται ένταση ηλεκτρικού πεδίου ή απλά ηλεκτρικό πεδίο. Η γνώση της τιμής του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο, χωρίς καμία συγκεκριμένη γνώση του τι το παράγει, είναι το μόνο που χρειάζεται για να καθοριστεί τι θα συμβεί με τα ηλεκτρικά φορτία κοντά στο συγκεκριμένο σημείο [2].

Το μαγνητικό πεδίο σχετίζεται με το μέγεθος του ρεύματος που ρέει σ' έναν αγωγό υπό συγκεκριμένη τάση. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου οφείλεται στις εντάσεις των ρευμάτων που ρέουν στους αγωγούς μιας ηλεκτρικής γραμμής, συσκευής ή άλλης εγκατάστασης. Στον αντίποδα με τα ηλεκτρικά, τα μαγνητικά πεδία διαπερνούν τα οικοδομικά υλικά και το ανθρώπινο σώμα, καθιστώντας τη θωράκιση δύσκολη. Το μέγεθος και η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου εκφράζονται από την τιμή της μαγνητικής επαγωγής B (Tesla ή Gauss) και εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος, τη γεωμετρία και την απόσταση [2].

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που έχουν αυτά τα πεδία είναι πως αποσβένονται όσο αυξάνεται η απόσταση από την πηγή που τα δημιουργεί και, κατά συνέπεια, οπτική επαφή με

πάσης φύσεως ηλεκτρικές εγκαταστάσεις δε συνεπάγεται απαραίτητα και έκθεση στα πεδία. Η συγκεκριμένη απόσβεση είναι αντιστρόφως ανάλογη είτε της απόστασης είτε της δύναμης της απόστασης, ανάλογα με το σημείο παρατήρησης.

Τα πεδία εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Μικρές εντάσεις ρεύματος σε συνδυασμό με μικρές αποστάσεις, όπως είναι οι αποστάσεις μεταξύ ηλεκτρικών συσκευών και ανθρώπων στις κατοικίες, προκαλούν μαγνητικά πεδία τα οποία είναι πολλές φορές μεγαλύτερα από εκείνα που οφείλονται στις εναέριες γραμμές, όπου υπάρχουν μεγάλες εντάσεις αλλά και μεγάλες αποστάσεις. Επομένως, οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι υποσταθμοί υψηλής τάσεως, οι οποίες προκαλούν συχνά ανησυχία λόγω των μεγάλων διαστάσεων τους, δεν προκαλούν πάντα τις μεγαλύτερες εντάσεις σε σχέση με τις πεδιακές εντάσεις των άλλων πηγών.

2.4 Πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων συχνότητας ισχύος

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία συχνότητας ισχύος (PF EMFs) δημιουργούνται από τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, ηλεκτρικών συσκευών και άλλων συσκευών που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια. Η ισχύς του EMF PF είναι ανάλογη με το ρεύμα που διαρρέει τη συσκευή και την απόσταση από την πηγή του EMF. Παρακάτω ακολουθούν μερικές από τις κύριες πηγές EMF PF:

2.4.1 Ηλεκτρικές Συσκευές και εξοπλισμός

Πολλές ηλεκτρικές συσκευές και εξοπλισμός παράγουν EMF. Η ισχύς του EMF εξαρτάται από την ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τη συσκευή, τον σχεδιασμό της συσκευής και την απόσταση από τη συσκευή. Κατά τη λειτουργία τους οι ηλεκτρικές συσκευές παράγουν μαγνητικά πεδία στο περιβάλλον τους. Αυτά τα πεδία εξασθενούν αρκετά γρήγορα όταν αυξάνεται η απόσταση από τη συσκευή, οπότε είναι άξια λόγου μόνο σε αποστάσεις αρκετά μικρότερες από ένα μέτρο. Όπως είναι γνωστό, η τάξη μεγέθους του πεδίου που μπορεί να φθάσει μια ηλεκτρική συσκευή είναι σε μέγεθος έως και εκατοντάδες μT [3]. Κατά κανόνα όμως, η έκθεση των ανθρώπων πραγματοποιείται σε αποστάσεις αρκετά μεγάλες για να μην υπάρχει πρόβλημα έκθεσης, εκτός από μερικές συσκευές που κατά τη χρήση τους ο χρήστης βρίσκεται αναπόφευκτα κοντά τους όπως παραδείγματος χάριν οι ηλεκτρικές ξυριστικές μηχανές και τα σεσουάρ για τα μαλλιά. Οι άνθρωποι όμως δε χρησιμοποιούν αυτές τις συσκευές για μεγάλο χρονικό διάστημα καθημερινά και με αυτόν τον τρόπο η χρονική διάρκεια της έκθεσης είναι περιορισμένη. Ακόμη, από τη μία η έκθεση στα πεδία από τις συσκευές εντοπίζεται τοπικά σε μια πολύ μικρή περιοχή του σώματος και από την άλλη η σύζευξη του πεδίου με το σώμα είναι εξαιρετικά ασθενής. Συμπερασματικά, από τα παραπάνω είναι φανερό πως η τοπική έκθεση των ανθρώπων στα πεδία των ηλεκτρικών συσκευών δεν είναι επιβλαβής, λόγω της μικρής χρονικής διάρκειας που έχει η χρήση τους [3].



Σχήμα 2.2: Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από οικιακές ηλεκτρικές συσκευές [3].
 Ακολούθως παρατίθεται πίνακας με τις ηλεκτρικές συσκευές και τα τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου.

Πίνακας 2.1: Τυπικά επίπεδα μαγνητικού πεδίου από κοινές ηλεκτρικές συσκευές και εργαλεία [3].

ΣΥΣΚΕΥΗ	ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 3cm (μT)	ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 30cm (μT)	ΣΕ ΑΠΟΣΤΑΣΗ 1m (mT)
Ευριστική Μηχανή	10-900	0,05-9	0,01-0,2
Σεσουάρ Μαλλιών	8-800	0,01-7	0,01-0,03
Λαμπτήρας Φθορισμού	40-400	0,5-2	0,02-0,25

Ηλεκτρική Κουζίνα	1-50	0,15-0,5	0,01-0,04
Φούρνος Μικροκυμάτων	5-100	0,4-8	0,15-0,5
Ψυγείο	0,5-1,7	0,01-0,3	0,01-0,05
Πλυντήριο Ρούχων	0,8-40	0,15-3	0,01-0,15
Πλυντήριο Πιάτων	1-15	0,2-2	0,07-0,3
Ηλεκτρικό Σίδερο	3-30	0,14-0,3	0,01-0,03
Ηλεκτρική Σκούπα	60-500	0,8-12	0,08-0,8
Φορητό Ραδιόφωνο	1-15	0,4-1,5	0,01-0,1
Τηλεόραση	2-80	0,04-8	0,01-0,9
Βιντεοκάμερα	0,6-20	0,7-2,5	0,01-0,03
Φωτοτυπικό	0,6-40	0,1-2,7	0,01-0,3
Συσκευή FAX	0,4-1,5	0,01-0,2	0,01-0,02
Οθόνη Υπολογιστή	1-60	0,02-5	0,01-0,6
Ηλεκτρικό Τρυπάνι	4-200	0,2-3,3	0,01-0,8

Εξετάζοντας τις τιμές του Πίνακα 2.1, γίνεται φανερό πως σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση ίση με 30cm είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με το επίπεδο αναφοράς των 100 μ T, βάσει της νομοθεσίας που έχει επιβάλλει η Ευρωπαϊκή Ένωση και το Ελληνικό κράτος για τη συχνότητα των 50Hz.

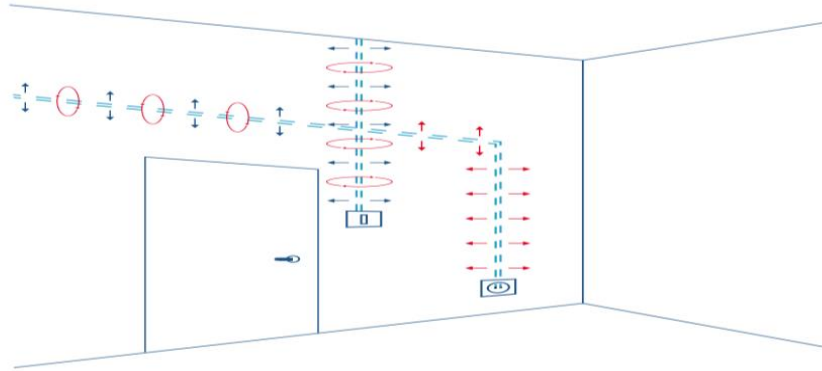
Πέρα όμως από το μαγνητικό πεδίο οι ηλεκτρικές συσκευές παράγουν και ηλεκτρικό πεδίο όταν βρίσκονται υπό τάση. Οι τιμές αυτές του παραγόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα σε σύγκριση με το όρια που προβλέπει η Ευρωπαϊκή Ένωση και η Ελληνική νομοθεσία (500V/m).

2.4.2 Εσωτερικές Καλωδιώσεις

Η ηλεκτρική καλωδίωση μέσα σε κτίρια και σπίτια μπορεί να δημιουργήσει ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF) λόγω της ροής ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των καλωδίων. Ωστόσο, η ισχύς του EMF που παράγεται από την ηλεκτρική καλωδίωση είναι γενικά πολύ χαμηλότερη από εκείνη που παράγεται από γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης ή άλλες πηγές EMF PF [3].

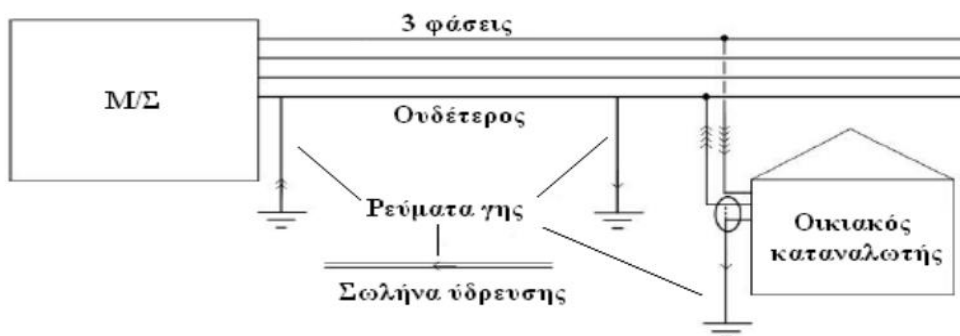
Η ισχύς του EMF που παράγεται από την ηλεκτρική καλωδίωση εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της ποσότητας ηλεκτρικού ρεύματος που ρέει μέσα από τα καλώδια, τη συχνότητα του ρεύματος και την απόσταση από την καλωδίωση. Γενικά, η ισχύς EMF μειώνεται γρήγορα με την απόσταση από την πηγή.

Βάσει των κανονισμών των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων τα ρεύματα των αγωγών των καλωδιώσεων των εγκαταστάσεων δημιουργούν μαγνητικά πεδία τα οποία σε ιδιαίτερο βαθμό αλληλοεξουδετερώνονται όπως διαπιστώνεται και από το Σχήμα 2.3. Σε μερικές σπάνιες περιπτώσεις που δεν πληρούνται οι όροι των κανονισμών στις εγκαταστάσεις είναι πολύ πιθανόν, εξαιτίας κάποιας λανθασμένης συνδεσμολογίας ή εξαιτίας της ύπαρξης κάποιας διαρροής, να παρουσιαστούν μεγάλα επίπεδα μαγνητικών πεδίων στο περιβάλλον των καλωδιώσεων [3].



Σχήμα 2.3: Αλληλοεξουδετέρωση των μαγνητικών πεδίων στις εσωτερικές καλωδιώσεις [3].

Επίσης, στην ύπαρξη μαγνητικών πεδίων συμβάλλουν τα ρεύματα γης σε μεγάλα γειωμένα αντικείμενα όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αυτά τα ρεύματα οδηγούν στη δημιουργία πεδίων υψηλών τιμών, φθίνουν σχετικά αργά σε σχέση με την απόσταση από τις πηγές και αποτελούν ένα μέρος των ρευμάτων επιστροφής, που κατά κανόνα ρέουν στον ουδέτερο αγωγό. Όμως όλες αυτές οι πολλαπλές γειωμένες συνδέσεις του ουδέτερου αγωγού παρέχουν εναλλακτικές οδούς στη ροή των ρευμάτων επιστροφής πίσω στο δίκτυο ενέργειας μέσω μεγάλων γειωμένων μεταλλικών αντικειμένων, όπως αυτών που έχουν ήδη αναφερθεί. Η εμφάνιση των ρευμάτων γης οφείλεται είτε στην ύπαρξη σφάλματος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είτε, σε κανονικές συνθήκες, εάν υπάρχουν αρκετές συνδέσεις του ουδέτερου αγωγού στη γη. Αντίθετα, η χρήση μη αγώγιμων τμημάτων στο σύστημα ύδρευσης μειώνει σημαντικά τα επίπεδα των ρευμάτων επιστροφής.



Σχήμα 2.4: Μηχανισμός δημιουργίας των ρευμάτων επιστροφής στη γη [4].

Τα επίπεδα των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων διαμορφώνονται σε σημαντικό βαθμό με βάση τις πρακτικές που εφαρμόζονται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και στην κατασκευή και λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, που μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικά από χώρα σε χώρα. Οι παραπάνω πηγές δημιουργούν κυρίως μαγνητικά πεδία σε κοντινή απόσταση

από αυτές, επειδή το δημιουργούμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι μικρό λόγω της χαμηλής τάσης και εξασθενεί περαιτέρω από τοίχους κ.λπ. Τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από τις συσκευές εξασθενούν γρήγορα με την αύξηση της απόστασης από αυτές ενώ λαμβάνουν αξιοσημειώτες τιμές σε αποστάσεις πολύ μικρότερες από 1m. Το πεδίο στην επιφάνεια της συσκευής μπορεί να είναι πολύ ισχυρό, φτάνοντας τιμές εκατοντάδων μT .

2.4.3 Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα σύστημα που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει ένα σύνθετο σύστημα γραμμών υποσταθμών, μετασχηματιστών και άλλου εξοπλισμού που συνεργάζονται για να διασφαλίσουν ότι η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται αξιόπιστα και αποτελεσματικά στους πελάτες.

Το δίκτυο διανομής ξεκινά από τον υποσταθμό στον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από μια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Στον υποσταθμό, υψηλή τάση υποβιβάζεται σε χαμηλότερη τιμή και η ηλεκτρική ενέργεια αποστέλλεται κατά μήκος των γραμμών ισχύος στους μετασχηματιστές διανομής. Αυτοί οι μετασχηματιστές μειώνουν περαιτέρω την τάση σε ένα επίπεδο που είναι κατάλληλο για χρήση από καταναλωτές χαμηλής τάσης.

Από τους μετασχηματιστές διανομής, η ηλεκτρική ενέργεια αποστέλλεται μέσω μικρότερων γραμμών σε μεμονωμένες κατοικίες και επιχειρήσεις. Το δίκτυο διανομής περιλαμβάνει επίσης εξοπλισμό όπως διακόπτες κυκλώματος και προστατευτικές συσκευές που βοηθούν στην αποφυγή διακοπών ρεύματος και προστατεύουν τον εξοπλισμό από ζημιές.

Το δίκτυο λειτουργεί από εταιρείες κοινής ωφέλειας, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη συντήρηση και την επισκευή του εξοπλισμού, την αντιμετώπιση των διακοπών ρεύματος και τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης παράδοσης ηλεκτρικής ενέργειας στους πελάτες. Οι εταιρείες κοινής ωφέλειας εργάζονται επίσης για τη διαχείριση του δικτύου διανομής με τρόπο που εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση, διασφαλίζοντας ότι υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια για να καλύψει τις ανάγκες των πελατών ανά πάσα στιγμή.

2.4.3.1 Δίκτυο Διανομής Χαμηλής Τάσης

Ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (LVDN) είναι ένα μέρος του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε κατοικίες, επιχειρήσεις και άλλους καταναλωτές σε επίπεδο τάσης που είναι κατάλληλο για χρήση. Συνήθως, τα LVDN λειτουργούν σε επίπεδο τάσης μεταξύ 110/240V στις Ηνωμένες Πολιτείες και 230/400V στην Ευρώπη και σε άλλα μέρη του κόσμου.

Το LVDN είναι ένα δίκτυο μετασχηματιστών διανομής, ηλεκτρικών γραμμών και άλλου εξοπλισμού που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο διανομής μέσης τάσης σε μεμονωμένους καταναλωτές. Οι μετασχηματιστές διανομής που βρίσκονται στο LVDN μειώνουν περαιτέρω την τάση από το επίπεδο μέσης τάσης στο επίπεδο χαμηλής τάσης, καθιστώντας το ασφαλές και κατάλληλο για χρήση σε κατοικίες και επιχειρήσεις.

Το LVDN λειτουργεί συνήθως από εταιρείες κοινής ωφέλειας, οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη συντήρηση και την επισκευή του εξοπλισμού, την ανταπόκριση σε διακοπές ρεύματος και τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης παράδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Οι εταιρείες κοινής ωφέλειας διαχειρίζονται επίσης το δίκτυο διανομής με τρόπο που εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση, διασφαλίζοντας ότι υπάρχει αρκετή διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών ανά πάσα στιγμή.

Μια από τις βασικές προκλήσεις στη λειτουργία ενός LVDN είναι η διαχείριση των επιπέδων τάσης για να διασφαλιστεί ότι παραμένουν εντός ασφαλών ορίων [4,5]. Τα πολύ υψηλά επίπεδα τάσης μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στις ηλεκτρικές συσκευές και τον εξοπλισμό, ενώ τα πολύ χαμηλά επίπεδα τάσης μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη απόδοση των ηλεκτρικών συσκευών. Ως αποτέλεσμα, οι εταιρείες κοινής ωφέλειας χρησιμοποιούν μια ποικιλία εργαλείων και τεχνικών, όπως ρυθμιστές τάσης και τεχνολογίες έξυπνων δικτύων, για να διαχειρίζονται τα επίπεδα τάσης και να διασφαλίζουν ότι παραμένουν εντός ασφαλών και αποδοτικών ορίων.

Συνολικά, το LVDN διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, επιτρέποντας στους ανθρώπους να τροφοδοτούν τις κατοικίες τους, να διευθύνουν τις επιχειρήσεις τους και να πραγματοποιούν τις καθημερινές δραστηριότητες. Η αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία του LVDN είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται με ασφάλεια και αξιοπιστία στους καταναλωτές ανά πάσα στιγμή.

2.4.3.2 Δίκτυο Διανομής Μέσης Τάσης

Ένα δίκτυο διανομής μέσης τάσης είναι ένα ηλεκτρικό σύστημα που διανέμει ηλεκτρική ενέργεια από έναν υποσταθμό σε πελάτες σε επίπεδα μέσης τάσης, που συνήθως κυμαίνονται από 2,4kV έως 35kV. Το δίκτυο αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα, όπως μετασχηματιστές, συσκευές διανομής, προστατευτικές συσκευές και καλώδια τροφοδοσίας. Ο κύριος σκοπός ενός δικτύου διανομής μέσης τάσης είναι να παρέχει αξιόπιστη και σταθερή ηλεκτρική ενέργεια σε τελικούς χρήστες, όπως οικιακούς, εμπορικούς και βιομηχανικούς πελάτες.

Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης λειτουργεί σε ακτινική ή κυκλική διαμόρφωση, ανάλογα με τον σχεδιασμό του δικτύου και τις απαιτήσεις ισχύος των πελατών. Σε ένα ακτινωτό σύστημα, η ισχύς ρέει προς μια κατεύθυνση από τον υποσταθμό προς τους τελικούς χρήστες. Σε ένα σύστημα βρόχου, η ισχύς μπορεί να ρέει σε πολλαπλές κατευθύνσεις, γεγονός που παρέχει πλεονασμό και βελτιώνει την αξιοπιστία του δικτύου [8,12].

Για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας του δικτύου διανομής μέσης τάσης χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα προστασίας και ελέγχου. Αυτά περιλαμβάνουν προστασία υπέρτασης, προστασία γείωσης και διαφορική προστασία. Επιπλέον, τα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της ροής ισχύος, την ανίχνευση σφαλμάτων και τη γρήγορη απομόνωση ελαττωματικών τμημάτων του δικτύου με σκοπό την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και τη βελτίωση της αξιοπιστίας.

Συνολικά το δίκτυο διανομής μέσης τάσης διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους πελάτες και ο σχεδιασμός και η λειτουργία του απαιτούν προσεκτική εξέταση για αποτελεσματικότητα του δικτύου [1,3].

2.4.3.3 Υποσταθμοί Διανομής

Ένας υποσταθμός διανομής είναι ένα βασικό στοιχείο του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνει ισχύ υψηλής τάσης από το σύστημα μεταφοράς και τη μετατρέπει σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης, που συνήθως κυμαίνονται από 2,4kV έως 35kV, τα οποία θα καταλήξουν στους πελάτες μέσω ενός δικτύου διανομής μέσης τάσης. Ο υποσταθμός διανομής περιλαμβάνει επίσης συστήματα προστασίας και ελέγχου για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου.

Η κύρια λειτουργία ενός υποσταθμού διανομής είναι να μειώσει την τάση της εισερχόμενης ισχύος από το σύστημα μεταφοράς σε ένα επίπεδο κατάλληλο για διανομή στους πελάτες. Αυτό

επιτυγχάνεται με τη χρήση μετασχηματιστών ισχύος, οι οποίοι βρίσκονται εντός του υποσταθμού. Οι μετασχηματιστές εντός των υποσταθμών διανομής διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον μετασχηματισμό τάσης. Χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική επαγωγή για να μειώσουν την υψηλή τάση που λαμβάνεται από τις γραμμές μεταφοράς σε χαμηλότερες τάσεις κατάλληλες για διανομή. Προσαρμόζοντας την αναλογία στροφών μεταξύ του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος, οι μετασχηματιστές παρέχουν ρύθμιση τάσης και διασφαλίζουν συνεπή και ασφαλή παροχή ισχύος στους καταναλωτές.

Εκτός από τους μετασχηματιστές, ένας υποσταθμός διανομής περιλαμβάνει μια σειρά από άλλα εξαρτήματα, όπως συσκευές διανομής, συσκευές προστασίας και συστήματα ελέγχου. Αυτά τα εξαρτήματα συνεργάζονται για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της ροής ισχύος μέσω του υποσταθμού, τον εντοπισμό και την απομόνωση βλαβών και την προστασία του δικτύου και των χρηστών του από σφάλματα.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υποσταθμών διανομής με βάση τη λειτουργικότητα και τη θέση εντός του δικτύου διανομής. Αυτοί περιλαμβάνουν πρωτεύοντες και δευτερεύοντες υποσταθμούς διανομής και υποσταθμούς μονάδας. Οι κύριοι υποσταθμοί διανομής λαμβάνουν ισχύ υψηλής τάσης από τις γραμμές μεταφοράς και τη μειώνουν σε επίπεδα μέσης τάσης για περαιτέρω διανομή. Οι δευτερεύοντες υποσταθμοί διανομής μειώνουν περαιτέρω την τάση από μέση σε χαμηλή για την παράδοση στους τελικούς καταναλωτές. Οι υποσταθμοί μονάδων είναι συμπαγείς υποσταθμοί που συνδυάζουν έναν μετασχηματιστή και έναν εξοπλισμό διανομής σε μια ενιαία μονάδα, που συνήθως τοποθετούνται πιο κοντά στους τελικούς χρήστες για τοπική διανομή.

Συνολικά, οι υποσταθμοί διανομής διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ασφαλή και αξιόπιστη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στους πελάτες και ο σχεδιασμός και η λειτουργία τους απαιτούν προσεκτική εξέταση για τη διασφάλιση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας του δικτύου διανομής [1,3].

Συμπερασματικά, το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα κρίσιμο στοιχείο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που επιτρέπει την παράδοση αξιόπιστης και οικονομικά προσιτής ηλεκτρικής ενέργειας σε σπίτια, επιχειρήσεις και βιομηχανίες.

2.5 Κανονισμοί Προστασίας Έναντι Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Παρόλο που οι μόνιμες συνέπειες που προκύπτουν από τα EMF χαμηλής συχνότητας είναι άγνωστες και μη επαληθευμένες, διεθνείς οργανισμοί έχουν θέσει όρια για να διασφαλίσουν την ασφάλεια των ανθρώπων που εργάζονται σε αυτόν τον τομέα και να ελαχιστοποιήσουν την απειλή που συνιστά για την ανθρώπινη υγεία. Αυτή η ενότητα παρέχει τα αποδεκτά όρια έκθεσης για τον πληθυσμό για να εγγυηθεί την ασφάλειά τους, καθώς και τις κατευθυντήριες γραμμές που χρησιμοποιούνται για την καθιέρωσή τους [20,21]. Επιπλέον, θα περιγραφούν τα πρωτόκολλα ασφαλείας που ισχύουν στην Ελλάδα και τις αρμόδιες αρχές που είναι υπεύθυνες για την προστασία του πληθυσμού και την επιβολή των κανονισμών.

I. Κριτήρια για ασφαλή όρια έκθεσης

Η Διεθνής Ένωση Προστασίας από την Ακτινοβολία (IRPA) ίδρυσε τη διεθνή επιτροπή για την προστασία από μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες (ICNIRP) το 1977. Η ICNIRP είναι ένας μη κυβερνητικός οργανισμός υπεύθυνος για την προστασία από τις βλαβερές συνέπειες των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Είναι επίσημα αναγνωρισμένος από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας (ΠΟΥ), την Ευρωπαϊκή Ένωση και το διεθνές γραφείο εργασίας. Το 1988, η ICNIRP εισήγαγε όρια έκθεσης τόσο για το ευρύ κοινό όσο και για τους εργαζομένους που ενδέχεται

να εκτεθούν σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία με συχνότητες που κυμαίνονται από μηδέν έως 300GHz. Αυτό περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εκπέμπονται από κεραίες τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών σταθμών, σταθμούς βάσης κινητών τηλεφώνων, συσκευές ραντάρ, καθώς και ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας που μελετώνται.

Το ICNIRP [26] καθόρισε όρια έκθεσης του ανθρώπου στις οδηγίες του λαμβάνοντας υπόψη τις γνωστές επιπτώσεις των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στο ανθρώπινο σώμα. Ωστόσο, οι μακροπρόθεσμες και αβέβαιες επιπτώσεις των μαγνητικών πεδίων, που συζητούνται στο κεφάλαιο αυτό και δεν έχουν γνωστό μηχανισμό δημιουργίας, καθιστούν αδύνατο τον καθορισμό ορίων έκθεσης με βάση αυτά. Ως εκ τούτου, η ICNIRP στήριξε τις κατευθυντήριες γραμμές της σε μια ολοκληρωμένη ανάλυση της επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με τους πιθανούς κινδύνους για την υγεία από την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Επίσης, έκαναν διάκριση μεταξύ βασικών περιορισμών και επιπέδων αναφοράς, ενώ ανέπτυξαν τις κατευθυντήριες γραμμές για την εφαρμογή περιορισμών στην έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

- Οι χρονικά μεταβαλλόμενοι περιορισμοί έκθεσης για ηλεκτρικά, μαγνητικά ακόμα και ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι οι βασικοί περιορισμοί που βασίζονται σε επιστημονικά αποδεδειγμένες επιπτώσεις στην υγεία και σε βιολογικές μελέτες. Αυτοί οι περιορισμοί καθορίζονται με την ενσωμάτωση σημαντικών παραγόντων ασφάλειας και ποικίλλουν ανάλογα με τη συχνότητα του πεδίου. Οι περιορισμοί καθορίζονται λαμβάνοντας υπόψη φυσικά μεγέθη όπως η μαγνητική επαγωγή (B), η πυκνότητα ρεύματος (J), ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης ενέργειας (SAR) και η πυκνότητας ισχύος (S).
- Τα επίπεδα αναφοράς αναφέρονται στα μέγιστα επιτρεπόμενα επίπεδα έκθεσης στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για το ευρύ κοινό. Αυτά τα επίπεδα χρησιμοποιούνται σε πρακτικές αξιολόγησης και έκθεσης για την αξιολόγηση της πιθανότητας υπέρβασης των πρωταρχικών περιορισμών. Ορισμένα επίπεδα αναφοράς υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μεθόδους μέτρησης και υπολογισμού με βάση τους βασικούς περιορισμούς, ενώ άλλα λαμβάνουν υπόψη τις επιπτώσεις στις αντιλήψεις και τις έμμεσες επιπτώσεις σε άτομα που εκτίθενται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα φυσικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των επιπέδων αναφοράς περιλαμβάνουν την ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E), την ένταση του μαγνητικού πεδίου (H), την μαγνητική επαγωγή (β), την πυκνότητα ισχύος (S) και το ρεύμα ακμής (IL) που μετρούνται ή προέρχονται από υπολογισμούς που βασίζονται σε βασικούς περιορισμούς. Επιπλέον, το ρεύμα επαφής (IC) και η ειδική απορρόφηση ενέργειας (SA) για παλμικά πεδία επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών του παλμικού πεδίου (όπως η διάρκεια παλμού, το πλάτος και η συχνότητα), οι ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος ή αντικειμένου (όπως αγωγιμότητα και διαστάσεις) και τη διάρκεια και τις συνθήκες επαφής.

Σε οποιοδήποτε δεδομένο σενάριο έκθεσης, οι τιμές πολλών φυσικών μεγεθών μπορούν να μετρηθούν ή να υπολογιστούν και να συγκριθούν με τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς. Εάν η μετρούμενη υπολογιζόμενη τιμή είναι εντός του επιπέδου αναφοράς, τότε πληροί τον αντίστοιχο βασικό περιορισμό. Ωστόσο, εάν η τιμή υπερβαίνει το επίπεδο αναφοράς, δε σημαίνει απαραίτητα ότι ο βασικός περιορισμός έχει ξεπεραστεί σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο μέτρησης.

Επιπλέον, οι κατευθυντήριες γραμμές του ICNIRP και τα διεθνή όρια έκθεσης χωρίζονται σε 2 κατηγορίες με βάση τον πληθυσμό που εκτίθεται. Η πρώτη κατηγορία αφορά τον γενικό πληθυσμό και η δεύτερη κατηγορία είναι για όσους εκτίθενται στον επαγγελματικό τους χώρο

σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Οι βασικοί περιορισμοί και τα επίπεδα αναφοράς για τον γενικό πληθυσμό καθορίστηκαν από το ICNIRP και τη σύσταση της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 1999 [27]. Αντίθετα ακόμα οι βασικοί περιορισμοί και τα επίπεδα αναφοράς για τα επαγγελματικώς εκτιθέμενα άτομα περιγράφονται στους πίνακες της οδηγίας του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του συμβουλίου που δημοσιεύθηκαν το 2004 [28].

Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες οδηγίες, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο μόνος θεμελιώδης περιορισμός για πεδία EM 50 Hz αφορά το ρεύμα που προκαλείται στο ανθρώπινο σώμα. Αυτός ο περιορισμός προέρχεται από τιμές κατωφλίου που έχουν καθοριστεί για να παράγουν επιβλαβείς βιολογικές επιδράσεις. Ο πρωταρχικός στόχος του συγκεκριμένου περιορισμού πυκνότητας είναι η προστασία από την άμεση έκθεση στους ιστούς του κεντρικού νευρικού συστήματος στις περιοχές του κεφαλιού και του κορμού του σώματος και περιλαμβάνει έναν παράγοντα ασφαλείας. Οι προδιαγραφές του ICNIRP έχουν καθορίσει αυτόν τον παράγοντα ασφαλείας στο 50 για τον γενικό πληθυσμό, υπονοώντας ότι τα όρια έκθεσης για την ακτινοβολία ΗΜ ήταν 50 φορές χαμηλότερα από τα επίπεδα στα οποία σημειώθηκαν ελάχιστες βιολογικές επιπτώσεις. Για τα επαγγελματικώς εκτιθέμενα άτομα, ο συντελεστής ασφαλείας ορίστηκε στο 10. Έτσι, για τη συχνότητα των 50Hz, ο βασικός περιορισμός για την πυκνότητα ρεύματος που προκαλείται στο ανθρώπινο σώμα ορίστηκε στο 2mA/ για δημόσια προστασία και στα 10mA/ για την επαγγελματική έκθεση.

Σύμφωνα με αυτό ακόμα τα επίπεδα αναφοράς για πεδία EM 50Hz καθορίζονται με τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου και βασίζονται στους θεμελιώδεις περιορισμούς, οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη χειρότερη περίπτωση σύζευξης των πεδίων με το σώμα και παρέχουν πρόσθετη ασφάλεια. Για τη συχνότητα των 50Hz τα επίπεδα αναφοράς για την προστασία του γενικού πληθυσμού ορίζονται στα 5kV/m και 500μΤ. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές για τον γενικό πληθυσμό είναι σημαντικά χαμηλότερες από εκείνες για τους επαγγελματικώς εκτιθέμενους, καθώς λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι ο γενικός πληθυσμός περιλαμβάνει άτομα με συγκεκριμένες ευαισθησίες, όπως ηλικιωμένους, μικρά παιδιά και άτομα με ασθένειες.

II. Όρια Έκθεσης στην Ελλάδα

Σε Συμμόρφωση με την Ελληνική Νομοθεσία ακόμα έχει θεσπιστεί η Κοινή Υπουργική Απόφαση από τα Υπουργεία Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων και Υγείας και Πρόνοιας. Η απόφαση αυτή εκδόθηκε στις 04/11/2016, και είναι τεκμηριωμένη στο Φ.Ε.Κ. Νο 1323, τεύχος δεύτερο. Σκοπός του είναι να παρέχει προστασία στο κοινό από ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας που εκπέμπονται από συσκευές εκπομπής. Η απόφαση βασίστηκε στη Σύσταση του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης (2008/46/EK και 2012/11/EE) [27], η οποία παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον περιορισμό της έκθεσης του κοινού στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εντός του εύρους συχνοτήτων από 0Hz έως 300GHz. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές βασίστηκαν επίσης στις συστάσεις της Διεθνούς Επιτροπής για την Προστασία από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) που εκδόθηκαν το 1998 [26]. Η Κοινή Υπουργική Απόφαση καθορίζει επίπεδα αναφοράς και βασικούς περιορισμούς για τον γενικό πληθυσμό για τον περιορισμό της έκθεσής του σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας. Προσδιορίζει επίσης τις αρμόδιες υπηρεσίες που είναι υπεύθυνες για τη διασφάλιση της προστασίας του κοινού έναντι αυτών των πεδίων.

i. Βασικοί περιορισμοί και επίπεδα αναφοράς

Η Ελληνική Νομοθεσία περιγράφει βασικούς περιορισμούς για την έκθεση του κοινού σε χρονικά μεταβαλλόμενα χαμηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία ακόμα συγκεκριμένα σε συχνότητες έως 100 kHz. Αυτοί οι περιορισμοί αφορούν την πυκνότητα του επαγόμενου ρεύματος και

ευθυγραμμίζονται με τις συστάσεις της ευρωπαϊκής ένωσης. Οι συγκεκριμένες τιμές για αυτούς τους περιορισμούς βρίσκονται στον Πίνακα 2.2 όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 2.2: Βασικοί περιορισμοί νομοθεσίας για τα ΗΜΠ χαμηλών συχνοτήτων[27].

Ζώνη Συχνοτήτων	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)	Πυκνότητα ρεύματος(rms) (mA/)
0 Hz	40	-
>0-1 Hz	-	8
1-4 Hz	-	8/f
4-1000 Hz	-	2
1000 Hz	-	f/500
100 kHz	-	f/500

Η Ελληνική Νομοθεσία ορίζει τα επίπεδα αναφοράς ως τα μέγιστα ασφαλή όρια για την έκθεση του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας. Αυτά τα επίπεδα καθορίζονται με βάση τα μετρούμενα μεγέθη των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων για συχνότητες έως 150 kHz και ευθυγραμμίζονται με τις τιμές που συνιστά η Ευρωπαϊκή Ένωση όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3. Η συμμόρφωση με όλα τα επίπεδα αναφοράς είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι πληρούνται οι βασικοί περιορισμοί που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 2.3: Επίπεδα αναφοράς της ελληνικής νομοθεσίας για τα ΗΜΠ χαμηλών συχνοτήτων[27].

Ζώνη Συχνοτήτων	Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου E (V/m)	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)	Πυκνότητα ρεύματος(rms) (mA/)
0-1 Hz	-	$3,2 \times$	$4 \times$
1-8 Hz	10000	$3,2 \times /$	$4 \times /$
8-25 Hz	10000	$4000/f$	$5000/f$
0.025-0.8 Hz	$250/f$	$4/f$	$5/f$
0.8-3 kHz	$250/f$	5	6,25
3-150 kHz	87	5	6,25

Στην Ελλάδα ακόμα ο γενικός πληθυσμός υπόκειται στα καθιερωμένα όρια έντασης ηλεκτρικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής σε συχνότητα 50 Hz. Αυτά τα όρια είναι κοινώς γνωστά ως 5kV/m για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και 100 μΤ για τη μαγνητική επαγωγή [3].

ii. Ρεύμα Επαφής και Ρεύμα Ακρών

Επιπλέον, για την πρόληψη των κινδύνων που σχετίζονται με ρεύματα επαφής σε συχνότητες έως 100kHz, η ελληνική νομοθεσία συνιστά πρόσθετα επίπεδα αναφοράς. Αυτά τα επίπεδα αναφοράς για το ρεύμα επαφής καθορίζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Επίπεδα αναφοράς για ρεύματα επαφής από αγωγίμα σώματα (f σε kHz) [27].

Ζώνη Συχνοτήτων	Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα επαφής (mA)
el	0,5
2,5 kHz – 100 kHz	0,2f

iii. Έκθεση σε πηγές με πολλαπλές συχνότητες

Γίνεται κατανοητό ότι το ελληνικό σύστημα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί σε συχνότητα 50Hz και ως εκ τούτου, η κύρια φασματική συνιστώσα των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων παρατηρείται τυπικά σε αυτήν τη συχνότητα. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις ακόμα οι μετρήσεις των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων δείχνουν την παρουσία φασματικών συνιστωσών σε άλλες συχνότητες, συνήθως σε αρμονικές (δηλαδή ακέραια πολλαπλάσια) των 50 Hz. Σε τέτοιες περιπτώσεις η ελληνική νομοθεσία [29] λαμβάνει υπόψη τον αντίκτυπο των πεδίων πολλαπλών συχνοτήτων.

iv. Αρμοδιες Υπηρεσίες και Έλεγχοι

Οι αρμοδιότητες της ΕΕΑΕ σχετικά με την προστασία του κοινού και του περιβάλλοντος από τις μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες ορίζονται από την κείμενη νομοθεσία [29] τελικά το γραφείο μη ιοντίζουσας ακτινοβολίας της ελληνικής επιτροπής ατομικής ενέργειας είναι υπεύθυνο για την προστασία του πληθυσμού και του περιβάλλοντος από τις τεχνητά παραγόμενες μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες. Το γραφείο αυτό παρέχει σχετικές πληροφορίες στα ενδιαφερόμενα μέρη διεξάγει εκπαιδευτικά προγράμματα ακόμα παρακολουθεί τις διεθνείς εξελίξεις, συντάσσει ερευνητικές μελέτες και διαδίδει πληροφορίες για την προστασία της υγείας από την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η τήρηση των ορίων ασφαλούς έκθεσης του κοινού ελέγχεται με περιοδικές μετρήσεις ή όποτε κρίνεται απαραίτητο από την ΕΕΑΕ, καθώς και από αρμόδιες υπηρεσίες από διάφορα υπουργεία ακόμα νομαρχιακές αυτοδιοικήσεις ή άλλα εξουσιοδοτημένα συνεργεία. Η ΕΕΑΕ συντονίζει και διανέμει τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται. Η ΕΕΑΕ ελέγχει και μετρά τα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπονται από συσκευές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως γραμμές μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, υποσταθμοί, συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, μηχανήματα και άλλες συσκευές που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας.

Εάν οι μετρήσεις από την ΕΕΑΕ αποκαλύψουν υπερβάσεις των ορίων ασφαλούς έκθεσης, η ΕΕΑΕ ενημερώνει την υπηρεσία που χορήγησε την άδεια εγκατάστασης, η οποία στη συνέχεια ειδοποιεί εγγράφως τον ιδιοκτήτη του εξοπλισμού να λάβει τα κατάλληλα μέτρα. Εάν διαπιστωθεί ξανά με φυσιολογική λειτουργία του ίδιου εξοπλισμού μετά την αρχική ειδοποίηση, η άδεια εγκατάστασης ανακαλείται οριστικά.

Βιβλιογραφία

- [1] Ενημερωτικό έντυπο της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ), “Χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία: Πηγές ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων - Βιολογικές επιπτώσεις - Έλεγχοι από την ΕΕΑΕ”, (2005), Ιστοσελίδα: http://www.eeae.gr/gr/docs/president/_xamilosixna.pdf.
- [2] Πρότυπο ΕΛΟΤ IEC 61786:2003, “Μετρήσεις μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων σε σχέση με την έκθεση των ανθρώπων”.
- [3] Δημήτριος Τσανάκας, “Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία γραμμών, υποσταθμών και συσκευών ηλεκτρικής ενεργείας ως περιβαλλοντικοί παράγοντες”, Πρακτικά Ημερίδας: «Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία: Μύθοι και πραγματικότητα», Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών 1-6-2005.
- [4] E. Karabetsos, G. Filippopoulos, D. Koutounidis, Ch. Govari, N. Skamnakis, “ELF Electric and Magnetic Fields measurements in Greece”, International Seminar on Electromagnetic fields: The Role of Dosimetry in High-Quality EMF Risk Assessment, September 13-15, 2006, Ljubljana-Slovenia, Zagreb -Croatia.
- [5] A. N. Proios, C. D. Halevidis, E. I. Koufakis, and Perikles D. Bourkas, “Magnetic Field Measurements Near Two-Pole-Type Distribution Substations”, IEEE Trans. Power Del., vol. 26, no. 2, Apr. 2011.
- [6] E. Καραμπέτσος, “Ηλεκτρομαγνητικά πεδία: Νομοθετικό πλαίσιο, όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού, αποτελέσματα ελέγχων”, Πρακτικά Ημερίδας: «Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία: Μύθοι και πραγματικότητα», Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών 1-6-2005, σελ. 57-70.
- [7] Transpower New Zealand Ltd, Fact Sheet 2, “The nature of electric and magnetic fields”, (2009).
- [8] M.L. Hiles, R.G. Olsen, K.C. Holte, D.R. Jensen, and K.L. Griffing, “Power Frequency Magnetic Field Management Using a Combination of Active and Passive Shielding Technology”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13(1), pp.171- 179, Jan. 1998.
- [9] A.S. Fraag, A. Al-Shehri, J.M. Bakhashwain, T.C. Cheng, and D. Penn, “Impact of electromagnetic field management on the design of 500 kV transmission lines”, Electric Power System Research, vol. 40, pp. 203-238, 1997.
- [10] O.B.C. Miguel, C.A. Melo Luiz Fonseca, E. Fontans, and S.R. Naidu, “Electric and magnetic fields of compact transmission lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14(1), pp. 200- 204, Jan. 1999.
- [11] P. Villa, A. Bertazzi, and M. Leva, “Compact transmission line with inverted delta configuration”, Cigre 2002 conference, 2002, Paper- 22-103, pp.1-4.
- [12] Xu-zheng, L. Xi-dong, Z. Rong, and D. Xin-zhou, “Analysis on electric parameter characteristics of compact transmission lines in China”, Power System Technology, vol. 31(1), pp. 16-19, 24, Jan. 2007.
- [13] G. Zhi-hong, S. Wei-min, G. Bo, Y. Jin-xia, and Z. Zhen-hua, “A study on restriction of secondary arc current and time coordination of single phase reclosing for 500 kV compact transmission line from Yuncheng to Tai'an”, Power System Technology, vol. 30(17), pp. 79-83, Sep. 2006.
- [14] S. Fang-yin, “Phase conductor configuration and power frequency electromagnetic environment of UHV transmission lines in China”, Power System Technology, vol. 29(8), pp. 1-7, Apr. 2005.
- [15] Y. You-wen, and J. Yong-chun, “Key technologies for 500 kV compact transmission line from Changping to Fangshan”, Power System Technology, vol. 27(7), pp. 75-77, Jul. 2003.

- [16] S. Yin-biao, and Z. Cheng-hua, "Study and implementation of 500 kV compact power transmission line with double circuits on a same tower in China", *Power System Technology*, vol. 26(4), pp. 49-51, Apr 2002.
- [17] D. Tsanakas, G. Filippopoulos, J. Voyatzakis, G. Kouvarakis, "Compact and optimum phase conductor arrangement for the reduction of electric and magnetic fields of overhead lines", *CIGRE Report*, 36-103, 2000.
- [18] Tsanakas D., Tsalemis D., Agoris D., Voyatzakis J., "Optimum arrangements of the phase conductors of overhead transmission lines for the magnetic field minimization", *CIGRE Report*, 36-101, Paris, France, 1994.
- [19] T. Matsumoto, H. Hirata, H. Tarao, N. Hayashi and K. Isaka, "Characteristics of magnetic field distribution under two double circuit power line", *17th International Symposium on High Voltage Engineering, (ISH2011)*, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [20] IEEE Magnetic Fields Task Force Report, "Correction to A Protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields", *Ibid* 9, p. 606 (1994).
- [21] M. A. Abd-Allah, "Effect of Conductor Heating on Magnetic Field Distribution Near Power Lines", *13th International Symposium on High Voltage Engineering, (ISH2003)*, Amsterdam, Netherlands, August, 2003.
- [22] M. Echrich, L.O. Fichte, "Magnetic field reduction of twisted three phase power cables of finite length by specific phase mixing", *International symposium on Electromagnetic Compatibility*, p.448-451, 1999.
- [23] J.R. Stewart, S. J. Dale, K. W.Klein, "Magnetic field reduction using high phase order lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, April 1993.
- [24] W.T. Kaune and L.E. Zaffanella, "Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol7, No.4, October 1992.
- [25] R. Raschen, "Example of tower height regarding EMF", *37th CIGRE Session, Paris France, 30.08.-5.9.1998, Vol I*, pp.70-71
- [26] ICNIRP Guidelines, International Committee for Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz), *Health Physics*, April 1998; 74 (No 4): 494-522.
- [27] Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης: Σύσταση του Συμβουλίου της 12ης Ιουλίου 1999 περί του περιορισμού της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0Hz – 300GHz), 1999/519/EK, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L199, σελ. 59 – 70, 30/7/1999.
- [28] Οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου, Περί των ελαχίστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία), Οδηγία 2013/35/EK, Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, L179/1, σελ. 1 – 21, 26/6/2013.
- [29] Κοινή Υπουργική Απόφαση, Αριθμός 3060 (ΦΟΡ) 238, ΦΕΚ 512 / Β / 25.04.02: «Μέτρα προφύλαξης του κοινού από τη λειτουργία διατάξεων εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βιολογική Επίδραση των Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Παρότι η εμφάνιση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει γίνει από τον 19^ο αιώνα, μόνο τις τελευταίες δεκαετίες η επιστημονική κοινότητα ασχολείται ενδελεχώς με τις ενδεχόμενες βιολογικές επιδράσεις που μπορεί να προκληθούν από τα εξαιρετικά χαμηλόσυχνα πεδία και κυρίως από τα μαγνητικά. Τα συμπεράσματα που έχουν προκύψει από πολλές μελέτες και έρευνες συνεκτιμώνται και αναλύονται από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα και τους αρμόδιους διεθνείς οργανισμούς και συντελούν στη θέσπιση κανονισμών και οδηγιών για τα αποδεκτά όρια του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, τόσο για τη συνεχή έκθεση του κοινού, όσο και για την έκθεση των εργαζομένων κατά την επαγγελματική τους ενασχόληση.

Οι βιολογικές επιδράσεις που είναι γνωστές για τις μη ιοντίζουσες ακτινοβολίες είναι αυτές που προκύπτουν κατά τη διάρκεια ή σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά το πέρας της έκθεσης. Η μη ιοντίζουσα, ή γνωστή και ως ηλεκτρομαγνητική, είναι η ακτινοβολία που μεταφέρει σχετικά μικρή ενέργεια που δεν προκαλεί ιοντισμό, είναι ικανή όμως να προκαλέσει ηλεκτρικές, χημικές και θερμικές επιδράσεις στον οργανισμό.

3.1 Βραχυχρόνιες επιδράσεις

3.1.1 Άμεσες επιδράσεις

Τα βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (EMF) εξαρτώνται από τη συχνότητα, την ένταση και τη διάρκεια της έκθεσης. Τα EMF παράγονται από μια σειρά πηγών, συμπεριλαμβανομένων των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας των συσκευών και των ηλεκτρονικών συσκευών.

Η έκθεση σε EMF υψηλής συχνότητας, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές, κινητά τηλέφωνα και φούρνους μικροκυμάτων, μπορεί να προκαλέσει βραχυπρόθεσμα αποτελέσματα όπως:

1. Θερμικές Επιδράσεις

Οι θερμικές επιδράσεις είναι μία από τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Αυτά τα πεδία μπορούν να δημιουργήσουν θερμότητα στους ιστούς του σώματος, η οποία μπορεί να προκαλέσει θερμικές επιδράσεις όπως δερματικά εγκαύματα, βλάβες στα μάτια και άλλους θερμικούς τραυματισμούς [1,2].

Η ποσότητα θερμότητας που εμφανίζεται στους ιστούς του σώματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η συχνότητα, η ένταση και η διάρκεια της έκθεσης στο πεδίο. Οι υψηλότερες συχνότητες και οι υψηλότερες εντάσεις EMF είναι πιο πιθανό να προκαλέσουν θερμικά αποτελέσματα. Η ποσότητα θερμότητας εξαρτάται επίσης από τα χαρακτηριστικά του ιστού που εκτίθεται. Για παράδειγμα, τα μάτια και οι όρχις είναι πιο ευαίσθητα σε θερμικές επιδράσεις επειδή δεν έχουν καλή παροχή αίματος για τη διάχυση της θερμότητας [1].

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα επίπεδα EMF που συναντώνται στην καθημερινή ζωή, όπως αυτά από κινητά τηλέφωνα, Wi-Fi και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, είναι γενικά πολύ χαμηλά για να προκαλέσουν σημαντικά αποτελέσματα θέρμανσης. Ωστόσο, τα άτομα που εργάζονται με EMF υψηλής συχνότητας, όπως εκείνα των τηλεπικοινωνιών ή των ραδιοηλεκτρονικών βιομηχανιών, ενδέχεται να διατρέχουν υψηλότερο κίνδυνο θερμικών επιπτώσεων και πρέπει να ακολουθούν τις οδηγίες ασφάλειας για να ελαχιστοποιήσουν την έκθεση τους[3,4].

2. Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί χαμηλής συχνότητας (EMPs) μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρικά ρεύματα στο σώμα, τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να προκαλέσουν διέγερση των νεύρων και των μυών. Αυτό συμβαίνει όταν τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία προκαλούν μικρά ηλεκτρικά ρεύματα στο σώμα, τα οποία μπορούν να διεγείρουν τα νευρικά και μυϊκά κύτταρα[1,3].

Το επίπεδο διέγερσης των νεύρων και των μυών εξαρτάται από την ένταση, τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης σε EMP. Σε χαμηλά επίπεδα έκθεσης σε EMP, η διέγερση των νεύρων και των μυών μπορεί να προκαλέσει ήπιες επιδράσεις, όπως μυϊκές συσπάσεις και αισθήματα μυρμηγκιάσματος [4]. Σε υψηλότερα επίπεδα έκθεσης σε EMP, η διέγερση των νεύρων και των μυών μπορεί να οδηγήσει σε πιο σοβαρές επιδράσεις, όπως μυϊκές συσπάσεις, τρόμο, ακόμα και καρδιακή αρρυθμία ή επιληπτικές κρίσεις σε ακραίες περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα της διέγερσης των νεύρων και των μυών μπορεί επίσης να εξαρτώνται από τη θέση της έκθεσης σε EMP. Για παράδειγμα, η έκθεση σε EMP κοντά στον εγκέφαλο ή την καρδιά μπορεί να έχει πιο σοβαρές επιπτώσεις από την έκθεση σε άλλα μέρη του σώματος.

Συνολικά, η διέγερση των νεύρων και των μυών από EMP χαμηλής συχνότητας μπορεί να έχει δυνητικά σοβαρές συνέπειες, ιδιαίτερα σε υψηλά επίπεδα έκθεσης. Τα άτομα που εκτίθενται σε EMP χαμηλής συχνότητας θα πρέπει να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας για να περιορίσουν την έκθεσή τους και να προστατευθούν από πιθανή βλάβη [1,2,3].

3. Η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς χαμηλής συχνότητας υψηλής ισχύος (EMPs) μπορεί να προκαλέσει θέρμανση των ιστών του σώματος, ιδιαίτερα σε περιοχές του σώματος με υψηλή περιεκτικότητα σε νερό όπως το δέρμα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ερεθισμό του δέρματος και εγκαύματα. Η σοβαρότητα του ερεθισμού του δέρματος και των εγκαυμάτων εξαρτάται από την ένταση, τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης σε EMP.

Σε χαμηλά επίπεδα έκθεσης σε EMP, ο ερεθισμός του δέρματος μπορεί να εκδηλωθεί ως ερυθρότητα, κνησμός ή εξάνθημα. Σε υψηλότερα επίπεδα έκθεσης, το δέρμα μπορεί να εμφανίσει φουσκάλες και μπορεί να εμφανιστούν επώδυνα εγκαύματα. Η σοβαρότητα του ερεθισμού του δέρματος και των εγκαυμάτων μπορεί επίσης να εξαρτηθεί από τη διάρκεια της έκθεσης στο EMP.

Οι επιπτώσεις του ερεθισμού του δέρματος και των εγκαυμάτων μπορεί επίσης να εξαρτώνται από τη θέση της έκθεσης στο EMP. Για παράδειγμα, η έκθεση σε EMP κοντά στο δέρμα μπορεί να έχει πιο σοβαρές επιπτώσεις από την έκθεση σε άλλα μέρη του σώματος.

Τα άτομα που εκτίθενται σε EMP χαμηλής συχνότητας θα πρέπει να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας για να περιορίσουν την έκθεσή τους και να προστατευθούν από πιθανή βλάβη, ιδιαίτερα εάν εργάζονται με πηγές EMP υψηλής ισχύος [4]. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση προστατευτικού ρουχισμού και εξοπλισμού, τον περιορισμό της διάρκειας της έκθεσης και την τήρηση των καθιερωμένων πρωτοκόλλων ασφαλείας.

4. Οπτικές διαταραχές

Η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς χαμηλής συχνότητας (EMPs) μπορεί να προκαλέσει οπτικές διαταραχές, ιδιαίτερα σε άτομα που έχουν προδιάθεση για φωτοευαίσθητη επιληψία. Αυτές οι οπτικές διαταραχές μπορεί να περιλαμβάνουν την εμφάνιση λάμπων φωτός ή προσωρινή τύφλωση.

Η φωτοευαίσθητη επιληψία είναι μια κατάσταση κατά την οποία οι επιληπτικές κρίσεις προκαλούνται από οπτικά ερεθίσματα, όπως φώτα που αναβοσβήνουν. Η έκθεση σε EMP χαμηλής συχνότητας μπορεί επίσης να προκαλέσει επιληπτικές κρίσεις σε άτομα με αυτήν την πάθηση.

Η σοβαρότητα των οπτικών διαταραχών από την έκθεση σε EMP χαμηλής συχνότητας εξαρτάται από την ένταση, τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης, καθώς και από την ατομική ευαισθησία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι επιπτώσεις των οπτικών διαταραχών μπορεί να είναι προσωρινές, ενώ σε άλλες μπορεί να είναι μόνιμες.

Τα άτομα που έχουν προδιάθεση για φωτοευαίσθητη επιληψία ή έχουν ιστορικό επιληπτικών κρίσεων θα πρέπει να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας για να περιορίσουν την έκθεση τους σε EMP χαμηλής συχνότητας, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου υπάρχουν πηγές EMP υψηλής ισχύος [5,6]. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αποφυγή έκθεσης σε φώτα που αναβοσβήσουν και άλλα οπτικά ερεθίσματα που μπορούν να προκαλέσουν επιληπτικές κρίσεις καθώς και τη χρήση προστατευτικού εξοπλισμού κατά την εργασία με πηγές EMP υψηλής ισχύος.

5. Πονοκέφαλοι και ζαλάδες

Μερικά άτομα μπορεί να εμφανίσουν πονοκεφάλους και ζάλη μετά από έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς χαμηλής συχνότητας (EMPs), αν και τα στοιχεία για αυτό είναι περιορισμένα. Η σοβαρότητα αυτών των συμπτωμάτων εξαρτάται από την ένταση, τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης σε EMP, καθώς και από την ατομική ευαισθησία.

Οι πονοκέφαλοι και η ζάλη μπορεί επίσης να είναι συμπτώματα άλλων καταστάσεων, όπως οι ημικρανίες ή ίλιγγος, και μπορεί να μην σχετίζονται άμεσα με την έκθεση σε EMP. Επομένως, είναι σημαντικό να αποκλειστούν άλλες πιθανές αιτίες πριν αποδοθούν αυτά τα συμπτώματα σε έκθεση σε EMP χαμηλής συχνότητας.

Συνολικά, τα στοιχεία για τις βραχυπρόθεσμες επιδράσεις των EMP χαμηλής συχνότητας στους πονοκεφάλους και τη ζάλη είναι περιορισμένα και απαιτείται περισσότερη έρευνα για την πλήρη κατανόηση των πιθανών κινδύνων και των συνεπειών στην υγεία από την έκθεση σε EMP χαμηλής συχνότητας.

6. Διαταραχή του ηλεκτρονικού εξοπλισμού

Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί χαμηλής συχνότητας (EMPs) μπορούν επίσης να διαταράξουν τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως ιατρικές συσκευές, υπολογιστές και συστήματα επικοινωνίας. Τα EMP είναι πιθανό να προκαλέσουν ηλεκτρικά ρεύματα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, τα οποία ενδέχεται να υπερφορτώσουν και να καταστρέψουν το κύκλωμα.

Οι επιπτώσεις των EMP στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό εξαρτώνται από την ένταση, τη συχνότητα και τη διάρκεια της έκθεσης σε EMP, καθώς και από την ευαισθησία του ηλεκτρονικού εξοπλισμού σε EMP. Ορισμένος ηλεκτρονικός εξοπλισμός έχει σχεδιαστεί για να είναι πιο ανθεκτικός σε EMPs από άλλους και επιτρέπεται να διαθέτει θωράκιση ή άλλα προστατευτικά μέτρα για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου ζημιάς από τα EMP.

Η έκθεση σε EMP μπορεί επίσης να έχει ως αποτέλεσμα παροδικά αποτελέσματα στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως προσωρινές δυσλειτουργίες ή σφάλματα, αντί για μόνιμη βλάβη. Ωστόσο, ακόμη και παροδικές επιδράσεις είναι πιθανό να είναι προβληματικές, ιδιαίτερα σε κρίσιμα συστήματα όπως ιατρικές συσκευές ή δίκτυα επικοινωνίας.

3.1.2 Έμμεσες επιδράσεις

Εκτός από τις άμεσες επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών παλμών χαμηλής συχνότητας (EMPs) στο ανθρώπινο σώμα και στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, τα EMPs ενδέχεται επίσης να έχουν έμμεσες επιπτώσεις σε υποδομές και συστήματα.

Για παράδειγμα, τα EMP είναι δυνατόν να προκαλέσουν διακοπές ρεύματος διακόπτοντας το ηλεκτρικό δίκτυο ή καταστρέφοντας τον εξοπλισμό παραγωγής ενέργειας. Αυτό είναι πιθανό

να οδηγήσει σε απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας και βασικών υπηρεσιών, όπως θέρμανση, ψύξη και συστήματα επικοινωνίας.

Οι διακοπές ρεύματος που προκαλούνται από το EMP μπορούν επίσης να έχουν κλιμακωτές επιπτώσεις σε άλλα συστήματα υποδομής ζωτικής σημασίας, όπως η επεξεργασία νερού και λυμάτων, οι μεταφορές και οι εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης. Η απώλεια ρεύματος ενδέχεται να οδηγήσει σε έλλειψη πρόσβασης σε καθαρό νερό, διακοπές στη μεταφορά και αδυναμία παροχής ιατρικής περίθαλψης.

Οι διαταραχές που προκαλούνται από το EMP μπορούν επίσης να έχουν οικονομικές συνέπειες, ιδιαίτερα σε βιομηχανίες που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως η χρηματοδότηση, οι μεταφορές και η κατασκευή. Οι διαταραχές σε αυτούς τους κλάδους μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια θέσεων εργασίας και μειωμένη οικονομική δραστηριότητα.

Όταν ένας ανθρώπινος οργανισμός ο οποίος είναι και ηλεκτρικά μονωμένος ως προς τη γη, βρίσκεται εντός ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου και έρχεται σε επαφή με ένα γειωμένο αντικείμενο, τότε προκαλείται η εμφάνιση σπινθηρισμού στο σημείο επαφής τους. Εάν το ηλεκτρικό πεδίο (πριν την παρουσία του ανθρώπου) ξεπερνά τα 5kV/m, είναι πολύ πιθανό το φαινόμενο αυτό να είναι ενοχλητικό. Ομοίως, όταν ένας άνθρωπος αγγίζει ένα αγείοτο μεταλλικό αντικείμενο, παρουσία ηλεκτρικού πεδίου, είναι πιθανό να προκύψουν σπινθηρισμοί [1,2]. Το μέγεθος της ενόχλησης σε αυτές τις περιπτώσεις εξαρτάται και από το μέγεθος του αντικειμένου.

Το παραπάνω φαινόμενο είναι απόρροια των ρευμάτων επαφής (contact currents) τα οποία ρέουν στον ανθρώπινο οργανισμό, όταν ο άνθρωπος έρχεται σε επαφή με αγώγιμο αντικείμενο, το οποίο και φέρει το επαγόμενο φορτίο. Αυτά τα ρεύματα επαφής είναι σημαντικά γιατί συχνά παράγουν υψηλές πυκνότητες ρεύματος κοντά στο σημείο επαφής, δηλαδή η επαφή αυτή που δημιουργείται μπορεί να είναι αρκετά ενοχλητική και σε ορισμένες περιπτώσεις αρκετά επίπονη. Επομένως, συνάγεται το συμπέρασμα πως τα μέγιστα ρεύματα επαφής αναπτύσσονται με την επαφή καλά γειωμένων ατόμων με μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα καλά μονωμένα ως προς τη γη.

Σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα, εξίσου σημαντική μπορεί να είναι και η αλληλεπίδραση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων με τη λειτουργία εμφυτευμένων καρδιακών βηματοδοτών ή με άλλα εμφυτεύματα στο ανθρώπινο σώμα. Αν και έχουν αναφερθεί παλαιότερα παρεμβολές σε κάποιους τύπους βηματοδοτών από ηλεκτρικά πεδία μεγαλύτερα από 2kV/m και από μαγνητικά πεδία μεγαλύτερα από 20μT στα 50Hz, δεν αναμένονται συνήθως προβλήματα σε τόσο χαμηλές τιμές. Οι τιμές των πεδίων που δημιουργούν παρεμβολές διαφέρουν ανάλογα με την κατασκευή της συσκευής, αλλά είναι συνήθως πολύ υψηλότερες από αυτές που εμφανίζονται συνήθως. Οι σύγχρονοι βηματοδότες όμως είναι έτσι σχεδιασμένοι ώστε να εξασφαλίζουν τη λειτουργία τους ακόμα και αν βρεθούν σε ισχυρά ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία.

Τέλος, ως έμμεση συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί και η επίδραση των χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε οθόνες. Πιο συγκεκριμένα, τα μαγνητικά πεδία πολλές φορές επηρεάζουν την ποιότητα της εικόνας στις οθόνες ηλεκτρονικών υπολογιστών καθοδικών σωλήνων. Αυτό μπορεί να προκύψει με μαγνητικά πεδία της τάξης του 1μT. Οι οθόνες υγρών κρυστάλλων, πλάσματος και άλλων σύγχρονων τεχνολογιών δεν εμφανίζουν τέτοια προβλήματα.

Συνολικά, οι έμμεσες επιπτώσεις των EMP χαμηλής συχνότητας μπορεί να είναι σημαντικές, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα EMP υψηλής ισχύος. Η προστασία κρίσιμων υποδομών και συστημάτων από EMPs αποτελεί σημαντικό μέρος της διασφάλισης της ασφάλειας και της

ασφάλειας της κοινωνίας. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την εφαρμογή θωράκισης EMP, εφεδρικών συστημάτων ισχύος και σχεδίων έκτακτης ανάγκης για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων των διαταραχών που προκαλούνται από το EMP.

3.1.3 Μακροχρόνιες επιδράσεις

Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών παλμών χαμηλής συχνότητας (EMPs) δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητές καθώς η έρευνα στον τομέα αυτό βρίσκεται σε εξέλιξη. Ωστόσο, ορισμένες μελέτες υποδηλώνουν ότι η παρατεταμένη έκθεση σε EMP χαμηλής συχνότητας μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες για την υγεία, όπως αυξημένο κίνδυνο ορισμένων τύπων καρκίνου, καθώς και νευρολογικά και καρδιαγγειακά προβλήματα. Για να γίνει ανάλυση των επιδράσεων που έχουν τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία στον ανθρώπινο οργανισμό πραγματοποιούνται πολλές έρευνες σε διάφορους τομείς της επιστήμης, όπως επιδημιολογικές, εργαστηριακές, κλινικές κτλ. Τα αποτελέσματα από αυτές τις έρευνες αξιολογούνται από ειδικές επιτροπές αρμόδιων διεθνών φορέων όπως ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από Μη Ιοντίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP), καθώς και από εθνικούς φορείς, όπως π.χ. το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (NRC) των ΗΠΑ, το Εθνικό Συμβούλιο Ραδιολογικής Προστασίας (NRPB) της Μεγάλης Βρετανίας κ.α.

- **Διαφοροποίηση του ανθρώπινου μυελού των βλαστικών/προγονικών κυττάρων**

Τα ανθρώπινα στρωματικά κύτταρα μυελού των οστών (hBMSCs, επίσης γνωστά ως μεσεγχευματικά βλαστοκύτταρα που προέρχονται από μυελό των οστών) είναι ένας πληθυσμός προγονικών κυττάρων που περιέχουν ένα υποσύνολο σκελετικών βλαστοκυττάρων (hSSCs), ικανά να αναδημιουργήσουν χόνδρο, οστό, στρώμα που υποστηρίζει την αιμοποίηση και τα μυελολοποκύτταρα. Ως εκ τούτου, έχουν γίνει μια σημαντική πηγή για την ανάπτυξη στρατηγικών για την αναγεννητική ιατρική και τη μηχανική ιστών λόγω των δυνατοτήτων αυτοανανέωσης και διαφοροποίησης τους. Η διαφοροποίηση των SSCs/BMSCs εξαρτάται από την έκθεση σε βιοφυσικά και βιοχημικά ερεθίσματα που ευνοούν την πρόωμη και ταχεία ενεργοποίηση της *in vivo* διαδικασίας επιδιόρθωσης ιστών. Η έκθεση σε εξωγενή ερεθίσματα όπως ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (EMF) μπορεί να προωθήσει τη διαφοροποίηση των SSCs/BMSCs μέσω της δυναμικής των ιόντων και των μικρών μορίων σηματοδότησης[2]. Η πλασματική μεμβράνη θεωρείται συχνά ότι είναι ο κύριος στόχος για τα σήματα EMF και τα περισσότερα αποτελέσματα υποδεικνύουν μια επίδραση στον ρυθμό σύνδεσης ιόντων λόγω μιας θέσης υποδοχέα που δρα ως διαμορφωτής των αναταράξεων σηματοδότησης. Οι ροές ιόντων εμπλέκονται στενά στον έλεγχο της διαφοροποίησης καθώς τα βλαστοκύτταρα κινούνται και αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις για να σχηματίσουν ιστούς και όργανα. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο επηρεάζει πολυάριθμες βιολογικές λειτουργίες όπως η γονιδιακή έκφραση, η μοίρα των κυττάρων και η κυτταρική διαφοροποίηση, αλλά θα προκαλέσει αυτά τα αποτελέσματα μόνο σε συγκεκριμένο εύρος χαμηλών συχνοτήτων καθώς και χαμηλών πλατών. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει αναφερθεί ότι είναι αποτελεσματικό στην ενίσχυση της οστεογένεσης και της χονδρογένεσης των hSSC/BMSCs χωρίς τεκμηριωμένα αρνητικά αποτελέσματα [2].

- **Κατακερματισμός DNA σε ανθρώπινους ινοβλάστες κάτω από έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας**

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF-EMFs) αναφέρθηκαν ότι επηρεάζουν την ακεραιότητα του DNA σε ανθρώπινα κύτταρα με

στοιχεία που βασίζονται στην ανάλυση Comet. Αυτά τα ευρήματα συζητήθηκαν έντονα για δύο βασικούς λόγους. Η έλλειψη αναπαραγωγιμότητας και η απουσία μιας εύλογης επιστημονικής λογικής για το πως τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία θα μπορούσαν να βλάψουν το DNA. Ξεκινώντας από μια αντιγραφή των σχετικών πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε μελέτη με σκοπό να διευκρινιστεί η ύπαρξη και να διερευνηθεί η προέλευση και η φύση των επαγόμενων επιδράσεων DNA από ELF-EMF [3]. Τα δεδομένα επιβεβαίωσαν ότι η διακεκομμένη (αλλά όχι συνεχής) έκθεση ανθρώπινων πρωτογενών ινοβλαστών σε EMF 50Hz σε πυκνότητα ροής 1mT προκαλεί μια ελαφρά αλλά σημαντική αύξηση του κατακερματισμού του DNA στον προσδιορισμό Comet, και παρέχει τα πρώτα στοιχεία γι' αυτό που προκαλείται από το μαγνητικό και όχι από το ηλεκτρικό πεδίο. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι οι αποκρίσεις που προκαλούνται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στον προσδιορισμό Comet εξαρτώνται από τον πολλαπλασιασμό των κυττάρων, υποδηλώνοντας ότι ενδέχεται να επηρεαστούν οι διαδικασίες αντιγραφής του DNA και όχι το ίδιο το DNA. Συνεπώς, τα φαινόμενα Comet συσχετίστηκαν με μείωση των ενεργά αναδιπλασιαζόμενων κυττάρων και ταυτόχρονη αύξηση των αποπτωτικών κυττάρων σε εκτεθειμένες καλλιέργειες, ενώ μια συνδυασμένη δοκιμή Frg-Comet απέτυχε να παράγει στοιχεία για μια αξιοσημείωτη συμβολή στην οξειδωτική βλάβη της βάσης του DNA. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα που προκαλούνται από το ELF-EMF στον προσδιορισμό Comet μπορούν να αναπαραχθούν υπό συγκεκριμένες συνθήκες και μπορούν να εξηγηθούν από μικρές διαταραχές στις διαδικασίες της φάσης S και περιστασιακής πυροδότησης απόπτωσης και όχι από τη δημιουργία βλάβης στο DNA [3].

- **Καρκίνος**

Υπάρχουν ορισμένα στοιχεία που υποδηλώνουν ότι η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς χαμηλής συχνότητας (EMPs) μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο ανάπτυξης ορισμένων τύπων καρκίνου. Ωστόσο, η σχέση μεταξύ της έκθεσης σε EMP και του καρκίνου δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητή και απαιτείται περισσότερη έρευνα για τον προσδιορισμό των ακριβών μηχανισμών με τους οποίους τα EMPs μπορεί να συμβάλλουν στον καρκίνο. Αμφιλεγόμενες, συγκλονιστικές και συχνά αντιφατικές επιστημονικές αναφορές έχουν πυροδοτήσει ενεργές συζητήσεις σχετικά με τις βιολογικές επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (EMFs) στη βιβλιογραφία και τα μέσα μαζικής ενημέρωσης τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε σύγχυση και απόσπαση της προσοχής, εμποδίζοντας στη συνέχεια την ανάπτυξη ενός μονοσήμαντου συμπεράσματος σχετικά με τους πραγματικούς κινδύνους που προκαλούνται από τα EMF στους ανθρώπους.

Ορισμένες μελέτες έχουν βρει μια συσχέτιση μεταξύ της έκθεσης σε EMP χαμηλής συχνότητας και ενός αυξημένου κινδύνου ορισμένων τύπων καρκίνου, συμπεριλαμβανομένης της λευχαιμίας, του καρκίνου του εγκεφάλου και του καρκίνου του μαστού.

- Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλές δημοσιεύσεις που υποδεικνύουν ότι το EMF μπορεί να προκαλέσει απόπτωση και θραύσματα κλώνου DNA στα κύτταρα. Από την άλλη πλευρά, αυτές οι επιδράσεις θα μπορούσαν μάλλον να είναι ευεργετικές, καθώς θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά για τη θεραπεία διαφόρων διαταραχών, συμπεριλαμβανομένου του καρκίνου. Γίνεται μια ανασκόπηση διαφόρων επιδημιολογικών μελετών σχετικά με τις επιδράσεις των μη ιονιζόντων EMFs σε κύτταρα και όργανα, συμπεριλαμβανομένων των συνεπειών της έκθεσης στο φάσμα ηλεκτρομαγνητικών χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων. Έμφαση δίνεται στην

ανάλυση των πρόσφατων δεδομένων σχετικά με τον ρόλο των EMF στην πρόκληση οξειδωτικού στρες και της βλάβης του DNA. Επιπλέον, έχει γίνει συζήτηση για τον αντίκτυπο του EMF στο αναπαραγωγικό σύστημα, καθώς και η σχέση μεταξύ ακτινοβολίας και καρκίνου του αίματος. Όπως γίνεται αντιληπτό οι μελέτες έχουν προτείνει ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας (ELF-EMF) μπορεί να επηρεάσουν τις φυσιολογικές λειτουργίες σε ζωικά μοντέλα. Ωστόσο, επιδημιολογικές μελέτες που διερευνούν τη συσχέτιση του ELF-EMF με την ευαισθησία στον καρκίνο δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Από την έρευνα προέκυψε ότι αυξημένη ευαισθησία στον καρκίνο εντοπίστηκε στον πληθυσμό που εκτέθηκε σε ELF-EMF. Στις στρωματοποιημένες αναλύσεις αυξημένος κίνδυνος βρέθηκε στη Βόρεια Αμερική, ιδιαίτερα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Ωστόσο, μελέτες από την Ευρώπη αντικρούουν αυτά τα αποτελέσματα. Επιπλέον, βρέθηκε ότι ο υψηλότερος κίνδυνος σχετίζεται στατιστικά σημαντικά με τον οικιακό εκτεθειμένο πληθυσμό. Ακόμη διαπιστώθηκε αυξημένος κίνδυνος καρκίνου σε έρευνες βασισμένες σε συνεντεύξεις. Σε μελέτες που βασίζονται σε μετρήσεις συσκευών, διαπιστώθηκε ελαφρά αυξημένος κίνδυνος μόνο στον προ εμμηνόπαυσιακό καρκίνο μαστού. Η μετά-ανάλυση υποδηλώνει ότι τα ELF-EMF συνδέονται με τον κίνδυνο καρκίνου, κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε οικιακούς εκτεθειμένους πληθυσμούς [4, 5, 6].

- **Παιδική Λευχαιμία**

Η παιδική λευχαιμία είναι ένας τύπος καρκίνου που επηρεάζει τον μυελό των οστών και τα κύτταρα του αίματος στα παιδιά. Η ακριβής αιτία της παιδικής λευχαιμίας δεν είναι καλά κατανοητή, αλλά οι ερευνητές έχουν διερευνήσει διάφορους πιθανούς παράγοντες κινδύνου, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (EMF) από γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος και άλλες πηγές.

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία παράγονται από την κίνηση του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος και οι ηλεκτρικές συσκευές, όπως οι συσκευές, παράγουν EMF χαμηλής συχνότητας. Ορισμένες μελέτες έχουν διερευνήσει την πιθανή σχέση μεταξύ των EMF και της παιδικής λευχαιμίας, αλλά τα αποτελέσματα ήταν ασαφή και αντιφατικά.

Ο Διεθνής Οργανισμός Έρευνας για τον Καρκίνο (IARC), ένας εξειδικευμένος οργανισμός του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (ΠΟΥ), έχει ταξινομήσει τα μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας ως «πιθανώς καρκινογόνα για τον άνθρωπο» με βάση περιορισμένα στοιχεία. Αυτή η ταξινόμηση οφειλόταν κυρίως σε μελέτες που υποδηλώνουν ασθενή συσχέτιση μεταξύ των EMF και της παιδικής λευχαιμίας [7,8].

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα στοιχεία που συνδέουν τα EMF με την παιδική λευχαιμία είναι ακόμα αβέβαια και ο συνολικός κίνδυνος, εάν υπάρχει, θεωρείται πολύ χαμηλός. Πολλές μελέτες μεγάλης κλίμακας απέτυχαν να δημιουργήσουν μια σαφή και συνεπή σχέση μεταξύ της έκθεσης στο EMF και της παιδικής λευχαιμίας. Ορισμένες μελέτες έχουν αναφέρει μια ελαφρά αύξηση του κινδύνου, ενώ άλλες δεν έχουν βρει καμία απολύτως συσχέτιση.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι η παιδική λευχαιμία είναι μια σχετικά σπάνια ασθένεια και η συντριπτική πλειονότητα των παιδιών που εκτίθενται σε EMF δεν αναπτύσσουν λευχαιμία. Άλλοι παράγοντες, όπως η γενετική προδιάθεση και η έκθεση σε ορισμένες λοιμώξεις, πιστεύεται ότι παίζουν σημαντικότερο ρόλο στην ανάπτυξη της παιδικής λευχαιμίας.

Για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανή έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να ληφθούν ορισμένα προληπτικά μέτρα, όπως η τήρηση απόστασης ασφαλείας από γραμμές υψηλής τάσης και η χρήση ηλεκτρικών συσκευών σε λογική απόσταση. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η επιστημονική κοινότητα δεν έχει καταλήξει σε συμφωνία σχετικά με τις επιβλαβείς επιπτώσεις των EMFs και απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την πλήρη κατανόηση των επιπτώσεων τους στην ανθρώπινη υγεία

3.1.4 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά είναι φανερό πως όσον αφορά τα ηλεκτρικά πεδία εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας έχει πλέον αποδειχθεί πως δεν επιφέρουν καμία δυσμενή βιολογική επίδραση στον ανθρώπινο οργανισμό, κάτι τέτοιο δεν επιβεβαιώνεται για τα μαγνητικά πεδία. Τουναντίον, κάποιοι επιστήμονες από τον χώρο της ιατρικής συσχετίζουν την ύπαρξη των μαγνητικών πεδίων με συγκεκριμένες παθήσεις. Ωστόσο εκφράζεται και η άποψη από μία μερίδα επιστημόνων πως τα συμπεράσματα των βιολογικών επιδράσεων που προκαλούν τα μαγνητικά πεδία είναι ασαφή διότι υπάρχουν διφορούμενες μελέτες και έρευνες από σπουδαίους επιστήμονες. Συνεπώς, επειδή τα αποτελέσματα των ερευνών είναι αντικρουόμενα, δεν είναι ακόμη δυνατή η κατάληξη σε κάποιο εύλογο και αδιαμφισβήτητο συμπέρασμα για τις δυσμενείς βιολογικές επιπτώσεις που έχουν τα χαμηλόσυχνα μαγνητικά πεδία στον ανθρώπινο οργανισμό.

Βιβλιογραφία

- [1] Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (ΕΕΑΕ) “Χαμηλόσυχα Ηλεκτρικά και Μαγνητικά Πεδία”, Αθήνα, 2005
- [2] Y. You-wen, and J. Yong-chun, “Key technologies for 500 kV compact transmission line from Changping to Fangshan”, *Power System Technology*, vol. 27(7), pp. 75-77, Jul. 2003.
- [3] S. Yin-biao, and Z. Cheng-hua, “Study and implementation of 500 kV compact power transmission line with double circuits on a same tower in China”, *Power System Technology*, vol. 26(4), pp. 49-51, Apr. 2002.
- [4] C. L. Ross, M. Siriwardane, G. A. Porada, C. D. Poradam, P. Brink G. J. Christ, B. S. Harrison “The effect of low-frequency electromagnetic field on human bone marrow stem/progenitor cell differentiation”, Apr. 2015.
- [5] F. Focke, D. Schuermann, N. Kuster, P. S.,”DNA fragmentation in human fibroblasts under extremely low frequency electromagnetic field exposure”, Oct. 2010.
- [6] A. Kozirowska, M. Romerowicz-Misielak, P. Sołek & M. Kozirowski, “Extremely low frequency variable electromagnetic fields affect cancer and noncancerous cells *in vitro* differently”, Mar. 2018.
- [7] Y. Zhang, J. Lai, G. Ruan, C. C. Dao, W. Wang, “Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: a pooled analysis of epidemiologic studiesAuthor links open overlay”, Dec. 2012.
- [8] T. Saliev, D. Begimbetova, A. R. Masoud, B. Matkarimov, “Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin”, Jul. 2018.
- [9] P. A. Kokate, A. K. Mishra, S. K. Lokhande, G. L. Bodhe, “Extremely Low Frequency Electromagnetic Field (ELF-EMF) and childhood leukemia (CL) near transmission lines: a review”, Apr. 2016.
- [10] K. A. Diab, “The Impact of the Low Frequency of the Electromagnetic Field on” Part of the *Advances in Experimental Medicine and Biology*, book series Cell Biology and Translation Medicine, Aug. 2019.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μετρητές Εξαιρετικά Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εξάγεται το συμπέρασμα πως όσον αφορά την επιστημονική γνώση τόσο για την παροδική όσο και για τη μακροχρόνια έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλών συχνοτήτων η επιστημονική κοινότητα δεν έχει ακόμα καταλήξει σε βέβαια και αδιαμφισβήτητα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση, όμως, είναι απαραίτητη η μέτρηση τόσο του ηλεκτρικού όσο και του μαγνητικού πεδίου σε κρίσιμες περιοχές ή εγκαταστάσεις (π.χ. κατοικημένες περιοχές, σχολεία, δημόσιες υπηρεσίες κτλ.), με σκοπό να διαπιστωθεί κατά πόσον πληρούνται οι απαιτήσεις για την ασφαλή έκθεση του γενικού πληθυσμού ή και των επαγγελματικά απασχολούμενων σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ο σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η περιγραφή των μετρητών χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, η ανάδειξη των βασικών χαρακτηριστικών τους και των προδιαγραφών όπως και η παρουσίαση του εξοπλισμού μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία.

4.1 Κατηγοριοποίηση μετρητών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Κάθε όργανο μέτρησης αποτελεί στην πράξη λειτουργικό σύνολο από ένα ή περισσότερα διακριτά στοιχεία (Σχήμα 4.1) με σκοπό την παραγωγή μιας ένδειξης, η οποία είναι συνάρτηση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους. Το βασικό στοιχείο από το οποίο αποτελείται ένα όργανο είναι ο αισθητήρας που δέχεται την επίδραση του μετρούμενου φυσικού μεγέθους και στη συνέχεια μεταφράζει την επίδραση αυτή σε άμεσα ή έμμεσα αναγνώσιμη πληροφορία. Συνήθη στοιχεία που μπορούν να εντοπιστούν σε ένα όργανο είναι ο μετατροπέας ή διαμορφωτής σήματος, ο οποίος μετατρέπει την πληροφορία στην έξοδο του αισθητήρα σε μια άλλη πληροφορία πιο εύκολα εκμεταλλεύσιμη (όπως π.χ. ένας ενισχυτής), ένα στοιχείο (αναλογικής ή ψηφιακής) επεξεργασίας σήματος και ένα στοιχείο απεικόνισης της μέτρησης [1,2].



Σχήμα 4.1: Σχηματική συνήθης δομή μετρητικών διατάξεων.

Οι μετρητές τόσο του ηλεκτρικού όσο και του μαγνητικού πεδίου περιέχουν όλα τα βασικά μέρη των οργάνων μέτρησης, με σημαντικότερα αυτά του αισθητήρα – ανιχνευτή του πεδίου (probe) και του φωρατή ο οποίος επεξεργάζεται το σήμα από τον αισθητήρα και υποδεικνύει την τιμή του πεδίου σε αναλογική ή ψηφιακή ένδειξη. Οι παραπάνω μετρητές κατηγοριοποιούνται σε μετρητές ηλεκτρικού πεδίου και σε μετρητές μαγνητικού πεδίου ανάλογα με το προς μέτρηση μέγεθος. Παρακάτω παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά των μετρητών πεδίων, σύμφωνα με τα πρότυπα IEE Std 644-2019 και IEC 61786:2003 [2,3].

4.1.1 Μετρητές Ηλεκτρικού Πεδίου

Οι μετρητές ηλεκτρικού πεδίου είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ισχύος και της κατεύθυνσης των ηλεκτρικών πεδίων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Χρησιμοποιούνται συνήθως στην ηλεκτρική μηχανική, τη φυσική και άλλα πεδία για την αξιολόγηση του επιπέδου των ηλεκτρικών πεδίων που παράγονται από ηλεκτρικές συσκευές, καλώδια ρεύματος ή άλλες πηγές.

Οι μετρητές ηλεκτρικού πεδίου λειτουργούν, συνήθως, μετρώντας τη δύναμη που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται στο ηλεκτρικό πεδίο. Ο μετρητής μετατρέπει τη μέτρηση της δύναμης σε μέτρηση έντασης ηλεκτρικού πεδίου, η οποία, συνήθως, εκφράζεται σε βολτ ανά μέτρο (V/m).

Υπάρχουν διαθέσιμοι διάφοροι τύποι μετρητών ηλεκτρικού πεδίου, συμπεριλαμβανομένων αναλογικών και ψηφιακών μοντέλων. Οι αναλογικοί μετρητές χρησιμοποιούν μία κινούμενη βελόνα ή άλλη φυσική ένδειξη για την εμφάνιση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ οι ψηφιακοί μετρητές παρέχουν μια αριθμητική ένδειξη. Ορισμένοι μετρητές ηλεκτρικού πεδίου έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η μέτρηση πεδίων υψηλής τάσης ή πεδίων σε επικίνδυνα περιβάλλοντα.

Η μετρητές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που συναντιούνται στην αγορά διακρίνονται σε τρεις τύπους. Αυτοί είναι οι εξής:

- Μετρητής Ελευθέρου Σώματος (Free-Body Meter)

Η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ελεύθερου σώματος είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της έντασης και της κατεύθυνσης των ηλεκτρικών πεδίων σε μια δεδομένη περιοχή. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός μικρού, ηλεκτρικά φορτισμένου σώματος δοκιμής στο πεδίο ενδιαφέροντος και την ανάλυση της συμπεριφοράς του για τον προσδιορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το σώμα δοκιμής μπορεί να είναι ένα φορτισμένο σωματίδιο, όπως μια φορτισμένη σφαίρα ή μια φορτισμένη πλάκα, ή μια σειρά από μικρά φορτισμένα σωματίδια. Όταν το σώμα δοκιμής εισάγεται στο ηλεκτρικό πεδίο, δέχεται μια δύναμη λόγω της παρουσίας του ηλεκτρικού πεδίου. Μετρώντας το μέγεθος και την κατεύθυνση αυτής της δύναμης, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το Νόμο του Coulomb ή άλλες σχετικές εξισώσεις. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε σενάρια όπου οι παραδοσιακές μετρήσεις είναι δύσκολες ή δεν είναι εφικτές, όπως κοντά σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης, πολύπλοκα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα ή σε κοντινή απόσταση από ενεργό ηλεκτρικό εξοπλισμό. Η μέτρηση αυτή παρέχει πολύτιμα δεδομένα για διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής μηχανικής, της ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, επιτρέποντας στους ερευνητές και τους μηχανικούς να κατανοήσουν καλύτερα και να βελτιστοποιήσουν τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών συστημάτων σε διάφορα περιβάλλοντα.

- Μετρητής τύπου αναφοράς γείωσης (Ground reference meter)

Ο μετρητής αναφοράς γείωσης είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ισχύος και της κατεύθυνσης των ηλεκτρικών πεδίων σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Σε αυτήν τη μέθοδο, ένα εργαλείο μέτρησης ή ένας αισθητήρας τοποθετείται σε ένα συγκεκριμένο ύψος πάνω από το έδαφος και οι μετρήσεις του αναφέρονται στο ηλεκτρικό δυναμικό της γης, το οποίο συνήθως θεωρείται ως το σημείο αναφοράς του εδάφους. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου προσδιορίζεται με τη μέτρηση της διαφοράς τάσης ή δυναμικού μεταξύ του αισθητήρα μέτρησης και ενός ξεχωριστού ηλεκτροδίου

αναφοράς γείωσης. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε καταστάσεις όπου η άμεση απόλυτη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι δύσκολη ή δεν απαιτείται. Η μέτρηση αναφοράς γείωσης χρησιμοποιείται συνήθως σε δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), περιβαλλοντική παρακολούθηση κοντά στις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, υποσταθμούς ή άλλες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και στην αξιολόγηση ακτινοβολίας ραδιοσυχνότητας (RF). Χρησιμοποιώντας τη γη ως σημείο αναφοράς, οι μετρήσεις μπορούν να είναι πιο απλές και τυποποιημένες σε διαφορετικές τοποθεσίες. Ωστόσο, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως η τοπική γεωλογία, η τοπογραφία και η παρουσία κοντινών αγωγίμων δομών, καθώς μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Συνολικά, η μέτρηση αναφοράς γείωσης παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τις επιπτώσεις του ηλεκτρικού πεδίου στο περιβάλλον και συμβάλλει στη διασφάλιση της συμμόρφωσης με τα πρότυπα και τους κανονισμούς ασφάλειας.

- Ηλεκτροοπτικός μετρητής (Electro-optic meter)

Ένας ηλεκτροοπτικός μετρητής είναι ένα όργανο που μετρά την ισχύ και την κατεύθυνση ενός ηλεκτρικού πεδίου ανιχνεύοντας αλλαγές στην πόλωση του φωτός που διέρχεται από ένα υλικό. Αυτός ο τύπος μετρητή χρησιμοποιείται συνήθως στον τομέα της οπτικής και της φωτονικής για τη μέτρηση ηλεκτρικών πεδίων σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των τηλεπικοινωνιών, των συστημάτων λέιζερ και της μηχανικής υψηλής τάσης. Ένας ηλεκτροοπτικός μετρητής τυπικά αποτελείται από ένα υλικό με μη γραμμική οπτική απόκριση, όπως το νιοβικό λίθιο ή το διοξίνο φωσφορικό κάλιο (KDP), το οποίο τοποθετείται στη διαδρομή μιας δέσμης φωτός. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται στο υλικό, προκαλεί μια αλλαγή στον δείκτη διάθλασης του υλικού, που μεταβάλλει την πόλωση του φωτός που διέρχεται από αυτό. Η αλλαγή στην πόλωση μπορεί στη συνέχεια να μετρηθεί χρησιμοποιώντας έναν πολωτή και ανιχνευτή για να προσδιοριστεί η ισχύς και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Οι ηλεκτροοπτικοί μετρητές είναι όργανα υψηλής ακρίβειας και ευαισθησίας, ικανά να μετρούν ηλεκτρικά πεδία με ισχύ που κυμαίνονται από $\mu\text{V/m}$ έως αρκετά kV/m . Είναι επίσης ικανά να μετρούν ταχέως μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, καθιστώντας τα χρήσιμα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπου απαιτούνται μετρήσεις υψηλής ταχύτητας.

4.1.2 Μετρητές Μαγνητικού Πεδίου

Οι μετρητές μαγνητικού πεδίου είναι όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ισχύος και της κατεύθυνσης των μαγνητικών πεδίων σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορα πεδία, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής μηχανικής, της φυσικής, της γεωλογίας και της περιβαλλοντικής επιστήμης, για την αξιολόγηση του επιπέδου των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές.

Οι μετρητές μαγνητικού πεδίου λειτουργούν συνήθως χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα, όπως έναν αισθητήρα Hall ή ένα μαγνητόμετρο, για να ανιχνεύσουν το μαγνητικό πεδίο και να το μετατρέψουν σε ηλεκτρικό σήμα. Στη συνέχεια, ο μετρητής επεξεργάζεται το σήμα και εμφανίζει την ένταση του μαγνητικού πεδίου, η οποία συνήθως εκφράζεται σε μονάδες tesla (T) ή gauss (G).

Υπάρχουν διαθέσιμοι διάφοροι τύποι μετρητών μαγνητικού πεδίου, συμπεριλαμβανομένων φορητών και σταθερών μοντέλων. Οι μετρητές χειρός χρησιμοποιούνται συχνά για εργασίες πεδίου ή σε καταστάσεις όπου η φορητότητα είναι

σημαντική, ενώ τα σταθερά μοντέλα χρησιμοποιούνται συνήθως για μακροχρόνια παρακολούθηση ή σε εργαστηριακές ρυθμίσεις. Ορισμένοι μετρητές μαγνητικού πεδίου έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η μέτρηση των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος ή ιατρικό εξοπλισμό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένοι μετρητές μαγνητικού πεδίου έχουν σχεδιαστεί ειδικά για τη μέτρηση στατικών μαγνητικών πεδίων, ενώ άλλοι έχουν σχεδιαστεί για τη μέτρηση εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων, όπως αυτά που παράγονται από ηλεκτρικά ρεύματα.

Για τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθοι τύποι μετρητών:

- Μετρητής πυκνότητας της μαγνητικής ροής (magnetic flux density meter)

Ο μετρητής πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι ένας τύπος οργάνου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ισχύος και της κατεύθυνσης ενός μαγνητικού πεδίου. Συχνά αναφέρεται ως μαγνητόμετρο ή Gaussmeter, με τη μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για τη μαγνητική επαγωγή του πεδίου που είναι το gauss.

Ένας μετρητής πυκνότητας μαγνητικής ροής τυπικά αποτελείται από έναν αισθητήρα, όπως έναν αισθητήρα φαινομένου Hall, που τοποθετείται στο μαγνητικό πεδίο που μετριέται. Ο αισθητήρας ανιχνεύει το μαγνητικό πεδίο και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια επεξεργάζεται και εμφανίζεται ως μέτρηση πυκνότητας μαγνητικής ροής.

Οι μετρητές πυκνότητας μαγνητικής ροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση τόσο στατικών όσο και εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων, ανάλογα με τον τύπο του αισθητήρα που χρησιμοποιείται. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορα πεδία, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής μηχανικής, της φυσικής, της γεωλογίας και της περιβαλλοντικής επιστήμης, για τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές.

Οι μετρητές πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι διαθέσιμοι σε μια σειρά μεγεθών και ευαισθησιών, από συσκευές χειρός για επιτόπια εργασία έως όργανα εργαστηριακής ποιότητας, ικανά να μετρούν πολύ μικρά μαγνητικά πεδία. Ορισμένοι μετρητές πυκνότητας μαγνητικής ροής είναι επίσης εξοπλισμένοι με δυνατότητες καταγραφής δεδομένων, επιτρέποντας τους να καταγράφουν μετρήσεις με την πάροδο του χρόνου για μεταγενέστερη ανάλυση.

- Μαγνητόμετρο ροής

Το μαγνητόμετρο ροής είναι ένας τύπος οργάνου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του ρυθμού ροής ενός ρευστού, όπως ενός αερίου ή υγρού, ανιχνεύοντας αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο που προκαλείται από τη ροή. Είναι επίσης γνωστό ως μαγνητικό ροόμετρο ή magmeter.

Ένα μαγνητόμετρο ροής αποτελείται συνήθως από ένα σωλήνα ροής κατασκευασμένο από μη μαγνητικό υλικό, με ηλεκτρόδια προσαρτημένα στα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα. Ένα μαγνητικό πεδίο εφαρμόζεται στο ρευστό που διέρχεται από τον σωλήνα και, καθώς το ρευστό ρέει ακόμα, δημιουργεί μια τάση που ανιχνεύεται από τα ηλεκτρόδια. Το μέγεθος της τάσης είναι ευθέως ανάλογο με την ταχύτητα του ρευστού και ο ρυθμός ροής μπορεί να υπολογιστεί με βάση αυτήν τη μέτρηση της ταχύτητας.

Τα μαγνητόμετρα ροής χρησιμοποιούνται συνήθως σε μια ποικιλία βιομηχανικών και επιστημονικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας νερού, της χημικής επεξεργασίας και της διύλισης πετρελαίου. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε περιπτώσεις όπου το ρευστό που μετριέται είναι διαβρωτικό, λειαντικό ή ακόμα

περιέχει και στερεά σωματίδια, καθώς δεν έχουν κινούμενα μέρη που μπορεί να καταστραφούν ή να εμποδιστούν.

Τα μαγνητόμετρα ροής μπορούν να σχεδιαστούν για τη μέτρηση του ρυθμού ροής υγρών, αερίων ή πολτών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα ρυθμών ροής, από χαμηλές έως υψηλές ταχύτητες. Είναι συνήθως υψηλής ακρίβειας και μπορούν να παρέχουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο του ρυθμού ροής και του όγκου.

4.1.3 Μετρητές Χαμηλόσυχνων Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

Οι μετρητές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας είναι όργανα που μετρούν την ισχύ και την κατεύθυνση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην περιοχή συχνοτήτων από μερικά Hz έως μερικά kHz. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής μηχανικής, της φυσικής και της περιβαλλοντικής επιστήμης, για την αξιολόγηση του επιπέδου των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που παράγονται από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές.

Οι μετρητές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούν συνήθως έναν αισθητήρα, όπως πηνίο ή κεραία, για να ανιχνεύσουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και να το μετατρέψουν σε ηλεκτρικό σήμα, στη συνέχεια ο μετρητής επεξεργάζεται το σήμα και εμφανίζει την ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η οποία συνήθως εκφράζεται σε μονάδες (V/m) ή (mG).

Οι μετρητές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται συχνά για τη μέτρηση των πεδίων που παράγονται από γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος, ηλεκτρικές συσκευές και άλλο ηλεκτρικό εξοπλισμό. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που παράγονται από φυσικές πηγές, όπως το μαγνητικό πεδίο της γης ή οι κεραυνοί.

Οι μετρητές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και ευαισθησίες, από συσκευές χειρός για επιτόπια εργασία έως όργανα εργαστηριακής ποιότητας που μπορούν να μετρήσουν πολύ μικρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ορισμένοι μετρητές είναι επίσης εξοπλισμένοι με δυνατότητες καταγραφής δεδομένων επιτρέποντάς τους να καταγράφουν μετρήσεις με την πάροδο του χρόνου για μεταγενέστερη ανάλυση.

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα γίνει εκτενής αναφορά στον βασικό μετρητικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε από το εργαστήριο για τις μετρήσεις των χαμηλόσυχνων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

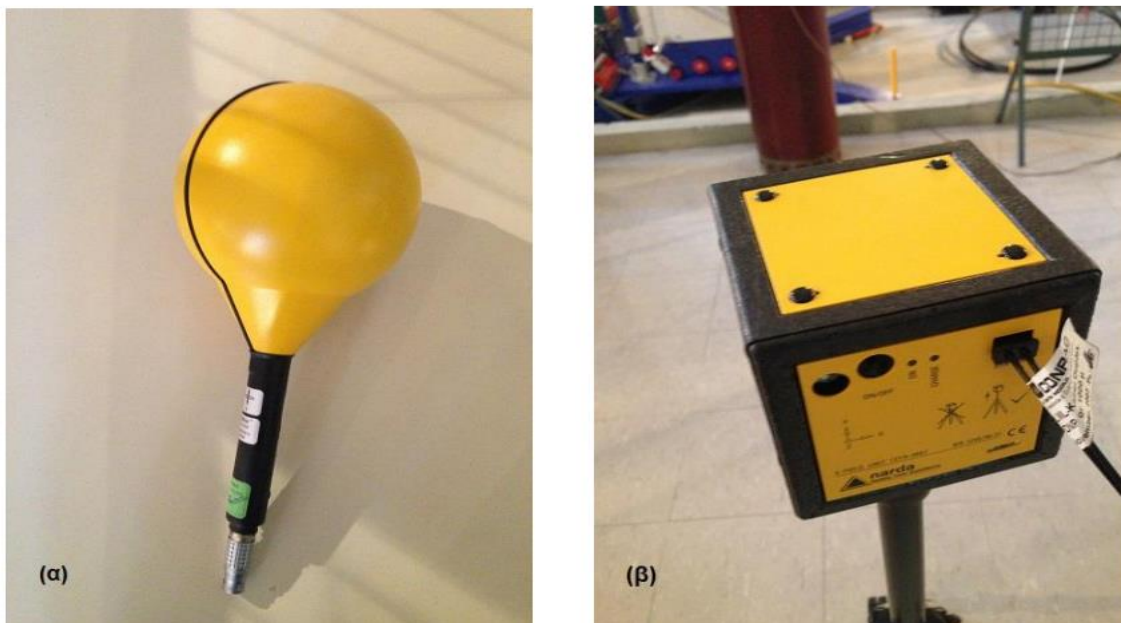
4.1.3.1 ELFA- 300 Field Analyzer

Ο αναλυτής πεδίου ELFA 300 είναι ένα φορητό όργανο σχεδιασμένο για τη μέτρηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε διάφορα περιβάλλοντα. Χρησιμοποιείται συνήθως από επαγγελματίες στους τομείς της υγείας και ασφάλειας στην εργασία, καθώς και της περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Το ELFA-300 μπορεί να μετρήσει ηλεκτρικά πεδία AC και DC έως 200 kV/m και μαγνητικά πεδία έως 30 A/m. Έχει ένα εύρος συχνοτήτων από 5 Hz έως 400 kHz, καθιστώντας το κατάλληλο για μέτρηση πεδίων από διάφορες πηγές, όπως αγωγοί ρεύματος, μετασχηματιστές και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Το όργανο συνοδεύεται από διάφορους ανιχνευτές και αισθητήρες για τη μέτρηση των πεδίων με διαφορετικούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένων ενός ανιχνευτή τριαξονικού ηλεκτρικού πεδίου, ενός καθετήρα μαγνητικού πεδίου ενός άξονα και ενός καθετήρα ραδιοσυχνοτήτων. Το ELFA-300 διαθέτει επίσης ενσωματωμένο καταγραφικό δεδομένων που μπορεί να αποθηκεύσει έως και 5000 μετρήσεις.



Εικόνα 4.1: Πεδιόμετρο Narda EFA-300.

Το όργανο μέτρησης EFA-300 διαθέτει και ενσωματωμένο ιστροπικό ανιχνευτή μαγνητικού πεδίου και μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί με έναν προαιρετικό μεγάλο αισθητήρα (B-FIELD) υψηλής ευαισθησίας για ενισχυμένη απόδοση και μέτρηση των ανομοιογενών μαγνητικών πεδίων. Για τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου συνδέεται το όργανο μέτρησης με τον αισθητήρα μέτρησης μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.2 (α) και 4.3.



Εικόνα 4.2: Αισθητήρες (α) Μαγνητικού και (β) Ηλεκτρικού Πεδίου.

Αντίστοιχα, για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται σύνδεση ενός εξωτερικού ανιχνευτή ηλεκτρικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων (E-FIELD UNIT), ο οποίος λειτουργεί σε συγκεκριμένο φάσμα από 5 Hz έως 32 kHz (Εικόνες 4.2 (β) και 4.3). Οι μετρήσεις μπορεί να γίνουν είτε με ιστροπικό τρόπο είτε σε ένα εύρος από 0,5V/m έως 100kV/m, με μια ακρίβεια $\pm 5\%$ και $\pm 1V/m$. Ο αισθητήρας μπορεί να λειτουργεί ως μια αυτόνομη μονάδα μετρήσεων αλλά και ως αποθήκευση δεδομένων, ενώ η σύνδεσή του με την κυρίως μονάδα χρησιμοποιείται για απομακρυσμένο έλεγχο. Η τοποθέτησή του σε μη

μεταλλικό τρίποδο και η σύνδεσή του μέσω οπτικής ίνας δίνει τη δυνατότητα στο πεδίομετρο να χρησιμοποιηθεί μακριά από τον αισθητήρα και μ' αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με ελάχιστη ή και καμία επιρροή από τον χειριστή.



Εικόνα 4.3: Σύνδεση οργάνου μέτρησης με τους αισθητήρες μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου (αριστερά) και μαγνητικού πεδίου (δεξιά).

Συνολικά, ο αναλυτής πεδίου ELFA-300 είναι ένα ευέλικτο και ισχυρό εργαλείο για τη μέτρηση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε διάφορες ρυθμίσεις και μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη διασφάλιση της ασφάλειας στον χώρο εργασίας και του περιβάλλοντος.

4.1.3.2 PWM 8053A

Το πεδίομετρο PWM 8053A είναι της εταιρείας Narda και αποτελεί μία φορητή ψηφιακή μονάδα μέτρησης πεδίου χαμηλών συχνοτήτων τόσο για ισοτροπικές όσο και για μη ισοτροπικές μετρήσεις, με φάσμα μετρήσεων που κυμαίνεται στο εύρος συχνοτήτων 5Hz – 40GHz. Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση των μεγεθών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αλλά και της μαγνητικής επαγωγής τοποθετείται στο όργανο μέτρησης ένας αισθητήρας ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων (ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ANALYZER) όπου μπορεί να λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων 5Hz – 100kHz. Η σύνδεση του αισθητήρα στο πεδίομετρο πραγματοποιείται με τη βοήθεια μίας οπτικής ίνας, γεγονός το οποίο επιτρέπει τον χειρισμό του πεδίομετρου εκτός του πεδίου δοκιμών.



Εικόνα 4.4: Πεδίομετρο PWM 8053A και όλος ο εξοπλισμός.

4.2 Διακρίβωση μετρητών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων

Η διακρίβωση είναι μια σημαντική πτυχή για τη διασφάλιση ακριβών και αξιόπιστων μετρήσεων των μετρητών ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η διακρίβωση περιλαμβάνει τη σύγκριση των ενδείξεων από τον μετρητή με ένα γνωστό πρότυπο ή αναφορά και την πραγματοποίηση προσαρμογών στον μετρητή όπως απαιτείται για να ευθυγραμμιστεί με το πρότυπο.

Η διακρίβωση (Calibration) είναι ο καθορισμός της σχέσης μεταξύ των τιμών μιας ποσότητας όπως αυτή προσδιορίζεται από ένα πρότυπο αναφοράς και των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από τις ενδείξεις του υπό διακρίβωση οργάνου ή συστήματος. Ο προσδιορισμός αυτής της σχέσης (και της διόρθωσης στην ένδειξη του υπό διακρίβωση οργάνου) πραγματοποιείται με τη χρήση κατάλληλης μετρητικής μεθόδου και συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό της αβεβαιότητας της μέτρησης, κάτι που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η επαλήθευση (Verification) είναι η επιβεβαίωση μέσω εξέτασης και παροχής αποδείξεων ότι ικανοποιούνται καθορισμένες προδιαγραφές. Αποτελεί συντομότερη και απλούστερη διαδικασία από αυτήν της διακρίβωσης. Οι δοκιμές επαλήθευσης εκτελούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια χρήσης του οργάνου.

Η διαδικασία βαθμονόμησης συνήθως περιλαμβάνει διάφορα στάδια ακόμα όπως:

1. Επαλήθευση του εύρους μέτρησης και της ανάλυσης του μετρητή.
2. Προσαρμογή των ρυθμίσεων μηδέν και ευαισθησίας του μετρητή, εάν υπάρχουν.
3. Σύγκριση των ενδείξεων του μετρητή με μια γνωστή πηγή αναφοράς, όπως μια βαθμονομημένη γεννήτρια πεδίου ή μετρητή αναφοράς.
4. Καταγραφή των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης και έκδοση πιστοποιητικού βαθμονόμησης.
5. Η βαθμονόμηση πρέπει να εκτελείται τακτικά για να διασφαλίζεται η συνεχής ακρίβεια του μετρητή. Η συχνότητα της βαθμονόμησης εξαρτάται από παράγοντες όπως οι συστάσεις του κατασκευαστή, η προβλεπόμενη μορφή του μετρητή και το επίπεδο ακρίβειας που απαιτείται για την εφαρμογή.

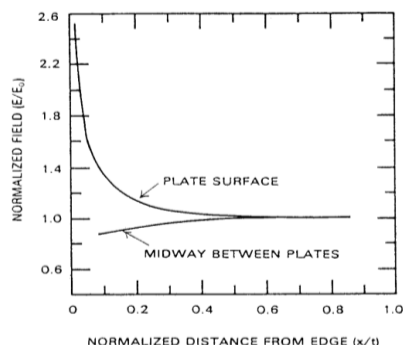
Στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στις μεθόδους διακρίβωσης και επαλήθευσης των μετρητικών οργάνων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

4.2.1 Διακρίβωση μετρητών ηλεκτρικών πεδίων

4.2.1.1 Μέθοδος ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου

Η μέθοδος ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου είναι μία τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μιας περιοχής του χώρου σε εργαστηριακό περιβάλλον. Σε αυτήν τη μέθοδο, ένα ζεύγος παράλληλων μεταλλικών πλακών χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ τους. Οι πλάκες συνδέονται με τροφοδοτικό υψηλής τάσης που διατηρεί σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Για να μετρηθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, τοποθετείται ένας αισθητήρας σε μια συγκεκριμένη θέση εντός της περιοχής του ηλεκτρικού πεδίου. Ο αισθητήρας αποτελείται συνήθως από μια μικρή αγώγιμη σφαίρα ή άλλο σχήμα, συνδεδεμένο με ένα ευαίσθητο βολτόμετρο. Όταν ο αισθητήρας τοποθετείται στο ηλεκτρικό πεδίο, δέχεται μια δύναμη λόγω της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Το μέγεθος αυτής της δύναμης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας το φορτίο του ανιχνευτή, την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και την απόσταση μεταξύ των πλακών. Μετρώντας την τάση και το ρεύμα που παράγεται από τον ανιχνευτή, μπορεί να προσδιοριστεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε αυτήν τη θέση.

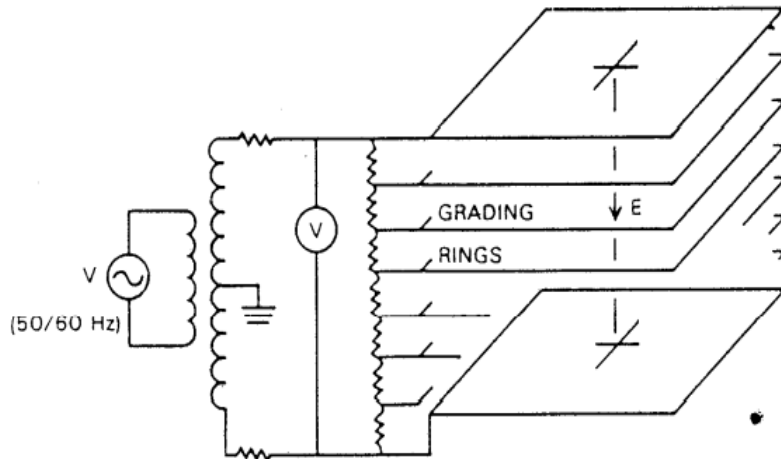
Η μέθοδος ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές έρευνας και δοκιμών που απαιτούν ακριβή και ελεγχόμενα ηλεκτρικά πεδία, όπως στην επιστήμη των υλικών, την ηλεκτρονική και την ηλεκτροχημεία. Είναι μια χρήσιμη τεχνική για τη μελέτη της συμπεριφοράς υλικών κάτω από διαφορετικές εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου και για τη βαθμονόμηση και τη δοκιμή οργάνων που μετρούν ηλεκτρικά πεδία.



Σχήμα 4.2: Κανονικοποιημένο πεδίο E στην επιφάνεια της πλάκας και στο μέσο μεταξύ των πλακών [41].

Πίνακας 4.1: Κανονικοποιημένες τιμές πεδίου E στο μέσο μεταξύ των πλακών και στις επιφάνειες των πλακών [41].

Midway between plates	
x/d	E/E_0
0.0698	0.837
0.1621	0.894
0.2965	0.949
0.4177	0.975
0.6821	0.995
0.7934	0.997
Plate surface	
0.7954	1.002
0.6861	1.005
0.4376	1.025
0.2431	1.095
0.1624	1.183
0.1230	1.265
0.0991	1.342
0.0829	1.414
0.0452	1.732
0.0307	2.000
0.0185	2.449



Σχήμα 4.3: Κανονικοποιημένο πεδίο E στην επιφάνεια της πλάκας και στο μέσο μεταξύ των πλακών [2].

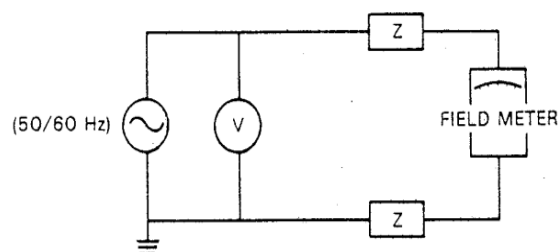
4.2.1.2 Τεχνική έγχυσης ρεύματος και τάσης

Η τεχνική έγχυσης ρεύματος και τάσης είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών και συσκευών, συμπεριλαμβανομένης της αγωγιμότητας, της ειδικής αντίστασης και της αντίστασης. Σε αυτήν την τεχνική, ένα γνωστό ρεύμα ή τάση εγχέεται στο υπό δοκιμή υλικό ή συσκευή και μετρείται η προκύπτουσα τάση ή το ρεύμα.

Για την τεχνική έγχυσης ρεύματος, ένα γνωστό ρεύμα εγχέεται στο υλικό ή τη συσκευή χρησιμοποιώντας μια πηγή ρεύματος και η προκύπτουσα τάση μετρείται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα τάσης. Η μέτρηση της τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντίστασης ή της αγωγιμότητας του υλικού της συσκευής. Για την τεχνική έγχυσης τάσης, μία γνωστή τάση εφαρμόζεται στο υλικό ή τη συσκευή χρησιμοποιώντας μια πηγή τάσης και το ρεύμα που προκύπτει μετρείται χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα ρεύματος. Η μέτρηση ρεύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης ή της εισόδου του υλικού ή της συσκευής.

Και οι δύο τεχνικές απαιτούν ακριβή όργανα συμπεριλαμβανομένων ακριβών πηγών ρεύματος και τάσης και ευαίσθητων ανιχνευτών τάσης και ρεύματος. Η προσεκτική βαθμονόμηση των οργάνων είναι επίσης σημαντική για την εξασφάλιση ορθών και αξιόπιστων μετρήσεων.

Η τεχνική έγχυσης ρεύματος και τάσης χρησιμοποιείται συνήθως στην επιστήμη των υλικών και σε άλλα πεδία για τον χαρακτηρισμό των ηλεκτρικών ιδιοτήτων υλικών και συσκευών και για τη δοκιμή απόδοσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και εξαρτημάτων. Είναι μια χρήσιμη τεχνική τόσο για εφαρμογές έρευνας και ανάπτυξης, όσο και για ποιοτικό έλεγχο και δοκιμές στην κατασκευή.



Σχήμα 4.4: Έλεγχος τρέχουσας βαθμονόμησης έγχυσης [2].

4.2.1.3 Διαδικασίες Βαθμονόμησης Μετρητών Ηλεκτρικών Πεδίων

Ο μετρητής ισχύος ηλεκτρικού πεδίου πρέπει να βαθμονομείται περιοδικά, με το διάστημα μεταξύ των βαθμονομήσεων να εξαρτάται εν μέρει από τη σταθερότητα του μετρητή. Ο μετρητής τοποθετείται στο κέντρο μιας παράλληλης πλάκας, δομής παρόμοιας με αυτήν που φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, με τη μονωτική λαβή που χρησιμοποιείται συνήθως κατά τις μετρήσεις. Οι διαστάσεις της κατασκευής πρέπει να είναι $1,5\text{m} \times 1,5\text{m} \times 0,75\text{m}$. Με αυτές τις διαστάσεις, οι δακτύλιοι βαθμονόμησης (ή διαχωριστές αντιστάσεων) είναι απαραίτητοι για να ληφθεί ένα πεδίο βαθμονόμησης που είναι εντός του 1% της ομοιόμορφης τιμής του πεδίου V/d . Υποτίθεται ότι η μεγαλύτερη διαγώνια διάσταση του μετρητή ισχύος ηλεκτρικού πεδίου που πρόκειται να βαθμονομηθεί δεν είναι μεγαλύτερη από 23cm. Η απόσταση από τα κοντινά μέρη εδάφους (τοίχοι, δάπεδα κ.λπ.) πρέπει να είναι τουλάχιστον 0,5m. Οι διαστάσεις της συσκευής βαθμονόμησης μπορεί να κλιμακωθεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω για να γίνει βαθμονόμηση μεγαλύτερων ή μικρότερων μετρητών ισχύος ηλεκτρικού πεδίου. Στα καλώδια εξόδου του μετασχηματιστή πρέπει να χρησιμοποιούνται επαρκείς αντιστάσεις περιορισμού ρεύματος ως μέτρο ασφάλειας. Για παράδειγμα, οι αντιστάσεις 10 MΩ είναι ικανοποιητικές για εφαρμοζόμενες τάσεις έως 10kV ($E \sim 13 \text{ kV/m}$).

4.2.2 Διακρίβωση μετρητών Μαγνητικών Πεδίων

4.2.2.1 Περιγραφή της συσκευής βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση ενός μετρητή μαγνητικού πεδίου γίνεται συνήθως με την εισαγωγή του καθετήρα σε σχεδόν ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο γνωστού μεγέθους και κατεύθυνσης. Τα γνωστά μαγνητικά πεδία μπορούν να παράγονται από συστήματα πηνίων με κυκλικές και ορθογώνιες γεωμετρίες, όπως για παράδειγμα, τα πηνία Helmholtz τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά για τη δημιουργία τέτοιων πεδίων. Ένας ενιαίος βρόχος από πολλές στροφές σύρματος με ορθογώνια γεωμετρία παράγει το πεδίο που περιγράφεται παρακάτω, επειδή οι εξισώσεις για τον υπολογισμό του πεδίου σε όλα τα σημεία του χώρου είναι σε κλειστή μορφή και το σύστημα πηνίου είναι απλό στην κατασκευή. Η απλότητα στην κατασκευή είναι εις βάρος της μειωμένης ομοιομορφίας πεδίου, αλλά η επαρκής ομοιομορφία για λόγους βαθμονόμησης λαμβάνεται άμεσα. Η συνιστώσα Z του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από έναν ορθογώνιο βρόχο διαστάσεων $2a \times 2b$ δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$B_z = \frac{\mu_0 I N}{4\pi} \sum_{a=1}^4 \frac{(-1)^{a+d_a} C_a}{r_a [r_a + (-1)^{a+1} C_a]} - \frac{C_a}{r_a (r_a + d_a)} \quad (4.1)$$

Όπου έχουμε:

$N =$ ο αριθμός των όρων

$$C_1 = -C_4 = a+x, \quad r_1 = \sqrt{(a+x)^2 + (b+y)^2 + z^2}$$

$$C_2 = -C_3 = a-x, \quad r_2 = \sqrt{(a-x)^2 + (b+y)^2 + z^2}$$

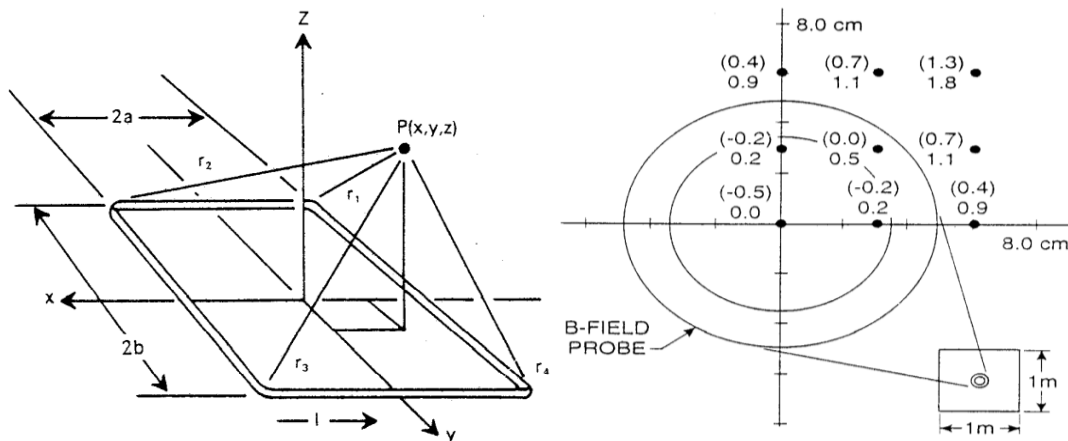
$$d_1 = d_1 = d_2 = b+y, \quad r_3 = \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}$$

$$d_3 = d_2 = d_4 = y - b, \quad r_4 = \sqrt{(a+x)^2 + (b-y)^2 + z^2}$$

$I =$ η rms τιμή του ρεύματος

$\mu_0 =$ η διαπερατότητα του αέρα ($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$)

Οι συντεταγμένες x, y και z φαίνονται στο αριστερό μέρος του Σχήματος 4.5. Οι αγωγοί στον τρέχοντα βρόχο θεωρείται ότι έχουν μικρή διατομή. Σημειώνεται για λόγους αναφοράς ότι $B_z=(0,0,0)=\mu_0 I N \sqrt{2} / \pi a$ για τετράγωνο βρόχο πλευρικής διάστασης $2a$. Η εξίσωση [4.1] για το B_z έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τιμών του πεδίου κοντά στο κέντρο ενός τετράγωνου βρόχου διαστάσεων $1\text{m} \times 1\text{m}$. Το ποσοστό αναχώρησης από την τιμή του κεντρικού μαγνητικού πεδίου σε κοντινά σημεία στο επίπεδο του βρόχου και 3cm πάνω και κάτω από το επίπεδο απεικονίζεται στο δεξί μέρος του Σχήματος 4.5. Στο σχήμα αυτό φαίνεται επίσης ένα σχέδιο κλίμακας ενός μαγνητικού πεδίου κάθετα διαμέτρου 10cm [2].

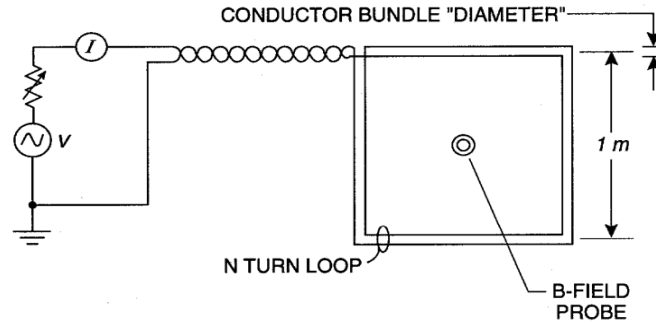


Σχήμα 4.5: Σύστημα συντεταγμένων για βρόχο που δημιουργεί μαγνητικό πεδίο B_z (στα αριστερά). Ποσοστό αναχώρησης του B_z από το $B_z(0,0,0)$ για θέσεις στο επίπεδο ενός τετραγώνου βρόχου ρεύματος $1\text{m} \times 1\text{m}$ και 3cm πάνω και κάτω από το επίπεδο (στα δεξιά).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας μετρητής πεδίου με έναν αισθητήρα πηνίου θα υποδεικνύει μια τιμή μαγνητικού πεδίου που είναι κατά μέσο όρο πάνω από την περιοχή διατομής της καθέτου. Η διαφορά μεταξύ αυτού του μέσου όρου και της κεντρικής τιμής [$B_z(0,0,0)$] θα είναι μικρότερη από το μέγιστο ποσοστό απόκλισης από την κεντρική τιμή. Για παράδειγμα, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της απόκλισης του μαγνητικού πεδίου από την κεντρική τιμή είναι $0,63\%$ για το όργανο δοκιμής 10cm (στο επίπεδο του βρόχου) το μέσο πεδίο είναι μόνο $0,31\%$ περισσότερο από την κεντρική τιμή (πεδίο βαθμονόμησης).

4.2.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης

Ο μετρητής μαγνητικού πεδίου πρέπει να βαθμονομείται περιοδικά με το μεσοδιάστημα μεταξύ των βαθμονομήσεων να εξαρτάται εν μέρει από τη σταθερότητα του μετρητή. Ο αισθητήρας μαγνητικού πεδίου τοποθετείται στο κέντρο ενός βρόχου με το επίπεδο του οργάνου να συμπίπτει με αυτό του βρόχου. Το Σχήμα 4.6 δείχνει μια σχηματική όψη του οργάνου, του βρόχου και της σχετικής συσκευής. Η διάσταση του βρόχου πρέπει να είναι τουλάχιστον $1\text{m} \times 1\text{m}$ για ένα όργανο με διάμετρο 10cm . Ο βρόχος μπορεί να κλιμακωθεί προς τα επάνω ή προς τα κάτω για μεγαλύτερους ή μικρότερους ανιχνευτές, αντίστοιχα, για να διατηρηθεί ένα επίπεδο ομοιομορφίας σε όλο τον ανιχνευτή συγκρίσιμο με αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 4.5 στα δεξιά. Είναι εμφανές ότι το πεδίο βαθμονόμησης μπορεί να δημιουργηθεί με άλλα συστήματα πηνίου, υπό τον όρο ότι μπορούν να ληφθούν συγκρίσιμες ομοιομορφίες [2,3,4].



Σχήμα 4.6: Σχηματικό κύκλωμα βαθμονόμησης μετρητή μαγνητικού πεδίου.

Θα πρέπει να εκτελούνται βαθμονομήσεις για κάθε άξονα ανιχνευτών τριών αξόνων. Θα πρέπει επίσης να γίνονται βαθμονομήσεις συνοδευόμενες από ελέγχους για παρεμβολές μεταξύ του κυκλώματος ανιχνευτή για κάθε ανιχνευτή. Οι μετρητές μαγνητικού πεδίου που αποτελούνται από ανιχνευτές με τρεις άξονες θα πρέπει επίσης να βαθμονομηθούν για έναν προσανατολισμό όπου έχει περίπου την ίδια ροή για όλα τα πηνία. Όπως και στο ηλεκτρικό έτσι και στο μαγνητικό πεδίο πρέπει να δημιουργηθεί μια γραφική παράσταση της υπολογιζόμενης ισχύος μαγνητικού πεδίου στο κέντρο του βρόχου, $B_z(0,0,0)$ έναντι του ρεύματος που εφαρμόζεται στον βρόχο. Σε αυτήν τη γραφική η ένταση του πεδίου πρέπει να υποδεικνύεται σε αντιπροσωπευτικό σημείο με μια κάθετη γραμμή σφάλματος. Αυτή η γραμμή σφάλματος αντιπροσωπεύει τις συνδυασμένες αβεβαιότητες που θα αναλυθούν εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

Οι καταγεγραμμένες τιμές πεδίου επιτρέπουν τον προσδιορισμό των συντελεστών διόρθωσης που πρέπει να εφαρμόζονται στον μετρητή πεδίου μέτρησης όταν εκτελούνται μετρήσεις κοντά σε καλώδια ρεύματος. Διαταραχές του πεδίου βαθμονόμησης μπορεί να συμβούν λόγω σιδηρομαγνητικών υλικών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τον βρόχο βαθμονόμησης. Για παράδειγμα, υλικά μεγάλης διαπερατότητας (όπως χάλυβας σε κοντινό ντουλάπι ή γραφείο, ή βραχίονα κάτω από ένα τραπέζι) θα συγκεντρώσει τη μαγνητική ροή και μπορεί να διαταράξει την τιμή του πεδίου στον βρόχο βαθμονόμησης. Η επίδραση των κοντινών σιδηρομαγνητικών υλικών στο πεδίο βαθμονόμησης θα πρέπει να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος [9,10]. Ο βρόχος βαθμονόμησης δεν πρέπει να απέχει λιγότερο από δύο πλευρικές διαστάσεις από οποιοδήποτε επίπεδο γείωσης, για να αποφευχθούν σημαντικές διαταραχές του πεδίου βαθμονόμησης του ρεύματος. Οι βαθμονομήσεις πρέπει να γίνονται πριν και μετά από οποιαδήποτε εκτεταμένη περίοδο χρήσης του μετρητή. Τα τροφοδοτικά ισχύος που χρησιμοποιούνται για βαθμονομήσεις πρέπει να είναι σχεδόν ελεύθερα (λιγότερο από 1%) αρμονικού περιεχομένου. Η θερμοκρασία και η υγρασία καταγράφονται τη στιγμή της βαθμονόμησης για να επιτραπούν οι διορθώσεις για αυτές τις παραμέτρους, εάν είναι απαραίτητο, όταν οι μετρήσεις εκτελούνται κάτω από ηλεκτροφόρους αγωγούς.

Βιβλιογραφία

- [1] Narda Safety Test Solutions, EFA-300 Operating Manual.
- [2] Μ. Ε. Μαθιουλάκης, “Μέτρηση, ποιότητα μέτρησης και αβεβαιότητα”, Ελληνική Ένωση Εργαστηρίων-HellasLab, Αθήνα, 2004.
- [3] Πρότυπο ΕΛΟΤ IEC 61786:2003, “Μετρήσεις μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων σε σχέση με την έκθεση των ανθρώπων”, 2003.
- [4] IEEE Std 644-2019 (Revision of IEEE Std 644-1994), “IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines”, 2019.
- [5] G. B. Johnson, “Instrumentation and measurement technology”, EMF Engineering Review Symposium, Charleston, SC (USA), April 28–29, 1998.
- [6] Narda Safety Test Solutions, Brochure : “Low Frequency (everything about EFA, ETM, and EFC)”.
- [7] O. Bottauscio, G. Crotti, S. D .Emilio, G. Farina, and A. Mantini, “Generation of Reference Electric and Magnetic Fields for Calibration of Power Frequency Field Meters”, IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, vol. 42, pp. 547–552, 1999.
- [8] M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio and G. d’Amore, “Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, Nuclear Technology Publishing, vol. 97, No 4, pp. 363–368, 2001.
- [9] K. K. karipidis, “Measurement of residential Power Frequency Magnetic Fields”, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), Mar. 2002.
- [10] NIOSH, “Manual for measuring occupational electric and magnetic field exposure”, U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health. DHHS (NIOSH) Publication No. 98-154, Oct. 1998.
- [11] Narda Safety Test Solutions, EFA-300 Data sheet - For Isotropic Measurement of Magnetic and Electric Fields.
- [12] Narda Safety Test Solutions, PMM 8053B Operating Manual.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Αβεβαιότητα Μετρήσεων Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Η αξιοπιστία, η εγκυρότητα και η ποιότητα μιας μέτρησης αποτελούσε στο παρελθόν περισσότερο μια αφηρημένη επιδίωξη και λιγότερο μια οργανωμένη προσπάθεια αναζήτησης τρόπων διασφάλισης και συγκεκριμενοποίησης της ποιότητας αυτής. Με την πάροδο όμως του χρόνου έγινε μια προσπάθεια για τη δημιουργία ενός ενιαίου μηχανισμού αποτίμησης της ποιότητας μέτρησης, δηλαδή της αβεβαιότητας (uncertainty). Κάθε μέτρηση, ασχέτως από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί και πραγματοποιηθεί ενέχει και σφάλματα επομένως μια μέτρηση έχει κάποιο ποσοστό αβεβαιότητας.

5.1 Εισαγωγή στην Αβεβαιότητα

Η αβεβαιότητα είναι μια σημαντική παράμετρος κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων, καθώς αντιπροσωπεύει το βαθμό αμφιβολίας ή έλλειψης εμπιστοσύνης στο αποτέλεσμα της μέτρησης. Όλες οι μετρήσεις έχουν κάποιο βαθμό αβεβαιότητας λόγω περιορισμών στη διαδικασία μέτρησης και της μεταβλητότητας της μετρούμενης ποσότητας.

Γενικά μπορούμε να την ορίσουμε ως μία κατάσταση ασάφειας ή έλλειψης πληροφοριών σχετικά με το μέλλον. Προκύπτει όταν είναι δυνατά πολλαπλά πιθανά αποτελέσματα και δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια ποιο θα συμβεί. Στον πυρήνα της η αβεβαιότητα αναγνωρίζει τα όρια της γνώσης μας και μας υπενθυμίζει ότι ο κόσμος απέχει πολύ από το να είναι προβλέψιμος. Είτε πρόκειται για πρόβλεψη καιρού, για χρηματοπιστωτικές αγορές ή για προσωπικές σχέσεις η αβεβαιότητα είναι πάντα παρούσα.

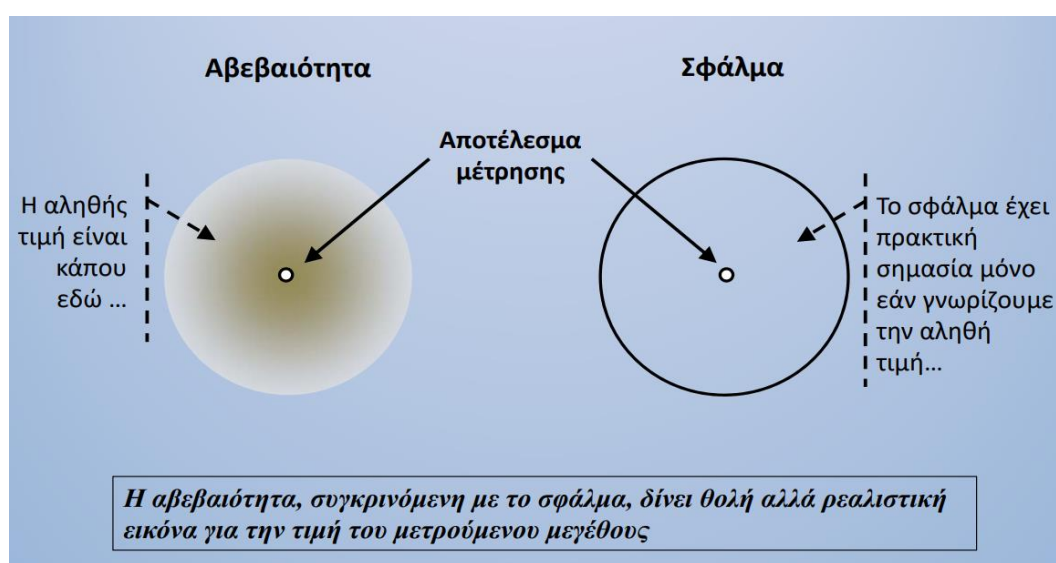
Αναπόσπαστο κομμάτι των μετρήσεων η αβεβαιότητα, προκύπτει από διάφορες πηγές. Μια κύρια πηγή είναι οι περιορισμοί των ίδιων των οργάνων μέτρησης. Κανένα όργανο δεν είναι απόλυτα ακριβές και πάντα θα υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις στις ενδείξεις λόγω ατελειών σφαλμάτων βαθμονόμησης. Επιπλέον περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τις μετρήσεις, όπως οι διακυμάνσεις θερμοκρασίας, οι αλλαγές της πίεσης του αέρα και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ακόμη, οι άνθρωποι είναι περιορισμένοι, όπως ο χρόνος αντίδρασης ή οπτική οξύτητα μπορεί να δημιουργήσουν αβεβαιότητες κατά τη χειροκίνητη λήψη μετρήσεων.

Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί χρησιμοποιούν 2 θεμελιώδεις προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας: ακρίβεια και ορθότητα. Η ακρίβεια αναφέρεται στον βαθμό επαναληψιμότητα στις μετρήσεις. Μια πολύ ακριβής μέτρηση παράγει σταθερά αποτελεσμάτων λαμβάνεται πολλές φορές υπό τις ίδιες συνθήκες. Από την άλλη πλευρά ακόμα η ορθότητα αναφέρεται στην εγγύτητα μιας μετρούμενης τιμής στην πραγματική τιμή της ποσότητας που μετριέται. Μια ακριβής μέτρηση είναι αυτή που είναι κοντά στην πραγματική τιμή, ανεξάρτητα από την ακρίβεια της. Μια μέτρηση μπορεί να είναι ακριβής αλλά όχι ορθή, ορθή αλλά όχι ακριβής, και τα δύο ή κανένα.

Για να διαχειριστούν αποτελεσματικά την αβεβαιότητα ακόμα οι επιστήμονες χρησιμοποιούν στατιστικές μεθόδους και σημαντικά στοιχεία. Εφαρμόζονται στατιστικά στοιχεία ακόμα μπορούν να εκτιμήσουν το εύρος εντός του οποίου πιθανώς βρίσκεται η πραγματική τιμή με βάση τις μετρήσεις και τις αβεβαιότητες τους. Αυτή η προσέγγιση δίνει τη δυνατότητα στους ερευνητές να εκφράσουν το επίπεδο εμπιστοσύνης που έχουν στα αποτελέσματα. Τα σημαντικά ψηφία παρέχουν έναν τυποποιημένο τρόπο αναπαράστασης της ακρίβειας των μετρήσεων, υποδεικνύοντας τον αριθμό των ψηφίων που είναι γνωστά με βεβαιότητα συν ένα αβέβαιο ψηφίο.

Η διαχείριση της αβεβαιότητας της μέτρησης είναι κρίσιμης σημασίας σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της επιστήμης, της μηχανικής και της κατασκευής, όπου οι ακριβείς μετρήσεις είναι απαραίτητες για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων κατά τη διασφάλιση ποιοτικού ελέγχου ή αποτελεσματική διαχείριση της αβεβαιότητας μετρήσεων περιλαμβάνει προσεκτική εξέταση των πηγών αβεβαιότητας και την επιλογή κατάλληλων τεχνικών μέτρησης και οργάνων για την ελαχιστοποίηση ή τον έλεγχο αυτών των αβεβαιοτήτων.

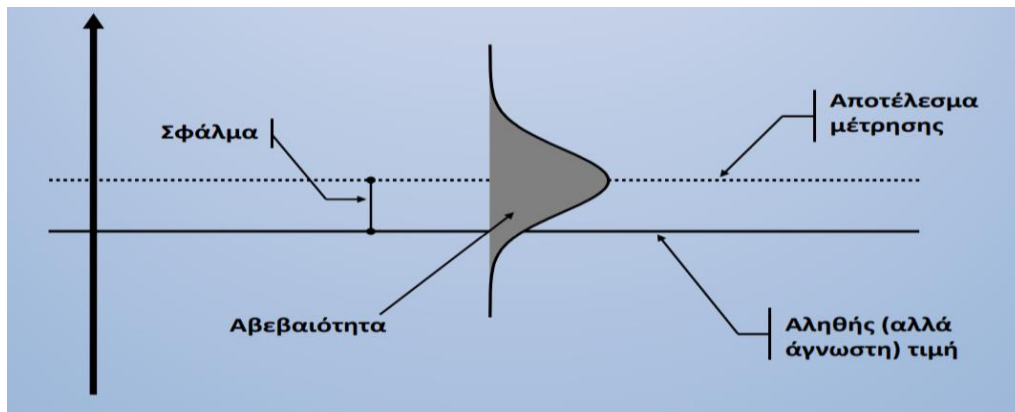
Σχετικά με την ονοματολογία για την αβεβαιότητα, στη βιβλιογραφία συνήθως γίνεται διαχωρισμός αβεβαιότητας και σφάλματος (error). Η αβεβαιότητα του μοντέλου εκφράζει την εν δυνάμει ανεπάρκεια του μοντέλου λόγω έλλειψης γνώσης για την υπό μελέτη διαδικασία, ενώ το σφάλμα του μοντέλου (modeling error) είναι η αναγνωρισμένη ανεπάρκεια που δίνει το μοντέλο όταν εφαρμόζεται στην πράξη. Αντίστοιχα, το σφάλμα μέτρησης (measurement error) είναι η διαφορά πραγματικής και παρατηρούμενης τιμής ενώ η αβεβαιότητα μέτρησης είναι η εκτίμηση για το σφάλμα μέτρησης που ορίζει ένα σύνολο δυνατών τιμών για το σφάλμα για μια συγκεκριμένη μέτρηση.



Σχήμα 5.1: Σύγκριση αβεβαιότητας και σφάλματος της τιμής του μετρούμενου μεγέθους [1].

5.2 Συστηματικά και τυχαία σφάλματα

Το αποτέλεσμα της μέτρησης ενός φυσικού μεγέθους είναι κατά κανόνα ακαθόριστο σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, δηλαδή σε περίπτωση επανάληψης της μέτρησης δε θα προκύψει ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα. Ακόμα και αν επαναληφθεί ένα πείραμα διατηρώντας τις ίδιες ακριβώς συνθήκες, κάποιος παράγοντας που δεν ελέγχεται μπορεί να επηρεάζει λιγότερο ή περισσότερο το αποτέλεσμα της μέτρησης. Για να γίνει ο εντοπισμός των πειραματικών αποκλίσεων στη μέτρηση θα πρέπει πρώτα να εντοπιστούν οι διαφορετικοί τύποι σφαλμάτων μέτρησης.



Σχήμα 5.2: Σφάλμα και αβεβαιότητα [1].

Οι δύο τύποι σφαλμάτων μέτρησης είναι τα συστηματικά σφάλματα (systematic errors) και τα τυχαία σφάλματα (random errors) που προσδίδουν και αντίστοιχα χαρακτηριστικά στις μετρήσεις.

Συστηματικά Σφάλματα

Τα συστηματικά σφάλματα είναι σφάλματα μέτρησης που έχουν ως αποτέλεσμα σταθερή απόκλιση από την πραγματική τιμή προς την ίδια κατεύθυνση, συχνά λόγω κάποιου ελαττώματος ή προβλήματος στο σύστημα μέτρησης. Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να προκύψουν με διάφορους τρόπους και μπορεί να επηρεάσουν όλες τις μετρήσεις που λαμβάνονται με την ίδια μέθοδο ή όργανο, οδηγώντας σε ανακρίβειες στα δεδομένα.

Μερικά κοινά παραδείγματα συστηματικών σφαλμάτων περιλαμβάνουν το μηδενικό σφάλμα, το σφάλμα κλίμακας και το σφάλμα παράλλαξης. Μηδενικό σφάλμα εμφανίζεται όταν το όργανο μέτρησης δεν διαβάζει το μηδέν όταν θα έπρεπε, οδηγώντας σε μια σταθερή απόκλιση στις ενδείξεις. Σφάλμα κλίμακας συμβαίνει όταν η βαθμονόμηση του οργάνου δεν έχει ρυθμιστεί σωστά, οδηγώντας σε σταθερή απόκλιση από την πραγματική τιμή. Σφάλμα παράλλαξης εμφανίζεται όταν η μέτρηση λαμβάνεται από εσφαλμένη γωνία ή απόσταση, οδηγώντας σε σταθερή απόκλιση της ένδειξης.

Η αντιμετώπιση συστηματικών σφαλμάτων είναι υψίστης σημασίας για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας των επιστημονικών ευρημάτων. Μια αποτελεσματική στρατηγική είναι η χρήση πειραμάτων ελέγχου διαδικασιών βαθμονόμησης. Τα πειράματα ελέγχου περιλαμβάνουν την εισαγωγή μιας γνωστής ποσότητας μιας τυπικής τιμής αναφοράς στη διαδικασία μέτρησης. Συγκρίνοντας τα ληφθέντα αποτελέσματα με τη γνωστή τιμή, οι ερευνητές μπορούν να εντοπίσουν και να διορθώσουν συστηματικά σφάλματα [2].

Η βαθμονόμηση είναι μια άλλη κρίσιμη τεχνική που χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του συστηματικών σφαλμάτων. Συγκρίνοντας τις ενδείξεις ενός οργάνου μέτρησης με τις τυπικές τιμές, οι ερευνητές μπορούν να προσδιορίσουν τα εγγενή ελαττώματα του οργάνου και να εφαρμόσουν αναλόγως διορθώσεις.

Επιπλέον, η διεξαγωγή του πειράματος πολλές φορές υπό διαφορετικές συνθήκες μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό συστηματικών σφαλμάτων [2]. Εάν οι σταθερές αποκλίσεις παραμένουν παρούσες σε όλες τις επαναλήψεις, οι ερευνητές μπορούν να συμπεράνουν την ύπαρξη συστηματικού σφάλματος και να επινοήσουν κατάλληλες στρατηγικές μετριασμού του.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ερευνητές χρησιμοποιούν πολλαπλές τεχνικές μέτρησης για να διασταυρώσουν τα αποτελέσματα. Εάν διαφορετικές τεχνικές αποδίδουν συνεπή

αποτελέσματα ακόμα η εμπιστοσύνη στην ακρίβεια των μετρήσεων αυξάνεται και ο αντίκτυπος των συστηματικών σφαλμάτων μειώνεται.

Παρά τις αυστηρές προσπάθειες, είναι δύσκολο να εξαλειφθούν πλήρως τα συστηματικά σφάλματα. Ωστόσο, η αναγνώριση της παρουσίας τους και ποσοτικοποίηση του μεγέθους τους επιτρέπει στους επιστήμονες να εκφράζουν το επίπεδο αβεβαιότητας στις μετρήσεις τους. Συμπεριλαμβάνοντας γραμμές σφάλματος οι αβεβαιότητες στα αποτελέσματα τους, οι ερευνητές μπορούν να μεταφέρουν το εύρος εντός του οποίου είναι πιθανόν να βρίσκεται η πραγματική τιμή [3].

Συμπερασματικά, τα συστηματικά σφάλματα αντιπροσωπεύουν σταθερές αποκλίσεις από την πραγματική τιμή στις μετρήσεις και μπορεί να προκύψουν λόγω διαφόρων παραγόντων όπως περιορισμοί οργάνων, πειραματική ρύθμιση ή μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων. Η αναγνώριση και η ελαχιστοποίηση συστηματικών σφαλμάτων είναι κρίσιμης σημασίας για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των επιστημονικών ερευνών. Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα, τα οποία μπορεί να έχουν σημαντικές συνέπειες για την επιστημονική γνώση και πρακτική [3]. Η αποδοχή της φύσης του συστηματικών σφαλμάτων είναι αναπόσπαστο μέρος της επιστημονικής διαδικασίας, που οδηγεί σε μια βαθύτερη κατανόηση του φυσικού κόσμου και βελτιώνει την ποιότητα της επιστημονικής γνώσης.

Τυχαία Σφάλματα

Τα τυχαία σφάλματα ακόμα γνωστά και ως στατιστικά σφάλματα ακόμα είναι ένας τύπος αβεβαιότητας μέτρησης που προκύπτει από απρόβλεπτους και ποικίλους παράγοντες κατά τη διαδικασία επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Αυτά τα σφάλματα οδηγούν σε διακυμάνσεις ή ασυνέπειες σε μεμονωμένες μετρήσεις, καθιστώντας δύσκολη την απόκτηση ίδιων τιμών για μια ποσότητα υπό τις ίδιες συνθήκες. Σε αντίθεση με τα συστηματικά σφάλματα, τα τυχαία σφάλματα οδηγούν σε διασπορά ή εξάπλωση τιμών γύρω από την πραγματική τιμή, υποθέτοντας ότι η πραγματική τιμή δεν επηρεάζεται από τα σφάλματα.

Παραδείγματα τυχαίων σφαλμάτων περιλαμβάνουν διακυμάνσεις στις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της μέτρησης, σφάλμα χειριστή κατά τη λήψη της μέτρησης ή εγγενή μεταβλητότητα στη διαδικασία μέτρησης λόγω της ευαισθησίας του οργάνου. Τα τυχαία σφάλματα μπορούν να μειωθούν αυξάνοντας το μέγεθος του δείγματος, βελτιώνοντας την τεχνική μέτρησης ή χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους για την εκτίμηση της αβεβαιότητας.

Η αντιμετώπιση και ελαχιστοποίηση των τυχαίων σφαλμάτων είναι απαραίτητη για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ακρίβειας των μετρήσεων. Μια κοινή προσέγγιση είναι η λήψη πολλαπλών μετρήσεων και υπολογισμός του μέσου όρου. Με αυτόν τον τρόπο ακόμα οι ερευνητές μπορούν να μειώσουν τον αντίκτυπο των τυχαίων σφαλμάτων, καθώς ο μέσος όρος τείνει να συγκλίνει προς την πραγματική τιμή με αυξανόμενο αριθμό μετρήσεων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στατιστική ανάλυση για τον προσδιορισμό της διασποράς ή της διασποράς των μετρήσεων, παρέχοντας μια εκτίμηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με τον μέσο όρο [1].

Αν γίνει συλλογή n μετρήσεων μιας τυχαίας μεταβλητής X , η αβεβαιότητα της μέτρησης είναι η εκτίμηση του σφάλματος μέτρησης που δίνεται από την τυπική απόκλιση s . Κάνοντας χρήση της κρίσιμης τιμής από την κατανομή Student και κάτω από προϋποθέσεις (X από κανονική κατανομή ή μεγάλο πλήθος n), το όριο της ακρίβειας επανάλυσης (random uncertainty) για κάθε επόμενη μέτρηση σε επίπεδο σημαντικότητας α είναι

$$\bar{x} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} s \quad (5.1)$$

Αντίστοιχα, η αβεβαιότητα για την εκτίμηση της μέσης τιμής μ είναι η εκτίμηση του σταθερού σφάλματος του μέσου όρου $s_{\bar{x}}=s/\sqrt{n}$ και το όριο της ακρίβειας για τη μέση τιμή είναι σε επίπεδο σημαντικότητας α

$$\bar{x} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} s / \sqrt{n} \quad (5.2)$$

Συμπερασματικά ακόμα τα τυχαία σφάλματα είναι μια εγγενής πτυχή των μετρήσεων, που πηγάζουν από διάφορους απρόβλεπτους παράγοντες που προκαλούν διακυμάνσεις στις μεμονωμένες μετρήσεις. Αν και είναι δύσκολο να εξαλειφθούν πλήρως, αυτές οι βεβαιότητες μπορούν να αντιμετωπιστούν και να αξιοποιηθούν μέσω στατιστικής ανάλυσης, λήψη πολλαπλών μετρήσεων και χρησιμοποίησης εννοιών ακριβείας και ορθότητας. Η αναγνώριση της φύσης του τυχαίου σφάλματος είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της εγκυρότητας των επιστημονικών ευρημάτων και για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε πρακτικές εφαρμογές.

5.3 Διάδοση σφάλματος μέτρησης

Η διάδοση του σφάλματος μέτρησης αναφέρεται στη διαδικασία εκτίμησης της αβεβαιότητας που σχετίζεται με μία μέτρηση υπολογιζόμενη από πολλαπλές μεταβλητές, κάθε μία από τις οποίες έχει τη δική της εγγενή αβεβαιότητα. Όταν σε μια μέτρηση εμπλέκονται πολλαπλές μεταβλητές, η αβεβαιότητα που σχετίζεται με κάθε μεταβλητή μπορεί να συμβάλει στη συνολική αβεβαιότητα του αποτελέσματος της μέτρησης.

Η διάδοση του σφάλματος μέτρησης γίνεται συνήθως με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων, όπως η διάδοση του τύπου σφάλματος ή οι προσομοιώσεις Monte Carlo. Ο τύπος διάδοσης του σφάλματος είναι μια απλή μέθοδος για την εκτίμηση της αβεβαιότητας σε μια μέτρηση που υπολογίζεται από πολλαπλές μεταβλητές. Αυτός ο τύπος λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα που σχετίζεται με κάθε μεταβλητή και τη μαθηματική σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

Οι προσομοιώσεις Monte Carlo, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνουν τη δημιουργία μεγάλου αριθμού τυχαίων δειγμάτων από την κατανομή κάθε μεταβλητής και τον υπολογισμό της προκύπτουσας κατανομής του αποτελέσματος της μέτρησης. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει μια ακριβέστερη εκτίμηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με το αποτέλεσμα της μέτρησης [4].

Η διάδοση του σφάλματος μέτρησης είναι σημαντική σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της επιστήμης, της μηχανικής και της κατασκευής, όπου οι ακριβείς μετρήσεις ακριβείας είναι απαραίτητες για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και τη διασφάλιση του ποιοτικού ελέγχου. Με την εκτίμηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με ένα αποτέλεσμα μέτρησης, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το επίπεδο εμπιστοσύνης στα αποτελέσματα και να ληφθούν πιο ενημερωμένες αποφάσεις με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα.

Έστω ότι υπάρχουν μετρήσεις ενός φυσικού μεγέθους X που είναι τυχαία μεταβλητή, δηλαδή το X είναι γνωστό με κάποια αβεβαιότητα σ_X που είναι η τυπική του απόκλιση. Έστω, επίσης, ένα δεύτερο φυσικό μέγεθος ενδιαφέροντος Y που δίνεται ως συνάρτηση του X , δηλαδή $Y = f(X)$. Η μεταβολή του Y , dY , για κάθε μικρή μεταβολή dX γύρω από κάποια τιμή x δίνεται ως

$$dY \cong \left(\frac{df}{dX} \right)_{X=x} dX, \quad (5.3)$$

όπου η προσέγγιση του αναπτύγματος Taylor έγινε μόνο ως πρώτη τάξη (πρώτη παράγωγο). Θεωρώντας τη μεταβολή $dX = x - \bar{x}$ και $dY = y - \bar{y}$, όπου \bar{x} και \bar{y} είναι οι μέσοι όροι των παρατηρήσεων των X και Y αντίστοιχα, προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για την αβεβαιότητα στην Y :

$$\sigma_Y^2 \sim \left(\frac{df}{dX} \right)_{X=x}^2 \sigma_X^2 \Leftrightarrow \sigma_Y \cong \left| \frac{df}{dX} \right|_{X=x} \sigma_X, \quad (5.4)$$

Η απόλυτη τιμή χρησιμοποιείται για να δίνει πάντα θετική τιμή στην αβεβαιότητα σ_Y , ακόμα και αν η παράγωγος της f είναι αρνητική.

Η σχέση (5.3) μπορεί να επεκταθεί και όταν η τυχαία μεταβλητή Y είναι συνάρτηση m παρατηρούμενων τυχαίων μεταβλητών X_1, X_2, \dots, X_m αντίστοιχα, και σ_{X_i, X_j} είναι η συνδιασπορά των X_i και X_j . Ο τύπος (5.4) ονομάζεται νόμος διάδοσης των σφαλμάτων (law of propagation of errors) και δίνει μία εκτίμηση της μέγιστης αβεβαιότητας σ_Y της Y για δεδομένες αβεβαιότητες $\sigma_{X_1}, \sigma_{X_2}, \dots, \sigma_{X_m}$. Αυτός ο νόμος είναι αυστηρά ακριβής όταν η συνάρτηση f είναι γραμμική (η ανάπτυξη της f κατά Taylor συμπίπτει με την ίδια την f). Η f μπορεί να έχει μη γραμμική μορφή που δεν επιτρέπει καλή προσέγγιση της αβεβαιότητας σ_Y αν δεν επεκταθεί το ανάπτυγμα Taylor σε μεγαλύτερη τάξη [1].

Όταν οι τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_m είναι ανεξάρτητες, το δεύτερο διπλό άθροισμα στη σχέση (5.4) απαλείφεται και αφού οι συνδιασπορές μηδενίζονται τότε η αβεβαιότητα δίνεται ως:

$$\sigma_Y \cong \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{df}{dX_i}\right)^2_{X_i=x_i} \sigma_{x_i}^2}, \quad (5.5)$$

5.4 Κατηγοριοποίηση Αβεβαιοτήτων (Τύπου Α & Τύπου Β)

Για μια τυχαία μεταβλητή, η μεταβλητότητα (variance) της κατανομής της ή η θετική τετραγωνική ρίζα της μεταβλητότητας, η οποία ονομάζεται τυπική απόκλιση (standard deviation), χρησιμοποιείται ως ένα μέτρο της διασποράς των τιμών της.

Η τυπική αβεβαιότητα της μέτρησης (standard uncertainty of measurement) σχετίζεται με την εκτίμηση του αποτελέσματος της μέτρησης y , συμβολίζεται με $u(y)$ και είναι η τυπική απόκλιση της μετρούμενης ποσότητας Y . Προσδιορίζεται και υπολογίζεται από τις εκτιμήσεις x_i , των X_i και τις σχετικές τυπικές τους αβεβαιότητες $u(x_i)$. Η τυπική αβεβαιότητα έχει τις ίδιες διαστάσεις με την αντίστοιχη ποσότητα.

Κατηγοριοποίηση των αβεβαιοτήτων σε Τύπου Α και Τύπου Β είναι μια κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με μια μέτρηση [5,6].

Αβεβαιότητα Τύπου Α

Αβεβαιότητα τύπου Α είναι ένας τύπος αβεβαιότητας που προκύπτει από τη στατιστική ανάλυση μιας σειράς μετρήσεων. Χαρακτηρίζεται τυπικά από την τυπική απόκλιση του μέσου όρου και αντανakλά τη μεταβλητότητα στη διαδικασία μέτρησης λόγω τυχαίων ή στοχαστικών επιδράσεων.

Η αβεβαιότητα Τύπου Α υπολογίζεται λαμβάνοντας πολλαπλές μετρήσεις της ίδιας ποσότητας υπό ίδιες συνθήκες και στη συνέχεια υπολογίζοντας την τυπική απόκλιση του μέσου όρου. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι η κατανομή των μετρήσεων είναι κανονική και ότι τα σφάλματα μέτρησης είναι τυχαία και ασύνδετα.

Η αβεβαιότητα μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας τον αριθμό των μετρήσεων ή βελτιώνοντας τις τεχνικές μέτρησης προκειμένου να μειωθεί η μεταβλητότητα στη διαδικασία μέτρησης. Με τη λήψη περισσότερων μετρήσεων και τη μείωση της μεταβλητότητας η αβεβαιότητα Τύπου Α μπορεί να μειωθεί, οδηγώντας σε μια πιο ακριβή εκτίμηση της πραγματικής τιμής της μετρούμενης ποσότητας.

Αβεβαιότητα Τύπου Β

Η αβεβαιότητα Τύπου Β είναι ένας τύπος αβεβαιότητας που προκύπτει από πηγές διαφορετικές από τη στατιστική διακύμανση στη διαδικασία μέτρησης. Αυτό περιλαμβάνει αβεβαιότητα που σχετίζεται με τη βαθμονόμηση, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τον

εξοπλισμό μέτρησης, μεταξύ άλλων. Η αβεβαιότητα Τύπου Β συνήθως εκτιμάται χρησιμοποιώντας πληροφορίες από τις προδιαγραφές των κατασκευαστών, τα πιστοποιητικά διακρίβωσης ή τη γνώμη ειδικού.

Η αβεβαιότητα τύπου Β είναι πιο δύσκολο να εκτιμηθεί από την αβεβαιότητα τύπου Α, καθώς, συχνά, απαιτεί γνώσεις και πληροφορίες σχετικά με το σύστημα ή τη διαδικασία μέτρησης. Γενικά εκφράζεται ως τυπική απόκλιση ή εύρος τιμών και αντικατοπτρίζει το εύρος των πιθανών τιμών λόγω των πηγών αβεβαιότητας που δε σχετίζονται με τα τυχαία ή στοχαστικά αποτελέσματα στη διαδικασία μέτρησης.

Παραδείγματα πηγών αβεβαιότητας τύπου Β περιλαμβάνουν διακυμάνσεις θερμοκρασίας, ανάλυση του εξοπλισμού μέτρησης, αβεβαιότητες που σχετίζονται με τη βαθμονόμηση του εξοπλισμού και την επίδραση εξωτερικών παραγόντων όπως οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι αβεβαιότητες τύπου Β μπορούν συχνά να μειωθούν με τη βελτίωση του συστήματος μέτρησης, όπως με τη βελτίωση της διαδικασίας διακρίβωσης ή με τη μείωση των εξωτερικών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν τη μέτρηση [2].

Για να εκτιμηθεί η συνολική αβεβαιότητα που σχετίζεται με μια μέτρηση, οι αβεβαιότητες τύπου Α και τύπου Β συνήθως συνδυάζονται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ρίζας του αθροίσματος τετραγώνων (RSS). Η μέθοδος RSS περιλαμβάνει τη λήψη της τετραγωνικής ρίζας του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους αβεβαιοτήτων τύπου Α και τύπου Β. Αυτό παρέχει μια εκτίμηση της συνολικής αβεβαιότητας που σχετίζεται με τη μέτρηση, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις στατιστικές όσο και τις μη στατιστικές πηγές αβεβαιότητας.

Η κατηγοριοποίηση των αβεβαιοτήτων σε τύπου Α και τύπου Β μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό των πηγών αβεβαιότητας και στον προσδιορισμό των κατάλληλων μεθόδων για την εκτίμηση και τη μείωση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με μια μέτρηση. Είναι σημαντικό να εξετάζονται προσεκτικά όλες οι πηγές αβεβαιότητας και να λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα για να ελαχιστοποιείται ο αντίκτυπος τους στο αποτέλεσμα της μέτρησης.

5.5 Η αβεβαιότητα των μετρήσεων των χαμηλόσυχνων Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

Η αβεβαιότητα των μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας (EMF) εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ακρίβεια του οργάνου μέτρησης, οι περιβαλλοντικές συνθήκες στη θέση μέτρησης και τα χαρακτηριστικά του EMF που μετριέται. Τα όργανα μέτρησης για EMF χαμηλής συχνότητας έχουν συνήθως μια καθορισμένη αβεβαιότητα μέτρησης, η οποία καθορίζεται από τον κατασκευαστή του οργάνου και συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό της ένδειξης ή μια σταθερή τιμή [8,9,10]. Η αβεβαιότητα μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η ανάλυση του οργάνου, η σταθερότητα του οργάνου με την πάροδο του χρόνου και η ακρίβεια βαθμονόμησης.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν επίσης να επηρεάσουν την αβεβαιότητα των μετρήσεων EMF χαμηλής συχνότητας. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Επιπλέον, η παρουσία μεταλλικών αντικειμένων ή άλλων αγώγιμων υλικών στο περιβάλλον μέτρησης μπορεί να παραμορφώσει το μετρούμενο μέγεθος και να επηρεάσει την ακρίβεια της μέτρησης.

Τα χαρακτηριστικά του EMF που μετριέται μπορούν, επίσης, να συμβάλουν στην αβεβαιότητα της μέτρησης. Για παράδειγμα, οι μετρήσεις σύνθετων κυματομορφών ή μη ομοιόμορφων πεδίων μπορεί να είναι πιο δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια από τις μετρήσεις απλών ημιτονοειδών πεδίων. Επιπλέον, το εύρος συχνοτήτων του EMF μπορεί να επηρεάσει

την αβεβαιότητα μέτρησης, με τις χαμηλότερες συχνότητες να είναι γενικά πιο δύσκολο να μετρηθούν με ακρίβεια.

Για να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα των μετρήσεων, είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται όργανα υψηλής ποιότητας που είναι σωστά βαθμονομημένα και συντηρημένα και να ελέγχονται προσεκτικά οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Είναι επίσης σημαντικό να χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές μέτρησης και να λαμβάνονται υπόψη τυχόν γνωστές πηγές αβεβαιότητας μέτρησης κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

5.6 Πηγές αβεβαιότητας μέτρησης χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Υπάρχουν διάφορες πηγές αβεβαιότητας μέτρησης για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας, που μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Οι πιθανές πηγές μέτρησης αναφέρονται παρακάτω:

Τα όργανα μέτρησης

Τα όργανα είναι μια από τις κύριες πηγές αβεβαιότητας μέτρησης για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας. Η ακρίβεια του οργάνου μέτρησης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ακολουθούν ορισμένοι παράγοντες που σχετίζονται με τα όργανα που μπορούν να συμβάλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων:

- **Ευαισθησία και δυναμικό εύρος:** Η ευαισθησία του οργάνου αναφέρεται στην ικανότητά του να ανιχνεύει μικρές αλλαγές στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, ενώ το δυναμικό εύρος αναφέρεται στην ικανότητα να μετράει τα πεδία χαμηλής και υψηλής έντασης. Η χαμηλή ευαισθησία ή το περιορισμένο δυναμικό εύρος μπορεί να οδηγήσει σε αβεβαιότητα στη μέτρηση, ιδιαίτερα σε καταστάσεις όπου η ένταση του πεδίου ποικίλλει ευρέως.
- **Σφάλματα διακρίβωσης:** Τα σφάλματα διακρίβωσης μπορεί να δημιουργήσουν αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της μέτρησης [11]. Διακρίβωση είναι η διαδικασία σύγκρισης της μέτρησης του οργάνου με ένα γνωστό πρότυπο αναφοράς για να διασφαλιστεί ότι είναι ακριβής. Τυχόν σφάλματα στη διαδικασία διακρίβωσης μπορεί να προκαλέσουν ανακρίβειες στις επόμενες μετρήσεις.
- **Εξαρτήματα οργάνου:** Η ποιότητα των εξαρτημάτων του οργάνου μπορεί επίσης να επηρεάσει την ακρίβεια της μέτρησης. Εξαρτήματα όπως η κεραία, ο ενισχυτής και το φίλτρο παίζουν όλα κάποιο ρόλο στη διαδικασία μέτρησης και τυχόν ελαττώματα ή ασυνέπειες σε αυτά τα εξαρτήματα μπορούν να οδηγήσουν σε αβεβαιότητα μέτρησης [12].
- **Περιβαλλοντικοί παράγοντες:** Η απόδοση του οργάνου μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [11]. Θα πρέπει να εξεταστούν οι προδιαγραφές του κατασκευαστή, για να καθοριστούν οι συνθήκες υπό τις οποίες θα πρέπει να χρησιμοποιείται το όργανο, ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση.

Η αντιμετώπιση αυτών των πηγών αβεβαιότητας περιλαμβάνει προσεκτική επιλογή, διακρίβωση και συντήρηση των οργάνων μέτρησης, καθώς και τήρηση των καθιερωμένων πρωτοκόλλων και προτύπων μέτρησης. Αναγνωρίζοντας και διαχειριζόμενη τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τα όργανα μέτρησης, οι ερευνητές και οι επαγγελματίες μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλής συχνότητας και να εξασφαλίσουν ουσιαστικά και εφαρμόσιμα αποτελέσματα.

Θόρυβος

Ο θόρυβος περιβάλλοντος είναι μια άλλη πηγή αβεβαιότητας μέτρησης για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας. Ο θόρυβος περιβάλλοντος αναφέρεται στην παρουσία άλλων ηλεκτρομαγνητικών σημάτων στο περιβάλλον μέτρησης που μπορεί να επηρεάσουν το σήμα μέτρησης. Ακολουθούν ορισμένοι παράγοντες που σχετίζονται με το θόρυβο του περιβάλλοντος που μπορούν να συμβάλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων:

- Γραμμές ηλεκτρικού ρεύματος: Οι γραμμές ηλεκτροδότησης μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία ιδιαίτερα ακόμα και σε χαμηλές συχνότητες, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν το σήμα μέτρησης [13]. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η εγγύτητα του οργάνου μέτρησης σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας και οι μετρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται σε απόσταση που ελαχιστοποιεί τον αντίκτυπο του θορύβου της γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ηλεκτρονικές συσκευές: Ηλεκτρονικές συσκευές όπως υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και άλλες συσκευές μπορούν να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία που μπορεί να επηρεάσουν το σήμα μέτρησης. Αυτές οι συσκευές θα πρέπει να απενεργοποιούνται και να διατηρούνται σε ασφαλή απόσταση από το όργανο μέτρησης για να ελαχιστοποιηθεί η επίδρασή τους στη μέτρηση.
- Άλλες ηλεκτρομαγνητικές πηγές: Άλλες ηλεκτρομαγνητικές πηγές στο περιβάλλον, όπως ραδιόφωνα, τηλεόραση και άλλος εξοπλισμός, μπορούν να δημιουργήσουν παρεμβολές που μπορεί να επηρεάσουν το σήμα μέτρησης [13]. Η μέτρηση πρέπει να πραγματοποιείται σε περιβάλλον όσο το δυνατόν πιο απαλλαγμένο από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος του θορύβου περιβάλλοντος στην αβεβαιότητα των μετρήσεων, είναι σημαντικό να εντοπιστούν οι πιθανές πηγές παρεμβολών και να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση των επιπτώσεών τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη μετακίνηση του οργάνου μέτρησης σε θέση που επηρεάζεται λιγότερο από τον θόρυβο του περιβάλλοντος, την προστασία του οργάνου από εξωτερικές πηγές παρεμβολών ή τη χρήση μιας τεχνικής επεξεργασίας σήματος όπως το φιλτράρισμα για την αφαίρεση θορύβου από το σήμα μέτρησης.

Παρεμβολές από άλλα πεδία

Οι παρεμβολές από άλλα ηλεκτρομαγνητικά πεδία είναι μια άλλη πηγή αβεβαιότητας μέτρησης για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας. Αυτός ο τύπος παρεμβολής συμβαίνει όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από άλλη πηγή παρεμβαίνει στο σήμα μέτρησης, οδηγώντας σε αλλοίωση της μέτρησης. Ακολουθούν ορισμένοι παράγοντες που σχετίζονται με παρεμβολές που μπορούν να συμβάλλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων:

- Εγγύτητα σε άλλες πηγές: Όσο πιο κοντά βρίσκεται το όργανο μέτρησης σε άλλες πηγές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα παρεμβολής. Είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη η θέση άλλων πηγών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και να τοποθετείται το όργανο μέτρησης ανάλογα.
- Επικαλύψεις συχνότητας: Εάν η συχνότητα του παρεμβαλλόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επικαλύπτεται με τη συχνότητα που μετρείται, είναι πιο πιθανό να προκύψει παρεμβολή. Αυτό συμβαίνει επειδή το σήμα παρεμβολής μπορεί να εκληφθεί λανθασμένα με το σήμα μέτρησης.
- Κατεύθυνση του σήματος παρεμβολής: Η κατεύθυνση του σήματος παρεμβολής μπορεί να επηρεάσει το επίπεδο παρεμβολής. Εάν το σήμα παρεμβολής προέρχεται από κατεύθυνση που είναι κάθετη στο όργανο μέτρησης, η παρεμβολή θα

ελαχιστοποιηθεί. Ωστόσο, εάν το σήμα παρεμβολής προέρχεται από κατεύθυνση που είναι παράλληλη με το όργανο μέτρησης, η παρεμβολή θα είναι μεγαλύτερη.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος των παρεμβολών από άλλα ηλεκτρομαγνητικά πεδία στην αβεβαιότητα των μετρήσεων, είναι σημαντικό να εντοπιστούν οι πιθανές πηγές παρεμβολών και να ληφθούν μέτρα για την ελαχιστοποίηση της επίδρασής τους. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη μετακίνηση του οργάνου μέτρησης σε μια θέση που επηρεάζεται λιγότερο από παρεμβολές, την προστασία του οργάνου από εξωτερικές πηγές παρεμβολών και τη χρήση μιας τεχνικής επεξεργασίας σήματος όπως το φιλτράρισμα για την αφαίρεση παρεμβολών από το σήμα μέτρησης.

Ανθρώπινοι Παράγοντες

Οι ανθρώπινοι παράγοντες δύνανται, επίσης, να συμβάλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας. Αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με τα άτομα που πραγματοποιούν τη μέτρηση και μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια και τη συνέπεια των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Ακολουθούν ορισμένοι ανθρώπινοι παράγοντες που μπορούν να συμβάλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων:

- **Εκπαίδευση και εμπειρία χειριστή:** Η εκπαίδευση και η εμπειρία του χειριστή μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και τη συνέπεια των αποτελεσμάτων των μετρήσεων. Οι χειριστές που δεν είναι κατάλληλα εκπαιδευμένοι ή άπειροι ενδέχεται να μην μπορούν να χρησιμοποιήσουν σωστά το όργανο μέτρησης ή να ερμηνεύσουν με ακρίβεια τα αποτελέσματα.
- **Κόπωση και συγκέντρωση:** Η κόπωση και η συγκέντρωση μπορεί να επηρεάσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Οι χειριστές που είναι κουρασμένοι ή δεν μπορούν να συγκεντρωθούν ενδέχεται να κάνουν σφάλματα στη διαδικασία μέτρησης ή να παρερμηνεύσουν τα αποτελέσματα.
- **Μεροληψία:** Η μεροληψία μπορεί να συμβεί όταν ο χρήστης έχει μια προκατειλημμένη αντίληψη για το ποια θα πρέπει να είναι τα αποτελέσματα της μέτρησης ή έχει κατοχυρωμένο συμφέρον να επιτύχει ένα συγκεκριμένο αποτέλεσμα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή ή ασυνεπή αποτελέσματα μέτρησης.
- **Ανθρώπινο σφάλμα:** Ανθρώπινο σφάλμα μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε στάδιο της διαδικασίας μέτρησης, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης του εξοπλισμού, της λήψης της μέτρησης και της καταγραφής των αποτελεσμάτων. Οι συνήθεις πηγές ανθρώπινου λάθους περιλαμβάνουν την εσφαλμένη ανάγνωση ή παρερμηνεία του οργάνου μέτρησης, εσφαλμένη εγκατάσταση ή τοποθέτηση του οργάνου και σφάλματα εισαγωγής δεδομένων.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος των ανθρώπινων παραγόντων στην αβεβαιότητα των μετρήσεων, είναι σημαντικό να εκπαιδεύονται σωστά οι χειριστές, να παρέχονται σαφείς και λεπτομερείς οδηγίες για τη διαδικασία μέτρησης και να χρησιμοποιούνται τυποποιημένες διαδικασίες για τη μείωση του κινδύνου ανθρώπινου λάθους. Οι χειριστές θα πρέπει επίσης να ενθαρρύνονται να κάνουν διαλείμματα για να μειώσουν την κόπωση και να διατηρήσουν τη συγκέντρωσή τους. Τέλος, είναι σημαντικό να παρακολουθείται και να ελέγχεται η διαδικασία μέτρησης για τον εντοπισμό και τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων ή προκαταλήψεων που μπορούν να υπάρχουν.

Η Δειγματοληψία και ο Μέσος Όρος

Η δειγματοληψία και ο μέσος όρος είναι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μείωση της αβεβαιότητας των μετρήσεων για ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας. Αυτές οι

τεχνικές περιλαμβάνουν τη λήψη πολλαπλών μετρήσεων με την πάροδο του χρόνου και τον συνδυασμό τους για να ληφθεί ένα πιο ακριβές και αξιόπιστο αποτέλεσμα μέτρησης. Ακολουθούν ορισμένοι παράγοντες που σχετίζονται με τη δειγματοληψία και τον μέσο όρο που μπορούν να συμβάλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων:

- **Ρυθμός δειγματοληψίας:** Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι η συχνότητα με την οποία το όργανο μέτρησης λαμβάνει μετρήσεις. Εάν ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι πολύ χαμηλός, η μέτρηση μπορεί να χάσει διακυμάνσεις στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, οδηγώντας σε ανακριβή αποτελέσματα. Εάν ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι πολύ υψηλός, η μέτρηση μπορεί να περιλαμβάνει θόρυβο ή άλλα ανεπιθύμητα σήματα οδηγώντας σε αύξηση της αβεβαιότητας της μέτρησης.
- **Παράθυρο μέσου όρου:** Το παράθυρο μέσου όρου είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία υπολογίζεται ο μέσος όρος των μετρήσεων. Εάν το παράθυρο του μέσου όρου είναι πολύ μικρό, οι μετρήσεις ενδέχεται να επηρεασθούν από θόρυβο ή άλλα ανεπιθύμητα σήματα. Εάν το παράθυρο μέτρησης στον μέσο όρο είναι πολύ μεγάλο, η μέτρηση μπορεί να χάσει διακυμάνσεις στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, οδηγώντας σε ανακριβή αποτελέσματα.
- **Αριθμός δειγμάτων:** Ο αριθμός των δειγμάτων που λαμβάνονται από το παράθυρο μέσου όρου μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μέτρησης. Ένας μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων θα οδηγήσει σε ένα πιο ακριβές αποτέλεσμα μέτρησης, αλλά αυτό μπορεί να μην είναι πρακτικό σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω περιορισμών χρόνου ή πόρων.
- **Μεταβλητότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου:** Η μεταβλητότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, επίσης, επηρεάζει την ακρίβεια του αποτελέσματος της μέτρησης. Εάν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι πολύ μεταβλητό μπορούν να χρειαστούν περισσότερες μετρήσεις για να ληφθεί ένα ακριβές και αξιόπιστο αποτέλεσμα μέτρησης.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος της δειγματοληψίας και του μέσου όρου στην αβεβαιότητα των μετρήσεων, είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται κατάλληλος ρυθμός δειγματοληψίας, παράθυρο μέσου όρου και αριθμός δειγμάτων με βάση τη μεταβλητότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και τους διαθέσιμους πόρους. Είναι επίσης σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το όργανο μέτρησης είναι διακριβωμένο και ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται με συνέπεια και ακρίβεια με την πάροδο του χρόνου.

Τεχνικές Επεξεργασίας Σήματος

Οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της αβεβαιότητας μέτρησης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν την εφαρμογή αλγόριθμων στα ακατέργαστα δεδομένα μέτρησης για να φιλτράρουν τον θόρυβο και άλλα ανεπιθύμητα σήματα και να εξάγουν το σήμα που μας ενδιαφέρει [14]. Ακολουθούν ορισμένοι παράγοντες που σχετίζονται με την επεξεργασία σήματος που μπορούν να συμβάλουν στην αβεβαιότητα των μετρήσεων:

- **Επιλογή αλγορίθμου:** Η επιλογή του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του σήματος μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία του αποτελέσματος της μέτρησης [14]. Διαφορετικοί αλγόριθμοι μπορεί να είναι πιο κατάλληλοι για διαφορετικούς τύπους σημάτων ή θορύβου και είναι σημαντικό να επιλεγεί ένας αλγόριθμος που να είναι κατάλληλος για το σήμα που μετρείται.
- **Παράμετροι αλγορίθμου:** Οι παράμετροι του αλγορίθμου που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία του σήματος μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία

του αποτελέσματος της μέτρησης. Είναι σημαντικό να επιλέγουν προσεκτικά οι παράμετροι του αλγόριθμου με βάση τα χαρακτηριστικά του μετρούμενου σήματος και το επίπεδο θορύβου ή παρεμβολής που υπάρχει.

- Χρόνος επεξεργασίας: Ο χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για την επεξεργασία του σήματος μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία του αποτελέσματος της μέτρησης [14]. Εάν ο χρόνος επεξεργασίας είναι πολύ μικρός, ο αλγόριθμος ενδέχεται να μην μπορεί να φιλτράρει όλους τους θορύβους ή τα ανεπιθύμητα σήματα. Εάν ο χρόνος επεξεργασίας είναι πολύ μεγάλος, μπορεί να μην είναι πρακτική η χρήση της τεχνικής σε εφαρμογές μέτρησης σε πραγματικό χρόνο.
- Διακρίβωση της τεχνικής επεξεργασίας σήματος: Όπως κάθε άλλη τεχνική μέτρησης, οι τεχνικές επεξεργασίας σήματος πρέπει να διακριβωθούν για να διασφαλιστεί ότι παρέχουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα [14]. Είναι σημαντικό να διακριβωθεί η τεχνική επεξεργασίας σήματος στο συγκεκριμένο όργανο μέτρησης και να επικαιροποιηθεί η απόδοση του υπό διαφορετικές συνθήκες.

Για να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος της επεξεργασίας σήματος στην αβεβαιότητα της μέτρησης, είναι σημαντικό να επιλεγεί προσεκτικά ο κατάλληλος αλγόριθμος και οι παράμετροι του αλγόριθμου, με βάση τα χαρακτηριστικά του σήματος που μετρείται και το επίπεδο του θορύβου ή παρεμβολής που υπάρχει. Είναι επίσης σημαντικό να επικυρωθεί η απόδοση της τεχνικής επεξεργασίας σήματος για διαφορετικές συνθήκες και να διακριβωθεί η τεχνική για να διασφαλιστούν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Βιβλιογραφία

- [1] Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων ΕΜΠ, Link: <http://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1109/document/MEYT-2020-2.pdf>
- [2] International Organization for Standardization (ISO), “Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology”, Geneva, 1993, ISBN 92-67-10175-1.
- [3] International Organization for Standardization (ISO), “Guide to the expression of the uncertainty in measurement (GUM)”, 1st ed, 1993, corrected and reprinted 1995, Geneva, Switzerland. ISBN 92-67-10188-9.
- [4] IEC 61786. Measurement of Low Frequency Magnetic and Electric Fields with Regard to Exposure of Human Beings — Special Requirements for Instruments and Guidance for Measurements (1998).
- [5] IEEE Std 644-1994. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines (1994).
- [6] M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio and G. d’Amore, “Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 97, No 4, pp. 363–368, 2001.
- [7] B. Vulevic and P. Osmokrovic, “Evaluation of Uncertainty in the Measurement of Environmental Electromagnetic Fields”, Radiation Protection Dosimetry (2010), doi: 10.1093/rpd/ncq158, First published online: May 28, 2010. Available at <http://rpd.oxfordjournals.org/content/early/2010/05/28/rpd.ncq158.abstract>.
- [8] International Standards Organisation (1999) ISO/IEC 17025: General Requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Γενικές Απαιτήσεις για την Ικανότητα των Εργαστηρίων Δοκιμών και Διακριβώσεων). ISO, Geneva.
- [9] Πρότυπο IEC 62110:2009, “Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure”, 2009.
- [10] Narda Safety Test Solutions, EFA-300 Operating Manual.
- [11] Μετρήσεις και Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων ΕΜΠ, Link: <http://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1109/document/MEYT-2020-2.pdf>
- [12] L. Kheifets, A. A. Afifi, R. Shimkhada, “Public Health Impact of Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields”, Environmental Health Perspectives, 114(10), 1532–1537, 2006.
- [13] A. Arduino, O. Bottauscio, M. Chiampi, I. Laakso, L. Zilberti, “Computational Low Frequency Electromagnetic Dosimetry Based on Magnetic Field Measurements”, IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, 1–1, 2018.
- [14] R. G. Olsen, P. S. K. Wong, “Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, 7(4), 2046–2055, 1992.
- [15] L. Kheifets, J. D. Bowman, H. Checkoway, M. Feychting, J. M. Harrington, R. Kavet, E. van Wijngaarden, “Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations”, Occupational and Environmental Medicine, 66(2), 72–80, 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Μετρήσεις Χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια των ατόμων από ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας, έχει καταστεί απαραίτητη η μέτρησή τους σε περιοχές που επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό. Αυτή η ενότητα εστιάζει σε αυτές τις μετρήσεις σε τοποθεσίες όπως υποσταθμοί υψηλής τάσης και περιοχές κοντά σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [1–6]. Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει τα συγκεκριμένα βήματα που πρέπει να γίνουν κατά τη διεξαγωγή μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων οδηγιών για τη συμπλήρωση των πρωτοκόλλων μετρήσεων και την αναφορά των αποτελεσμάτων. Επίσης περιγράφει τη διενέργεια μετρήσεων Η/Μ πεδίων σε περιοχές εντός της Αττικής και της Βοιωτίας, παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες για τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις, παρουσιάζει τα αποτελέσματά τους και τα συγκρίνει με τα τρέχοντα όρια ασφαλούς έκθεσης.

6.1 Προπαρασκευή Μετρήσεων

Κατά την αρχική φάση της δοκιμής, οι στόχοι των μετρήσεων καθορίζονται με σαφήνεια για τον προσδιορισμό των απαραίτητων οργάνων (όπως η ζώνη διέλευσης και το όργανο της περιοχής εμβέλειάς της) και για τη δημιουργία κατάλληλου πρωτοκόλλου μέτρησης. Επιπλέον, πριν από την επίσκεψη στην περιοχή μέτρησης, καταβάλλονται προσπάθειες για τη συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών για την περιοχή, ακολουθούμενη από τη διασφάλιση της σωστής λειτουργίας της συσκευής μέτρησης. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται επίσκεψη στο πεδίο μέτρησης και καθορίζονται όλα τα απαραίτητα βήματα πριν από την έναρξη δοκιμής. Ακολούθως, περιγράφονται λεπτομερώς οι αρχικές διαδικασίες που εφαρμόζονται για την ακριβή εκτέλεση των μετρήσεων.

Προετοιμασία

Πρωταρχικός στόχος είναι η μέτρηση των τιμών των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που εκπέμπονται από ηλεκτρικές διατάξεις υψηλής τάσης, όπως γραμμές μεταφοράς και υποσταθμοί. Επιπλέον, στόχος είναι η επαλήθευση της συμμόρφωσης ή μη αυτών των τιμών με τα όρια ασφαλούς έκθεσης. Στη συνέχεια, συντάσσεται ένα πρωτόκολλο μέτρησης που περιλαμβάνει λεπτομέρειες σχετικά με τη θέση, τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, τις προδιαγραφές του εξοπλισμού (τάση, ισχύς), τη διάταξη του χώρου, την ημερομηνία και τη διάρκεια της δοκιμής, τις περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία και θερμοκρασία) για τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν. Επιπροσθέτως, συλλέγονται πληροφορίες για την τοποθεσία που θα πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις. Τέλος, προσδιορίζεται ο απαιτούμενος και προαιρετικός εξοπλισμός που απαιτείται για τη διεξαγωγή των μετρήσεων.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε έχει ως εξής:

- Όργανο μέτρησης πεδίων με αισθητήρες ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου
- Οπτική ίνα
- Βάση στήριξης αισθητήρα (τρίποδο)
- Υγρόμετρο
- Θερμόμετρο
- Μετροταινία
- Φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής (προαιρετικό)
- Φωτογραφική μηχανή (προαιρετικό)
- Φορητή μονάδα ελέγχου - διακρίβωσης του πεδιομέτρου (προαιρετικό).

Ο εξοπλισμός μέτρησης για τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας παρέχεται από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Αυτός ο εξοπλισμός παρατίθεται στον πίνακα που ακολουθεί. Το κεφάλαιο 4 εξηγεί πως τα εργαστηριακά όργανα μέτρησης ανταποκρίνονται στις ανάγκες των στόχων που έχουν τεθεί. Το εργαστήριο είναι διαπιστευμένο κατά ISO/IEC 17025 [7], το οποίο απαιτεί τον καθορισμό των οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας και τη διεξαγωγή δοκιμών σε αυτά.

Πίνακας 6.1: Εξοπλισμός μέτρησης ΗΜΠ Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

Περιγραφή	Κατασκευαστής / Τύπος	Σειριακός Αριθμός
Πεδιόμετρο	PMM / 8053 PMM / EHP-50B	152WK50252 242WM40220
Πεδιόμετρο	NARDA / EFA-300: NARDA / 2245/30 NARDA / 2245/90.10 NARDA / 2245/90.31	Z-0006 AT-0013 X-0016
Υγρόμετρο - Θερμόμετρο	Testo / 645	00582535/109
Υγρόμετρο – Θερμόμετρο	Testo/625	01132403
Υγρόμετρο – Θερμόμετρο	Testo/625	01365697
Υγρόμετρο – Θερμόμετρο	GREISINGER / GMH 3300	-
Υγρόμετρο - Θερμόμετρο	OMEGAETTE / HH3314	06801031
Μετροταινία	ELSON (100m)	-

Μετά την επιλογή του εξοπλισμού μέτρησης, είναι σημαντικό να παρακολουθείται το περιβάλλον πριν ολοκληρωθούν οι μέθοδοι μέτρησης. Αυτό περιλαμβάνει την παρακολούθηση της τοποθεσίας και την αξιολόγηση των συνθηκών. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας γίνονται οι ακόλουθες ενέργειες:

1. Λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Εάν οι συνθήκες είναι ακραίες, οι μετρήσεις δεν πραγματοποιούνται επειδή η ακρίβεια του οργάνου ενδέχεται να μην εμπίπτει εντός των ορίων της διακρίβωσης και των προδιαγραφών του κατασκευαστή.
2. Πραγματοποιείται ένας γρήγορος έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν τα επίπεδα πεδίου βρίσκονται εντός του επιθυμητού εύρους. Εάν οι τιμές του πεδίου είναι υψηλές, είναι απαραίτητη η γνώση της χρονικής περιόδου (ώρα/ημέρα) κατά την οποία αναμένεται να εμφανιστούν αυτές οι τιμές.

3. Προσδιορίζονται οι πηγές που συμβάλλουν στο υπό μέτρηση πεδίο, το μέγεθος και η θέση στο χώρο, καθώς και η απόστασή τους από χώρους που συχνάζουν άνθρωποι, για την καλύτερη εκτίμηση των αναμενόμενων εντάσεων πεδίου στον χώρο και των περιοχών με αυξημένη επικινδυνότητα. Σε περιβάλλον μέτρησης με γραμμές υψηλής ή υπερυψηλής τάσης ο προσδιορισμός των παραπάνω στοιχείων καθίσταται σχετικά εύκολη διαδικασία σε αντίθεση με τους υποσταθμούς μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ιδιομορφίας και της πολυπλοκότητας της εγκατάστασης.
4. Απαραίτητη είναι η καταγραφή πληροφοριών σχετικά με τις πηγές ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου, συμπεριλαμβανομένης της ισχύος, της τάσης και της βασικής συχνότητας λειτουργίας. Χρήσιμες είναι επίσης πληροφορίες σχετικά με τη διάταξη των γραμμών μεταφοράς, όπως οι φάσεις, η γεωμετρία ακόμα το ύψος των αγωγών και οι τύποι υποστρωμάτων και αγωγών, καθώς και τα ρεύματα φορτίου σε συνάρτηση με τον χρόνο. Για τους υποσταθμούς μεταφοράς, τα ηλεκτρικά διαγράμματα είναι χρήσιμα.
5. Πρέπει να γίνει ορισμός και καταγραφή της περιοχής μέτρησης. Αυτό περιλαμβάνει τη σήμανση περιοχών υψηλού ενδιαφέροντος και τυχόν δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στην περιοχή μέτρησης, όπως η δύσκολη προσβασιμότητα. Σημειώνονται, επίσης, αντικείμενα στην περιοχή που παραμορφώνουν το πεδίο, όπως δέντρα, θάμνοι ή μηχανήματα. Επιπλέον, γίνεται ένα σχέδιο της κάτοψης της περιοχής, τα σημεία μέτρησης καθορίζονται πλήρως στο σκαρίφημα και παρατίθενται τα χαρακτηριστικά της περιοχής που βοηθούν στον προσανατολισμό.
6. Για τη συμμόρφωση με τα διεθνή πρότυπα εγκαθίσταται μια μέτρηση σε περιοχές κοντά σε γραμμές μεταφοράς ή εντός υποσταθμών όπως περιγράφονται παρακάτω [8–10].

Για τις γραμμές μεταφοράς, επιλέγονται σημεία κατά μήκος του διαμήκους και του εγκάρσιου άξονα της γραμμής. Οι μετρήσεις κατά μήκος της γραμμής λαμβάνονται όχι μόνο ακριβώς κάτω από αυτήν, αλλά και στα σημεία ενδιαφέροντος παράλληλα με τη γραμμή. Επιλέγονται τουλάχιστον 5 θέσεις μετρήσεων, ξεκινώντας από το μέσο του ανοίγματος της γραμμής και γίνονται σταδιακά βήματα και προς τις 2 κατευθύνσεις μέχρι να καλυφθεί η συνολική απόσταση της γραμμής. Ομοίως, οι μετρήσεις κατά μήκος της γραμμής λαμβάνονται είτε στο μέσο του ανοίγματος μεταξύ 2 πυλώνων για τη μέτρηση των μέγιστων επιπέδων πεδίου, είτε σε ένα άλλο εγκάρσιο άξονα ενδιαφέροντος. Αυτές οι μετρήσεις σύμφωνα με το IEEE Std 644:2019 [9], θα πρέπει να ξεκινούν από τον άξονα συμμετρίας της γραμμής και να εκτείνονται και προς τις 2 κατευθύνσεις σε εγκάρσια απόσταση τουλάχιστον 30 μέτρων από τον εξωτερικό αγωγό της γραμμής. Τουλάχιστον 5 μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε ίσα διαστήματα κάτω από τους αγωγούς.

Αντιθέτως, ο καθορισμός σημείων μέτρησης σε υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί εμπειρία και συχνά έρευνα για τον εντοπισμό των σημείων μέγιστης έκθεσης. Όταν ψάχνει για μαγνητικό πεδίο, ο χειριστής σαρώνει αργά την περιοχή του υποσταθμού με ένα πεδίομετρο που συγκρατείται στο ύψος των ώμων και σημειώνει τα σημεία που παρατηρούνται υψηλότερες τιμές πεδίου. Για να εντοπίσει σημεία ηλεκτρικού πεδίου, ο χειριστής τοποθετεί τον αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου σε ένα τρίποδο και το συνδέει με το όργανο μέσω οπτικής ίνας για να λάβει στιγμιαίες μετρήσεις σε διάφορα σημεία του χώρου. Ο χειριστής ασφαλίζει το τρίποδο σε κάθε σημείο και απομακρύνεται τουλάχιστον 10m για να διαβάσει την ένδειξη του οργάνου, απαιτώντας περίπου 20 έως 30 δευτερόλεπτα για κάθε θέση μέτρησης. Η πυκνότητα των θέσεων μέτρησης μπορεί να αυξηθεί σε περιοχές υψηλής έντασης για να εντοπιστεί το χωρικό σημείο που δέχεται τη μεγαλύτερη επιβάρυνση ή να μειωθεί σε περιοχές

με χαμηλή ένταση πεδίου για εξοικονόμηση χρόνου. Εάν προκύψουν δυσκολίες κατά τις μετρήσεις, ο υπεύθυνος θα πρέπει να λάβει αποφάσεις σχετικά με τους άξονες μέτρησης, την απόσταση μεταξύ των μετρήσεων, τα ύψη των μετρήσεων και το μέγεθος του δείγματος, αποκλίνοντας από τα ισχύοντα πρότυπα.

Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω περιλαμβάνει την πραγματοποίηση παρατηρήσεων και τη λήψη σύντομων μετρήσεων για τον προσδιορισμό των θέσεων όπου θα πραγματοποιηθούν περαιτέρω μετρήσεις. Σε αυτά τα σημεία στη συνέχεια δίνονται αριθμοί και σημειώνονται σε μια κάτοψη της περιοχής, ενώ καταγράφονται και τα περισσότερα από τα απαραίτητα δεδομένα σύμφωνα με το πρωτόκολλο μέτρησης.

6.2 Διαδικασία Μέτρησης

Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη λήψη μετρήσεων σε περιοχές κοντά σε γραμμές μεταφοράς ή εντός υποσταθμών ακολουθεί τα διεθνή πρότυπα συμπεριλαμβανομένων των IEEE Std 644:2019, ΕΛΟΤ IEC 61786-1:2014, ΕΛΟΤ IEC-617862:2014 και IEC 62110:2009 [8–10]. Σε αυτήν τη μελέτη, το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο συχνότητας 50Hz μετρήθηκε χρησιμοποιώντας ένα όργανο 3 αξόνων. Τα σημεία μέτρησης επιλέχθηκαν ακολουθώντας τις ίδιες θέσεις και τους άξονες όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα και λήφθηκαν σε ύψος ενός μέτρου πάνω από το έδαφος, σύμφωνα με αυτά τα πρότυπα [8–10].

Για τη μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε σημείο, ο αισθητήρας μέτρησης συνδέεται απευθείας με το πεδίομετρο, το οποίο κρατάει χειριστής περίπου σε ύψος περίπου 1,0m ή 1,5m από το έδαφος ανάλογα με το πρότυπο. Από την άλλη πλευρά, για τη μέτρηση των ηλεκτρικών πεδίων, ο αντίστοιχος αισθητήρας μέτρησης τοποθετείται σε τρίποδο και συνδέεται με το απομακρυσμένο πεδίομετρο μέσω οπτικής ίνας, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε επιρροή από παρατηρητές ή άλλα αντικείμενα κοντά στον αισθητήρα πεδίου. Ο χειριστής καταγράφει ή αποθηκεύει τις τιμές για κάθε σημείο του πρωτοκόλλου μέτρησης, με καθορισμένο χρόνο λήψης τουλάχιστον 30s. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα σημεία ενδιαφέροντος.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να είμαστε προσεκτικοί σχετικά με αντικείμενα κοντά στους αισθητήρες πεδίου, καθώς μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητα σφάλματα στις μετρήσεις εάν δημιουργήσουν σημαντικές διαταραχές πεδίου. Κατά τη μέτρηση ηλεκτρικών πεδίων, είναι απαραίτητο να διατηρείται απόσταση τουλάχιστον τριπλάσια από το ύψος οποιουδήποτε προσωρινού αντικειμένου από το πεδίομετρο, προκειμένου να επιτευχθεί ακριβής μέτρηση του ομοιόμορφου πεδίου. Ομοίως, κατά τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων, τα προσωρινά μαγνητικά υλικά και οι μη μαγνητικοί αγωγοί θα πρέπει να διατηρούνται σε απόσταση τουλάχιστον 3 φορές τη μέγιστη διάσταση του αντικειμένου μακριά από το σημείο μέτρησης. Και για τους 2 τύπους μετρήσεων, το πεδίομετρο θα πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 1m από μόνιμα αντικείμενα για να διασφαλιστεί η ακρίβεια στη μέτρηση του διαταραγμένου πεδίου γύρω από το αντικείμενο. Τέλος, το άτομο που χειρίζεται το όργανο μέτρησης πρέπει να διασφαλίσει ότι δεν στέκεται μεταξύ της πηγής του πεδίου και του αισθητήρα κατά τη διάρκεια της μέτρησης [8–11].

Λήψη Φωτογραφιών του χώρου μέτρησης

Με την ολοκλήρωση των μετρήσεων, αποτυπώνονται εικόνες της περιοχής όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, καθώς και των πηγών του πεδίου που επηρέαζαν την υπό εξέταση περιοχή.

6.3 Αναφορά των αποτελεσμάτων μέτρησης

Οι πληροφορίες που απαιτούνται κατά την καταγραφή και την αναφορά των αποτελεσμάτων των μετρήσεων ενδέχεται να διαφέρουν ανάλογα με τους στόχους μέτρησης που υποδεικνύονται στην αρχή του πρωτοκόλλου. Ακολούθως παρατίθενται οι πληροφορίες σχετικά με τις μετρήσεις και τον εξοπλισμό που πρέπει να παρέχονται σε όλες τις περιπτώσεις.

- Η ημερομηνία των μετρήσεων
- Ο χρόνος έναρξης και λήξης των μετρήσεων
- Οι περιβαλλοντικές συνθήκες (π.χ. υγρασία, θερμοκρασία, τύπος και κατάσταση του εδάφους, καιρός, κτλ.)
- Ο προσδιορισμός του κατασκευαστή και του μοντέλου του πεδιομέτρου
- Η καταγραφή του υπόλοιπου εξοπλισμού μέτρησης
- Η ημερομηνία της τελευταίας διακρίβωσης του εξοπλισμού μέτρησης
- Το μετρούμενο μέγεθος (σε SI μονάδες), π.χ. η μέγιστη τιμή του πεδίου, το συνιστάμενο πεδίο, η κάθετη πεδιακή συνιστώσα, ο χρονικά σταθμισμένος μέσος όρος, κλπ.
- Η συνολική αβεβαιότητα μέτρησης
- Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών και των παραμέτρων της πηγής (για γραμμές μεταφοράς και υποσταθμούς)
- Η τοποθεσία μέτρησης
- Τα σχέδια (ή σκαριφήματα) που περιγράφουν την περιοχή και τις θέσεις όπου οι μετρήσεις εκτελούνται.

Άλλες πληροφορίες που πρέπει να δίνονται όπου χρειάζεται είναι οι εξής:

- Περιγραφές της ανθρώπινης δραστηριότητας, όταν λαμβάνεται υπόψη η ανθρώπινη έκθεση
- Περιγραφές των αντικειμένων (π.χ. μέγεθος, απόσταση από τα σημεία μέτρησης κτλ.) που παραμορφώνουν τις μετρήσεις
- Πρόσθετες πληροφορίες του πεδιομέτρου, όπως η συχνότητα δειγματοληψίας κτλ.
- Ανάλυση συχνοτήτων του φάσματος των πεδίων που περιέχουν πολλαπλάσιες συχνότητες
- Προσδιορισμός του προσωπικού που εκτελεί τις μετρήσεις
- Φωτογραφίες.

6.4 Αποτελέσματα των μετρήσεων

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής σε περιοχές όπου υπάρχουν γραμμές μεταφοράς. Αυτές οι μετρήσεις παρέχουν το συνιστάμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (ενεργός τιμή - rms) σε συχνότητα 50 Hz, αντί για ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, συμπεριλαμβανομένου του θεμελιώδους. Αν και το ποσοστό των αρμονικών είναι σημαντικό στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται από τις γραμμές μεταφοράς, ο στόχος δεν είναι να ποσοτικοποιηθούν επακριβώς τα πεδία με τις αρμονικές τους προκειμένου να αναπαραχθούν με προσομοιώσεις και να συγκριθούν στο μέλλον. Επιπλέον, η αβεβαιότητα των μετρήσεων υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας το κεφάλαιο 5.

Η επιλογή των σημείων μέτρησης σε κάθε τοποθεσία καθορίστηκε σύμφωνα με το IEEE Std 644:2019, το IEC 61786:2003 και το IEC 62110:2009 [8–10], για την κάλυψη των πιο επηρεαζόμενων θέσεων έκθεσης στην υπό εξέταση περιοχή. Ωστόσο, μερικές φορές οι θέσεις των σημείων μέτρησης πρέπει να προσαρμόζονται λόγω της εγγύτητας των αντικειμένων που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανεπιθύμητα σφάλματα στις μετρήσεις. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκαν σε ύψος 1m από την επιφάνεια του εδάφους και σε κάθε θέση πραγματοποιούνταν εναλλάξ μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.

Το ρεύμα φόρτισης των γραμμών μεταφοράς καταγράφεται συνεχώς από τον ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) ο οποίος μας παρείχε όλα τα δεδομένα μετά από ειδική συνεννόηση κατά τη χρονική περίοδο που έγιναν οι μετρήσεις (δηλαδή ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο).

Οι μετρήσεις ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση εξοπλισμού που παρέχεται από το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Ε.Μ.Π. Συγκεκριμένα, η συσκευή EFA-300 κατασκευής της εταιρείας NARDA χρησιμοποιήθηκε ως όργανο μέτρησης για πεδίο χαμηλής συχνότητας.

Οι μετρήσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν σε περιοχές της Βόρειας Αττικής και της Βοιωτίας και μάλιστα σε θέσεις με ποικίλο ανάγλυφο εδάφους και παρουσία εμποδίων μερικές φορές όπως χαμηλής βλάστηση, ψηλά δένδρα, γραμμές Μ.Τ και Χ.Τ, κολώνες δημοτικού φωτισμού κ.α. Γι' αυτόν το λόγο οι θέσεις μέτρησης προσαρμόζονταν κάθε φορά στις ειδικές συνθήκες, ώστε οι μετρήσεις να παραμένουν ανεπηρέαστες από τα εκάστοτε εμπόδια.

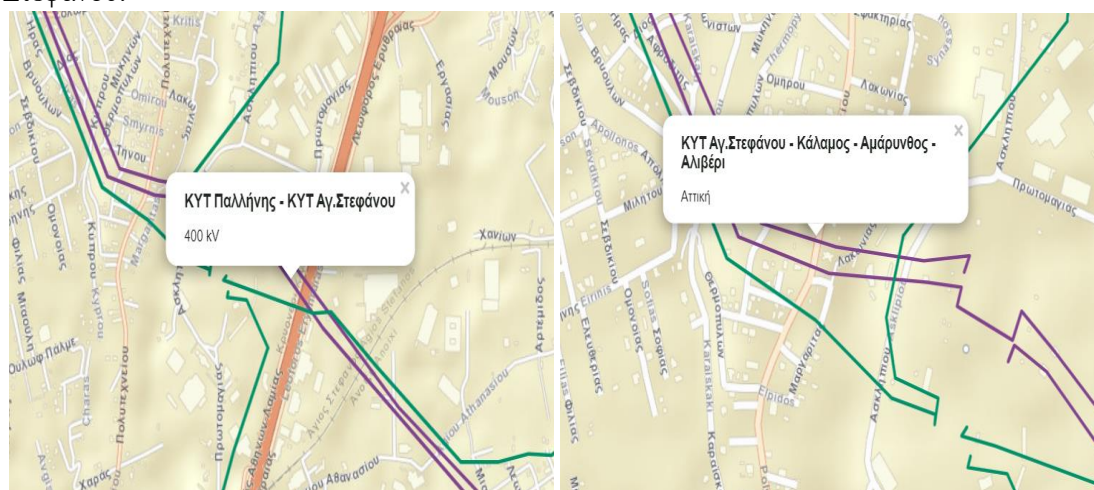
6.4.1 1^η Μέτρηση

Ημερομηνία: 14/05/2022

Ώρα Έναρξης – Λήξης Ελέγχου: Οι μετρήσεις στην περιοχή του Αγίου Στεφάνου διεξήχθησαν από τις 12:00-16:30.

Περιβαλλοντικές Συνθήκες: Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η μέση θερμοκρασία κυμαινόταν μεταξύ 25°C και 27°C η δε σχετική υγρασία του μεταξύ 35% και 37%.

Περιοχή Μέτρησης: Οι μετρήσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκαν στον Νομό Αττικής και συγκεκριμένα στον Άγιο Στέφανο που ανήκει στον Δήμο Διονύσου, σε δύο θέσεις της γραμμής μεταφοράς (ΚΛΣ) υψηλής τάσης 400 kV που συνδέει ΚΥΤ Αγίου Στεφάνου-Κάλαμος-Αμάρυνθος-Αλιβέρι με ΚΥΤ Παλλήνης- ΚΥΤ Αγίου Στεφάνου.

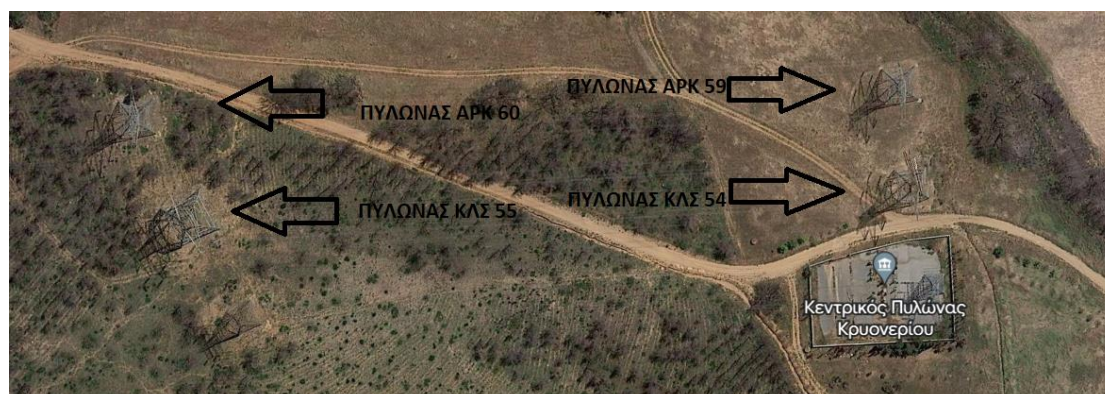


Εικόνα 6.2: Γραμμές μεταφοράς Παλλήνη–Άγιος Στέφανος και Άγιος Στέφανος–Αλιβέρι [12].

Στοιχεία Γραμμής Μεταφοράς: Για την γραμμή μεταφοράς ΚΛΣ και τα προς μέτρηση τμήματα της έχουν συγκεντρωθεί τα παρακάτω στοιχεία στον Πίνακα 6.2.

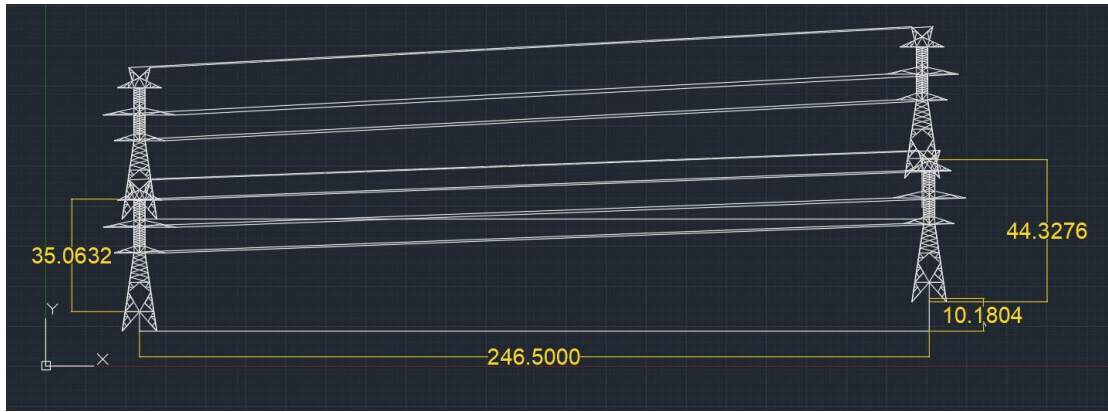
Πίνακας 6.2: Στοιχεία των προς μέτρηση τμημάτων της γραμμής ΚΛΣ 55 – ΚΛΣ 54 (Περιοχή Α) και ΑΡΚ 60 -ΑΡΚ 59 (Περιοχή Β).

Τάση / Συχνότητα Λειτουργίας	400 kV/50 Hz	
Αριθμός Τριφασικών Κυκλωμάτων	Γραμμή Διπλού Κυκλώματος	
Διάταξη των Φάσεων	Συμμετρική	
Συνολική Απόσταση Γραμμής		
Περιοχή Α		
Άνοιγμα της Γραμμής	ΚΛΣ 55 -ΚΛΣ 54	
Μήκος του Ανοίγματος	261,5 m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	10 m -30 m	
Ρεύμα Φορτίου	1 ^ο Κύκλωμα	2 ^ο Κύκλωμα
	150 A	66,4 A
Τύπος Πυλώνα	Κωδικός ΚΛΣ 55	Κωδικός ΚΛΣ 54
	G5	G5
Περιοχή Β		
Άνοιγμα της Γραμμής	ΑΡΚ 60 – ΑΡΚ 59	
Μήκος του ανοίγματος	246,5 m	
Ρεύμα Φορτίου	1 ^ο Κύκλωμα	2 ^ο Κύκλωμα
	33,6 A	38,3 A
Τύπος Πυλώνα	Κωδικός ΑΡΚ 60	Κωδικός ΑΡΚ 59
	R5	R5

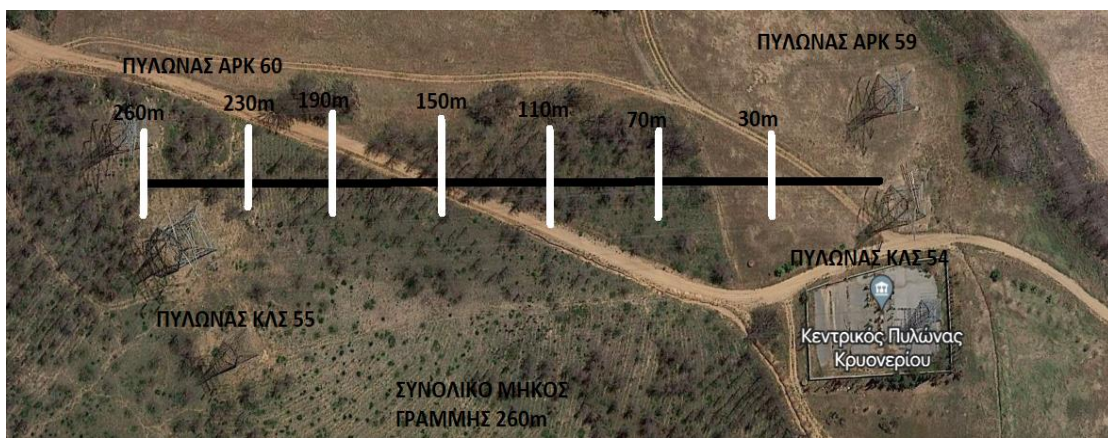


Εικόνα 6.2: Απεικόνιση του διπλού κυκλώματος και ονομασία των πυλώνων.

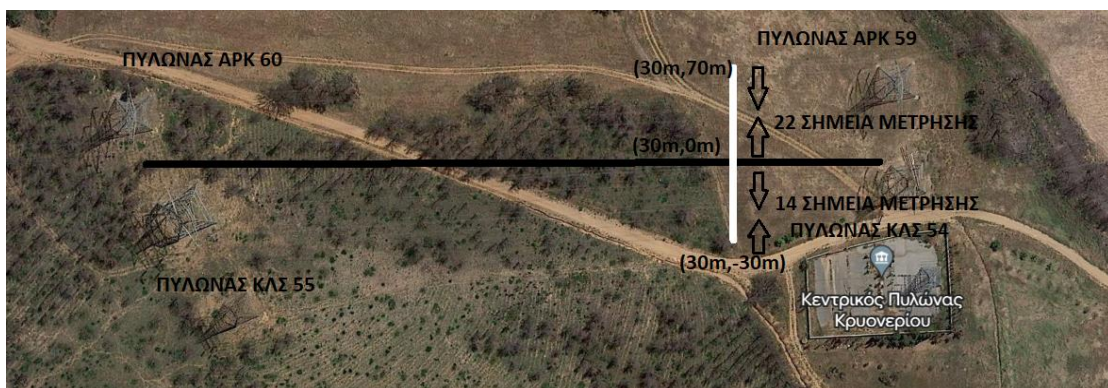
Θέσεις Μέτρησης: Συνολικά ελήφθησαν 64 μετρήσεις στο τμήμα των γραμμών ΑΡΚ 59/ΚΛΣ54 – ΑΡΚ 60/ΚΛΣ 55. Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν σημεία μέτρησης πάνω σε δύο άξονες που βρίσκονται κατά μήκος και εγκάρσια στη γραμμή. Οι μετρήσεις κατά μήκος των γραμμών έγιναν ακριβώς πάνω στον άξονα συμμετρίας τους, ενώ οι εγκάρσιοι άξονες δεν ελήφθησαν στο μέσο του ανοίγματος λόγω της ανομοιομορφίας του εδάφους και της πυκνής θαμνώδους βλάστησης. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί πως λόγω του ανώμαλου εδάφους και της δύσκολης πρόσβασης στον χώρο δεν ήταν εφικτό να υπολογιστούν όλες οι αποστάσεις των σημείων μέτρησης μέσω της μετροταινίας. Για τον λόγο αυτόν έγινε χρήση GPS με το οποίο εντοπίζονταν τα σημεία μέτρησης σε συντεταγμένες και το υψόμετρο των θέσεων μέτρησης.
Σκαριφήμα: Παρουσιάζονται τα σκαριφήματα και διάφορες όψεις των χώρων μέτρησης, όπου σημειώνονται οι άξονες μέτρησης και οι θέσεις αγωγών στις περιοχές Α και Β.



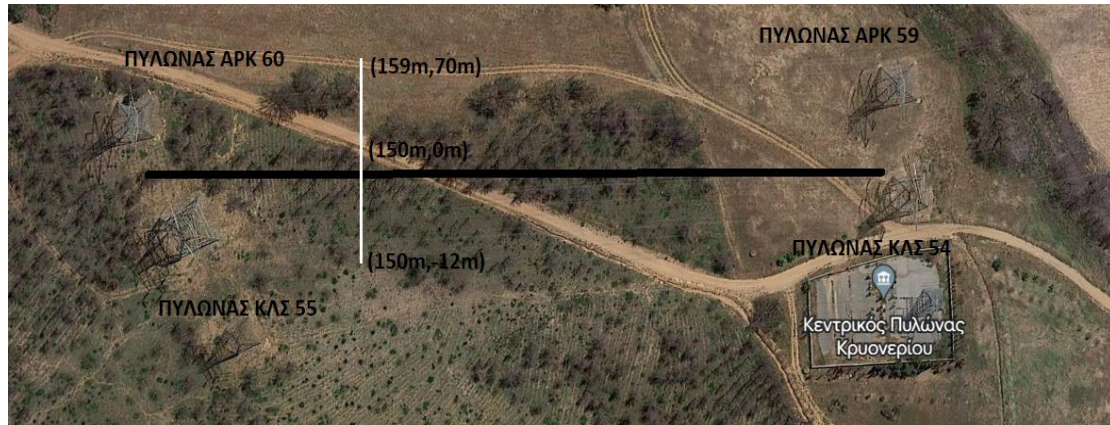
Εικόνα 6.3: Απεικόνιση της γραμμής μεταφοράς (Πάνω αριστερά είναι ο Πυλώνας ΚΑΣ54 ακριβώς από κάτω είναι ο Πυλώνας ΑΡΚ59 και στη δεξιά μεριά πάνω είναι ο Πυλώνας ΚΑΣ55 και ακριβώς από κάτω ο Πυλώνας ΑΡΚ60).



Εικόνα 6.4: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΑΡΚ59/60 – ΚΑΣ54/55 για την κατά μήκος μέτρηση.



Εικόνα 6.5: Εγκάρσιος άξονας μέτρησης σε απόσταση 30m από το μέσο των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΑΣ 54.



Εικόνα 6.6: Εγκάρσιος άξονας μέτρησης σε απόσταση 150m από το μέσο των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΑΣ 54.

Εξοπλισμός μέτρησης: Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν το όργανο μέτρησης EFA-300, το υγρόμετρο-θερμόμετρο TESTO / 625, η μετροταινία ELSON (100m) και ένα GPS.

Αποτελέσματα: Παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα του επί τόπου ελέγχου και τα ποσοστά συμμόρφωσης τους με τα όρια των ελληνικών κανονισμών. Από τα σκαριφήματα υιοθετείται ως θέση 0m στους διαμήκεις άξονες το μέσο του ανοίγματος της γραμμής μεταφοράς και στους εγκάρσιους άξονες ο άξονας της γραμμής (δηλ. κάτω από τον αγωγό γης).

Πίνακας 6.3: Μετρήσεις κατά μήκος του άξονα στο μέσο του διπλού κυκλώματος των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΑΣ 54.

Α/Α	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	+ 30m	0,5102	0,5088	1,042	1,061
2	+ 70m	0,6087	0,6314	1,17	1,168
3	+ 110m	0,6543	0,6594	2,352	478,2
4	+ 150m	0,5908	0,6141	685,3	683,3
5	+ 190m	0,6004	0,6143	498,4	496,7
6	+ 230m	0,5192	0,5315	775,55	772,8
7	+ 260m	0,5581	0,5613	731,7	741,4

Πίνακας 6.4: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα που απέχει 30m από το μέσον των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΑΣ 54.

Α/Α	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	- 30m	0,6172	0,6306	700,5	678,1
2	- 25m	0,5241	0,5345	958,3	974,5
3	- 23m	0,4855	0,4881	982,7	984,5
4	- 21m	0,4324	0,4333	965,3	958,7
5	- 19m	0,3836	0,3887	989,1	988,6
6	- 17m	0,3439	0,3431	897,7	893,1
7	- 15m	0,2873	0,2901	823,7	827,1

8	- 13m	0,2361	0,2419	871,1	867,2
9	- 11m	0,1974	0,1965	1,223	1,242
10	- 9m	0,1524	0,1577	799,1	792,2
11	- 7m	0,1318	0,1485	765,1	766,5
12	- 5m	0,1334	0,1536	687,1	690,3
13	- 3m	0,1491	0,1627	687,2	682,6
14	- 1m	0,1901	0,2046	952,65	992,1
15	0m	0,2074	0,2222	691,1	692,3
16	+ 2m	0,2733	0,2816	808,7	810,4
17	+ 4m	0,3248	0,3274	894,1	971,2
18	+ 6m	0,3619	0,3689	993,2	1,09
19	+ 8m	0,4046	0,4931	1,087	1,205
20	+ 10m	0,4232	0,4451	1,21	1,278
21	+ 12m	0,4497	0,4662	1,282	1,23
22	+ 14m	0,4665	0,4838	1,229	1,196
23	+ 16m	0,4693	0,4896	1,187	1,121
24	+ 18m	0,4635	0,4783	1,117	1,118
25	+ 20m	0,4701	0,4741	1,128	1,101
26	+ 22m	0,4592	0,4672	1,093	1,284
27	+ 24m	0,4326	0,4326	1,28	1,286
28	+ 26m	0,4024	0,4136	1,325	1,376
29	+ 28m	0,3742	0,3796	1,379	1,317
30	+ 30 m	0,3478	0,3753	1,339	1,34
31	+ 32m	0,3221	0,3447	1,676	1,665
32	+35m	0,2859	0,3027	1,704	1,62
33	+ 40m	0,2273	0,2464	776,5	783,3
34	+ 50m	0,1313	0,1647	537,2	528,9
35	+ 60m	0,0772	0,1035	224,8	225,3
36	+ 70m	0,04785	0,0912	100,6	97,88

Πίνακας 6.5: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα που απέχει 30m από το μέσον των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.

Α/Α	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	- 12m	0,5441	0,5459	1,964	3,917
2	- 10m	0,5561	0,5756	-	-
3	- 8m	0,6033	0,6045	27,34	27,36
4	- 6m	0,6183	0,6291	82,8	82,6
5	- 4m	0,6131	0,6178	118,2	117,5
6	- 2m	0,6413	0,6348	148,1	148,2
7	0m	0,6217	0,6342	198,2	197,2
8	+ 1m	0,6207	0,6327	283,9	282,7
9	+ 2m	0,6113	0,6331	253,2	250,7
10	+ 3m	0,6059	0,6139	381,2	382,3
11	+ 4m	0,5881	0,6049	554,4	555,3

12	+ 6m	0,5573	0,5776	827,5	828,2
13	+ 8m	0,5352	0,467	1,007	1,02
14	+ 10m	0,4968	0,5116	1,305	1,301
15	+ 13m	0,4426	0,4605	1,428	1,434
16	+ 18m	0,3557	0,3707	1,185	1,199
17	+ 28m	0,1998	0,2169	632,5	631,4
18	+ 38m	0,1171	0,1302	353,6	355,7
19	+ 48m	0,07858	0,1047	204,1	217,8
20	+ 58m	0,05811	0,07591	106,4	110,2
21	+ 70m	0,05062	0,06181	67,71	78,87

Φωτογραφίες: Παρατίθενται οι φωτογραφίες που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.



Εικόνα 6.7: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου στον εγκάρσιο άξονα που απέχει 150 m από το μέσον των Πυλώνων ΑΡΚ 59 και ΚΛΣ 54.



Εικόνα 6.8: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.

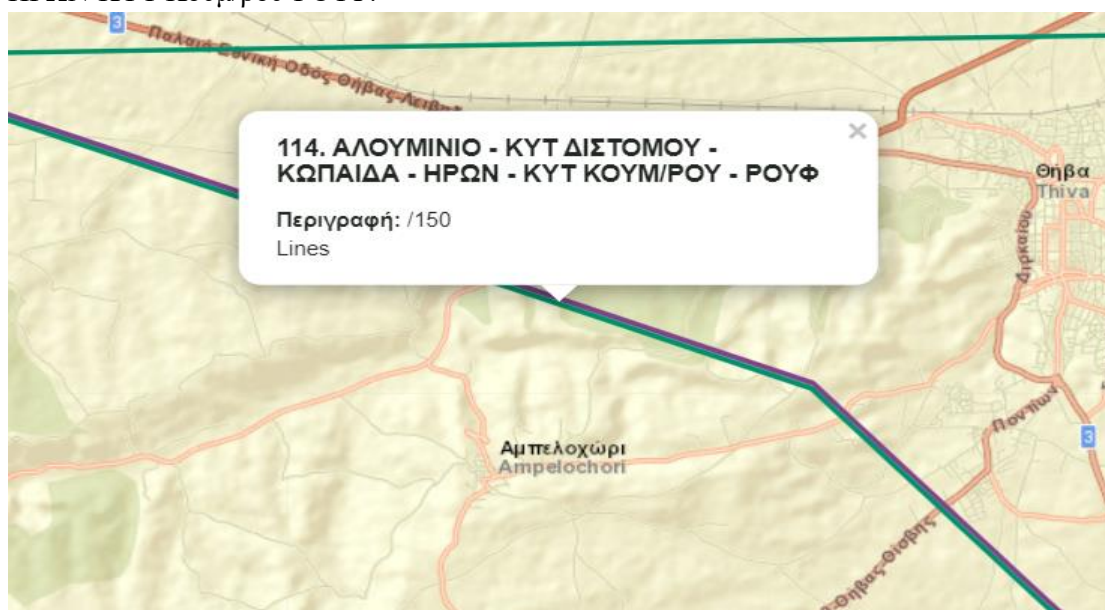
6.4.2 2^η Μέτρηση

Ημερομηνία: 17/09/2022

Ώρα Έναρξης – Λήξης Ελέγχου: 11:00-13:30

Περιβαλλοντικές Συνθήκες: Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η μεν θερμοκρασία κυμαινόταν μεταξύ 25°C και 28°C, η δε σχετική υγρασία του μεταξύ 32% και 35%.

Περιοχή Μέτρησης: Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε χωρική έκταση του Νομού Βοιωτίας, από την οποία διέρχεται γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης 150 kV Αλουμίνιο- ΚΥΤ Διστόμου- ΗΡΩΝ-ΚΥΤ Κουμ/ρου-ΡΟΥΦ.



Εικόνα 6.9: Γραμμή μεταφοράς Αλουμίνιο–Ρουφ [12].

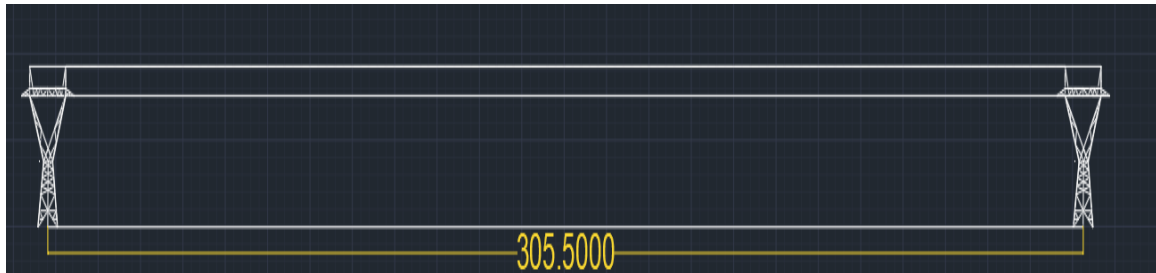
Στοιχεία Γραμμής Μεταφοράς: Για τη συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς και το προς μέτρηση τμήμα της έχουν συγκεντρωθεί τα παρακάτω στοιχεία στον Πίνακα 6.6.

Πίνακας 6.6: Στοιχεία του τμήματος της γραμμής ΣΑ 93 – ΣΑ 92

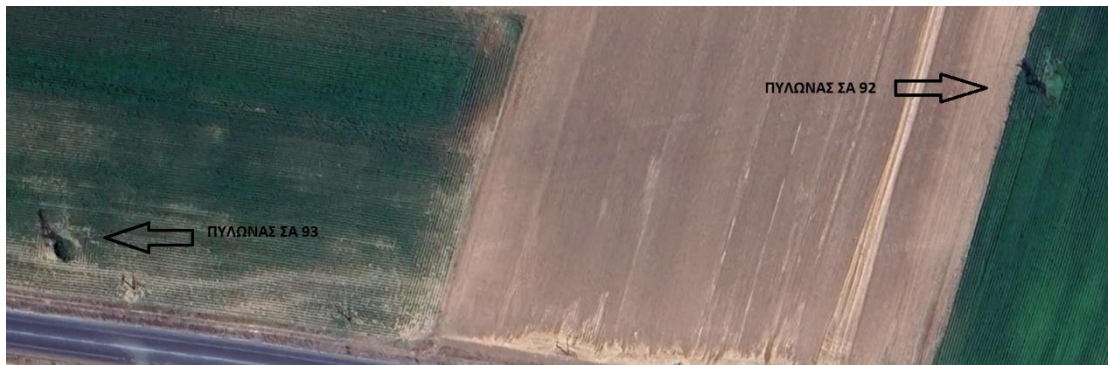
Τάση / Συχνότητα Λειτουργίας	150 kV/50 Hz	
Αριθμός Τριφασικών Κυκλωμάτων	Γραμμή Διπλού Κυκλώματος	
Διάταξη των Φάσεων	Συμμετρική	
Συνολική Απόσταση Γραμμής		
Άνοιγμα της Γραμμής	ΣΑ 93 – ΣΑ 92	
Μήκος του Ανοίγματος	305,5 m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	10m – 30m	
Ρεύμα Φορτίου	1 ^ο Κύκλωμα	2 ^ο Κύκλωμα
	160,4 A – 166,5 A	159,1 A – 161,3 A
Τύπος Πυλώνα	Κωδικός ΣΑ 93	Κωδικός ΣΑ 92
	T3	Z3

Θέσεις μέτρησης: Συνολικά επιλέχθηκαν 42 σημεία μέτρησης σε έναν άξονα κατά μήκος της γραμμής και σε δύο άλλους κάθετα σε αυτήν.

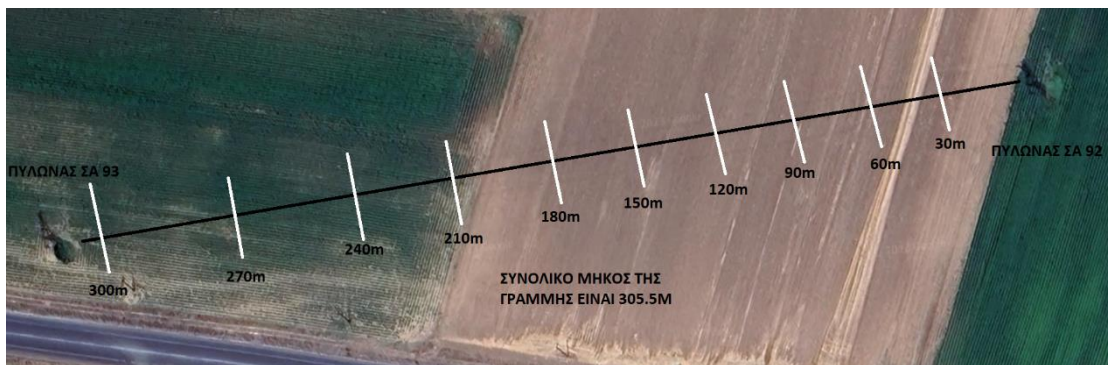
Σκαρίφημα: Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το σκαρίφημα του χώρου, όπου καθορίζονται οι άξονες μέτρησης.



Εικόνα 6.10: Απεικόνιση της γραμμής μεταφοράς.



Εικόνα 6.11: Απεικόνιση του διπλού κυκλώματος και ονομασία των πυλώνων.



Εικόνα 6.12: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΣΑ92-ΣΑ93 για την κατά μήκος μέτρηση.



Εικόνα 6.13: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΣΑ92-ΣΑ93 για τον εγκάρσιο άξονα που απέχει 25m από τον Πυλώνα ΣΑ 93.



Εικόνα 6.14: Άξονες μέτρησης και θέσεις των αγωγών του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΣΑ92-ΣΑ93 για τον εγκάρσιο άξονα που απέχει 30m από τον Πυλώνα ΣΑ 92.

Εξοπλισμός Μέτρησης: Ο εξοπλισμός αποτελούνταν από το πεδίομετρο EFA-300, το υγρόμετρο-θερμόμετρο TESTO / 625 και τη μετροταινία ELSON (100m).

Αποτελέσματα: Παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 6.7: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΣΑ93-ΣΑ92.

A/A	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	+ 30m	1,154	1,169	130,5	133,7
2	+ 60m	1,598	1,698	292,3	292,3
3	+ 90m	2,277	2,285	530,9	531,7
4	+ 120m	2,785	2,768	799,7	793,9
5	+ 150m	2,837	2,874	952,6	952,1
6	+ 180m	2,766	2,992	995,5	956,6
7	+ 210m	2,483	2,506	744	743,1
8	+ 240m	0,577	0,5781	590,6	591,3
9	+ 270m	0,3092	0,3094	143,4	146,9
10	+ 300m	0,1563	0,1565	106,1	108,2

Πίνακας 6.8: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στα +25m από τον Πυλώνα ΣΑ93 της γραμμής ΣΑ93-ΣΑ92.

A/A	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	- 30m	0,2867	0,3088	253,5	253,7
2	- 20m	0,5021	0,5156	510,5	511,2
10	+ 5m	1,113	1,136	417,2	418,2
11	+ 10m	0,873	0,885	578,4	579,1
12	+ 20m	0,525	0,5285	375,8	376,1
13	+ 30m	0,3184	0,3323	142,8	142,7
14	+ 40m	0,2027	0,2135	29,85	30,13
15	+ 50m	0,1449	0,1576	50,7	50,96
16	+ 60m	0,144	0,123	101	101,1

Πίνακας 6.9: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσιο στα + 30m από τον Πυλώνα ΣΑ92 της γραμμής ΣΑ93-ΣΑ92.

Α/Α	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	- 30m	0,2501	0,2584	162,8	163,2
2	- 20m	0,83	0,8444	337,7	337,1
3	- 10m	0,9547	0,9675	672,3	679,1
4	- 5m	1,004	1,02	468,6	468,8
5	- 3m	1,012	1,025	299,9	300,2
6	- 1m	1,03	1,037	162,9	163,3
7	0m	1,035	1,036	153,9	154,2
8	+ 1m	1,028	1,027	210,9	211,1
9	+ 3m	0,9921	0,9945	392,3	392,1
10	+ 5m	0,9821	0,9474	570,4	568,9
11	+ 10m	0,7695	0,7799	740,3	740,5
12	+ 20m	0,4294	0,4433	492,2	499,1
13	+ 30m	0,2754	0,2818	231,3	231,2
14	+ 40m	0,1594	0,1902	122,6	122,7
15	+ 50m	0,1023	0,1527	63,07	63,07
16	+ 60m	0,0744	0,155	33,44	33,77

Φωτογραφίες: Παρακάτω ακολουθούν οι φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 6.15: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα της γραμμής.



Εικόνα 6.16: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου και μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο προς τη γραμμή.

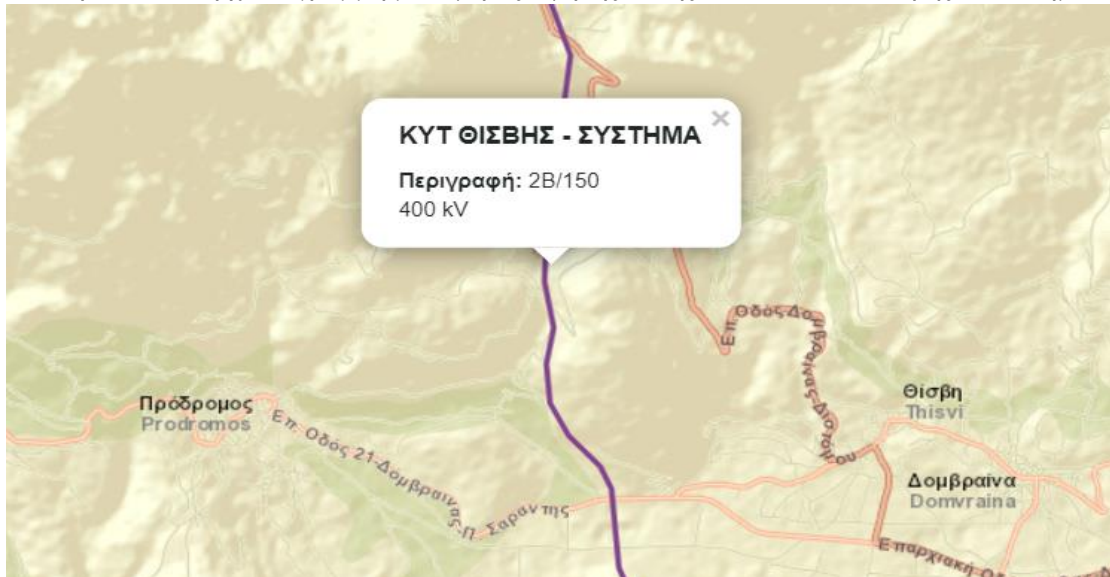
6.4.3 3^η Μέτρηση

Ημερομηνία: 17/09/2022

Ώρα Έναρξης – Λήξης Ελέγχου: 14:00-16:30

Περιβαλλοντικές Συνθήκες: Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων η μεν θερμοκρασία κυμαινόταν μεταξύ 25°C και 28°C, η δε σχετική υγρασία του μεταξύ 32% και 35%.

Περιοχή Μέτρησης: Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε χωρική έκταση του νομού Βοιωτίας, από την οποία διέρχεται γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης 400 kV ΚΥΤ Θίσβης – Σύστημα.



Εικόνα 6.37: Γραμμή μεταφορά ΚΥΤ Θίσβης – Σύστημα [12].

Στοιχεία Γραμμής Μεταφοράς: Για τη συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς και το προς μέτρηση τμήμα της έχουν συγκεντρωθεί τα παρακάτω στοιχεία στον Πίνακα 6.9.

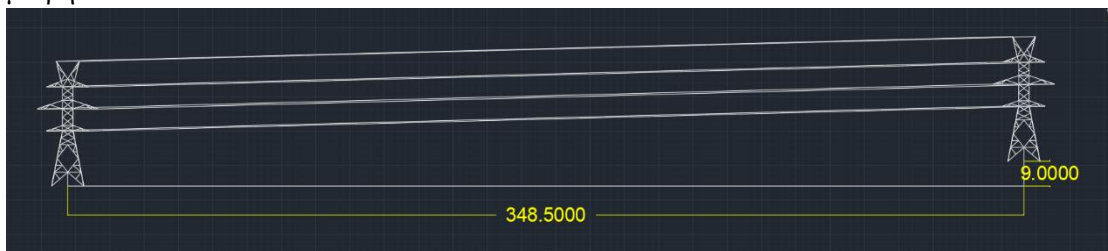
Πίνακας 6.10: Στοιχεία των προς μέτρηση τμήματος της γραμμής ΑΑ228/60 – ΑΑ228/61.

Τάση / Συχνότητα Λειτουργίας	400 kV/50 Hz
Αριθμός Τριφασικών Κυκλωμάτων	Γραμμή Διπλού Κυκλώματος

Διάταξη των Φάσεων	Συμμετρική	
Άνοιγμα της Γραμμής	AA228/60 – AA228/61	
Μήκος του Ανοίγματος	348,5 m	
Ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος	10 m – 30 m	
Ρεύμα Φορτίου	1 ^ο Κύκλωμα	2 ^ο Κύκλωμα
	21,3 A – 23,5 A	18,1 A – 19,9 A
Τύπος Πυλώνα	Κωδικός AA228/60	Κωδικός AA228/61
	T5	Z5

Θέσεις μέτρησης: Συνολικά επιλέχθηκαν 26 σημεία μετρήσεων σε έναν άξονα κατά μήκος της γραμμής σε έναν άξονα κάθετο σε αυτήν. Ακόμη θα πρέπει να σημειώσουμε πως σε κάποιες θέσεις μέτρησης τα αποτελέσματα συχνά επηρεάζονταν από τη μικρή βλάστηση που υπήρχε στην περιοχή.

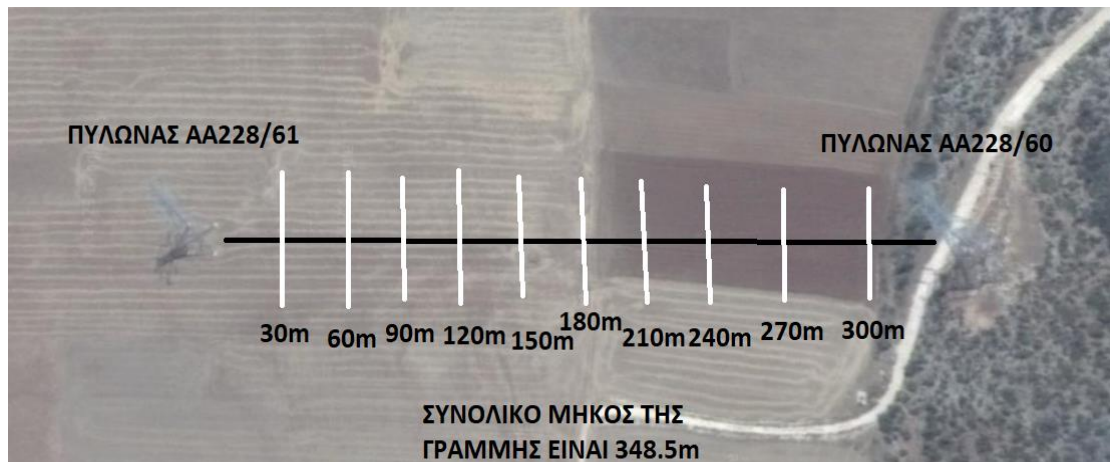
Σκαρίφημα: Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σκαρίφηματα και άλλες όψεις του χώρου, όπου σημειώνονται οι άξονες μέτρησης και τα απαραίτητα στοιχεία του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων.



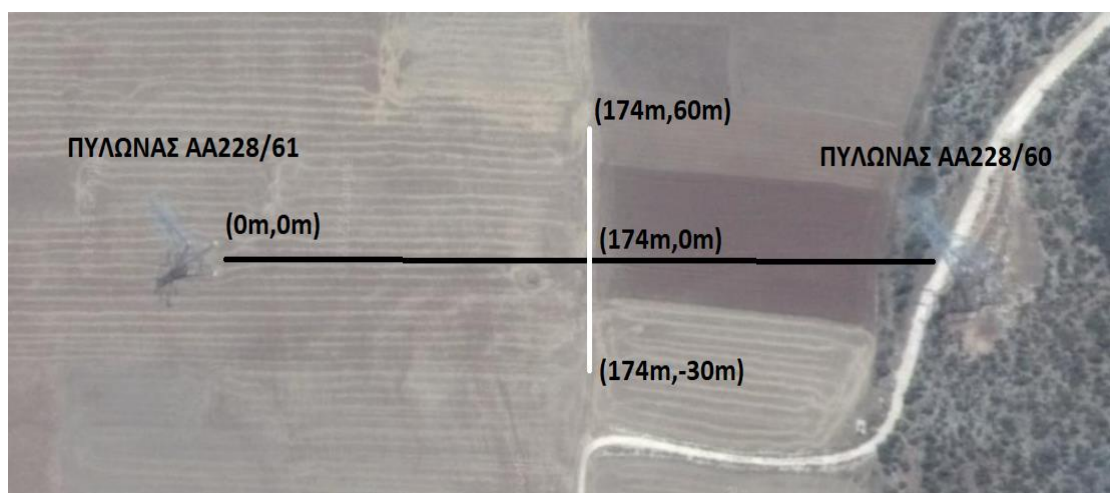
Εικόνα 6.18: Απεικόνιση της γραμμής AA228.



Εικόνα 6.19: Απεικόνιση των πυλώνων της γραμμής AA228 μεταξύ των οποίων επιλέχθηκαν οι θέσεις μέτρησης του πεδίου.



Εικόνα 6.20: Θέσεις μέτρησης κατά μήκος της γραμμής ΑΑ228



Εικόνα 6.21: Θέσεις μέτρησης για τον εγκάρσιο άξονα που βρίσκεται στο μέσο του τμήματος της γραμμής μεταφοράς ΑΑ228.

Εξοπλισμός Μέτρησης: Ο εξοπλισμός αποτελούνταν από το πεδιόμετρο EFA-300, το υγρόμετρο-θερμόμετρο TESTO / 625 και τη μετροταινία ELSON (100m).

Αποτελέσματα: Παρατίθενται στη συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Πίνακας 6.11: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα κατά μήκος της γραμμής ΑΑ228/61-ΑΑ228/60.

Α/Α	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	+ 30m	1,154	1,169	130,5	130,7
2	+ 60m	1,598	1,698	292,3	292,3
3	+ 90m	2,277	2,285	530,9	531,7
4	+ 120m	2,765	2,768	799,7	793,9
5	+ 150m	2,837	2,874	952,6	952,2
6	+ 180m	2,766	2,892	995,1	956,6
7	+ 210m	2,483	2,506	744,2	743,1
8	+ 240m	0,577	0,5781	1,906	1,913
9	+ 270m	0,3092	0,3094	1,434	1,469
10	+ 300m	0,1563	0,1565	1,06	1,08

Πίνακας 6.12: Μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε άξονα εγκάρσια στο μέσο της γραμμής ΑΑ228/61-ΑΑ228/60.

Α/Α	Περιγραφή Θέσης	Μαγνητική Επαγωγή (μΤ)		Ένταση Ηλεκτρικού Πεδίου (V/m)	
		BandPass	Broadband	BandPass	Broadband
1	- 30m	0,6168	0,6308	704,1	703,8
2	- 20m	0,7754	0,7781	659,1	653,1
3	- 10m	0,8962	0,9031	632,1	629,1
4	- 5m	0,9321	0,9361	590,2	587,2
5	- 3m	0,9444	0,9445	544,3	544,2
6	- 1m	0,9498	0,9568	532,1	526,1
7	0m	0,9511	0,9775	498,1	495,2
8	+ 1m	0,9536	0,9621	474,1	471,2
9	+ 3m	0,909	0,9484	430,2	426,1
10	+ 5m	0,9328	0,9508	492,1	493,1
11	+ 10m	0,9011	0,9102	521,2	520,1
12	+ 20m	0,7721	0,7875	587,2	586,1
13	+ 30m	0,6114	0,6437	607,1	607,2
14	+ 40m	0,4722	0,4873	258,5	258,6
15	+ 50m	0,3591	0,3683	108,1	108,4
16	+ 60m	0,2891	0,3041	78,48	79,02

Φωτογραφίες: Παρακάτω ακολουθούν οι φωτογραφίες που λήφθηκαν κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου.



Εικόνα 6.22: Μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του άξονα της γραμμής μεταφοράς.



Εικόνα 6.23: Μέτρηση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο προς τη γραμμή..

Βιβλιογραφία

- [1] C. Garrido, A. F. Otero, J. Cidra's, "Low-frequency magnetic fields from electrical appliances and power lines", IEEE Transactions on Power Delivery, 18(4), 1310– 1319, 2003.
- [2] Δ. Τσανάκας, Ε. Μίμος, Π. Ζαχαροπούλου, Κ. Καραμανής, "Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο των Υ/Σ 150 kV εξωτερικού χώρου ως περιβαλλοντικοί παράγοντες", ΕΕ CIGRE, Σύνοδος Αθήνα 2003.
- [3] Δ. Τσανάκας, Ε. Μίμος, Α. Τζινευράκης, Ν. Τσεκουράς και Ν. Φωτιάδης, "Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων γραμμών 400kV κατά τη συμμετρική και βέλτιστη διάταξη των αγωγών των φάσεων", Σύνοδος Ελληνικής Επιτροπής CIGRE, Αθήνα, 15-16 Δεκέμβριος 2005.
- [4] H. Okubo, N. Goto, A. Matsumoto, M. Shimizu, K. Kato, "Magnetic field distribution based on power line current in 500kV/275kV open-air substation", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore, India, 2001.
- [5] Toni Sjöblome et al, "Electric fields caused by transmission lines in Finland", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore, India, 2001.
- [6] B. Krishna, R. Sivakumara Aradhya, R. Arunjothi, D. Devendranath "Measured magnetic field profiles at HV gas insulated substations (GIS), underground cables and generating stations", 17th ISH, Hannover, Germany, Aug. 22-26, 2011.
- [7] ISO/IEC 17025: "General Requirements for the competence of testing and calibration laboratories", Geneva, 2017.
- [8] ΕΛΟΤ IEC 61786-1:2014, "Μετρήσεις μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων σε σχέση με την έκθεση των ανθρώπων", 2014.
- [9] ΕΛΟΤ IEC 61786-:2014, "Μετρήσεις μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων σε σχέση με την έκθεση των ανθρώπων", 2014.
- [10] IEEE Std 644-2019, "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines", 2019.
- [11] IEC 62110:2009, "Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure", 2009.
- [12] Χάρτης Γραμμών Μεταφοράς, ΑΔΜΗΕ
<https://www.admie.gr/systima/perigrafia/hartis-grammon>.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

2. Το πακέτο λογισμικού COMSOL Multiphysics

7.1 Οι δυνατότητες του Λογισμικού – Ροή Εργασίας

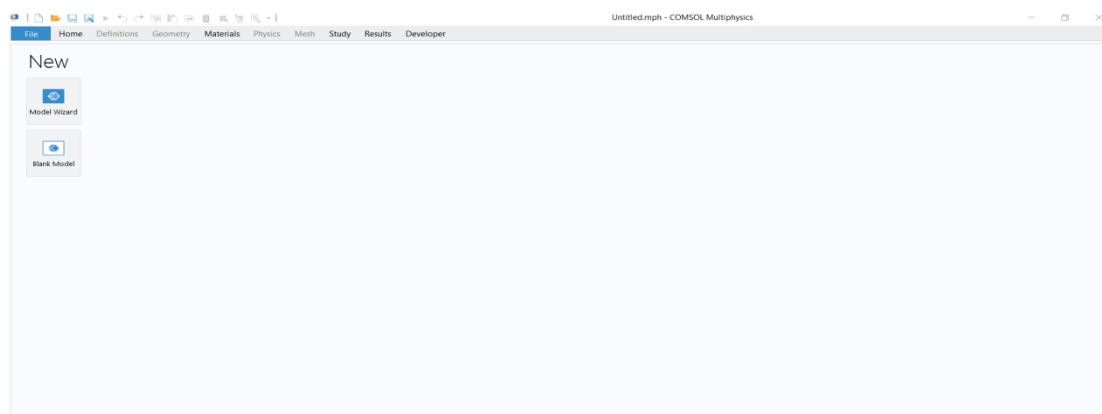
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εισαγωγή στο λογισμικό COMSOL Multiphysics το οποίο χρησιμοποιεί ως επί το πλείστον την προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση μοντέλων, ενώ μπορεί επίσης να χρησιμοποιήσει τη μέθοδο των οριακών στοιχείων όταν πληρούνται ορισμένες συνθήκες. Αναλύονται τα εργαλεία, τα μοντέλα και οι επιμέρους λειτουργίες που διαθέτει για την προσομοίωση προβλημάτων στους τομείς της φυσικής, της θερμοδυναμικής, της μηχανικής των ρευστών και του ηλεκτρομαγνητισμού με ιδιαίτερη έμφαση στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αποτελούν το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Επίσης αναλύονται τα μοντέλα των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης και παρατίθεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο COMSOL για την κατασκευή των μοντέλων και την προσομοίωση των πεδίων.

Γενικά, τα βήματα που συνθέτουν το διάγραμμα ροής για τη σωστή ρύθμιση και επίλυση ενός μοντέλου είναι τα εξής:

- Ορισμός του Model Wizard
- Καθολικοί ορισμοί (παράμετροι, μεταβλητές, υλικά κλπ.)
- Τοπικοί ορισμοί (συναρτήσεις, μεταβλητές, probes κλπ.)
- Ορισμοί Γεωμετρίας (Geometry)
- Επιλογή Υλικών (Materials)
- Εισαγωγή πακέτων φυσικής (Physics)
- Ορισμός πλέγματος (Mesh)
- Ορισμός μελέτης – τρόπου επίλυσης (Study)

7.2 Ορισμός του Model Wizard

Η αρχική οθόνη, η οποία προσφέρει στον χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ ενός μοντέλου άδειας χρήσης και του Model Wizard, είναι το πρώτο πράγμα που βλέπει κανείς κατά την εκκίνηση του λογισμικού. Το Model Wizard είναι ένα εγχειρίδιο που καθοδηγεί τον χρήστη στη διαδικασία δημιουργίας ενός μοντέλου από την αρχή.



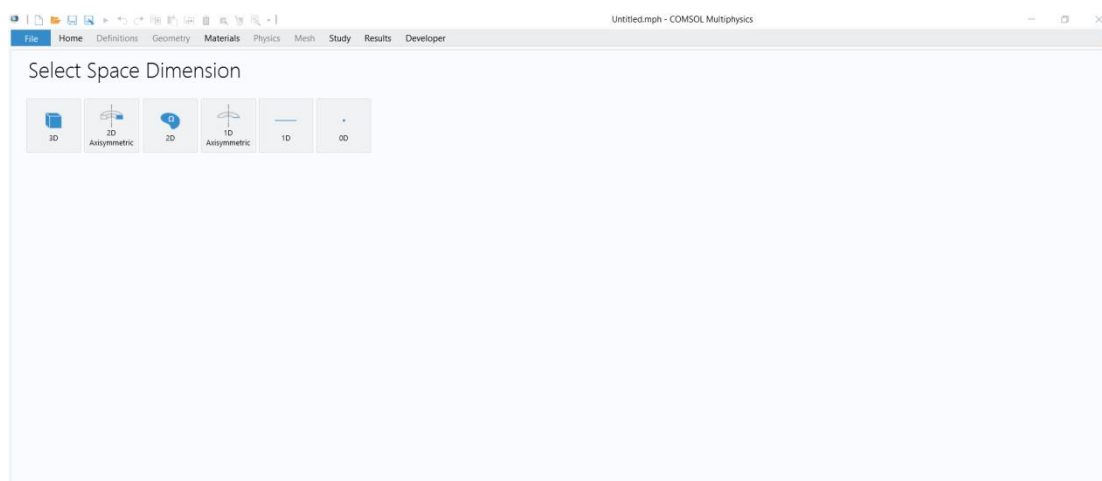
Εικόνα 7.1: Model Wizard / Blank Model COMSOL Multiphysics.

7.3 Διαστάσεις του Μοντέλου

Όταν επιλέγεται το Model Wizard, το λογισμικό μεταφέρει τον χρήστη σε μια νέα οθόνη όπου μπορεί να επιλέξει τις διαστάσεις του μοντέλου. Υπάρχουν επιλογές για τα εξής:

- 0D
- 1D
- 1D Axisymmetric
- 2D
- 2D Axisymmetric
- 3D

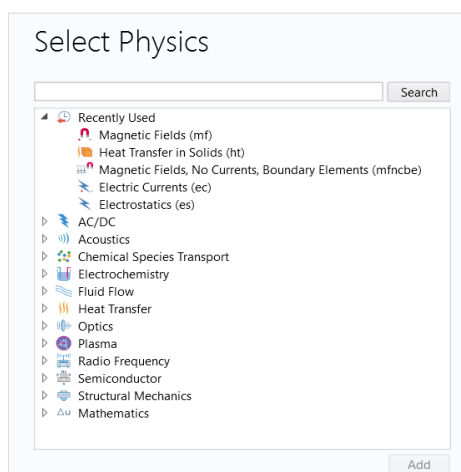
Για το μοντέλο της εργασίας επιλέχθηκε το 3D μοντέλο, παρότι η επιλογή του τρισδιάστατου μοντέλου θα επιμηκύνει τον χρόνο υπολογισμού, αφού χρειάζονται περισσότεροι υπολογιστικοί πόροι, διότι η συγκεκριμένη επιλογή αναμένεται να δώσει καλύτερα και πληρέστερα αποτελέσματα στον χώρο [2].



Εικόνα 7.2: Επιλογή διαστάσεων του μοντέλου COMSOL Multiphysics.

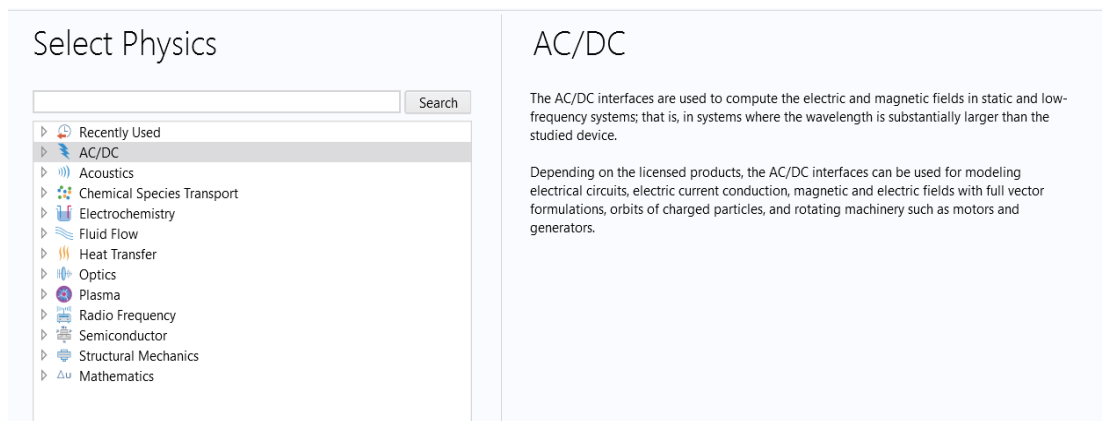
7.4 Επιλογή Κλάδων Φυσικής

Η επιλογή Κλάδοι Φυσικής, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει τους κλάδους φυσικής που μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο προς επίλυση, εμφανίζεται μόλις επιλεγεί η επιλογή 3D.



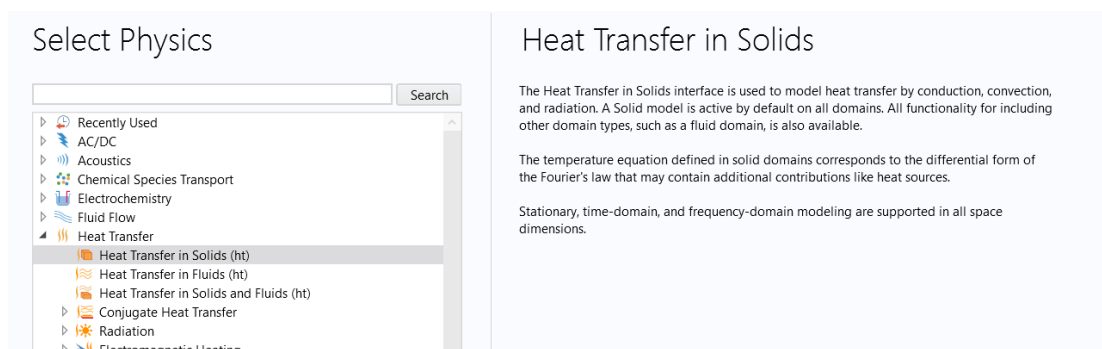
Εικόνα 7.3: Κλάδοι Φυσικής του μοντέλου COMSOL Multiphysics.

Για το μοντέλο της εργασίας επιλέγεται ο κλάδος AC/DC και ο κλάδος μεταφοράς θερμότητας (Heat Transfer). Σε καταστάσεις στατικού πεδίου ή χαμηλής συχνότητας, δηλαδή σε συστήματα όπου το μήκος κύματος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις διαστάσεις του υπό μελέτη συστήματος, χρησιμοποιείται ο κλάδος AC/DC για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.



Εικόνα 7.4: AC/DC module COMSOL Multiphysics.

Επιλέγεται το Heat Transfer in Solids (ht), από τον κλάδο Heat Transfer. Αυτός ο κλάδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της έντασης του πεδίου θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Λόγω της παρουσίας ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, είναι δυνατός ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας συνδεδεμένα πακέτα φυσικής [2].



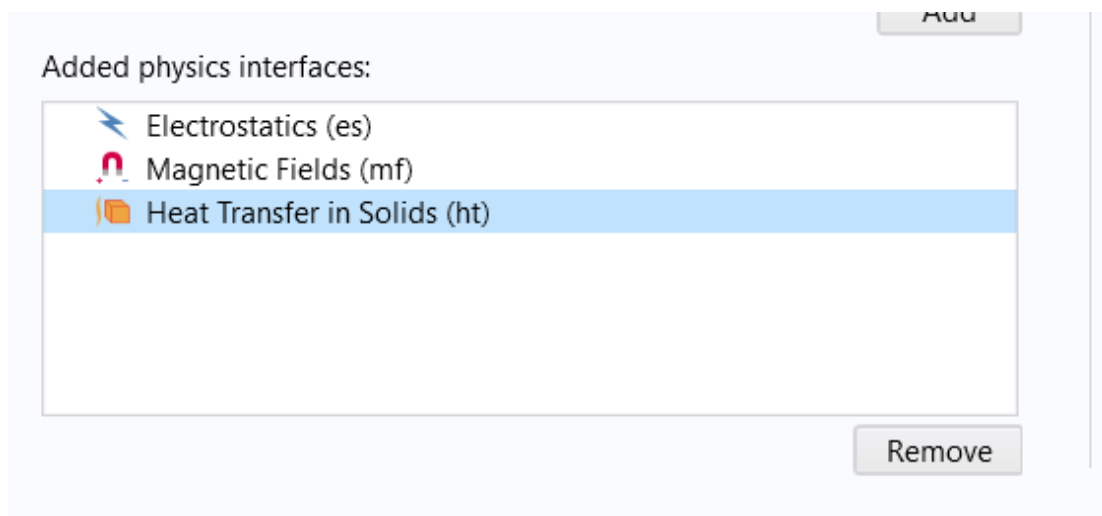
Εικόνα 7.5: Heat Transfer module COMSOL Multiphysics.

Επιλέγονται οι κλάδοι φυσικής για μαγνητικά πεδία (mf) και ηλεκτρικά ρεύματα (ec), τα οποία αναλύονται στο Παράρτημα Β, από τον κλάδο AC/DC. Όταν τα φαινόμενα επαγωγής είναι ελάχιστα, το πακέτο ηλεκτρικών ρευμάτων υπολογίζει το ηλεκτρικό πεδίο, την κατανομή των ρευμάτων και το ηλεκτρικό δυναμικό στα αγωγία μέσα. Ο νόμος του Ohm και το ηλεκτρικό δυναμικό χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές εισόδου προκειμένου να λυθούν οι εξισώσεις με τη μεταβλητή του ρεύματος σταθερή.

Το μαγνητικό πεδίο και τα ρεύματα μέσα και γύρω από αγωγία υλικά και μαγνήτες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το πακέτο Magnetic Fields. Χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες έχουν τροποποιηθεί για να λάβουν υπόψη το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό.

Ο κλάδος Heat Transfer in Solids χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της μετάδοσης θερμότητας από αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Δίνει τη δυνατότητα να οριστεί ένα μοντέλο όχι μόνο σε στερεά υλικά αλλά και υγρά ή αέρια, κάτι το οποίο είναι χρήσιμο για τον ορισμό του αέρα γύρω από τους αγωγούς υψηλής τάσης. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι

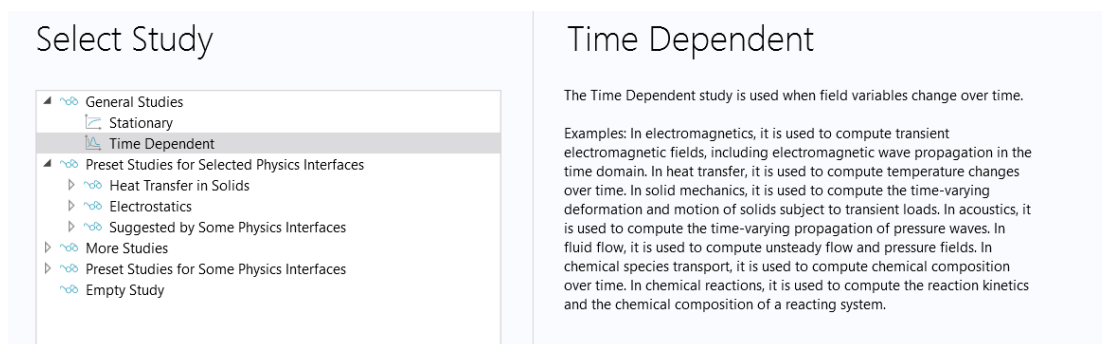
η διαφορική μορφή του νόμου Fourier για τη θερμότητα που περιέχει και εξωτερικές συνεισφορές, όπως πηγές θερμότητας [2].



Εικόνα 7.6: Πακέτα Φυσικής που επιλέχθηκαν στο COMSOL Multiphysics.

7.5 Επιλογή Μελέτης

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον τύπο μελέτης που θέλει να κάνει από μια σειρά επιλυτών σύμφωνα με τα πακέτα φυσικής που έχει επιλέξει. Επιλέγεται η μέθοδος Time Dependent Study επειδή οι πληροφορίες που παρέχονται και τα επιθυμητά αποτελέσματα είναι χρονικά μεταβλητά (διακύμανση θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου, χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία) [2].



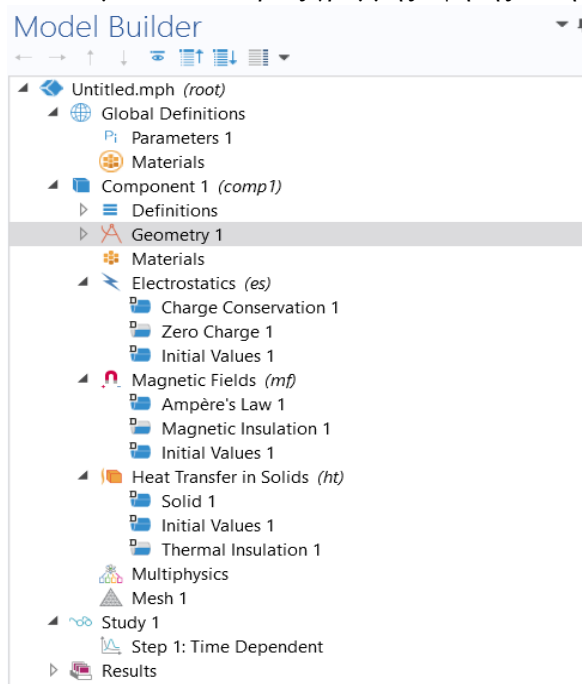
Εικόνα 7.7: Επιλογή Μελέτης COMSOL Multiphysics.

7.6 Model Builder

Ο χρήστης κατευθύνεται αμέσως σε ένα νέο παράθυρο, κομμάτι του οποίου το κύριο χαρακτηριστικό είναι το Model Builder, αφού επιλέξει έναν τύπο μελέτης. Το περιβάλλον εργασίας όπου θα δημιουργηθεί σταδιακά το μοντέλο γραμμής απεικονίζεται στην Εικόνα 7.8. Ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει και να καθορίσει το μοντέλο, καθώς και να δει αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου, χρησιμοποιώντας 4 κύριους κόμβους ως εξής:

- Global Definitions (Εισαγωγή Παραμέτρων)
- Component 1 (Ορισμός των Probes γεωμετρίας, φυσικών υλικών, πλέγματος)
- Study 1 (Ορισμός τρόπου επίλυσης του μοντέλου)
- Results (Επεξεργασία και εμφάνιση αποτελεσμάτων)

Η διαδικασία και η ροή της θα συζητηθούν ακολούθως προκειμένου να αναπτυχθεί, να καθοριστεί και να επιλυθεί το μοντέλο εναέριας γραμμής υψηλής τάσης [2].



Εικόνα 7.8: Model Builder COMSOL Multiphysics.

7.6.1 Ορισμός Παραμέτρων

Από τον κόμβο Global Definitions μπορεί ο χρήστης να ορίσει παραμέτρους, υλικά και κοινές εισόδους μοντέλων για όλα τα Components του περιβάλλοντος εργασίας. Εφόσον υπάρχει μόνο ένα Component, θα οριστούν μόνο οι παράμετροι, ενώ τα υλικά και οι εισοδοί του μοντέλου θα οριστούν τοπικά μέσα στο Component 1.

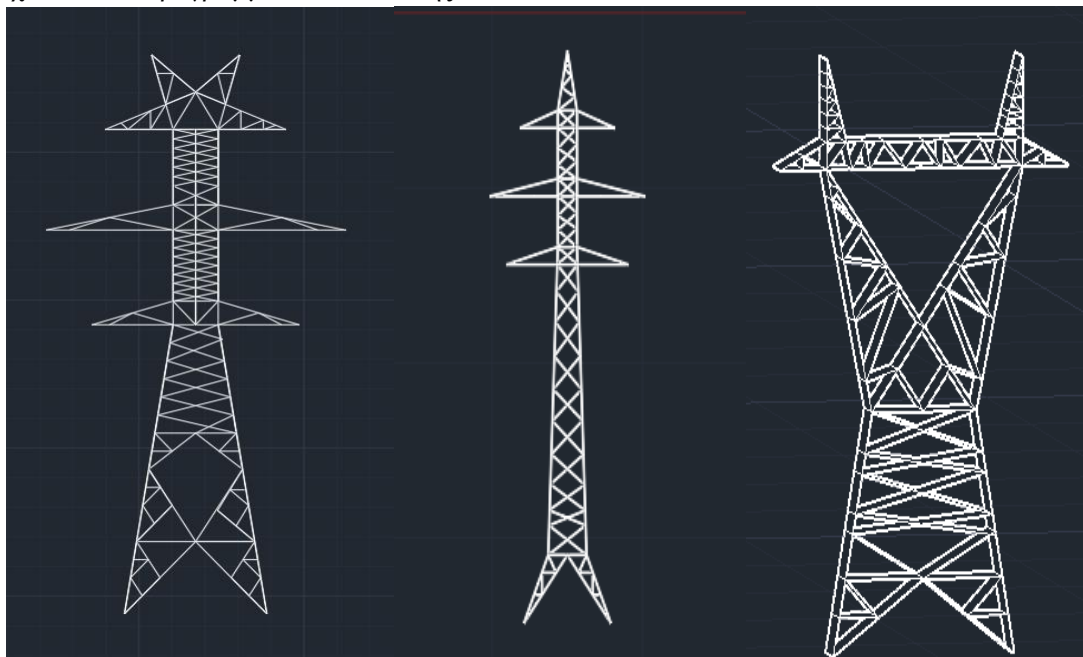
Στην Εικόνα 7.9 που ακολουθεί φαίνονται όλες οι παράμετροι του μοντέλου.

Name	Expression	Value	Description
Imax1	$\sqrt{2} \cdot 557.90 [\text{A}]$	788.99 A	Megisto reuma grammhs
rho0al	$4.4 \cdot 10^{-8} [\Omega \cdot \text{m}]$	$4.4 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	p0 alouminiou
alphaal	$0.004308 [1/\text{K}]$	$0.004308 1/\text{K}$	a alouminiou
rad1	$0.99 [\text{in}] / 2$	0.012573 m	sunoliki aktina agwgou
rad2	$0.3648 [\text{in}] / 2$	0.004633 m	aktina xalubdinis psuxhs
D	$\pi \cdot (\text{rad1} - \text{rad2})^2$	$1.9806 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	epifaneia alouminiou
Text	$299.15 [\text{K}]$	299.15 K	thermokrasia periballono...
rho0st	$2.4 \cdot 10^{-7} [\Omega \cdot \text{m}]$	$2.4 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$	p0 xaluba
alphast	$0.003 [1/\text{K}]$	$0.003 1/\text{K}$	a xaluba
Dp	$70 [\text{mm}^2]$	$7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$	epifaneia agwgou prosta...
rad3	$\sqrt{70 [\text{mm}^2] / \pi}$	0.0047203 m	aktina agwgou prostasias
ha	$10.45 - v + 10 \cdot v^{(1/2)} [W / (\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	$10.45 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$	suntelestis metaforas the...
v	0	0	taxutha anemou
Tref	$298.15 [\text{K}]$	298.15 K	thermokrasia anaforas
ltyp	$\sqrt{2} \cdot 500 [\text{A}]$	707.11 A	typiko reuma grammhs
Vmax	$\sqrt{2} \cdot 150000 [\text{V}]$	$2.1213 \cdot 10^5 \text{ V}$	tash grammhs
f	$50 [\text{Hz}]$	50 Hz	syxnothta
omega	$2 \cdot \pi \cdot f$	314.16 Hz	kukliki syxnothta

Εικόνα 7.9: Παράμετροι του μοντέλου COMSOL Multiphysics.

7.6.2 Ορισμός Γεωμετρίας

Η γεωμετρία του μοντέλου μπορεί να καθοριστεί από τον κλάδο Component 1 ή από τη γραμμή εργαλείων του προγράμματος. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να σχεδιάσει και να εισάγει τη γεωμετρία του μοντέλου στο COMSOL Multiphysics από άλλη εφαρμογή σχεδίασης, πράγμα που έγινε και στην παρούσα εργασία, λόγω της πολυπλοκότητας των διατάξεων. Για τη σχεδίαση των πυλώνων και των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD της Autodesk.



Εικόνα 7.10: Μοντέλα πυλώνων γραμμών μεταφοράς του Ελληνικού δικτύου.

7.6.3 Ορισμός των Υλικών

Το λογισμικό δίνει στον χρήστη πρόσβαση σε μια μεγάλη συλλογή πόρων από τους οποίους μπορεί να επιλέξει υλικά για το μοντέλο. Επιπλέον, ανάλογα με τους κλάδους της μηχανικής που έχει επιλέξει, ο χρήστης μπορεί να εισάγει μερικά από τα δικά του υλικά και να διαμορφώσει όσα χαρακτηριστικά θέλει για κάθε υλικό. Όλες οι ιδιότητες του υλικού που εισάγονται στο μοντέλο προέρχονται από βιβλιοθήκες λογισμικού COMSOL και διαδικτυακούς πόρους [3,4].

Στα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα υλικά:

- Aluminum
- Air
- Steel AISI 4340
- Soil

Ιδιότητες των υλικών που απαιτούνται για τους υπολογισμούς των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και τη θερμική συμπεριφορά, όπως έχουν αναλυθεί και στο παράρτημα, φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες [4].

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	230	W/(m·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	900	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_is...	3.54e8	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	2700	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_iso ; ...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r_...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Reference resistivity	rho0	4.4e-8	Ω·m	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Resistivity temperature coefficient	alpha	0.004308	1/K	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Reference temperature	Tref	293.15	K	Linearized resistivity

Εικόνα 7.11: Ιδιότητες του Aluminum (Αλουμνίου).

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_iso ; ...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_is...	4.032e6[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	475[J/(kg·K)]	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r_...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	7850[kg/m...]	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	44.5[W/(m...]	W/(m·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Reference resistivity	rho0	2.48e-7	Ω·m	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Resistivity temperature coefficient	alpha	0.003	1/K	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Reference temperature	Tref	293.15	K	Linearized resistivity

Εικόνα 7.12: Ιδιότητες του STEEL AISI 4340 (Χάλυβα).

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	0.5	W/(m·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	890	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_is...	5e-3	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	1500	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_iso ; ...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r_...	10	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Reference resistivity	rho0	100	Ω·m	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Resistivity temperature coefficient	alpha	5.5e-6	1/K	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Reference temperature	Tref	293.15	K	Linearized resistivity

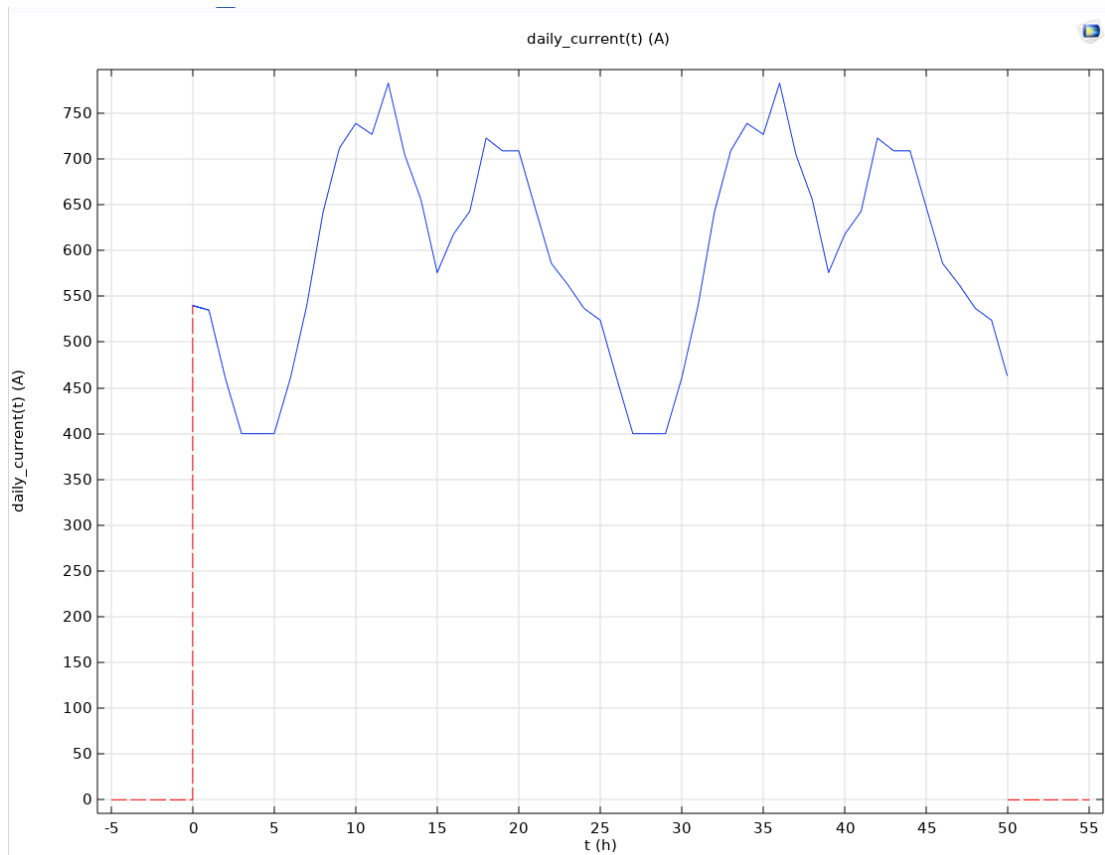
Εικόνα 7.13: Ιδιότητες του Soil (Εδάφους).

Property	Variable	Value	Unit	Property group
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permeability	mur_iso ; ...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Relative permittivity	epsilon_r_...	1	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Ratio of specific heats	gamma	1.4	1	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical conductivity	sigma_is...	1e-15[S/m]	S/m	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	1005	J/(kg·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	1.205	kg/m ³	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso ; kii...	0.0257	W/(m·K)	Basic
<input checked="" type="checkbox"/> Reference resistivity	rho0	1.3E13	Ω·m	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Resistivity temperature coefficient	alpha	1E-12	1/K	Linearized resistivity
<input checked="" type="checkbox"/> Reference temperature	Tref	293.15	K	Linearized resistivity

Εικόνα 7.14: Ιδιότητες του Air (Αέρα).

7.6.4 Ορισμός Συναρτήσεων

Από το πεδίο Definitions του Component 1 δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει συναρτήσεις για το μοντέλο του. Για την προσομοίωση θα χρειαστεί να οριστεί μια συνάρτηση η οποία παρατίθεται στο διάγραμμα 7.1 που ακολουθεί. Η δημιουργία της συνάρτησης έγινε με τη μέθοδο “Interpolation”.



Διάγραμμα 7.1: Ρεύμα γραμμής δύο ημερών.

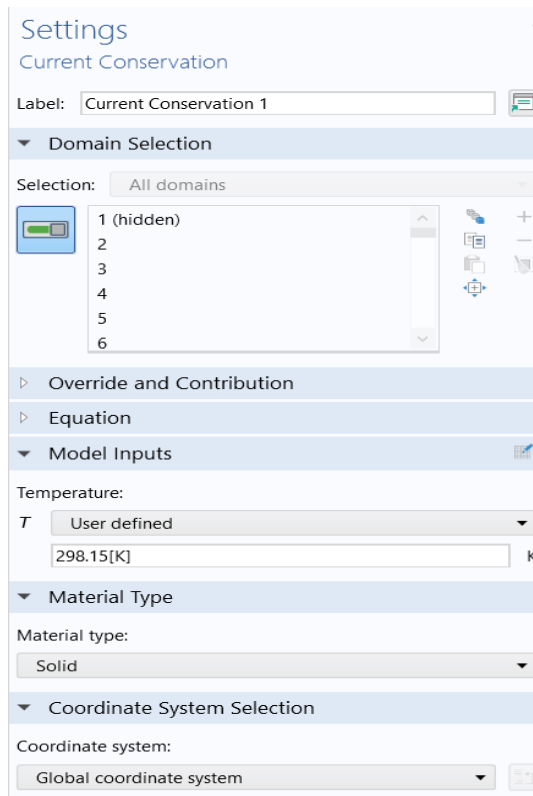
Σημειώνεται πως οι τιμές του ρεύματος είναι rms, ενώ η περίπτωση που περιγράφεται στο διάγραμμα 7.1 γενικά θεωρείται μια ακραία περίπτωση φόρτισης, καθώς στις αιχμές φορτίου το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να αντέξει η γραμμή (780 A) [7,8].

7.6.5 Ορισμός του κλάδου λειτουργίας του προγράμματος

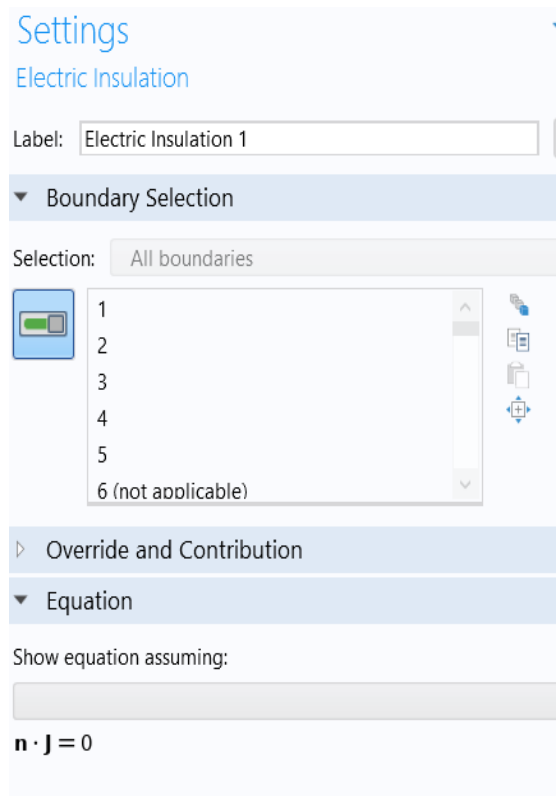
Ο χρήστης μπορεί τώρα να έχει πρόσβαση στους κλάδους φυσικής που επέλεξε στα βήματα του Model Wizard, να ορίσει οριακές συνθήκες και να προσθέσει διαφορετικά δεδομένα και εξισώσεις για να εξηγήσει σωστά τις διαδικασίες που επιθυμεί να μοντελοποιήσει. Οι ορισμοί της φυσικής για την τυπική λειτουργία του μοντέλου γραμμής για τις προσομοιώσεις, η ανάλυση των πεδίων για 2 περιόδους και η θερμική συμπεριφορά της γραμμής σε μια περίοδο 2 ημερών παρατίθενται στις ακόλουθες παραγράφους.

7.6.5.1 Electric Currents Interface

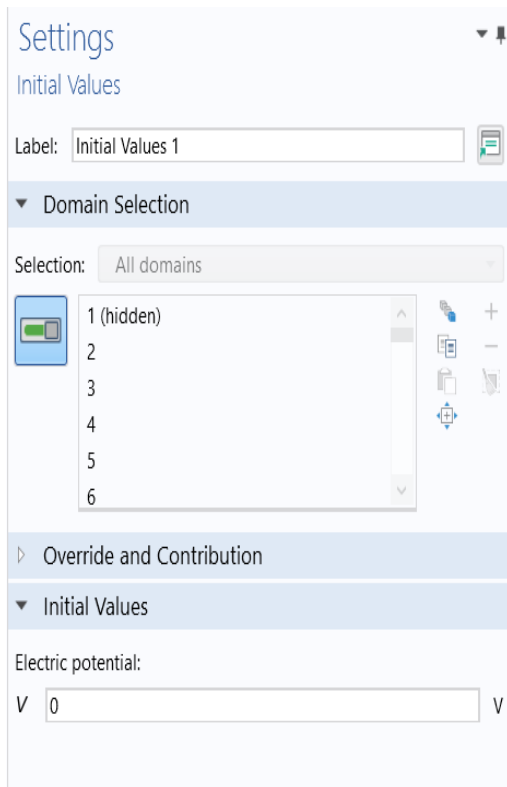
Ο χρήστης μπορεί να ελέγξει τη γείωση του συστήματος και την τάση στους αγωγούς χρησιμοποιώντας αυτό το interface. Οι μεταλλικοί πυλώνες, η γεωμετρία γείωσης του τοπίου και οι προστατευτικοί αγωγοί είναι όλα γειωμένα. Οι αγωγοί στη φάση είναι υπό τάση. Ο κόμβος “Initial Values” θέτει τις αρχικές συνθήκες της τάσης στο μηδέν. Οι εξισώσεις που απαιτούνται για την επίλυση του ζητήματος, όπως έχει αναλυθεί, βρίσκονται στον κόμβο “Current Conservation”. Οι οριακές συνθήκες που καθιστούν το μοντέλο ένα κλειστό σύστημα υπάρχουν στα άκρα της γεωμετρίας στον κόμβο “Electric Insulation”. Δηλαδή δεν υπάρχουν ρεύματα από εξωτερικές πηγές. Όσο προαναφέρθηκαν φαίνονται στις Εικόνα 7.15 - Εικόνα 7.21 [5,6].



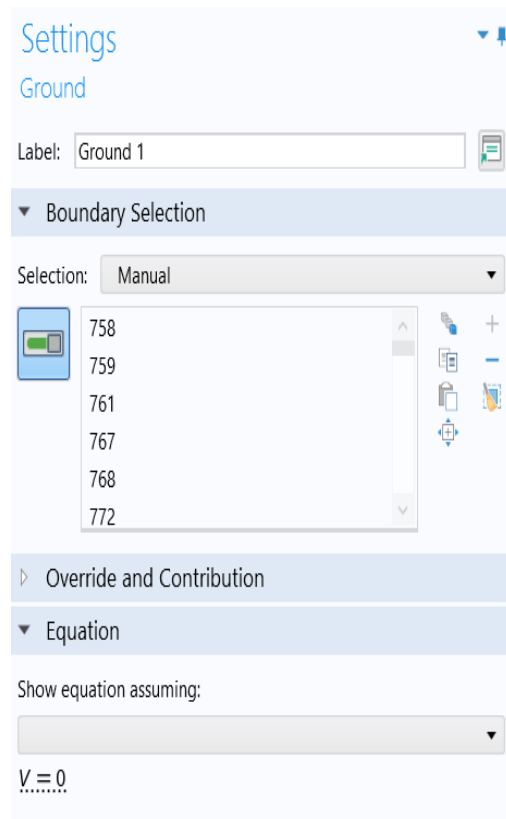
Εικόνα 7.15: Current Conservation 1 COMSOL.



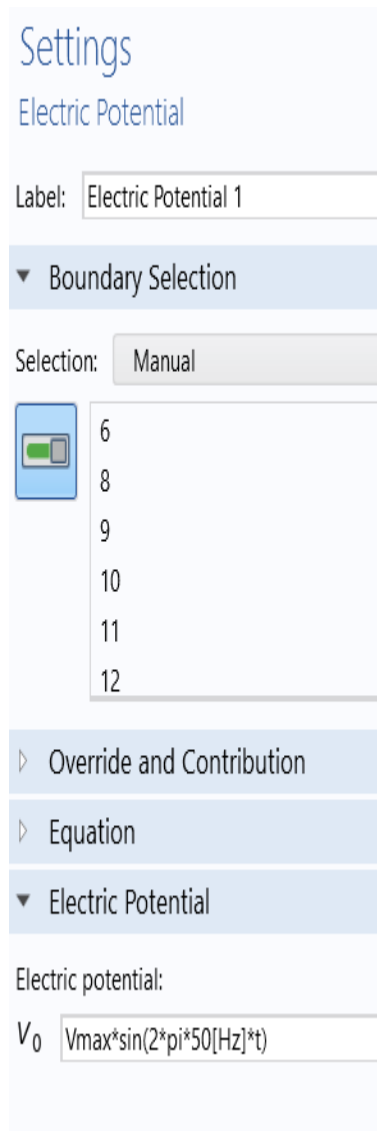
Εικόνα 7.16: Electric Insulation 1 COMSOL.



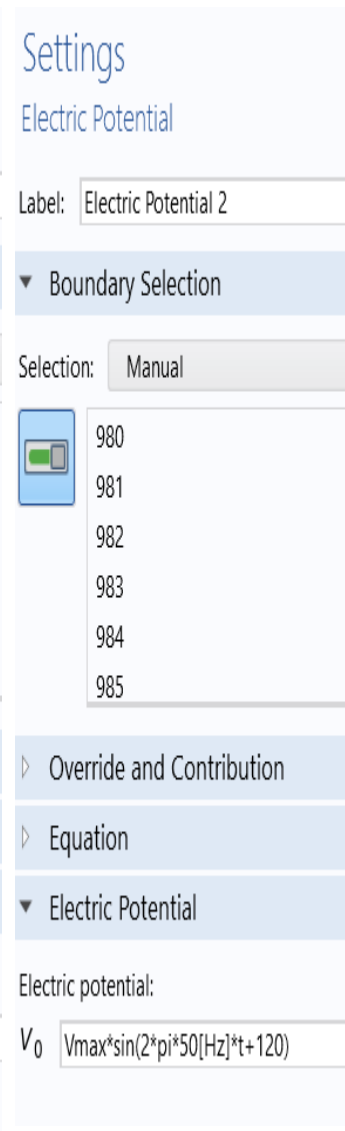
Εικόνα 7.17: Initial Value 1 COMSOL.



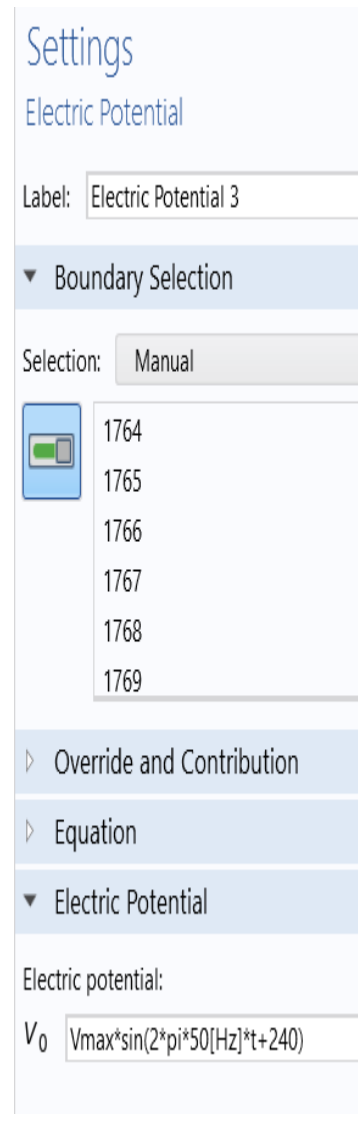
Εικόνα 7.18: Ground (Γείωση) 1 COMSOL.



Εικόνα 7.19: Electric Potential 1 (Φάση 1) COMSOL.



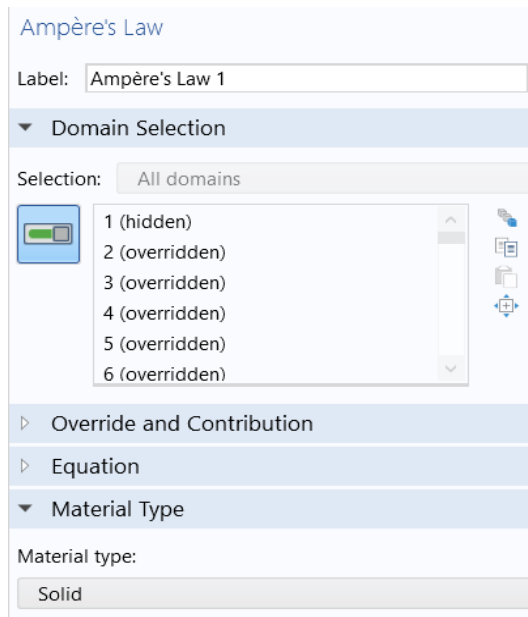
Εικόνα 7.20: Electric Potential 1 (Φάση 2) COMSOL.



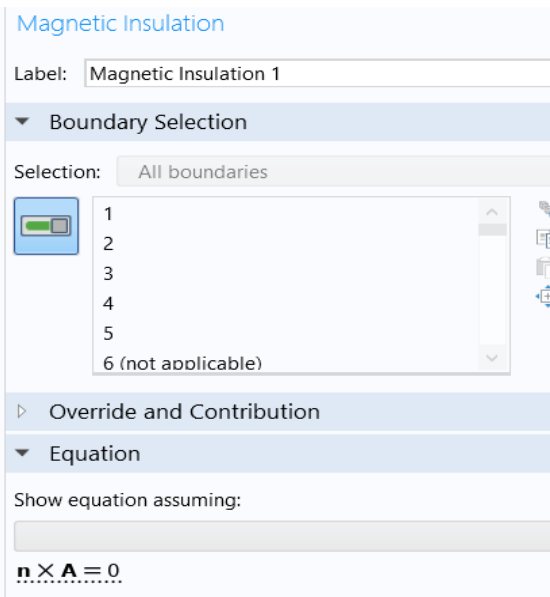
Εικόνα 7.21: Electric Potential 1 (Φάση 3) COMSOL.

7.6.5.2 Magnetic Fields Interface

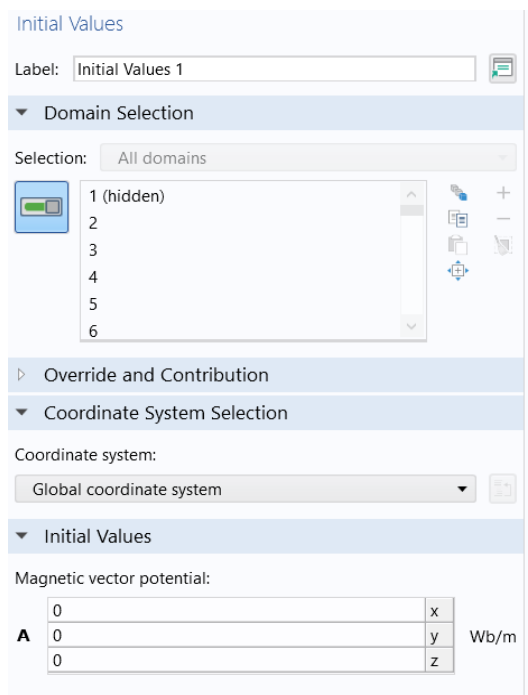
Το ρεύμα σε κάθε αγωγό ορίζεται από το περιβάλλον Coil όπως φαίνεται στις Εικόνες 7.26 – 7.29 για τον υπολογισμό του μαγνητικού του πεδίου. Το ρεύμα σε κάθε αγωγό ξεχωριστά ορίζεται σε μια τυπική τιμή σύμφωνα με βάση τις λεπτομέρειες που αναφέρονται στο Παράρτημα Β. Θεωρούμε ότι δεν ρέει ρεύμα από τους αγωγούς γείωσης υπό τυπικές συνθήκες. Ο κόμβος “Initial Values” στο μοντέλο μηδένισε το μαγνητικό πεδίο. Οι εξισώσεις Maxwell που περιγράφονται στο Παράρτημα Β περιέχονται στον κόμβο του νόμου του Ampere (Ampere’s law). Ο κόμβος “Magnetic Insulation” έχει τις οριακές συνθήκες στα άκρα της γεωμετρίας που μετατρέπουν το μοντέλο σε ένα κλειστό σύστημα, πράγμα που σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες [5,6].



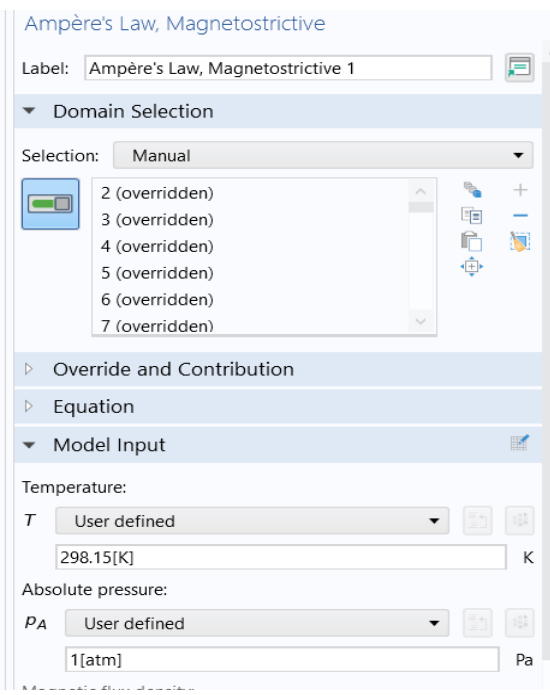
Εικόνα 7.22: Ampere's law 1 COMSOL.



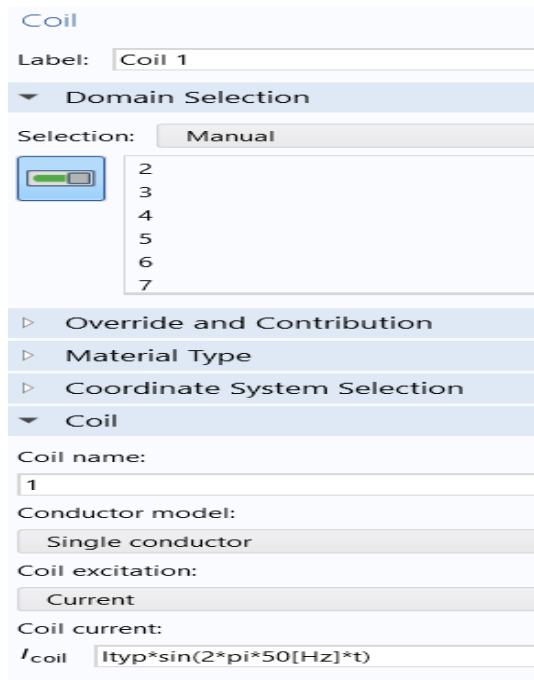
Εικόνα 7.23: Magnetic Insulation 1 COMSOL.



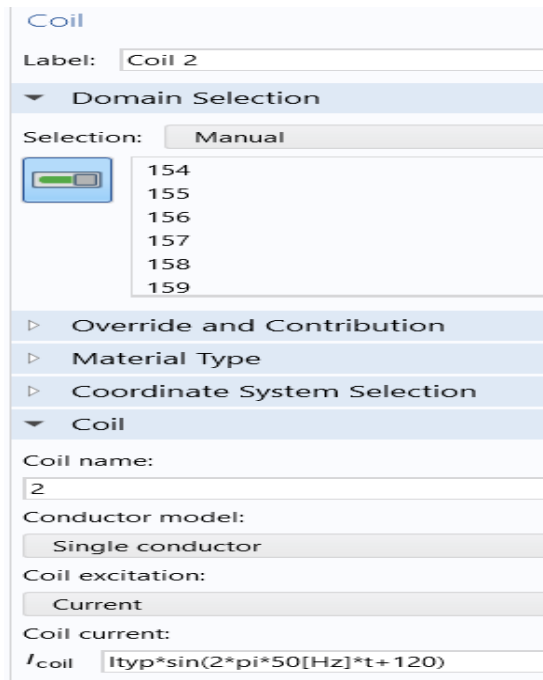
Εικόνα 7.24: Initial Values 1 COMSOL.



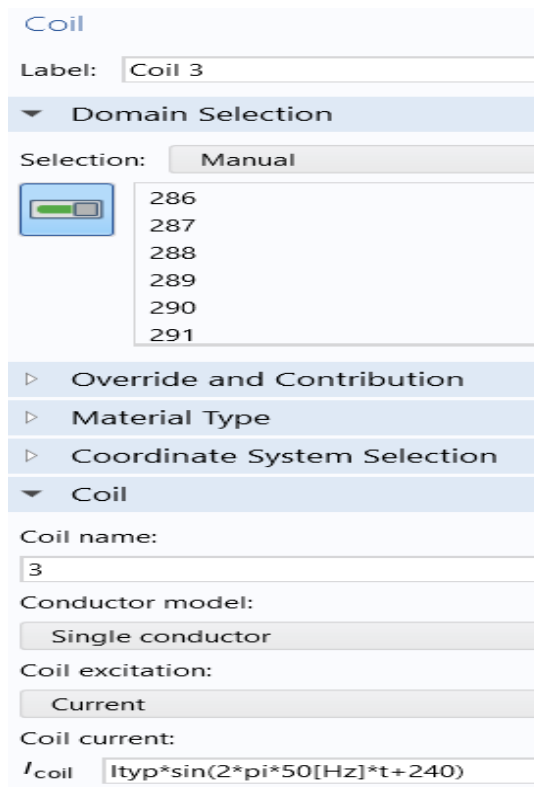
Εικόνα 7.25: Ampere's Law, Magnetostrictive 1 COMSOL.



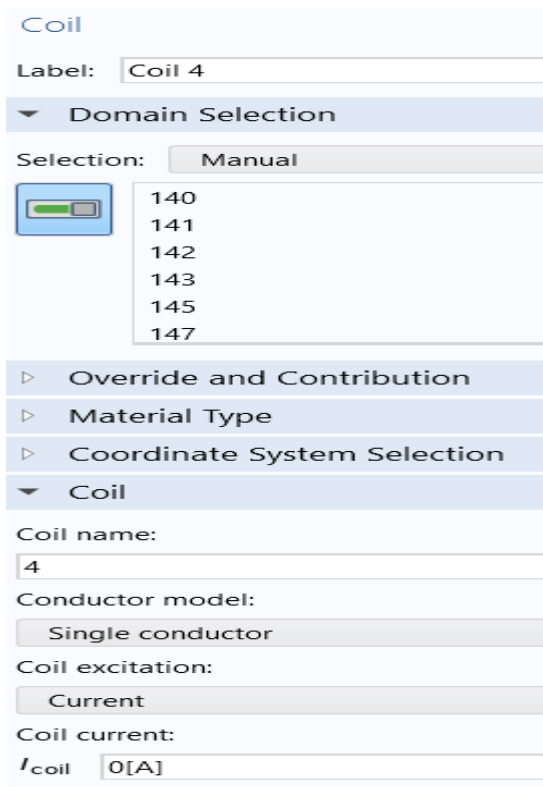
Εικόνα 7.26: Coil 1 (Φάση 1) COMSOL.



Εικόνα 7.27: Coil 2 (Φάση 2) COMSOL.



Εικόνα 7.28: Coil 3 (Φάση 3) COMSOL.

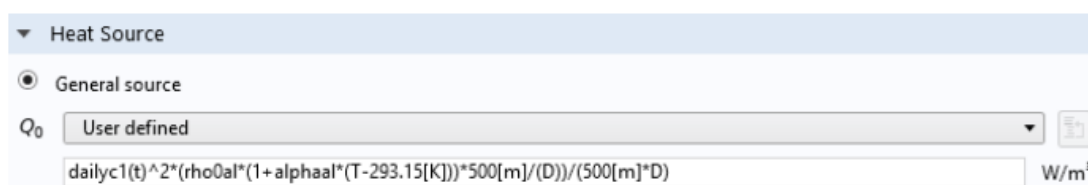


Εικόνα 7.29: Coil 4 (Γείωση) COMSOL.

7.6.5.3 Heat Transfer In Solids Interface

Οι πηγές θερμότητας, οι απαγωγές θερμότητας και η αρχική θερμοκρασία του μοντέλου ορίζονται σε αυτόν τον κλάδο. Ο ορισμός των πηγών θερμότητας στο μοντέλο φαίνεται στις Εικόνα 7.30 και Εικόνα 7.31 Το μήκος της κάθε γραμμής αναφέρεται στο Κεφάλαιο 6 σε μέτρα. Ο κόμβος “Initial Values” χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση της αρχικής θερμοκρασίας στους 25°C. Οι διαφορικές εξισώσεις του νόμου Fourier για στερεά, υγρά και αέρια περιέχονται στους κόμβους “Solid” και “Fluid”. Οι οριακές συνθήκες που καθιστούν το μοντέλο ένα κλειστό σύστημα —δηλαδή όπου δεν υπάρχουν εξωτερικές συνεισφορές θερμότητας—ορίζονται από τον κόμβο “Thermal Insulation”.

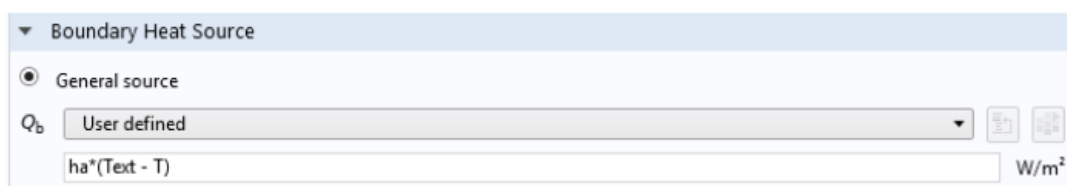
- Τρεις Φάσεις:



Εικόνα 7.30: Ορισμός της συνάρτησης Q_0 .

Η ενότητα 7.6.1 περιέχει μια πλήρη λίστα όλων των παραμέτρων. Ουσιαστικά, το μοντέλο γραμμικής αντίστασης έναντι θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει μια σύνδεση μεταξύ της αντίστασης των αγωγών και της θερμοκρασίας.

- Απορρόφηση Θερμότητας

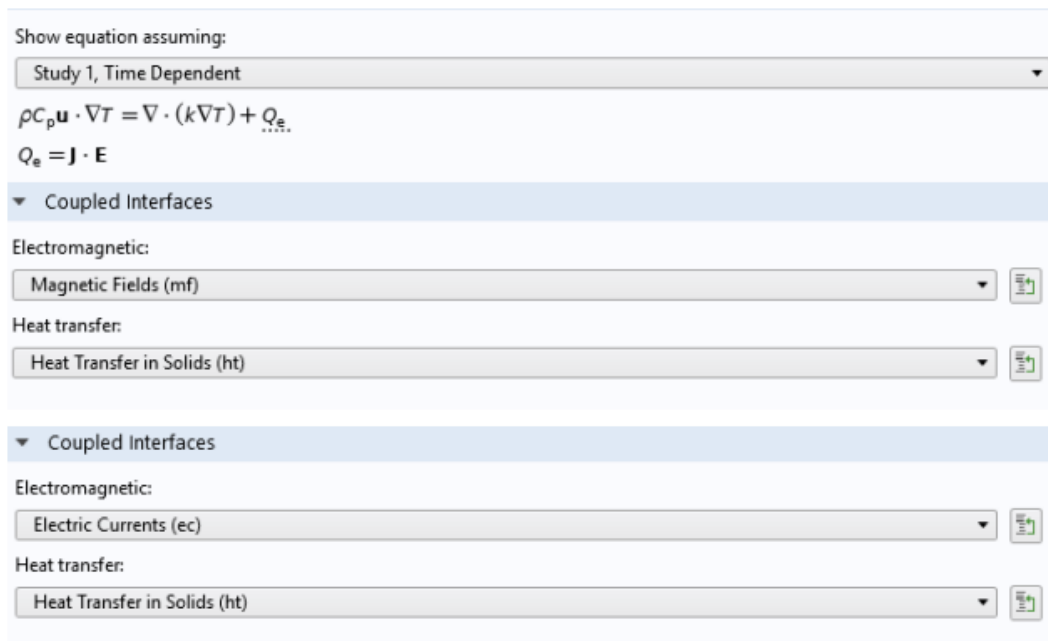


Εικόνα 7.31: Ορισμός της συνάρτησης Q_b .

Όπου h_a ορίζεται στις παραμέτρους του μοντέλου στην παράγραφο 7.6.1 και είναι μια εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της απαγωγής θερμότητας από τον αέρα η οποία συμπεριλαμβάνει και την ταχύτητα του αέρα για τιμές μέχρι και 20 m/s. Αυτή η συνθήκη ισχύει μόνο στην επιφάνεια του αγωγού, αφού και εκεί η θερμότητα μεταφέρεται στον αέρα. [3].

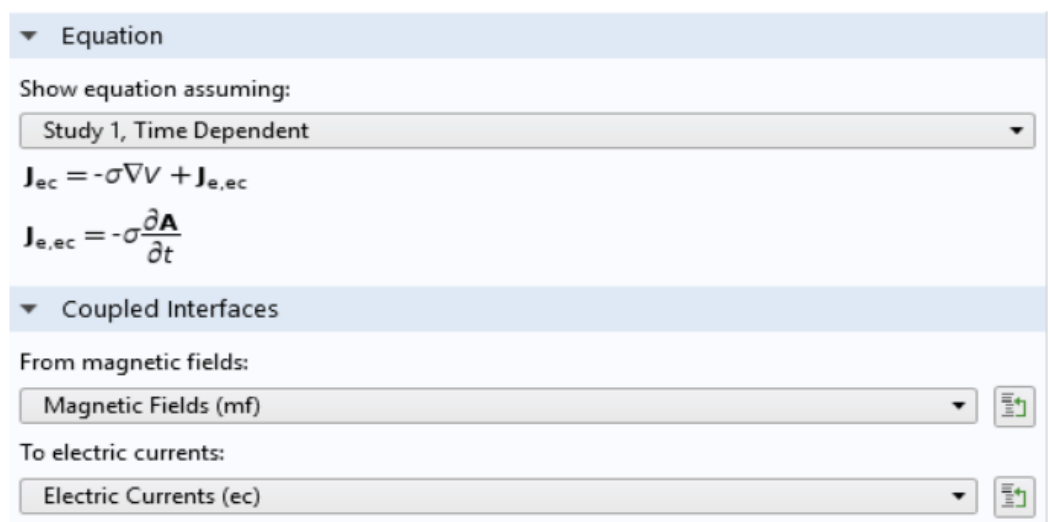
7.6.5.4 Multiphysics Interface

Όπου είναι δυνατόν, δίνεται στον χρήστη η επιλογή να ενσωματώσει τους διάφορους επιλεγμένους κλάδους. Το “Electromagnetic Heating” στο μοντέλο ενεργοποιείται 2 φορές, μαζί με το “Temperature Coupling”. Τα ηλεκτρικά και θερμικά προβλήματα στο μοντέλο συνδυάζονται με αυτόν τον τρόπο. Το ρεύμα επαγωγής που προκαλείται από το μαγνητικό πεδίο (Eddy Currents) εξακολουθεί να εισάγεται στο μοντέλο από τη σύζευξη “Induction Current Density Component”. Το μοντέλο “Linearized Resistivity”, το οποίο καθορίζει την αγωγιμότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ειδικής αγωγιμότητας των υλικών στα modules “Electric Current” και “Magnetic Fields”, στους κόμβους “Current Conservation” και “Ampere’s law” αντίστοιχα. Οι σύνδεσμοι μεταξύ των κλάδων φαίνονται ακολούθως:



Εικόνα 7.32: Οι σύνδεσμοι των κλάδων που χρησιμοποιήθηκαν για τα μοντέλα.

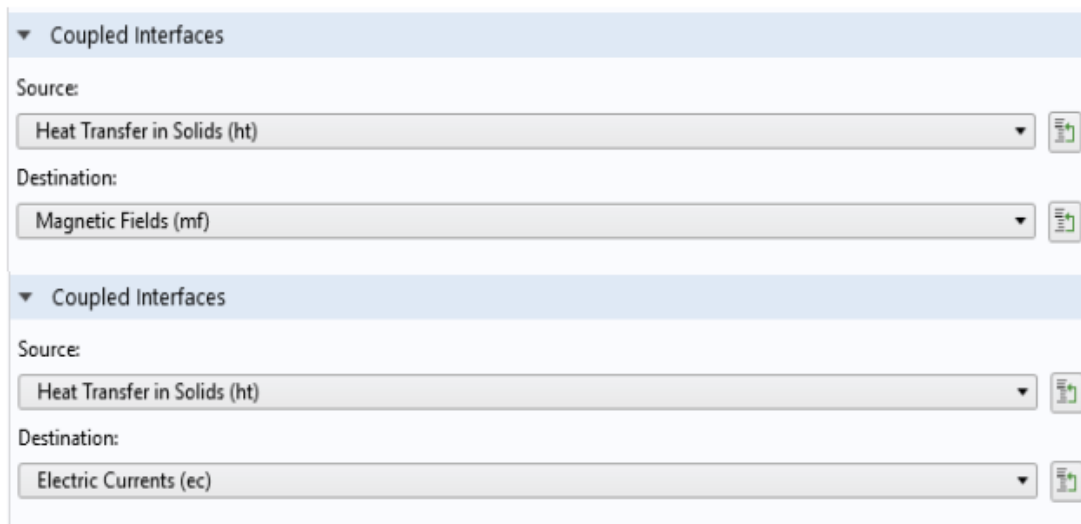
Με αυτόν τον τρόπο συμπεριλαμβάνονται οι ηλεκτρομαγνητικές απώλειες στο μοντέλο.



Εικόνα 7.33: Ο σύνδεσμος που περιλαμβάνει τις ηλεκτρομαγνητικές απώλειες του μοντέλου.

Έτσι συμπεριλαμβάνεται το ρεύμα εξ' επαγωγής στο μοντέλο.

Με απλά λόγια, το “Temperature Coupling” επιτρέπει την εισαγωγή της παραμέτρου της θερμοκρασίας σε άλλα προγράμματα φυσικής που ακόμα σε αυτήν την περίπτωση, το απαιτούν για τον υπολογισμό της γραμμικής αγωγιμότητας των σχετικών υλικών [5,6].



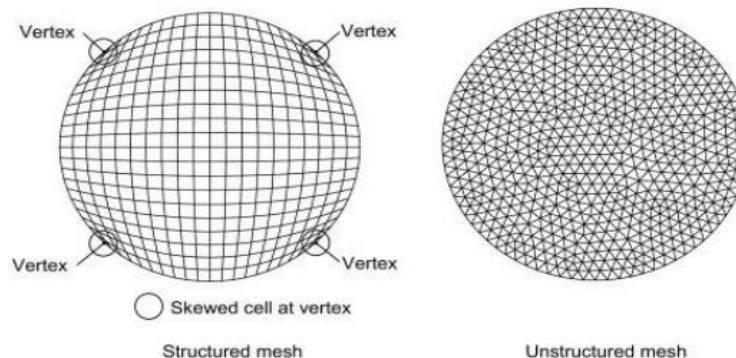
Εικόνα 7.34: Οι σύνδεσμοι των κλάδων που χρησιμοποιήθηκαν για τα μοντέλα.

7.6.6 Ορισμός Πλέγματος (Mesh)

Στο λογισμικό προσομοίωσης, το πλέγμα (Mesh) χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση του συνεχούς γεωμετρικού χώρου ενός μοντέλου. Η διαδικασία της πλεγματοποίησης της περιοχής επίλυσης πρέπει να συνδυάζει την ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας, αλλά και την ανάγκη για γρήγορη ταχύτητα υπολογισμών. Σε μια προσομοίωση είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός κόμβων και κελιών του πλέγματος. Ακολουθούν ορισμένες γενικές οδηγίες για την κατασκευή ενός πλέγματος:

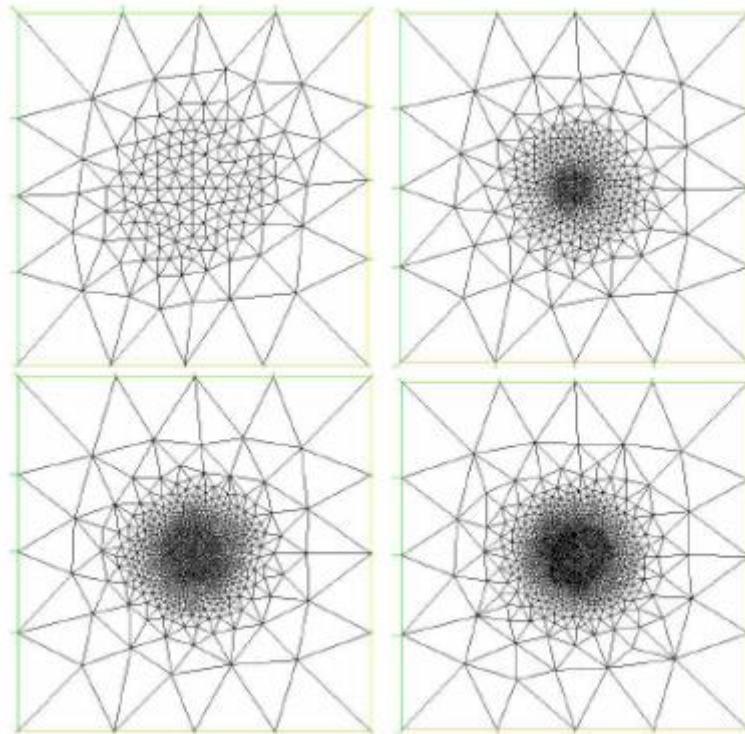
- Θα πρέπει να υπάρχουν περισσότεροι κόμβοι στη γεωμετρία των σημείων όπου αναμένονται σημαντικές διακυμάνσεις στα μετρούμενα μεγέθη σε μικρές αποστάσεις (συνήθως αιχμηρά αντικείμενα ή όρια μεταξύ περιοχών).
- Θα πρέπει να αποφεύγεται η ξαφνική αλλαγή στο μέγεθος των κελιών σε κοντινές περιοχές του δικτύου.
- Το πρόβλημα θα πρέπει πρώτα να λύνεται σε αραιό πλέγμα και μετά σε πιο πυκνό [1].

Τα πλέγματα μπορούν να χωριστούν σε 2 βασικές κατηγορίες: δομημένα πλέγματα και μη δομημένα πλέγματα. Κάθε κόμβος σε δομημένα πλέγματα περιέχει τον ίδιο αριθμό κελιών, ωστόσο, σε μη δομημένα πλέγματα αυτός ο αριθμός ποικίλλει. Το μη δομημένο πλέγμα δημιουργείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στο COMSOL Multiphysics, η οποία χρησιμοποιεί περισσότερους πόρους επεξεργασίας αλλά απεικονίζει τη γεωμετρία με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από ένα δομημένο πλέγμα.



Εικόνα 7.35: Δομημένο και Αδόμητο Πλέγμα από Manual COMSOL Multiphysics [1].

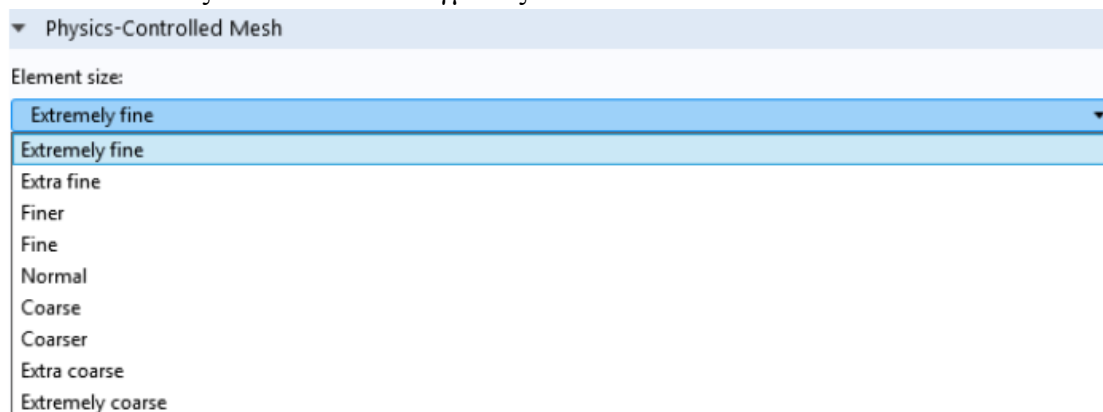
Όταν γίνεται χρήση μη δομημένων πλεγμάτων, είναι ακόμα δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα προσαρμοστικό πλέγμα για να γίνει το πλέγμα πιο πυκνό στις περιοχές ενδιαφέροντος καθώς το πρόβλημα επιλύεται για να βελτιωθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 7.36: Προσαρμοστικό Πλέγμα σε μη Δομημένα Πλέγματα από Manual COMSOL Multiphysics [1].

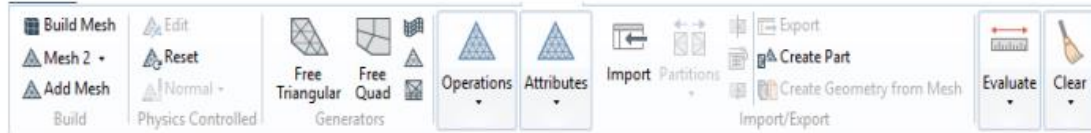
Ο χρήστης του COMSOL Multiphysics έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει το δικό του πλέγμα ή να αφήσει το πρόγραμμα να καθορίσει το πλέγμα που θα αντιμετωπίσει καλύτερα το πρόβλημα της φυσικής του μοντέλου.

Στο δεύτερο σενάριο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ ενός πολύ λεπτού και ενός πολύ πυκνού πλέγματος.



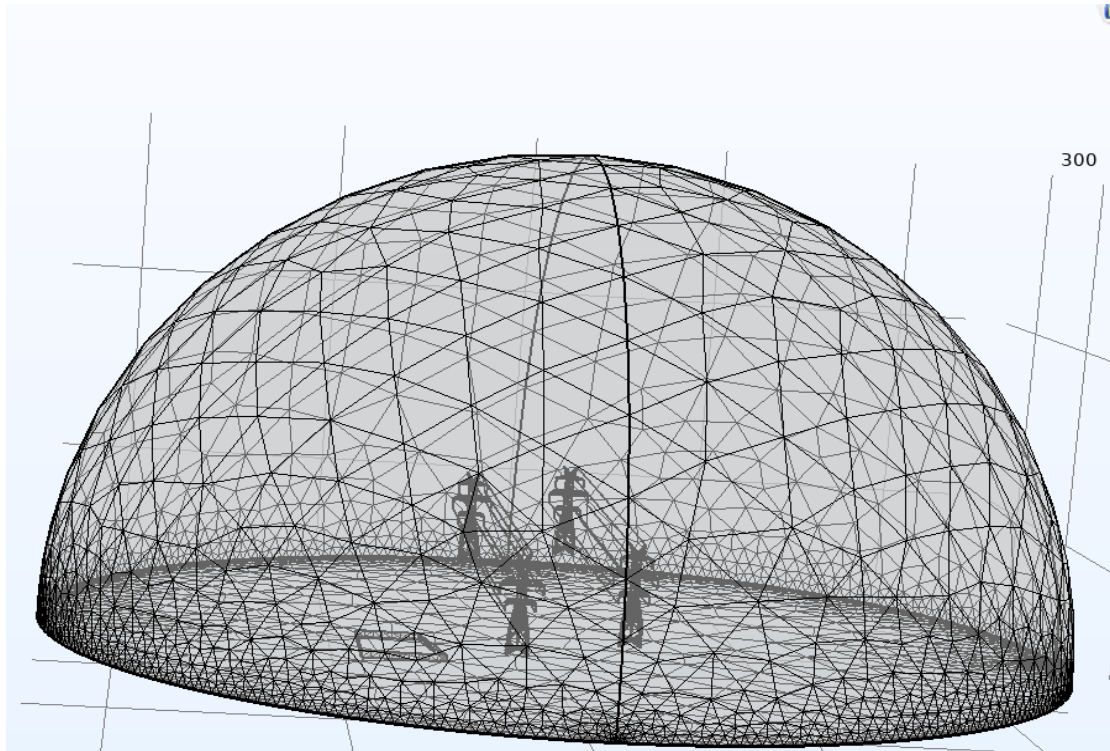
Εικόνα 7.37: Πλέγματα που παρέχει το πρόγραμμα προσομοίωσης «Πλέγματα».

Στο πρώτο σενάριο, όταν ο χρήστης αποφασίζει να δημιουργήσει το δικό του πλέγμα παρέχεται μια ποικιλία εργαλείων για να ενεργοποιηθεί ο σχεδιασμός πλέγματος από τη γραμμή εργαλείων COMSOL Multiphysics.

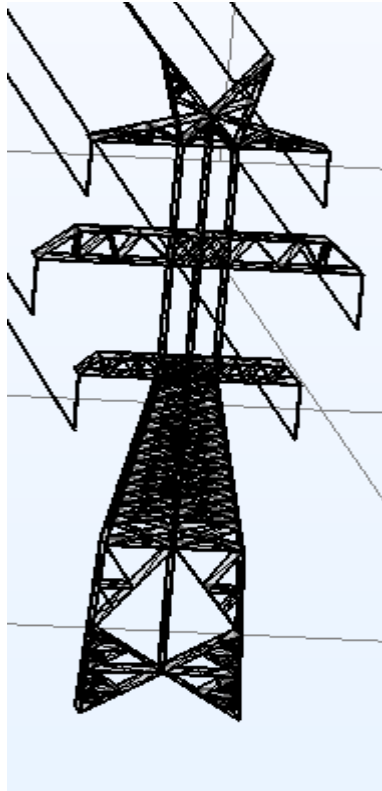


Εικόνα 7.38: Εργαλεία που παρέχονται για τη δημιουργία ατομικών πλεγμάτων.

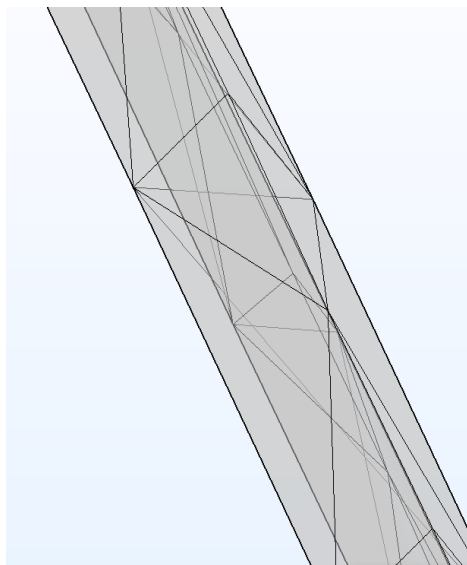
Στις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν σ' αυτήν τη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το "Extremely Fine Mesh", το οποίο είναι πολύ πυκνό σε περιοχές που αλλάζει γεωμετρία σε μικρή απόσταση (αγωγοί, αντικείμενα, σύνορα μεταξύ περιοχών) και, καθώς απομακρυνόμαστε από αυτές, αραιώνουν σταδιακά. Για τις μεταλλικές κατασκευές των πυλώνων επιλέχθηκε το "Extra Fine Mesh" και για το εξωτερικό ημικύκλιο που προσομοιώνει την ατμόσφαιρα επιλέχθηκε το "Fine Mesh" [2].



Εικόνα 7.39: Fine mesh COMSOL Multiphysics από την προσομοίωση που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 7.40: Extra Fine Mesh COMSOL Multiphysics από την προσομοίωση που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 7.41: Extremely Fine Mesh Comsol Multiphysics που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

Οι πόροι επεξεργασίας που απαιτούνται για την προσομοίωση θα αυξάνονταν γρήγορα εάν το πλέγμα ήταν υπερβολικά παχύ σε ολόκληρη την επιφάνεια της γεωμετρίας και θα είχαμε σχεδόν ελάχιστη διασφάλιση ότι τα αποτελέσματα θα ήταν ακριβή.

7.6.7 Ορισμός Μελέτης

Τα στοιχεία της λύσης προσομοίωσης, οι χρονικές περίοδοι που καθορίστηκαν και οι τύποι τεχνικών επίλυσης που επιλέχθηκαν για κάθε ζήτημα περιγράφονται όλα σ' αυτήν την ενότητα.

7.6.7.1 Μέθοδοι Επίλυσης

Η διαδικασία μετατροπής ενός συνεχούς προβλήματος φυσικής σε διακριτό περιλαμβάνει την αλλαγή της αντίστοιχης διαφορικής εξίσωσης σε ένα σύστημα εξισώσεων με τη μορφή $A \cdot X = B$.

Όπου:

A: Πίνακας συντελεστών που προκύπτει από τη μετατροπή των συνεχών διαφορικών εξισώσεων σε διακριτές συναρτήσεις κόμβων.

X: Πίνακας που περιέχει τις τιμές των εξαρτημένων μεταβλητών του προβλήματος.

B: Πίνακας διεγέρσεων.

Οι μέθοδοι επίλυσης κατηγοριοποιούνται σε ευθείες (Direct) και επαναληπτικές (Iterative).

Οι ευθείες μέθοδοι χρησιμοποιούν τη διάσπαση LU για να επιλύσουν ένα σύστημα εξισώσεων όπως το παραπάνω. Η λογική της διάσπασης LU έχει ως εξής:

- Διάσπαση LU: $A = L \cdot U$
- Πρόδρομη απαλοιφή: $L \cdot Y = B$
- Οπισθόδρομη απαλοιφή: $U \cdot X = B$

Οι επαναληπτικές προσεγγίσεις βασίζονται στην ιδέα ότι υπάρχει μια αρχική τιμή που αντιπροσωπεύει την απάντηση στο πρόβλημα και ότι χρησιμοποιώντας αυτήν και έναν αλγόριθμο, μπορούμε να πλησιάσουμε στην επίλυση του συστήματος με κάθε επανάληψη. Όταν επιτύχουμε το καθορισμένο επίπεδο ακριβείας, η διαδικασία τελειώνει. Με την τεχνική Gauss-Seidel, το σκεπτικό εξηγείται ακολούθως:

- $A = D + L + U$
- $(D + L + U) \cdot X = B$
- $(D + L) \cdot X_n = -U \cdot X_{n-1} + B$
- $X_n = -(D + L)^{-1} \cdot U \cdot X_{n-1} + (D + L)^{-1} \cdot B$

Ο πίνακας $(D + L)^{-1} \cdot U$ ονομάζεται πίνακας επαναλήψεων και ανάλογα με το αν οι τιμές του αλλάζουν σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος χαρακτηρίζεται στάσιμος ή όχι [1].

Οι σημαντικότερες διαφορές των μεθόδων συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.1: Οι διαφορές της Ευθείας με την Επαναληπτική μέθοδο.

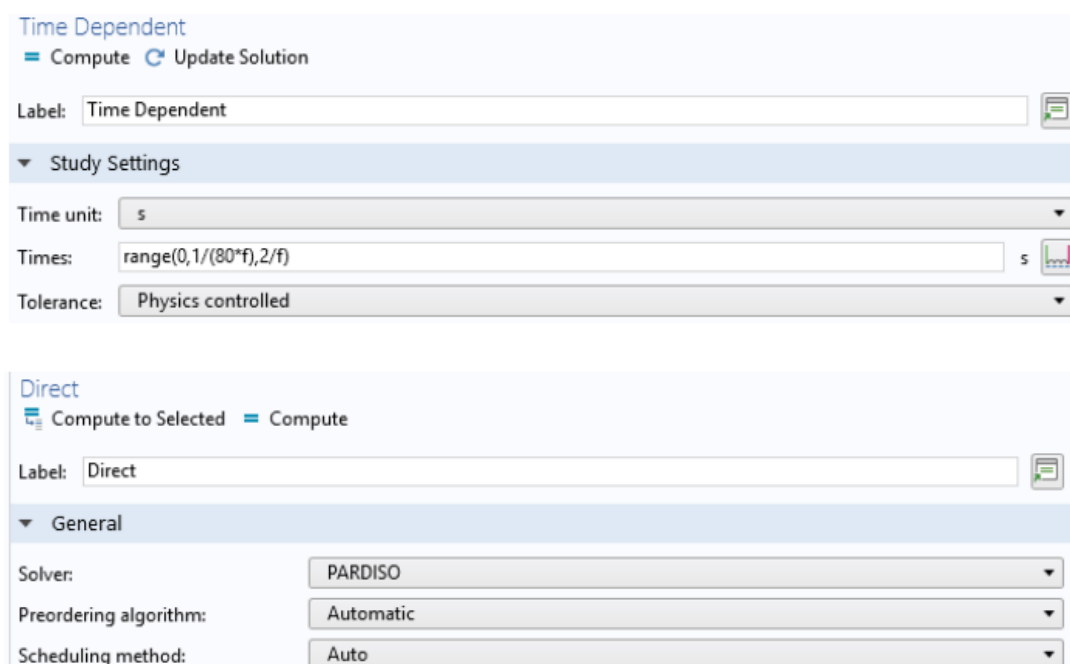
Ευθείες Μέθοδοι	Επαναληπτικές Μέθοδοι
Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από το σφάλμα που συσσωρεύεται στον Πίνακα A	Η μέθοδος τερματίζεται στην επιθυμητή ακρίβεια
Πεπερασμένος αριθμός πράξεων της τάξης του N^3 , N άγνωστοι	Η μέθοδος μπορεί να συγκλίνει αργά ή και καθόλου
Κατανάλωση πολλών υπολογιστικών πόρων	Λίγες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους
Διαδεδομένες μέθοδοι: MUMPS PARDISO SPOOLES	Διαδεδομένες μέθοδοι: Συζυγής Βάθμωσης Αλγεβρικές Πολυπλεγματικές Γεωμετρικές Πολυπλεγματικές

Επομένως, ο αριθμός των αγνώστων N και οι διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι έχουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή τεχνικής. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν πολλοί άγνωστοι στο

μοντέλο που αναλύεται για αυτήν την εργασία, θα χρησιμοποιηθούν απλές προσεγγίσεις για την επίλυσή του.

7.6.7.2 Επίλυση Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου για δύο περιόδους

Στο πρώτο στάδιο της προσομοίωσης μελετάται η συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για δύο περιόδους. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα να γίνει μελέτη στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο της συχνότητας. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.5 επιλέγεται η μελέτη στο πεδίο του χρόνου, για δύο περιόδους σε ογδόντα βήματα. Ξεκινάει από $t=0s$ με βήμα $\beta=1/(80f)$ έως $t=0,004s$ και επιλέγεται για τον “solver” ο ευθύς αλγόριθμος PARDISO [5].



Εικόνα 7.42: Ο Ευθύς Αλγόριθμος PARDISO.

7.6.7.3 Επίλυση Θερμικού μοντέλου για 48 ώρες

Η μόνη διαφορά μεταξύ αυτής και της προηγούμενης περίπτωσης είναι ο χρόνος προσομοίωσης. Επιλέγεται λοιπόν μελέτη στο πεδίο του χρόνου, συνολικής διάρκειας 48 ωρών και βήματος μισής ώρας. Ο αλγόριθμος είναι PARDISO για άλλη μια φορά.



Εικόνα 7.43: Ο Ευθύς Αλγόριθμος PARDISO

Βιβλιογραφία

- [1] «Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα», David K. Cheng, εκδόσεις Fountas, 2η έκδοση.
- [2] “COMSOL Multiphysics User’s Guide”, Version 5.6
- [3] <https://www.engineeringtoolbox.com/>
- [4] “Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Vol. 2, ASM Handbook, ASM International, 1990, pp. 62–122.
- [5] S. A. Pastromas, K. Sandros, K. N. Koutras, E. Pyrgioti, “Investigation of lightning strike effects on wind turbine critical components”, Proc. of the 2018 ICHVE 2018.
- [6] B. Ali Rachedi, A. Babouri, F. Berrouk, “A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using COMSOL MULTIPHYSICS”, International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), 2014.
- [7] <https://www.admie.gr>
- [8] «Οικονομική Λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Α. Γ. Μπακιρτζής, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1998.
- [9] https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Προσομοίωση των χαμηλόσυχνων ΗΜΠ

Παραμένει συνεχές το ενδιαφέρον για τη διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας (50Hz) στην ανθρώπινη υγεία. Έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες πρόσφατες μελέτες με πρωταρχικό στόχο τη σύγκριση μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας και αποτελεσμάτων προσομοίωσης [1–4]. Η σχετική έρευνα συνεχίζεται και έχει γίνει πιο έντονη, χάρη στην πρόοδο, στην παραγωγή οργάνων ακριβείας και στην ανάπτυξη πακέτων λογισμικού. Κατά συνέπεια, απαιτούνται ισχυρά εργαλεία λογισμικού για τη μοντελοποίηση και τη διαχείριση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας και είναι απαραίτητο να επαληθεύονται οι υπολογισμοί με πραγματικές μετρήσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο, χρησιμοποιείται το πακέτο λογισμικού COMSOL Multiphysics για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής συχνότητας 50Hz. Στη συνέχεια, αυτοί οι υπολογισμοί συγκρίνονται με τις μετρήσεις που λαμβάνονται στο Κεφάλαιο 6.

8.1 Υπολογισμός των Ηλεκτρικών και των Μαγνητικών Πεδίων

Πριν γίνει ανάλυση στο κύριο μέρος του κεφαλαίου, θα πρέπει να εξεταστούν οι τυπικές τεχνικές για την εκτίμηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50Hz που δημιουργούνται από γραμμές μεταφοράς και υποσταθμούς υψηλής τάσης μπορούν να διερευνηθούν μεμονωμένα, όπως εξηγείται στο πρώτο κεφάλαιο. Απαιτούνται τρισδιάστατοι (3D) αριθμητικοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό αυτών των πεδίων στους υποσταθμούς, ενώ οι δισδιάστατοι (2D) αριθμητικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται συχνότερα σε γραμμές μεταφοράς. Ο υπολογισμός τόσο των μαγνητικών όσο και των ηλεκτρικών πεδίων της γραμμής μεταφοράς απλοποιείται σε ένα δισδιάστατο ζήτημα. Η αντιμετώπιση του προβλήματος ως δισδιάστατου είναι ένας θεωρητικός μονόδρομος για εύκολη δημιουργία μοντέλου γραμμής και γρήγορο υπολογισμό πεδίου. Σύμφωνα με αυτήν, για την απλοποίηση και την ουσιαστική διατύπωση του προβλήματος γίνονται συνήθως οι εξής παραδοχές:

- Τα ρεύματα γης δεν επηρεάζουν το συνολικό μαγνητικό πεδίο ή τα ρεύματα των άλλων αγωγών.
- Το ρεύμα που δημιουργείται στους αγωγούς αντικεραυνικής προστασίας είναι αμελητέο και δεν επηρεάζει ουσιαστικά τον υπολογισμό του πεδίου σε ύψη πρακτικού ενδιαφέροντος. Επιπλέον, η επίδραση των επαγόμενων ρευμάτων στα ρεύματα φάσεων είναι ασήμαντη.
- Όλοι οι αγωγοί θεωρούνται ευθύγραμμοι, απείρου μήκους και παράλληλοι σε ένα καθορισμένο ύψος (συνήθως ίσο με το μέγιστο ύψος βέλους).
- Η γη θεωρείται ότι είναι ένας άπειρος, επίπεδος και τέλειος αγωγός.
- Αντικείμενα στο έδαφος συνήθως δεν αναπαριστώνται.

Η πλειονότητα των προηγούμενων παραδοχών έχει ελάχιστη επίδραση στον υπολογισμό του πεδίου ειδικά κοντά στη γραμμή μεταφοράς. Οι δύο τελευταίες παραδοχές, ειδικότερα, ενδέχεται να δημιουργήσουν ένα μικρό ποσοστό σφάλματος.

Συγκεκριμένα, το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται με αναλυτικές αριθμητικές μεθόδους και φυσικά με τη βοήθεια σύγχρονων υπολογιστών. Το ηλεκτρικό πεδίο στις γραμμές μεταφοράς θεωρείται ανοιχτό συνοριακό πρόβλημα και ο υπολογισμός του πραγματοποιείται

χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προσομοίωσης φορτίου (CSM) [2] και τη μέθοδο οριακών στοιχείων (BEM) [1]. Σπάνια εφαρμόζονται διαφορικές αριθμητικές τεχνικές και αναλυτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό τους.

Αντίθετα, λόγω του τεράστιου μήκους των σωλήνων σε σχέση με την ακτίνα τους, το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον νόμο Biot- Savart, ο οποίος παράγει εξαιρετικά αποτελέσματα που συμφωνούν με το αξιόπιστο λογισμικό υπολογισμού πεδίου. Επιπλέον, μια τρισδιάστατη προσέγγιση που βασίζεται στον νόμο Biot-Savart και μοντελοποιεί τους αγωγούς ως συνδεδεμένα ευθύγραμμα τμήματα μπορεί να χρησιμοποιεί για τον προσδιορισμό του μαγνητικού πεδίου.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα των δισδιάστατων και των απλοποιημένων μοντέλων 3D δεν αποδίδουν πάντα σωστά αποτελέσματα. Παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα είναι η επίδραση του βέλους των γραμμών, των κοντινών αγωγίων αντικειμένων, των πυλώνων στήριξης κ.λπ. Ως αποτέλεσμα, καθορίστηκε ότι η χρήση του επιλύτη για την επίλυση του 3D και τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων σε συστήματα λεπτών αγωγών, όπως οι εξεταζόμενες γραμμές μεταφοράς ήταν απαραίτητες.

8.2 Μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών του δικτύου και του χώρου μέτρησης

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, στην παράγραφο που ακολουθεί περιγράφεται η προσέγγιση μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση της υπό εξέταση γραμμής και τη θέση των δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς (π.χ. η γεωμετρία των αγωγών γραμμής, οι διατομές και οι θέσεις αναρτήσεων των αγωγών, η φόρτιση των αγωγών κ.λπ.) θεωρήθηκαν ως δεδομένα του προβλήματος του πεδίου, όπως και το περιβάλλον μέτρησης (π.χ. σχετική ηλεκτρική αντίσταση (relative electrical resistance) και σχετική μαγνητική διαπερατότητα (relative magnetic permeability) εδάφους και αέρα), τα αντικείμενα που βρίσκονται σε αυτό (π.χ. κολώνες, κτίρια, δέντρα κ.λπ.) και τα σημεία υπολογισμού. Οι υπολογιζόμενες σε κάθε περίπτωση άγνωστες μεταβλητές ήταν οι ενεργές (rms) τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής, οι οποίες χρησιμοποιούνται, όπως θα φανεί στη συνέχεια, για την απευθείας σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές των δύο μεγεθών του Κεφαλαίου 6.

Περιβάλλον προσομοίωσης: Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο αέρα-εδάφους δύο επιπέδων. Εξετάζεται ένα ομοίμορφο έδαφος με ειδική αντίσταση $100\Omega\text{m}$, σχετική επιτρεπτότητα 1.0 και σχετική διαπερατότητα 1.0. Για τον αέρα επιλέχθηκαν αντίσταση $10^8\ \Omega\text{m}$, σχετική επιτρεπτότητα 1.0 και σχετική διαπερατότητα 1.0.

Γραμμή μεταφοράς: Οι αγωγοί των φάσεων της γραμμής μεταφοράς είναι αγωγοί ACSR. Οι αγωγοί γείωσης της γραμμής μεταφοράς, που συνδέονται με τις κολώνες, αποτελούνται από γαλβανισμένο χάλυβα, υψηλής αντοχής, Επιπλέον συμπεριλαμβάνονται οι ακτίνες των αγωγών φάσης και γείωσης στα δεδομένα, τα οποία είναι τυποποιημένα και αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Το ύψος στο οποίο είναι τοποθετημένοι οι αγωγοί, η γεωμετρική τους διάταξη και η διάταξη φάσεων, από την άλλη πλευρά, καθορίζονται από το αντίστοιχο πρόβλημα.

Υπολογίζονται επίσης οι τάσεις και τα ρεύματα όλων των τριφασικών γραμμών μεταφοράς. Η τάση και η ένταση του ρεύματος διέλευσης των αγωγών φάσης μετριοούνται διαφορετικά ανάλογα την περίπτωση. Οι γωνίες φάσης αυτών των δύο τιμών, από την άλλη πλευρά επιλέχθηκαν να είναι 0° , 120° και 240° . Η τροφοδοσία των τριφασικών γραμμών μεταφοράς στα μοντέλα πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή της τάσης φάσης και την έγχυση

του επιθυμητού ρεύματος. Η συχνότητα λειτουργίας ορίστηκε στα 50Hz. Η θέση των αγωγών, η γεωμετρική τους διάταξη και η διάταξη φάσεων ποικίλλουν ανάλογα με την κατάσταση.

Πυλώνες γραμμών μεταφοράς: Οι σχετικοί τύποι υποστυλωμάτων δημιουργήθηκαν για κάθε τμήμα γραμμών μεταφοράς που μοντελοποιήθηκε, όπως φαίνεται στους πίνακες για κάθε μέτρηση στο Κεφάλαιο 7. Στο Παράρτημα δίνεται μια λεπτομερής περιγραφή των μετρήσεων των πυλώνων στήριξης. Σύμφωνα με το Παράρτημα καθώς και τα χαρακτηριστικά του κάθε πυλώνα έγινε ο σχεδιασμός των πυλώνων μέσω του προγράμματος AutoCAD βάσει των μηκών που υπάρχουν στους Πίνακες Α.4, Α.5, Α.10.

Σημεία Παρατήρησης: Κατά τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, οι υπολογισμοί έγιναν σε ευθεία σημεία παρατήρησης (προφίλ) και επιφάνειες που συνδέονται με άξονες μέτρησης και περιοχές μέτρησης, αντίστοιχα. Το προφίλ παρατήρησης αποτελείται από σημεία παρατήρησης που βρίσκονται οριζόντια κατά μήκος της γραμμής (άξονας Y) ή κατά μήκος της κατεύθυνσης γραμμής (άξονας X). Το προφίλ (άξονας Z) είναι 1m πάνω από το έδαφος, επομένως οι θέσεις παρατήρησης είναι απόλυτα ευθυγραμμισμένες με τις μετρήσεις που έγιναν και αναφέρονται στο Κεφάλαιο 6. Τέλος, για την παρατήρηση της μεταβολής των πεδιακών μεγεθών σε ένα τμήμα του χώρου μέτρησης μπορεί να προσδιοριστεί ένα επιφανειακό προφίλ σε ύψος 1m πάνω από το έδαφος.

8.3 Σκοπός των προσομοιώσεων χαμηλόσυχνων ΗΜΠ σε διατάξεις ΥΤ

Στόχος της μελέτης είναι ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση των τιμών ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε εξοπλισμό ΥΤ (τριφασικές γραμμές μεταφοράς και υποσταθμοί) με τη βοήθεια του λογισμικού όπως ακριβώς αυτών που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 6.4. Επομένως, για τη μελέτη αυτή θα μοντελοποιηθούν οι γραμμές μεταφοράς του Κεφαλαίου 6 και τα περισσότερα στοιχεία που βρίσκονται στο περιβάλλον τους. Ταυτόχρονα, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα αυτά με τις ενεργές τιμές (rms) των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τη συσκευή EFA 300. Τα ευρήματα της μέτρησης παρέχονται μαζί με την εκτιμώμενη αβεβαιότητα που υπολογίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Επίσης, σε αυτό το κεφάλαιο, θα μελετηθεί η επίδραση των μεταβαλλόμενων παραγόντων που επηρεάζουν την τιμή των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων γύρω από τις εν λόγω γραμμές μεταφοράς [2,3]. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, τα πεδία που παράγονται από τις γραμμές μεταφοράς καθορίζονται από έναν αριθμό μεταβλητών. Για την παραμετρική ανάλυση μελετήθηκαν οι μεταβλητές της διάταξης των αγωγών των φάσεων, της απόστασης των αγωγών μεταξύ τους, της απόστασης των αγωγών από το έδαφος, το φορτίο της γραμμής, της ειδικής αντίστασης του εδάφους, της ύπαρξης αγωγών αντικεραυνικής προστασίας, της ενεργοποίησης γειτονικής γραμμής μεταφοράς και της επίδρασης των γειτονικών αντικειμένων. Η επιρροή αυτών των παραγόντων θα διερευνηθεί στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου και τα ευρήματα θα παρουσιαστούν στους άξονες μέτρησης και στο ύψος (1m) που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των περιπτώσεων του 6^{ου} Κεφαλαίου. Επισημαίνεται ότι μόνο μια παράμετρος θα αξιολογείται κάθε φορά και οι υπόλοιπες θα παραμένουν αμετάβλητες (δηλαδή ίδιες με τις συνθήκες μέτρησης). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι για να προχωρήσει η διαδικασία παραμετρικής ανάλυσης, οι καμπύλες έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητική επαγωγή που προκύπτουν από το μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία της γραμμής πρέπει να αποκλίνουν κάπως από τις παρατηρούμενες τιμές του Κεφαλαίου 6.

Στη συνέχεια δίνονται περαιτέρω πληροφορίες για την εφαρμογή της παραμετρικής ανάλυσης:

- Για την προσομοίωση των γραμμών διπλού κυκλώματος, στις οποίες οι αγωγοί των φάσεων τους είναι διατεταγμένοι στον χώρο με τη συμμετρική διάταξη, θα εφαρμοστεί η βέλτιστη διάταξη. Για τη διάταξη αυτή αντιμετωπίζονται οι γωνίες των τάσεων και των ρευμάτων στις ακριανές φάσεις σε ένα από τα δύο τριφασικά κυκλώματα.
- Ακόμα, για τις γραμμές διπλού κυκλώματος με τις «παραδοσιακές» αποστάσεις των υ σύμφωνα με αυτά που ισχύουν στις συμπαγείς γραμμές του ελληνικού δικτύου (βλ. Παράρτημα Β).
- Επιπλέον, για τις γραμμές θα διερευνηθεί η επίδραση στην τιμή των πεδίων της μεταβολής του ύψους ανάρτησης των αγωγών στο σημείο των μετρήσεων. Πιο αναλυτικά, θα εξεταστούν οι εξής περιπτώσεις: α) το μέγιστο βέλος της γραμμής, β) το μέσο βέλος της γραμμής και γ) το ύψος των αγωγών κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Δε γίνεται συγκεκριμένος καθορισμός βυθισμάτων της γραμμής γιατί η απόσταση των αγωγών των φάσεων από το έδαφος διαφέρει από άνοιγμα σε άνοιγμα σε διαδοχικούς πυλώνες και από σημείο σε σημείο σε άνοιγμα μεταξύ δύο πυλώνων. Ακόμη, η επιλογή του ύψους των κατώτερων αγωγών έγινε ούτως ώστε οι αγωγοί να βρίσκονται ψηλότερα από το όριο που προβλέπει ο κανονισμός, αλλά ταυτόχρονα να αντικατοπτρίζουν πραγματικές καταστάσεις.
- Εξετάζεται η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου των γραμμών στις εξής τρεις περιπτώσεις: α) για μέγιστη φόρτιση αυτών με το ελάχιστο ύψος ανάρτησης των αγωγών, β) για μέση φόρτιση (δηλ. 50% της μέγιστης) με μέσο ύψος ανάρτησης των αγωγών και γ) για φόρτιση και ύψος ανάρτησης των αγωγών των γραμμών, όπως αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Στόχος είναι να γίνει αναπαραγωγή των συνθηκών μέγιστης έκθεσης της μαγνητικής επαγωγής.
- Για γραμμές μεταφοράς 150kV, το μέγιστο ρεύμα που αναμένεται να περάσει από τους αγωγούς είναι 500A, το οποίο είναι κάτω από το όριο θερμικού φορτίου των 770A. Στην περίπτωση των γραμμών μεταφοράς 400kV, το μέγιστο ρεύμα που αναμένεται να διαρρέει κάθε φάση είναι 1000A, που σημαίνει ότι κάθε αγωγός μεταφέρει ρεύμα 500A.
- Σε περιπτώσεις όπου υπήρχαν αντικείμενα κατά τις μετρήσεις και επηρέασαν τις τιμές των πεδίων, θα υπολογιστούν τα επίπεδα αυτών των πεδίων σε περίπτωση απουσίας τους. Επιπλέον, θα διερευνηθεί η διαφορά στις τιμές ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου όταν παρακαμφθούν οι προστατευτικοί αγωγοί. Τέλος, θα αναλυθούν οι διακυμάνσεις στα πεδία, αν δηλαδή εφαρμόζεται παράλληλη τροφοδοσία για ανενεργές γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας.

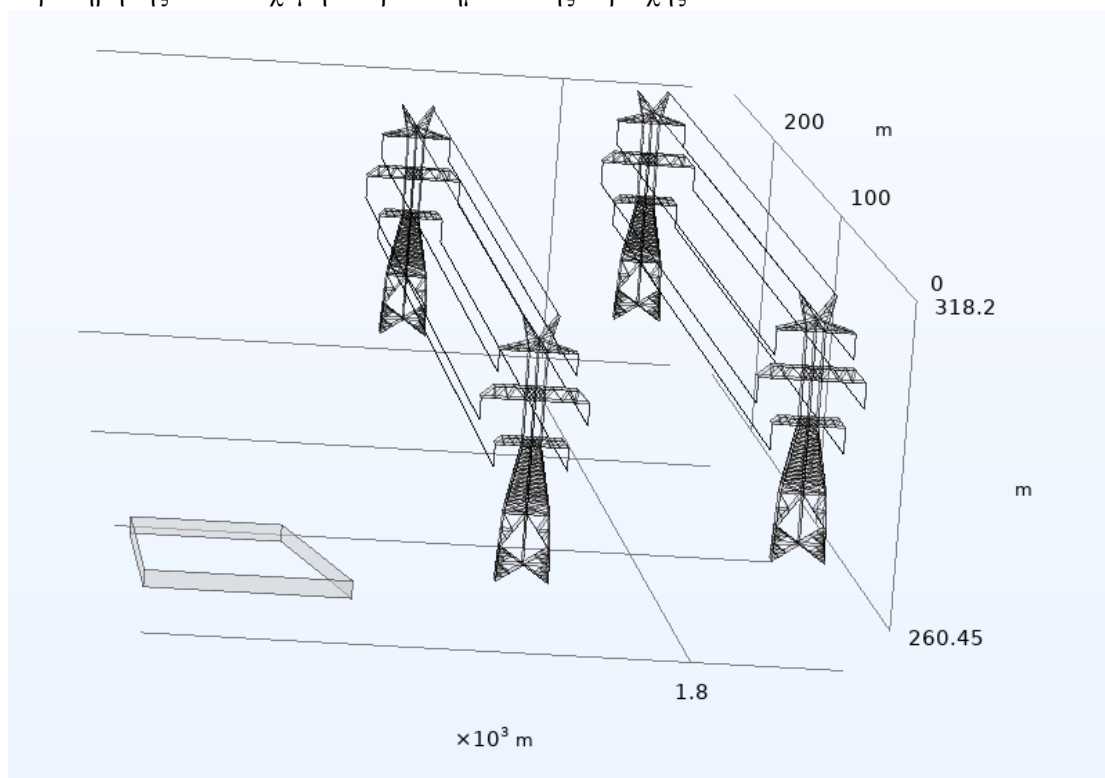
8.4 Σκοπός των προσομοιώσεων χαμηλόσυχνων ΗΜΠ σε διατάξεις ΥΤ

8.4.1 1^η Προσομοίωση

Μοντελοποίηση

Για τη διεξαγωγή αυτής της συγκεκριμένης προσομοίωσης τηρούνται τα δεδομένα που παρέχονται στην παράγραφο 6.4.1 του Κεφαλαίου 6. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την περιοχή Α, σχεδιάστηκε το άνοιγμα της διπλής γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60 και τους πυλώνες στήριξης όπως φαίνεται στην εικόνα 6.2. Τα δέντρα και ο μεγάλος αριθμός από θάμνους που βρίσκονταν κάτω από τη γραμμή και ήταν σε άμεση γειτνίαση με τον εξοπλισμό μέτρησης δε μοντελοποιήθηκαν. Τα αντικείμενα αυτά αλλάζουν τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Λόγω της σημαντικής ανομοιομορφίας του εδάφους και της αδυναμίας του λογισμικού να εισάγει εδάφη με ανώμαλες επιφάνειες, προσδιορίστηκε το

ύψος των σημείων παρατήρησης με βάση τη διαφορά υψομέτρου μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του χαμηλότερου σημείου της περιοχής Α.



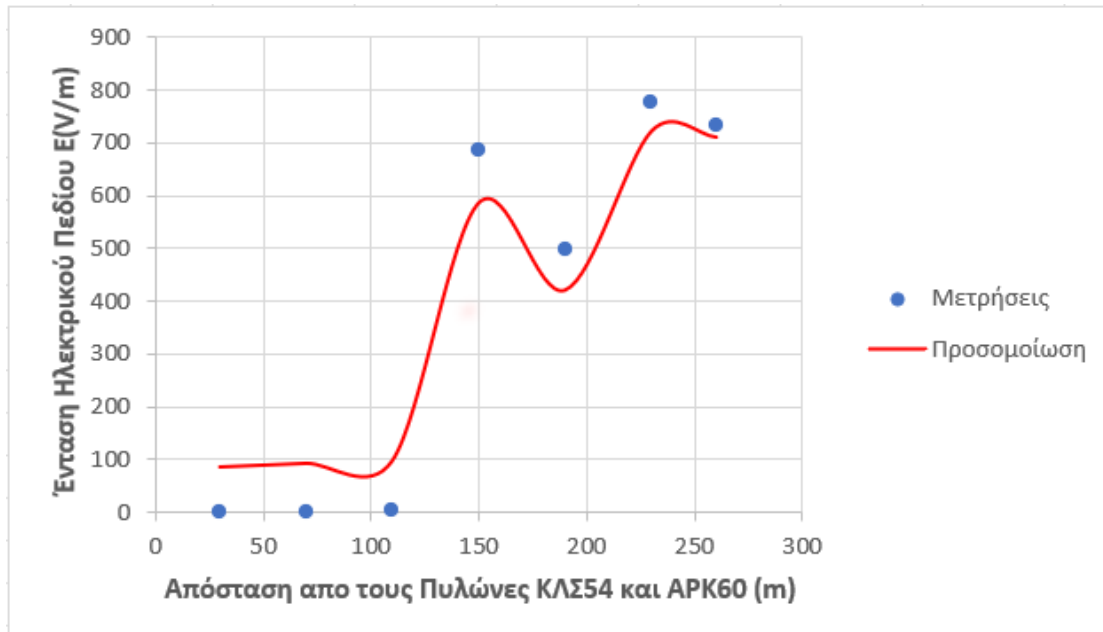
Σχήμα 8.1: Μοντέλο του τμήματος της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.

Σύγκριση Αποτελεσμάτων

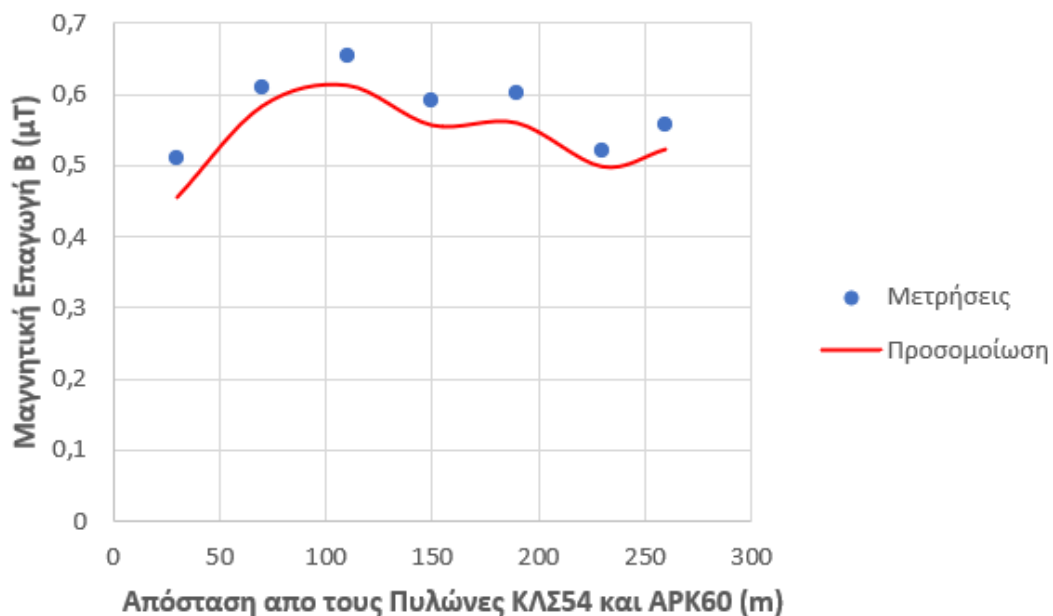
Σε αυτήν την ενότητα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τόσο των μετρήσεων όσο και των προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν στους καθορισμένους άξονες μέτρησης, όπως ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 6. Τα γραφήματα που παρέχονται στη συνέχεια απεικονίζουν μια σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής.

Διάμηκες Προφίλ

Τα σχήματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν τη σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών δύο όψεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου κάτω από το ενεργό κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς 400 kV.



Σχήμα 8.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.



Σχήμα 8.3: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.

Τα δεδομένα δείχνουν ξεκάθαρα πως τα χαρακτηριστικά του εδάφους επηρεάζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων, με τα αποτελέσματα να ποικίλλουν ανάλογα με το υψόμετρο. Κατά συνέπεια, οι τιμές τείνουν να είναι υψηλότερες σε υπερυψωμένα σημεία, καθώς οι αγωγοί βρίσκονται πιο κοντά στο έδαφος. Αυτά τα σημεία ευθυγραμμίζονται κατά προσέγγιση με το μέσο των πυλώνων ΚΛΣ54 και ΑΡΚ60, όπου η ενίσχυση πεδίου εμφανίζεται από το βέλος της γραμμής.

Επιπλέον, το Σχήμα 8.2 δείχνει μια αξιοσημείωτη μείωση στα ηλεκτρικά πεδία καθώς πλησιάζουμε στον πυλώνα. Αυτό αποδίδεται στο ότι οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι όσο το

δυνατόν πιο μακριά, με αποτέλεσμα τη μείωση του ηλεκτρικού πεδίου σε αυτές τις θέσεις λόγω της αγωγιμότητας των μεταλλικών πυλώνων.

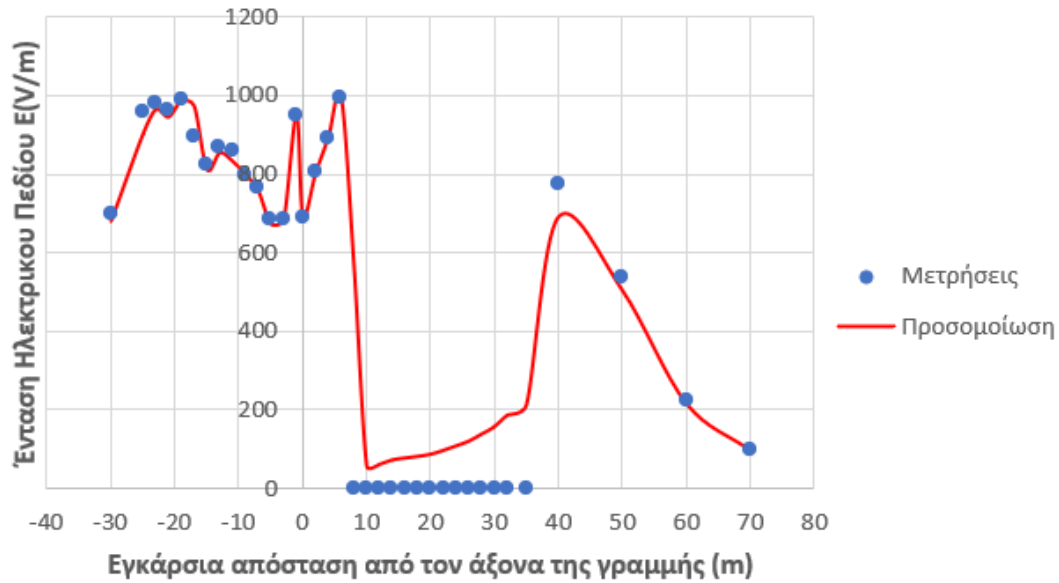
Κατά τη σύγκριση των τιμών στα Σχήματα 8.2 και 8.3, αποκλίσεις μεταξύ μετρήσεων και προσομοιώσεων είναι εμφανείς σε ορισμένες θέσεις. Ο κύριος παράγοντας που συμβάλλει είναι η αβεβαιότητα γύρω από τις μετρήσεις του υψόμετρου που καταγράφονται από το GPS και το εκτιμώμενο βύθισμα της γραμμής. Ακόμη παρατηρήθηκε πως όταν το καταγεγραμμένο υψόμετρο αποκλίνει κατά 1m ή περισσότερο από την πραγματική τιμή, οδηγεί σε σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα. Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα πως δεν μπορούν να επιτευχθούν ακριβή αποτελέσματα προσομοίωσης όταν το έδαφος είναι ανώμαλο.

Επιπλέον, ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει σε αυτές τις διαφορές είναι η παρουσία βλάστησης στην περιοχή. Η βλάστηση έχει διηλεκτρικές ιδιότητες που σημαίνει ότι μπορεί να αλληλεπιδράσει ηλεκτρικά με το πεδίο. Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο διέρχεται μέσα από τη βλάστηση, μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικά ρεύματα μέσα στη μάζα των φυτών. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να αλλάξει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στη γύρω περιοχή και να επηρεάσει τις μετρήσεις. Ένας ακόμα λόγος είναι η θωράκιση ηλεκτρικού πεδίου. Η βλάστηση μπορεί να λειτουργήσει ως ένα είδος ασπίδας στο ηλεκτρικό πεδίο. Το φυτική μάζα μπορεί να απορροφήσει μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε άμεση γειτνίαση με τη βλάστηση. Αυτό το φαινόμενο θωράκισης μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς μετρήσεις εάν δε ληφθεί υπόψη η παρουσία βλάστησης στη ρύθμιση της μέτρησης. Ακόμη μερίδιο ευθύνης έχει η γεωμορφολογία του εδάφους κάτω από τις γραμμές. Η πολύπλοκη δομή των φυτών, συμπεριλαμβανομένων των φύλλων, των κλαδιών και των ριζών, μπορεί να δημιουργήσει διαταραχές στο ηλεκτρικό πεδίο καθώς αυτό διέρχεται. Αυτές οι διαταραχές μπορεί να προκαλέσουν κάμψη ή απόκλιση των γραμμών ηλεκτρικού πεδίου από την αναμενόμενη διαδρομή τους, οδηγώντας σε διακυμάνσεις στην ένταση του πεδίου που μπορεί να μην ευθυγραμμίζονται με θεωρητικά μοντέλα ή προβλέψεις. Επίσης σημαντικές είναι και οι επιδράσεις γείωσης. Τέλος καθοριστικός παράγοντας είναι και η θέση μέτρησης. Ανάλογα με τη διάταξη μέτρησης και την τοποθέτηση ηλεκτροδίων ή αισθητήρων, η βλάστηση μπορεί να εισαγάγει μεταβλητότητα στο μετρούμενο ηλεκτρικό πεδίο λόγω της ανομοιόμορφης κατανομής της στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη αβεβαιότητα της μέτρησης σε διαφορετικές θέσεις εντός μιας περιοχής μελέτης [9,10].

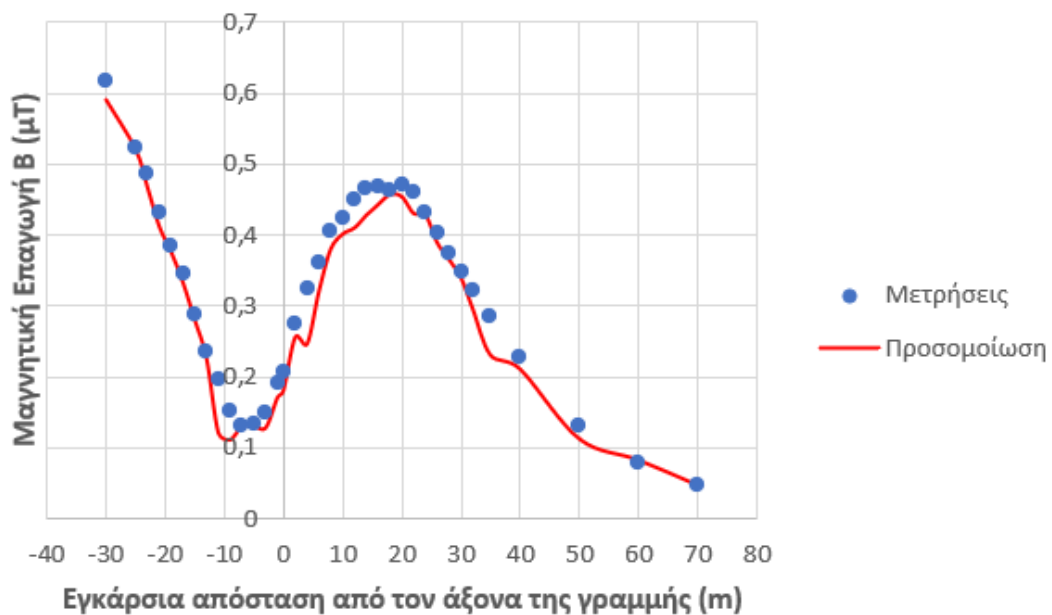
Όσον αφορά το μαγνητικό πεδίο, προκύπτουν διακυμάνσεις λόγω των διακυμάνσεων του ρεύματος που διαρρέει τη γραμμή μεταφοράς. Οι διακυμάνσεις στο ρεύμα της γραμμής μεταφοράς επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο επειδή αλλάζουν άμεσα το μέγεθος του ρεύματος στον αγωγό και αυτό το μεταβαλλόμενο ρεύμα δημιουργεί με τη σειρά του μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με τις αρχές του νόμου του Ampere και του νόμου Biot-Savart. Ακόμη, τα φαινόμενα συχνότητας και οι αλληλεπιδράσεις με μετασχηματιστές και επαγωγείς μπορούν περαιτέρω συμβάλουν στις διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου.

Εγκάρσιος άξονας No.1 σε απόσταση 30m (Πλευρικό Προφίλ)

Με παρόμοιο τρόπο συγκρίνονται οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί για τον εγκάρσιο άξονα.



Σχήμα 8.4: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.



Σχήμα 8.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.

Με βάση τα προηγούμενα διαγράμματα γίνεται προφανές ότι μόνο ένα από τα 2 τριφασικά κυκλώματα λειτουργεί, καθώς η μέγιστη τιμή εμφανίζεται κάτω από το ενεργό κύκλωμα. Όταν η πλευρική απόσταση μεταξύ των σημείων μέτρησης και των προσομοιώσεων αυξάνεται, οι τιμές μειώνονται γρήγορα. Σε αυτή τη μείωση συμβάλλει και η κλίση του εδάφους.

Παρατηρώντας το διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι φανερό πως ο εγκάρσιος άξονας που έγινε η μέτρηση έχει βλάβιση. Αυτό το αντιλαμβάνεται κανείς γιατί από τα 5m έως τα 35m οι τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι αρκετά χαμηλές και φαίνεται να πλησιάζουν το μηδέν, άρα υπάρχει κάτι αγωγίμο κάτω από τη γραμμή και αυτό

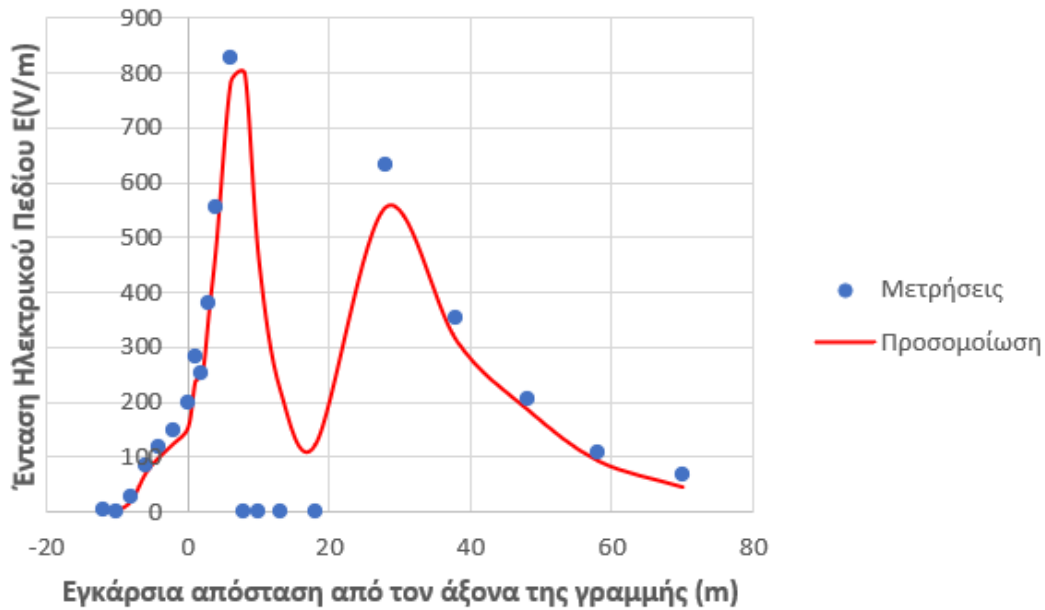
είναι η βλάστηση στην περιοχή. Η ύπαρξη των ψηλών δέντρων οδηγεί σε ημιμηδενισμό του πεδίου, κάτι το οποίο κρατήθηκε για να γίνει παρουσίαση του μηδενισμού του πεδίου κάνοντας μια προσπάθεια να προσομοιωθεί και μέσω του λογισμικού. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο η βλάστηση επηρεάζει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου επειδή τα φυτά είναι ημιαγωγοί καθώς περιέχουν μόρια νερού, τα οποία είναι πολωμένα. Η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μηδενίζεται όταν υπάρχει βλάστηση επειδή τα φυτά παράγουν ιόντα υδρογόνου (H_+) στην επιφάνεια των φύλλων τους. Τα ιόντα υδρογόνου είναι φορτισμένα αρνητικά, επομένως δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο που είναι αντίθετο με το ηλεκτρικό πεδίο της γης. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της γης είναι περίπου $100V/m$. Όταν τα φυτά παράγουν ιόντα υδρογόνου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τους μπορεί να φτάσει τα $1000V/m$. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου των φυτών είναι μεγαλύτερη από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της γης, τα δύο πεδία αλληλοεξουδετερώνονται και η συνολική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν [9,10].

Συγκρίνοντας τις τιμές των μετρήσεων και των υπολογισμών παρατηρούμε κάποιες μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτές αρχικά οφείλονται στο ότι δεν λάβαμε υπόψη στην προσομοίωση τη βλάστηση όποτε δεν μπορούν να συγκλίνουν οι τιμές. Ακόμη οφείλονται στα σφάλματα που μπορεί να περιέχουν οι μετρήσεις και γι' αυτό οδηγούμαστε σε απόκλιση, κάτι το οποίο είναι πολύ πιθανό. Επίσης, εξαιτίας της κλίσης που εμφάνιζε ο λόφος που ήταν πάνω οι δύο πυλώνες μπορεί να αποκλίνουν.

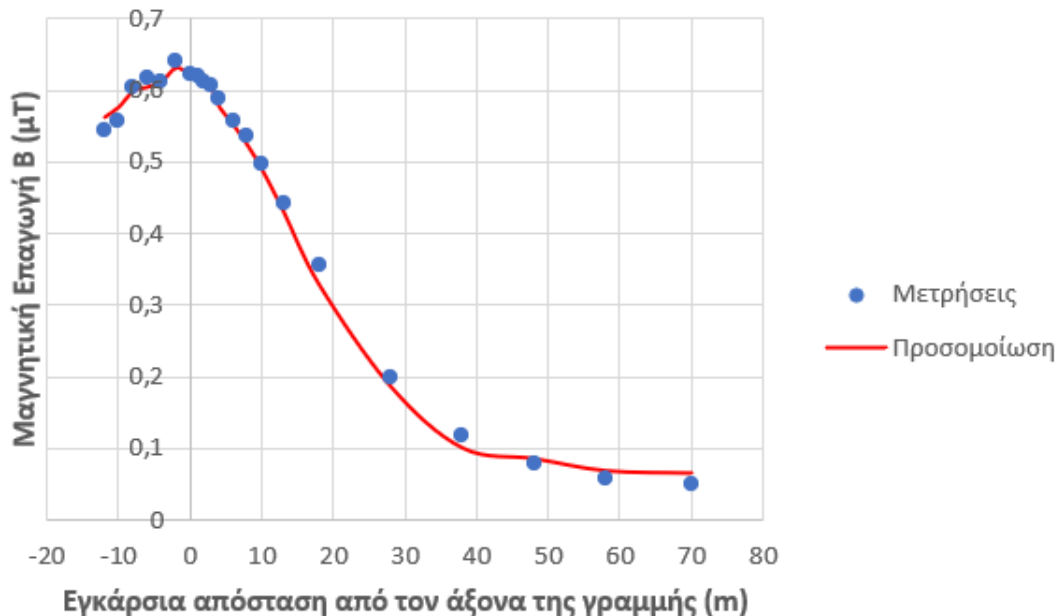
Οι διαφορές στο μαγνητικό πεδίο προκύπτουν από την διακύμανση του ρεύματος που μπορεί να προκληθεί από διάφορους παράγοντες, όπως η αλλαγή της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας, η διακοπή της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και η ύπαρξη ηλεκτρικών φορτίων. Αυτό γιατί η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με την ένταση του ρεύματος. Όταν η ένταση του ρεύματος αυξάνεται, το μαγνητικό πεδίο γίνεται ισχυρότερο. Όταν η ένταση του ρεύματος μειώνεται, το μαγνητικό πεδίο γίνεται ασθενέστερο. Ακόμη η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου αλλάζει ανάλογα με την κατεύθυνση του ρεύματος. Όταν η φορά του ρεύματος αλλάζει, η φορά του μαγνητικού πεδίου αλλάζει επίσης. Τέλος, η συχνότητα του μαγνητικού πεδίου είναι η ίδια με τη συχνότητα του ρεύματος. Όταν η συχνότητα του ρεύματος αυξάνεται, η συχνότητα του μαγνητικού πεδίου αυξάνεται επίσης ομοίως όταν μειώνεται, μειώνεται.

Εγκάρσιος 2 σε απόσταση 150 m(Πλευρικό Προφίλ)

Παρακάτω γίνεται σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση από τον άξονα της γραμμής μεταφοράς ως μεταβλητή.



Σχήμα 8.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.



Σχήμα 8.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΚΛΣ 55-ΚΛΣ54 και ΑΡΚ 59-ΑΡΚ 60.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως οι μετρήσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ακολουθούν το βέλος της γραμμής μεταφοράς και τη μορφολογία του εδάφους. Ταυτόχρονα, βλέπουμε τη μείωση που επιφέρουν οι χαλύβδινοι πυλώνες καθώς και η βλάστηση στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

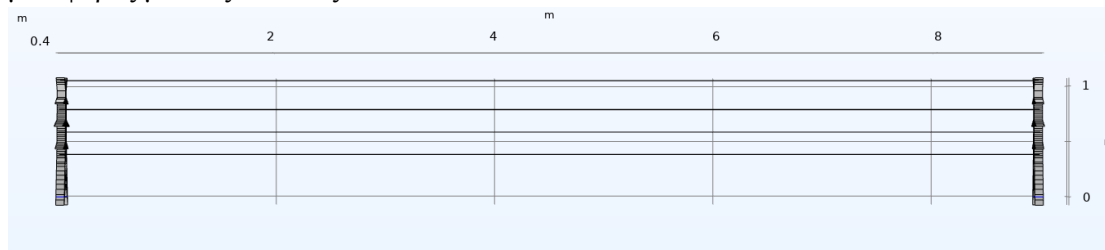
Όπως ήταν αναμενόμενο, τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων διαφέρουν ελαφρώς μεταξύ τους και τα αίτια τους έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων κυμαίνεται για το ηλεκτρικό πεδίο περίπου 10%-15%, ενώ για το μαγνητικό 10%. Οι διαφορές αυτές είναι μικρότερες για το ηλεκτρικό πεδίο από -25m-5m, γιατί η βλάστηση στην περιοχή ήταν λιγότερο από το υπόλοιπο

τμήμα του άξονα. Οι διαφορές όμως, για το μαγνητικό πεδίο παραμένουν σημαντικές λόγω της διακύμανσης του ρεύματος. Ακόμη, είναι πιθανό οι τελευταίες μετρήσεις να έχουν επηρεαστεί από άλλες γειτονικές γραμμές ή ακόμα και από τον υποσταθμό (ΚΥΤ Κρυονερίου).

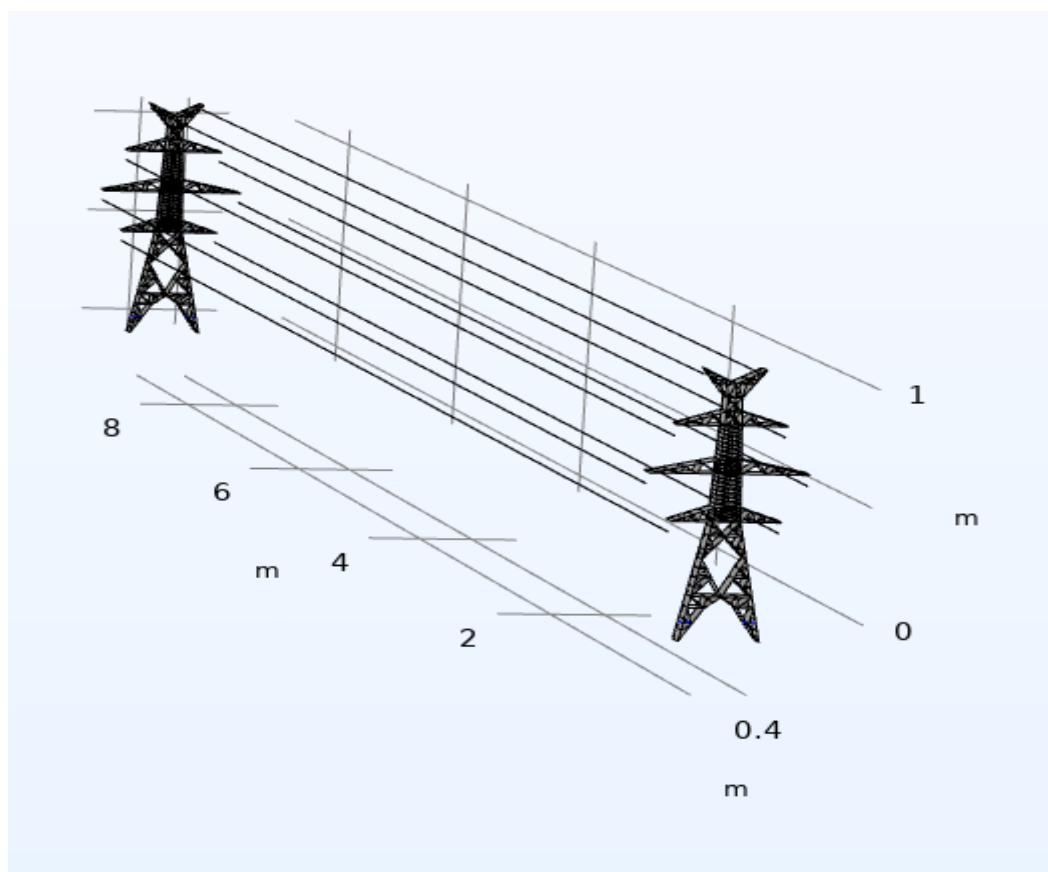
8.4.2 2^η Προσομοίωση

Μοντελοποίηση

Στην 2^η προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν στην παράγραφο 6.4.1 του Κεφαλαίου 6 (2^η μέτρηση) και σχεδιάστηκε το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς με τους πυλώνες ΣΑ92 και ΣΑ93.



Σχήμα 8.8: Πανοραμική όψη του μοντέλου του τμήματος της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.

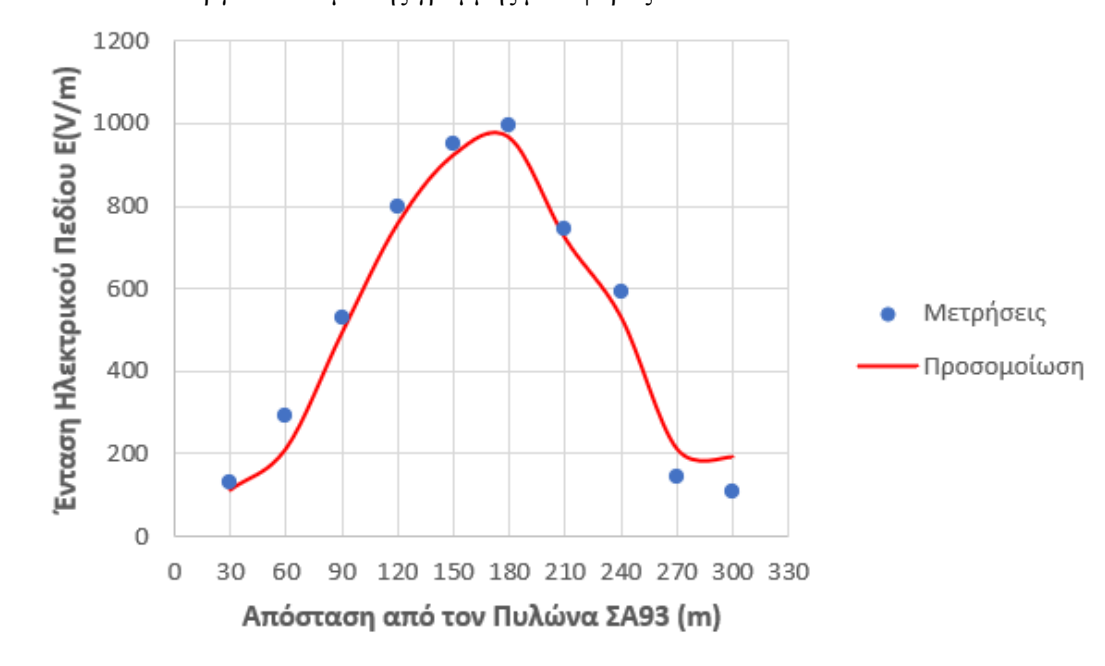


Σχήμα 8.9: Μοντέλο των τμημάτων των γραμμών ΣΑ92 και ΣΑ93.

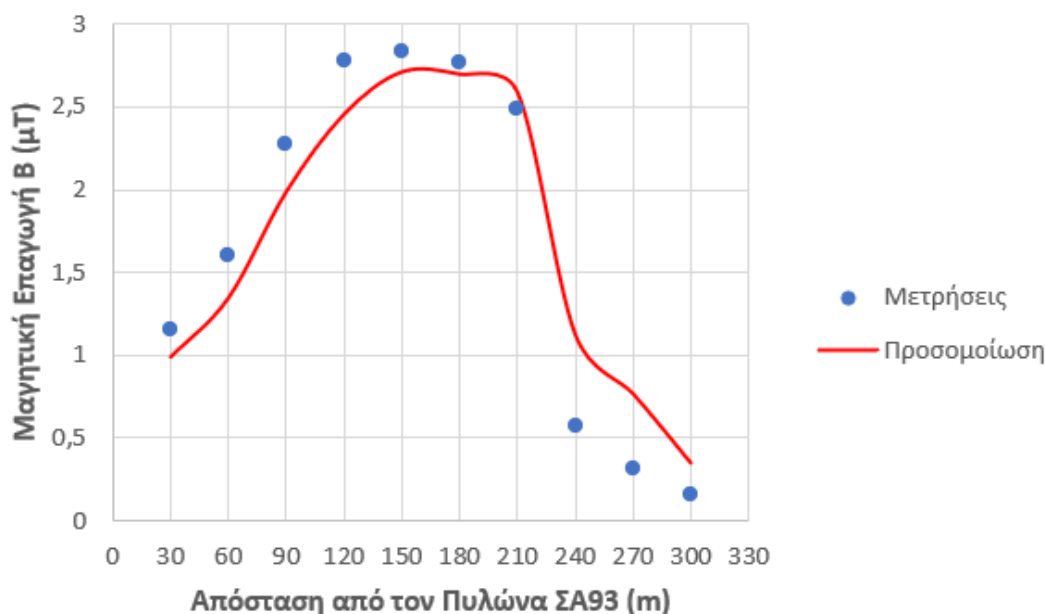
Σύγκριση αποτελεσμάτων

Διάμηκες Προφίλ

Τα σχήματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν τη σύγκριση μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών δύο όψεων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου κάτω από το ενεργό κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς 150 kV.



Σχήμα 8.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.



Σχήμα 8.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.

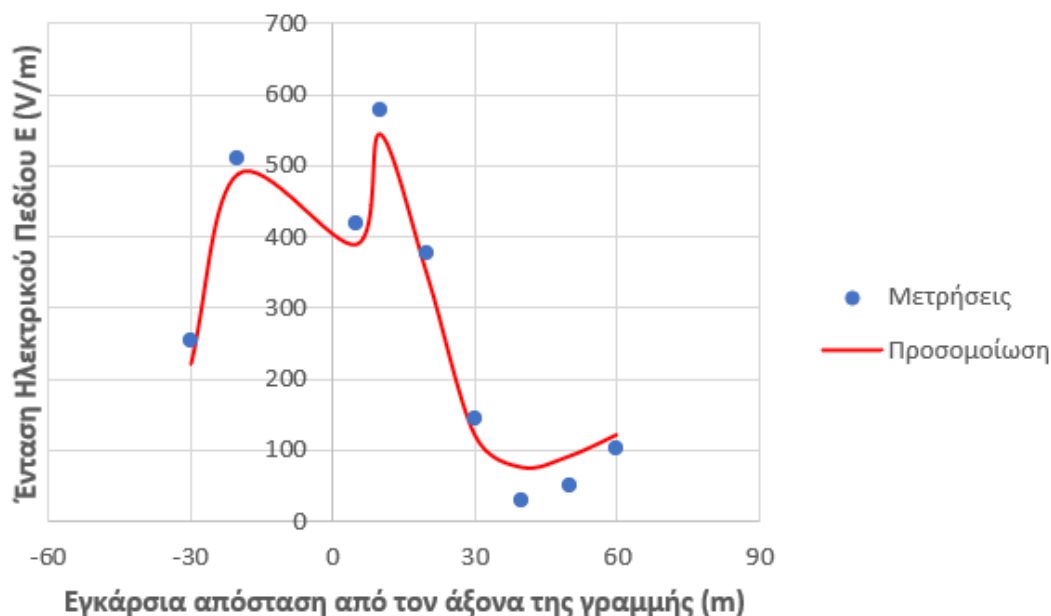
Από το Σχήμα 8.10 αναμέναμε το ηλεκτρικό πεδίο να ακολουθεί το ύψος των αγωγών της γραμμής μεταφοράς και τη μορφολογία του εδάφους, έτσι ώστε η μέγιστη τιμή του να εμφανίζεται περίπου στο ενδιάμεσο της γραμμής όπου οι αγωγοί θα βρίσκονται στο μικρότερο

ύψος. Επίσης οι «βυθίσεις» που παρατηρούνται οφείλονται σε υψηλά αντικείμενα όπως οι στύλοι φωτισμού. Από το σχήμα επίσης, είναι φανερό πως η θέση του προφίλ του ηλεκτρικού πεδίου προσεγγίζει τον πυλώνα, το ύψος των αγωγών αυξάνεται και το μέγιστο πεδίο μειώνεται. Πολύ κοντά στον γειωμένο πυλώνα, το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται αισθητά λόγω της μεταλλικής θωράκισης του χαλύβδινου πυλώνα.

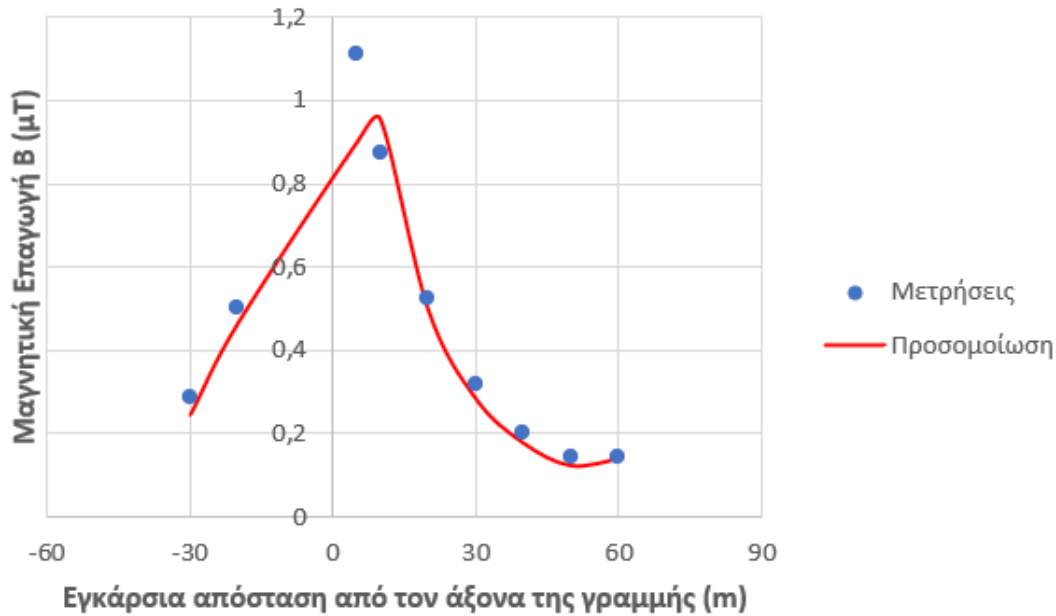
Η σύγκλιση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό COMSOL Multiphysics κρίνεται ικανοποιητική. Οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται αποδίδονται σε αντικείμενα που δεν μπορούσαν να μοντελοποιηθούν, όπως ορισμένα κτίρια, τα αυτοκίνητα και σε κάποια σημεία η μικρή βλάστηση. Επίσης, είναι φανερό πως επιτεύχθηκε με πολύ καλή ακρίβεια η επίδραση των πυλώνων στις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου. Όσον αφορά τη μαγνητική επαγωγή τα περισσότερα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βρίσκονται εντός των ορίων της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ μετρήσεων και προσομοιώσεων είναι μικρότερη από το 7%. Οι διαφορές που εντοπίζονται σε ορισμένα σημεία μπορεί να οφείλονται σε επαγόμενα ρεύματα των μεταλλικών πυλώνων. Τέλος, για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης το ρεύμα στο 1^ο και στο 2^ο κύκλωμα ήταν αντίστοιχα 160,4 A και 159,1 A.

Εγκάρσιος 1 σε απόσταση +25m από τον Πυλώνα ΣΑ92(Πλευρικό Προφίλ)

Στα Σχήματα 8.12 και 8.13 παρουσιάζονται τα εγκάρσια προφίλ μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής αντίστοιχα.



Σχήμα 8.12: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.

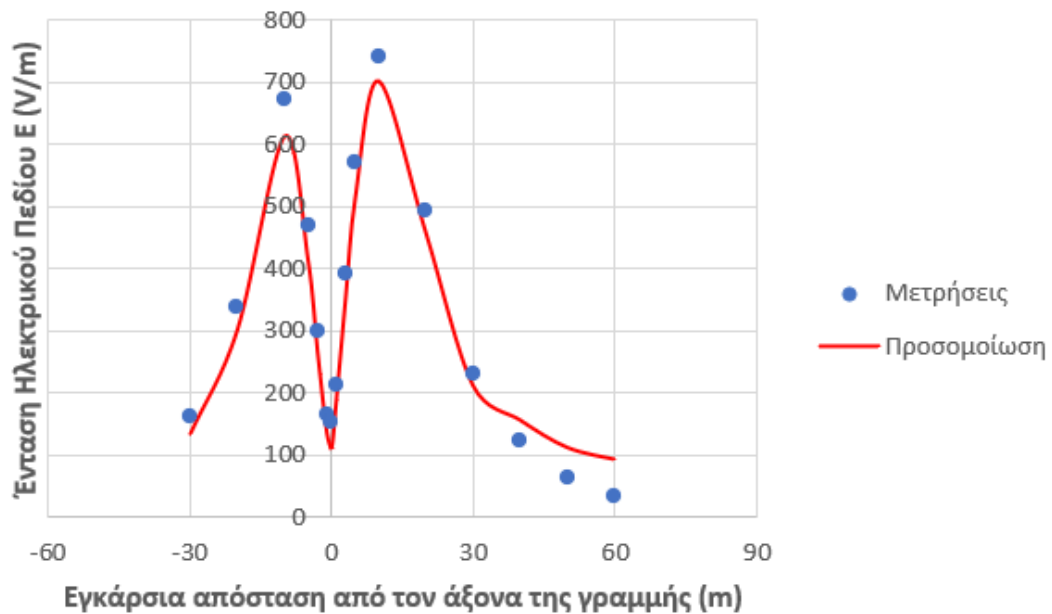


Σχήμα 8.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.

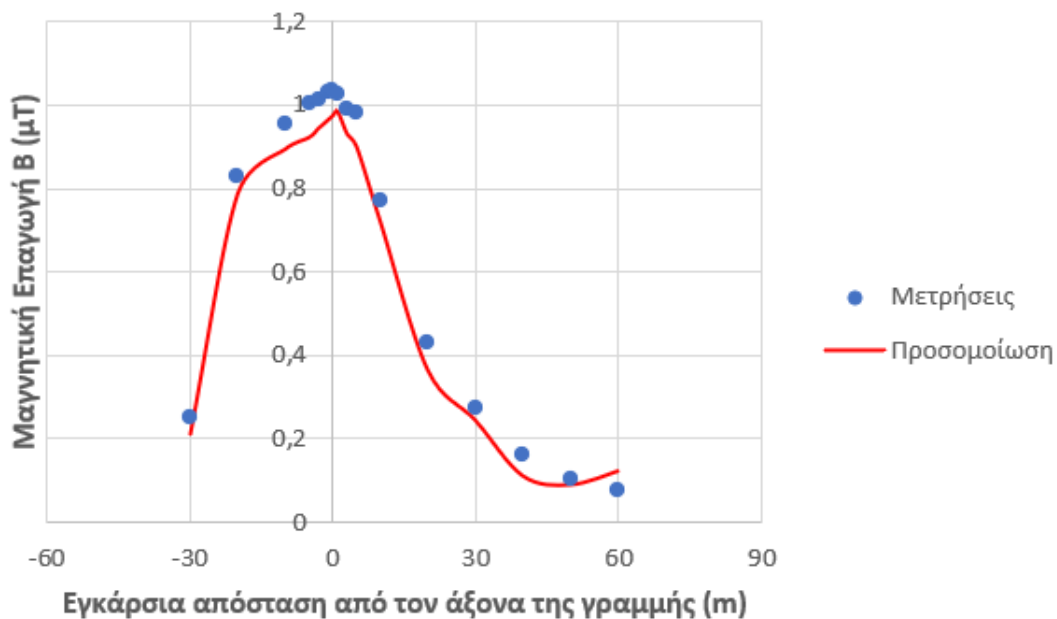
Το σχήμα 8.12 δείχνει μια γενική τάση όπου οι μετρούμενες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου είναι σταθερά χαμηλότερες από τις τιμές του μοντέλου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην επίδραση της βλάστησης, στην ακρίβεια των μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Επιπλέον, η παρουσία του αγώγιμου πυλώνα έχει αξιοσημείωτο αντίκτυπο στην κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Ως αποτέλεσμα, το ποσοστό σφάλματος μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμών που εκτελούνται στο COMSOL Multiphysics είναι υψηλότερο, φτάνοντας έως και το 20% σε ορισμένες περιοχές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι αποκλίσεις εμπίπτουν στο εύρος των αβεβαιοτήτων μέτρησης.

Αντίθετα, το Σχήμα 8.13 αποκαλύπτει μια συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμών. Το ποσοστό σφάλματος είναι αρχικά μικρότερο από το 10%, αλλά σταδιακά αυξάνεται καθώς μεγαλώνει η οριζόντια απόσταση. Το μέγιστο ποσοστό σφάλματος εμφανίζεται κάτω από τη γραμμή μεταφοράς, φτάνοντας περίπου το 2%. Το φορτίο γραμμής στο πρώτο κύκλωμα ήταν 166,5 A, ενώ για το δεύτερο κύκλωμα ήταν 161,3 A.

Εγκάρσιος 2 σε απόσταση +30m από τον Πυλώνα ΣΑ93(Πλευρικό Προφίλ)



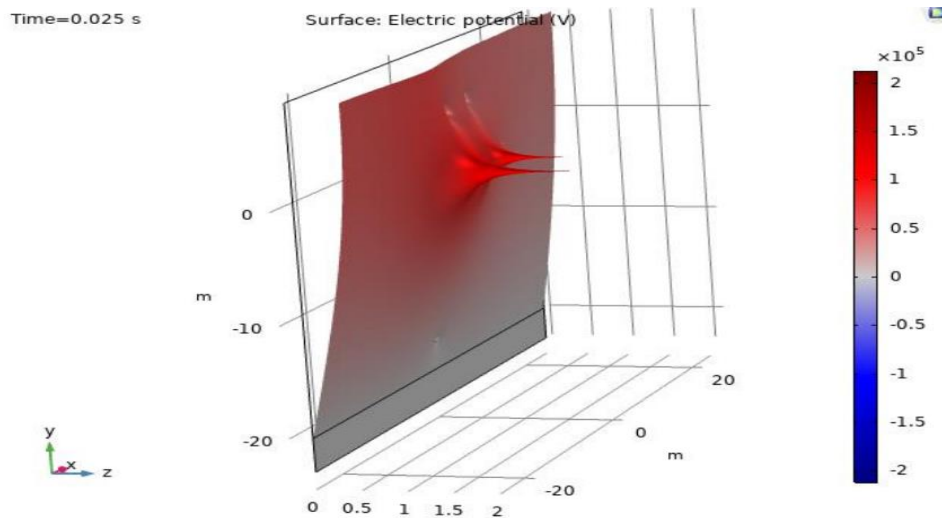
Σχήμα 8.14: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.



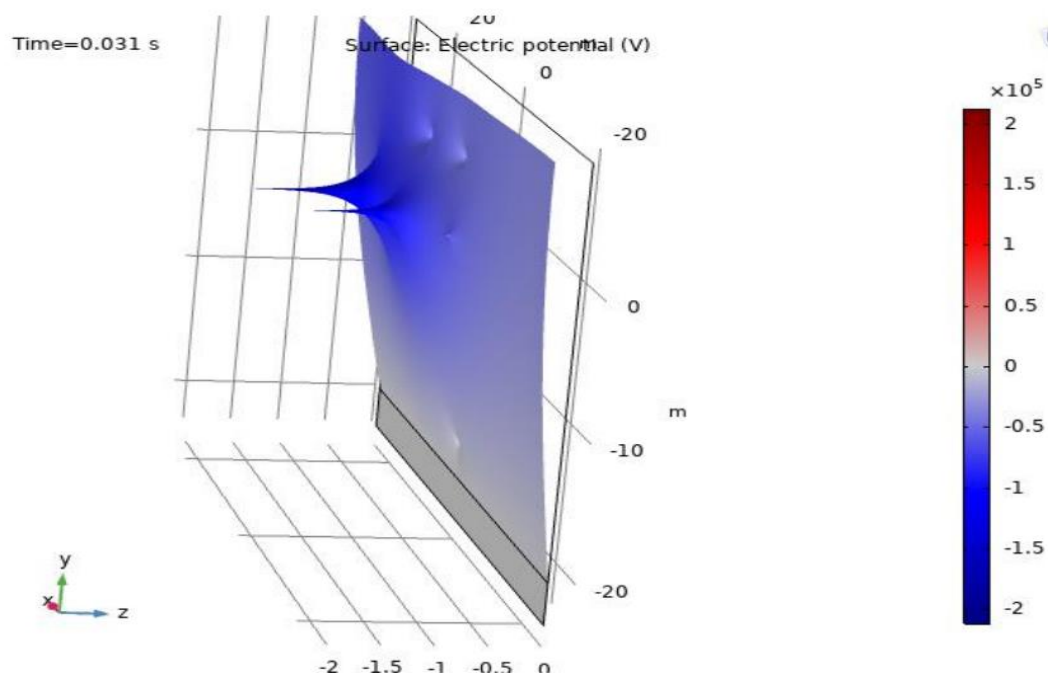
Σχήμα 8.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ92 και ΣΑ93.

Το Σχήμα 8.14 είναι χαρακτηριστικό για τη συμμετρία που εμφανίζει το πεδίο εκατέρωθεν του άξονα της γραμμής με κάποιες, βεβαίως, ελάχιστες αποκλίσεις. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με αυτά των μετρήσεων του ηλεκτρικού πεδίου διαπιστώνεται μια πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ τους. Η διαφορά μεταξύ των υπολογισμών και των πραγματικών τιμών των μετρήσεων σε κάποια σημεία μέτρησης υπερβαίνει το 15% κυρίως στα άκρα του άξονα που έχουμε πολύ μικρές τιμές (εκτός δυναμικού εύρους μέτρησης του οργάνου). Στο Σχήμα 8.15 παρατηρείται αρκετά καλή σύγκλιση (σχετικά σφάλματα <7%)

μεταξύ υπολογισμών και πραγματικών τιμών μαγνητικής επαγωγής από -30m έως 20m. Έξω από τη ζώνη αυτή η σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση που εντοπίζεται οφείλεται κυρίως στο ότι οι τιμές είναι μικρές και συνεπώς οι μικρές διαφορές μεταξύ υπολογισμών και πραγματικών τιμών οδηγούν σε μεγάλες τιμές σχετικού σφάλματος.



Σχήμα 8.16: Διαφορά Δυναμικού για $t=0,025s$.



Σχήμα 8.17: Διαφορά Δυναμικού για $t=0,031s$.

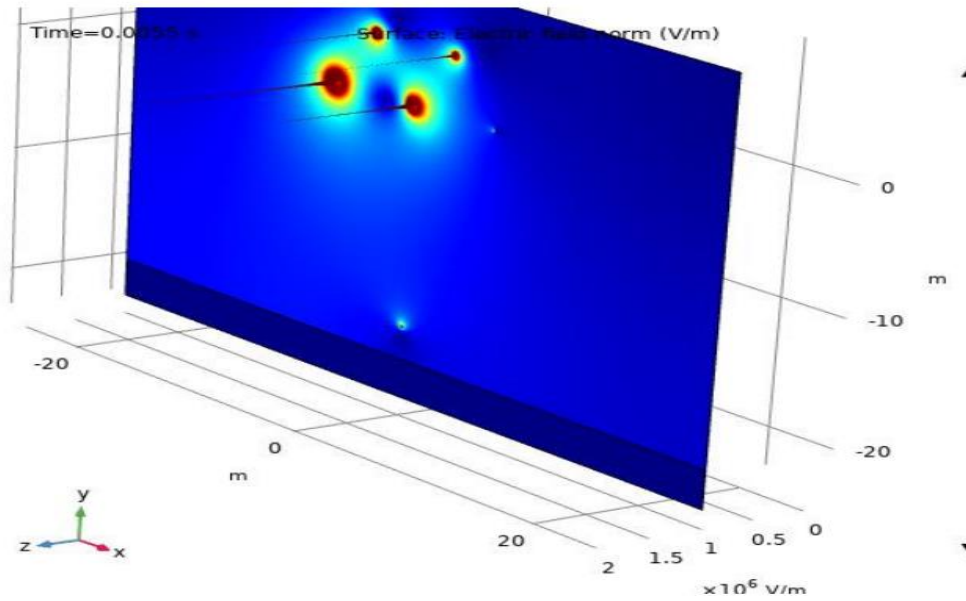
Παραπάνω παρουσιάζονται δύο γραφήματα χρώματος επιφάνειας (Surface) για τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται εγκάρσια του μοντέλου της γραμμής. Πρέπει να αναφερθεί πως σε τέτοια «3D» διαγράμματα χρώματος επιφάνειας ο άξονας z δείχνει το εύρος του μετρούμενου μεγέθους χρωματικά και όχι τη διεύθυνση αυτού.

Η διαφορά δυναμικού παρουσιάζεται κατά μήκος του άξονα x σε διάφορα ύψη του y άξονα σε διάφορες χρονικές στιγμές t με τα επόμενα γραφήματα γραμμών. Σημειώνεται πως σε σχέση με την «3D» απεικόνιση του μοντέλου, ο x άξονας ξεκινά από την τιμή 0 και καταλήγει στην

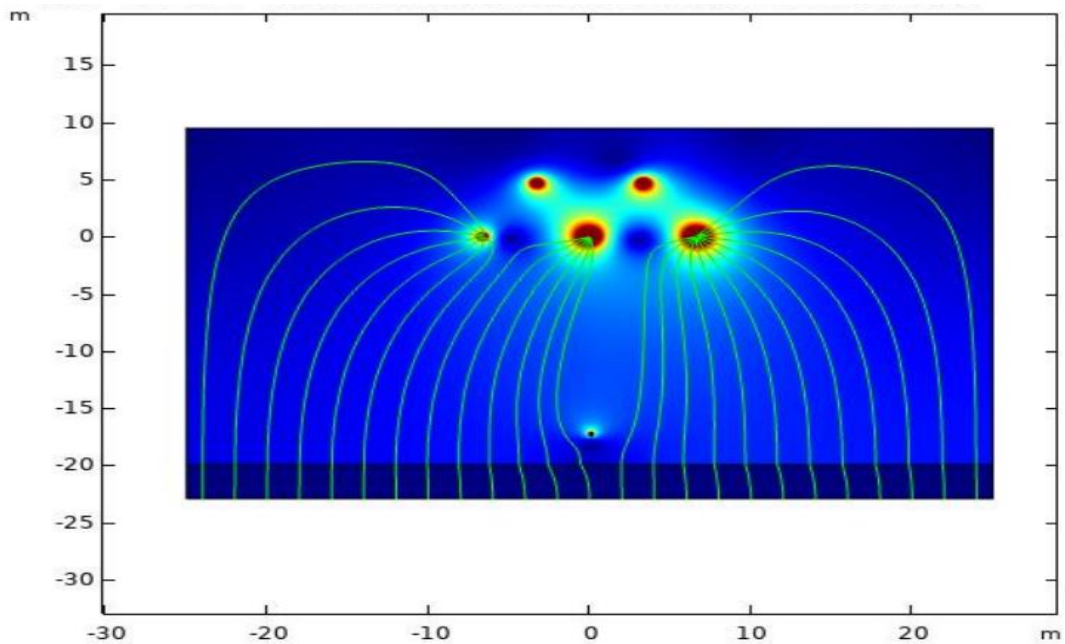
τιμή 0. Επίσης έγινε επιλογή διαφόρων υψών για να εξεταστεί το πως επηρεάζονται τα διάφορα μεγέθη παρουσία του γειωμένου αντικειμένου.

Είναι φανερό πως υπάρχει μια κατανομή της διαφοράς δυναμικού σε όλη τη γεωμετρία του μοντέλου και όχι μόνο πολύ κοντά στα αγωγίμα υλικά αλλά και στον αέρα. Αυτό είναι λογικό μιας και ο αέρας δεν είναι τέλειος μονωτής αλλά έχει μια πολύ μικρή αγωγιμότητα. Αυτό σημαίνει πως τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν μέσα στον αέρα, αν και πολύ πιο αργά απ' ότι σε ένα καλό αγωγό όπως ο χαλκός. Η αγωγιμότητα του αέρα είναι πολύ χαμηλή, περίπου 10^{-15} S/m [8]. Αν και τα ηλεκτρόνια χρειάζονται πολύ χρόνο για να κινηθούν μέσω του αέρα, ωστόσο, σε υψηλές τάσεις, ακόμη και μια μικρή ποσότητα αγωγιμότητας μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική διαφορά δυναμικού. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς προκαλεί την επαγωγή μιας διαφοράς δυναμικού στον αέρα. Η διαφορά δυναμικού αυτή είναι μικρότερη από τη διαφορά δυναμικού που υπάρχει κοντά στους αγωγούς, επειδή η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον αέρα είναι μικρότερη. Η τιμή της επαγωγικής τάσης εξαρτάται από την τάση λειτουργίας της γραμμής μεταφοράς, την ένταση του ρεύματος που ρέει μέσω της γραμμής και την απόσταση μεταξύ των αγωγών [11,12]. Η διαφορά δυναμικού επαγωγής μπορεί να είναι αρκετά υψηλή, ιδιαίτερα σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να είναι επικίνδυνη για κάθε έμβιο οργανισμό που κινείται πλησίον των γραμμών μεταφοράς. Το σημαντικό, ωστόσο είναι, πως δεν υπάρχει σημαντικό ποσό ισχύος στον αέρα οπότε αν και υπάρχει η τάση. Η επαγωγική τάση που δημιουργείται στον αέρα είναι πολύ μικρής, και επομένως η ισχύς που παράγεται από την διαφορά δυναμικού της επαγωγικής τάσης είναι πολύ μικρή [11,13]. Η επαγωγική τάση είναι ανάλογη της ταχύτητας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου. Η ταχύτητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη της συχνότητας του ρεύματος. Οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν ρεύμα χαμηλής συχνότητας, συνήθως 50 ή 60Hz. Αυτό σημαίνει ότι η επαγωγική τάση που δημιουργείται στον αέρα είναι πολύ μικρή. Ακόμα παρατηρείται πως κοντά στο γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο η διαφορά δυναμικού τείνει στο μηδέν γιατί το γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο είναι σε ηλεκτρική ισορροπία με το έδαφος [13,14]. Το έδαφος είναι ένα καλό αγωγίμο υλικό, και επομένως οποιοδήποτε ηλεκτρικό φορτίο που αποθηκεύεται στο γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο θα κατανεμηθεί ομοιογενώς σε όλο το έδαφος. Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά δυναμικού μεταξύ του γειωμένου μεταλλικού αντικειμένου και του εδάφους θα είναι πολύ μικρή [12,13]. Σε ένα γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο, το ηλεκτρικό δυναμικό είναι το ίδιο σε όλη την επιφάνεια του αντικειμένου και αυτός ο λόγος το καθιστά ισοδυναμική επιφάνεια. Αυτό συμβαίνει επειδή το μέταλλο είναι ένα αγωγίμο υλικό, οπότε το ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μέσα σε αυτό. Όταν το μέταλλο είναι γειωμένο, το ηλεκτρικό φορτίο από το μέταλλο διοχετεύεται στο έδαφος [11,14]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ηλεκτρικό δυναμικό του εδάφους να είναι το ίδιο με το ηλεκτρικό δυναμικό του μετάλλου. Ως εκ τούτου, η διαφορά δυναμικού μεταξύ της μεταλλικής κατασκευής και του εδάφους είναι πολύ μικρή. Η διαφορά δυναμικού τείνει στο μηδέν όσο πιο κοντά πλησιάζουμε στο γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο. Αυτό συμβαίνει επειδή η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μικρότερη όσο πιο κοντά πλησιάζουμε στο αντικείμενο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού. Επομένως, η διαφορά δυναμικού τείνει στο μηδέν καθώς η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου τείνει στο μηδέν [11,12,13,14].

Στα Σχήματα 8.18 και 8.19 παρατίθενται τα γραφήματα χρώματος επιφάνειας και γραμμών ροής για το ηλεκτρικό πεδίο στο μοντέλο.

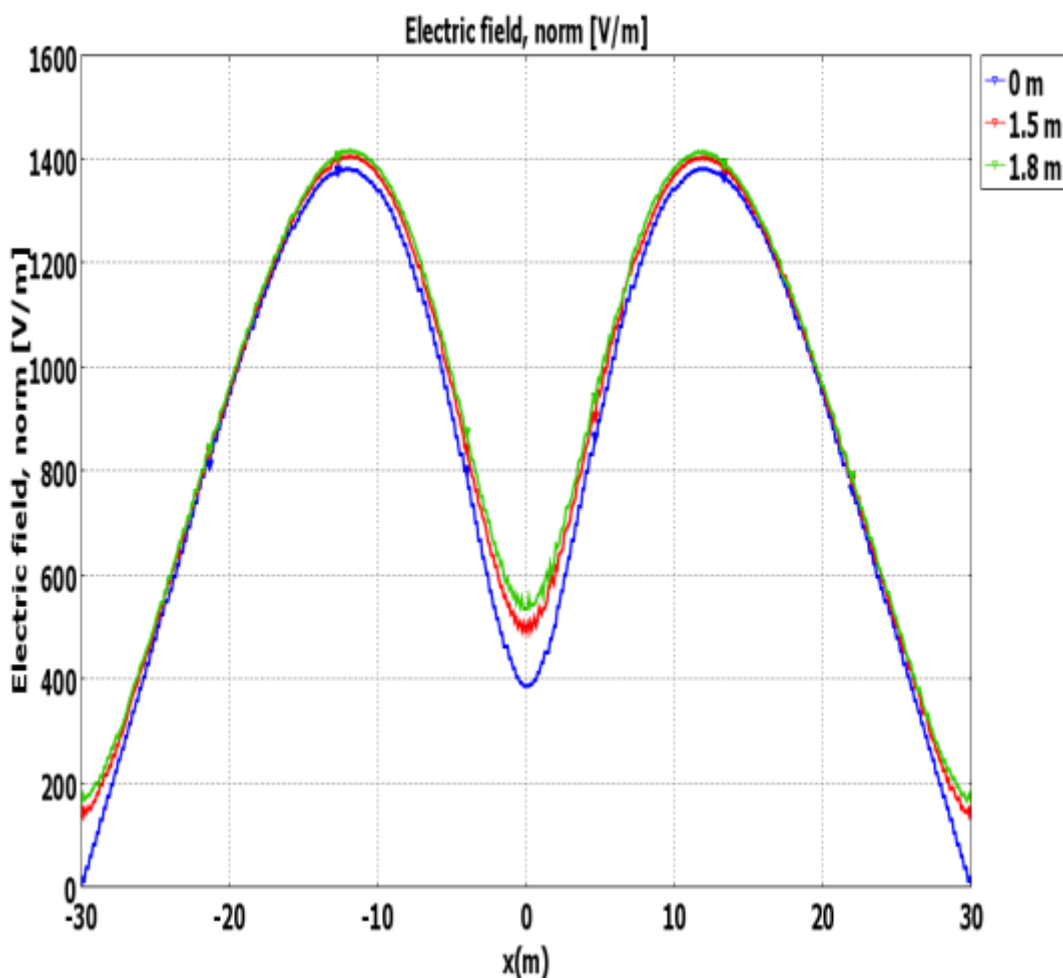


Σχήμα 8.18: Ηλεκτρικό πεδίο για τη χρονική στιγμή $t=0,0055s$.



Σχήμα 8.19: Γραμμές ροής ηλεκτρικού πεδίου.

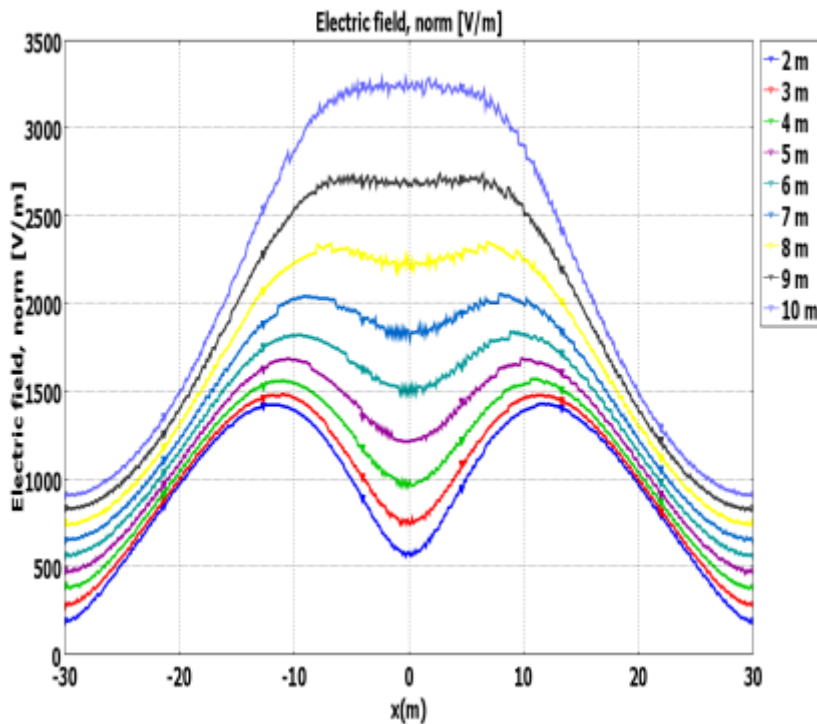
Κοντά στους αγωγούς παρατηρείται μια απότομη αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου όπως ήταν αναμενόμενο. Πάνω από το μεταλλικό αντικείμενο παρατηρείται επίσης αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου καθώς δεν μπορεί να το διαπεράσει και είναι το σημείο που αναμένεται να έχει την μεγαλύτερη τιμή πεδίου αφού απέχει λιγότερο από τους αγωγούς. Κάτω από το αντικείμενο παρατηρείται μια σημαντική βύθιση της έντασης του πεδίου καθώς αυτό προσφέρει ηλεκτροστατική θωράκιση.



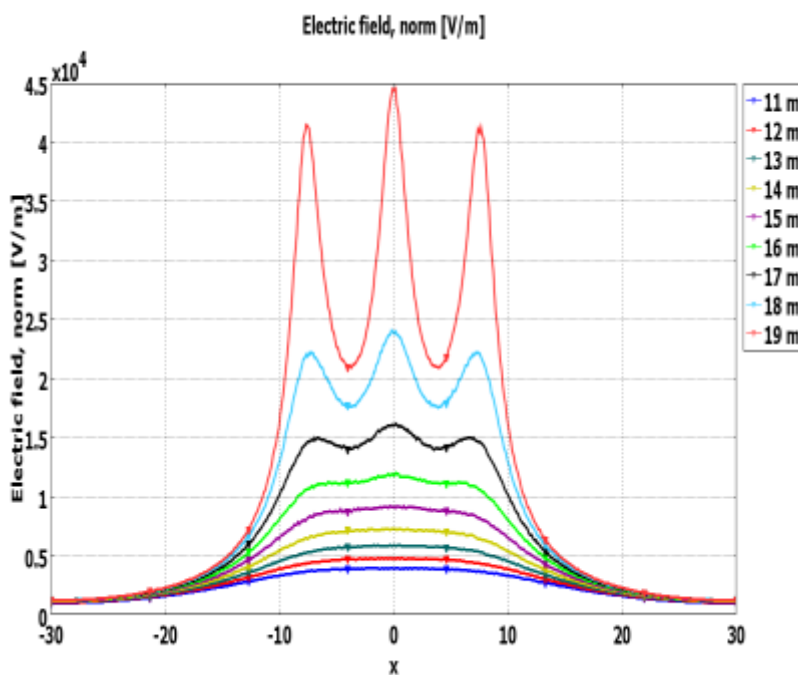
Σχήμα 8.20: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για επίπεδα (0m, 1,5m, 1,8m) από το έδαφος.

Το Σχήμα 8.20 δείχνει τη διδιάστατη γραφική παράσταση του ηλεκτρικού πεδίου σε συνάρτηση με το ύψος από το έδαφος για τα τρία ακόλουθα επίπεδα: το έδαφος (0m), έκθεση της καρδιάς (1,5m) και η έκθεση του εγκεφάλου (1,8m)

Στην προσομοίωση του πεδίου ελήφθησαν υπόψη επιπρόσθετα επίπεδα και το Σχήμα 8.21 παρουσιάζει την απεικόνιση του προφίλ ηλεκτρικού πεδίου σε ύψη που κυμαίνονται από 2m έως 19m πάνω από το έδαφος. Προκειμένου να διευκολυνθεί η σαφής απεικόνιση των αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα σχεδιάστηκαν σε δύο ξεχωριστές καμπύλες.



Σχήμα 8.21: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 2m έως 10m.

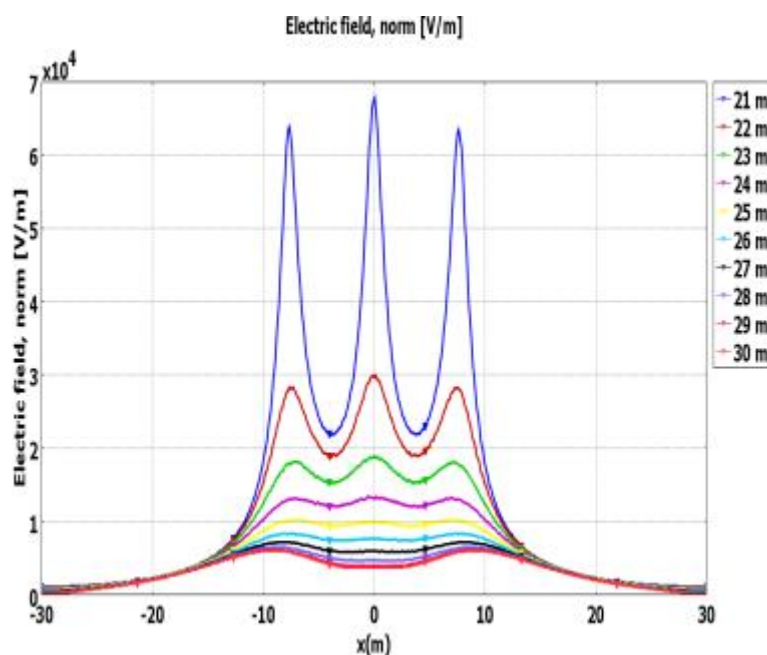


Σχήμα 8.22: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 11m έως 19m.

Παρατηρείται μια απότομη άνοδος του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στους αγωγούς επειδή το ρεύμα που ρέει μέσω των αγωγών δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο και αυτό το μαγνητικό πεδίο τέμνεται από τον αέρα, δημιουργώντας ένα ηλεκτρικό πεδίο. Ομοίως, παρατηρείται αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από τον μεταλλικό πυλώνα, όπου δεν μπορεί να διεισδύσει και φτάνει στη μέγιστη τιμή λόγω της εγγύτητας του με τους αγωγούς [16]. Η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από τον μεταλλικό πυλώνα είναι πιο έντονη από ό,τι πάνω από τον αέρα, επειδή ο μεταλλικός πυλώνας είναι ένας καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Το

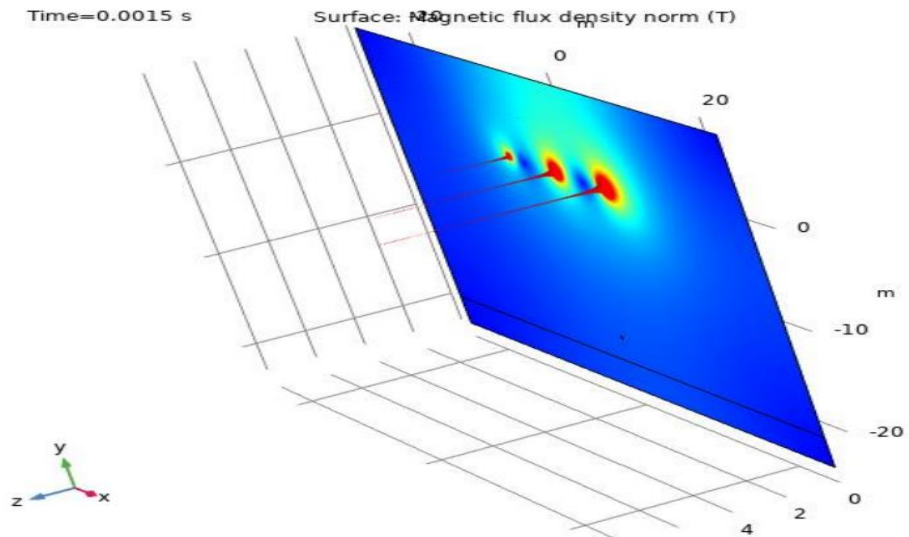
ρεύμα που ρέει μέσω του πυλώνα δημιουργεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, το οποίο τέμνεται από τον αέρα, δημιουργώντας ένα υψηλό ηλεκτρικό πεδίο. Αντίθετα, παρατηρείται σημαντική μείωση στην ένταση του πεδίου κάτω από τον πυλώνα. Όταν υπάρχει ρεύμα διαρροής, δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων όπου το ρεύμα εισέρχεται και εξέρχεται από τον πυλώνα [15,16]. Αυτή η διαφορά δυναμικού μειώνει τοπικά την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, μιας και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού. Σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερη κοντά στις φάσεις και μικρότερη μακριά από τις φάσεις. Όταν υπάρχει ρεύμα διαρροής, δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων όπου το ρεύμα εισέρχεται και εξέρχεται από τον πυλώνα. Αυτή η διαφορά δυναμικού δημιουργεί μια ισοδυναμική επιφάνεια που περνάει από τα σημεία αυτά [15,16]. Η ισοδυναμική επιφάνεια που δημιουργείται από το ρεύμα διαρροής μειώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε όλη την περιοχή που περιλαμβάνει. Παρόλα αυτά είναι φανερό ότι οι εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ κάτω από τα όρια που έχει θέσει η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) με κατευθυντήριες γραμμές πεδίου τα 5kV/m για το ηλεκτρικό πεδίο [15,16].

Επιπλέον, εξετάστηκε η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου μέχρι τα επίπεδα των αγωγών. Το Σχήμα 8.23 απεικονίζει το προφίλ ηλεκτρικού πεδίου σε ύψη που κυμαίνονται από 21m έως 30m.

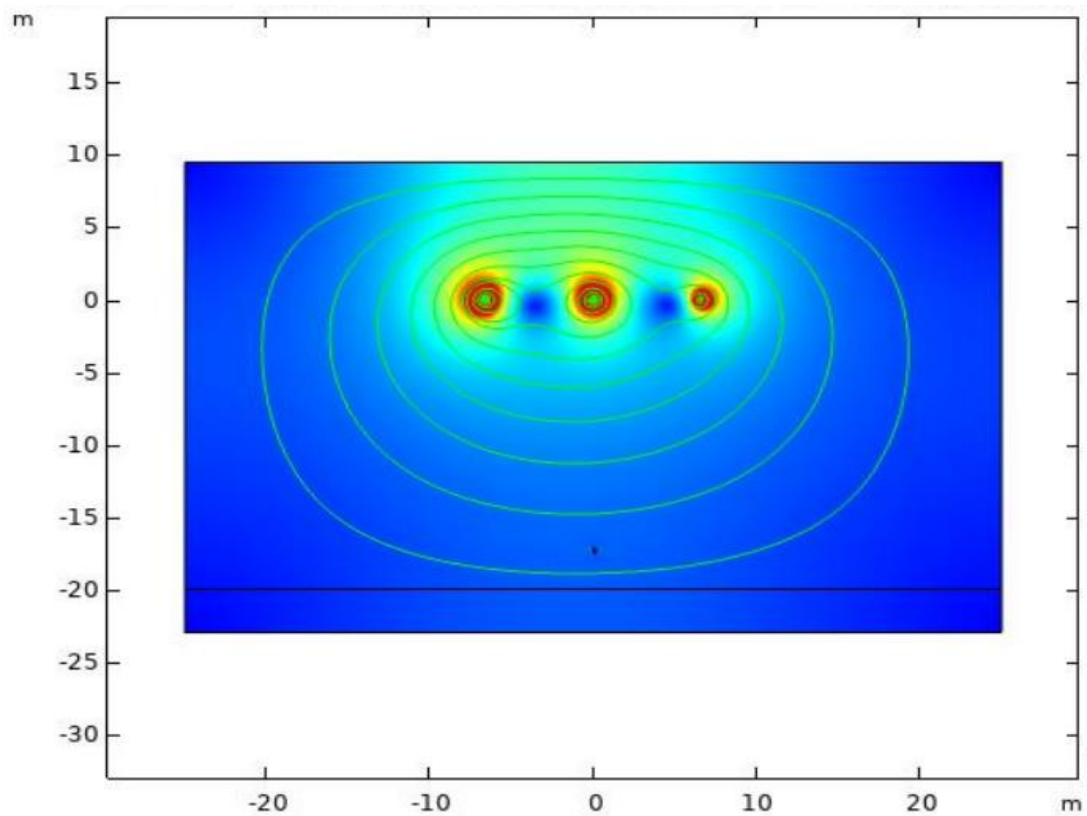


Σχήμα 8.23: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 21m έως 30m.

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για τη μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου.

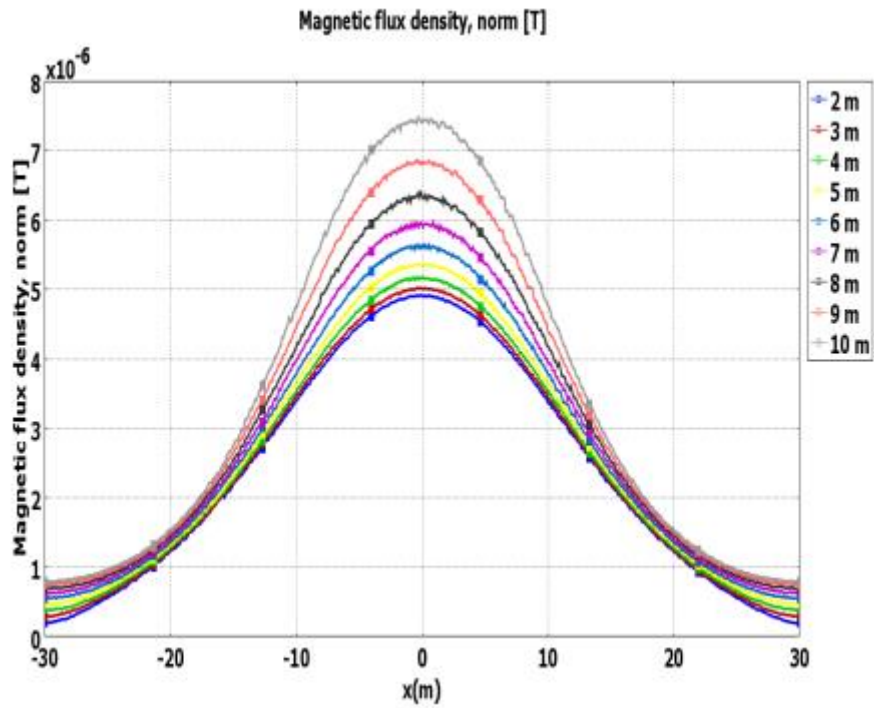


Σχήμα 8.24: Μαγνητικό πεδίο για $t=0,0015s$.

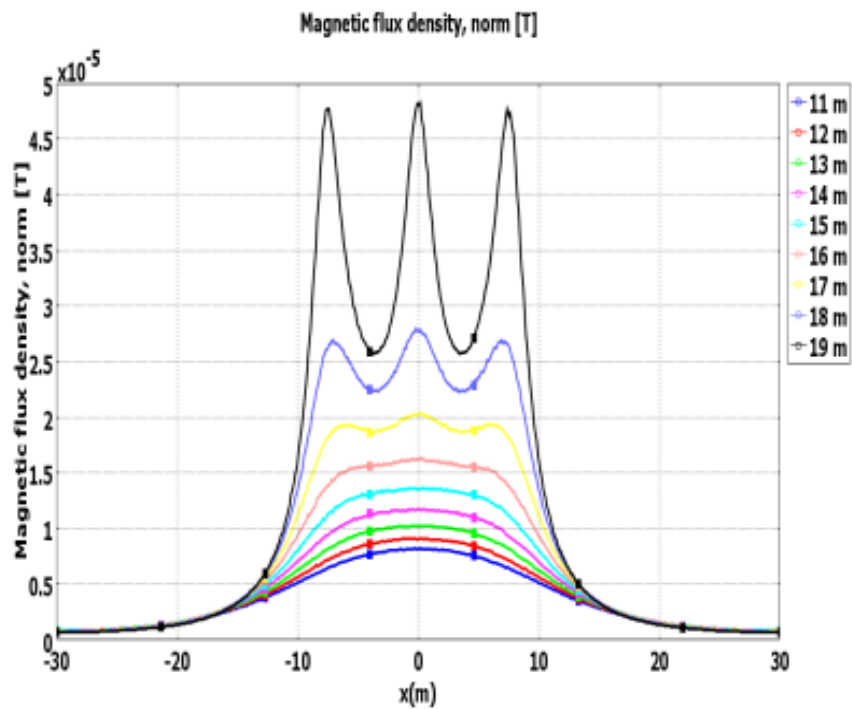


Σχήμα 8.25: Γραμμές ροής του μαγνητικού πεδίου.

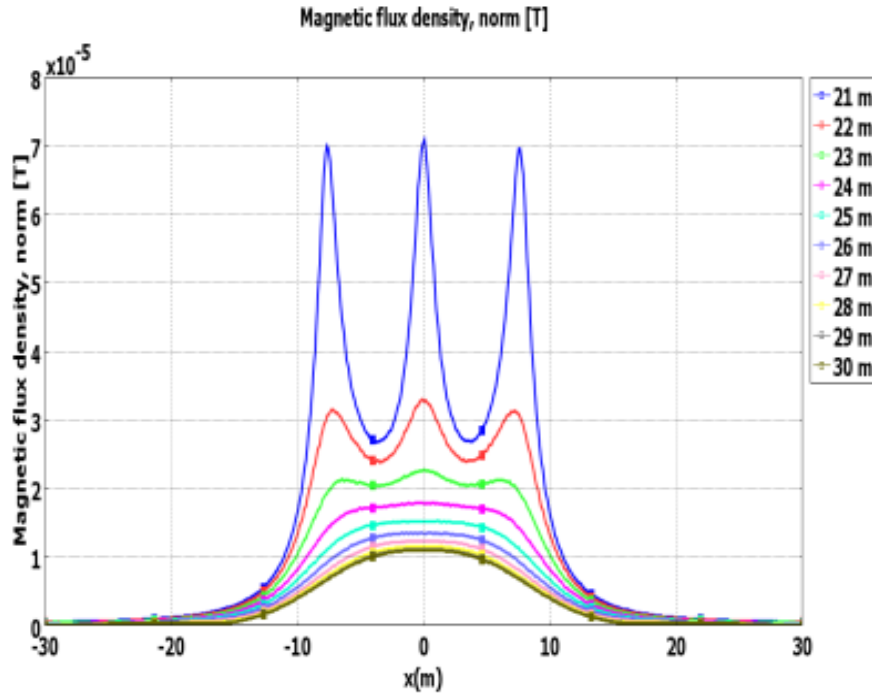
Τα Σχήματα 8.26, Εικόνα 8.27 και 8.28 δείχνουν την κατανομή του μαγνητικού πεδίου για διαφορετικά ύψη από 2m έως και 30m από το έδαφος.



Σχήμα 8.26: Πλευρικά προφίλ μαγνητικού πεδίου για τα επίπεδα από 2m έως 10m.



Σχήμα 8.27: Πλευρικά προφίλ μαγνητικού πεδίου για τα επίπεδα από 11m έως 19m.



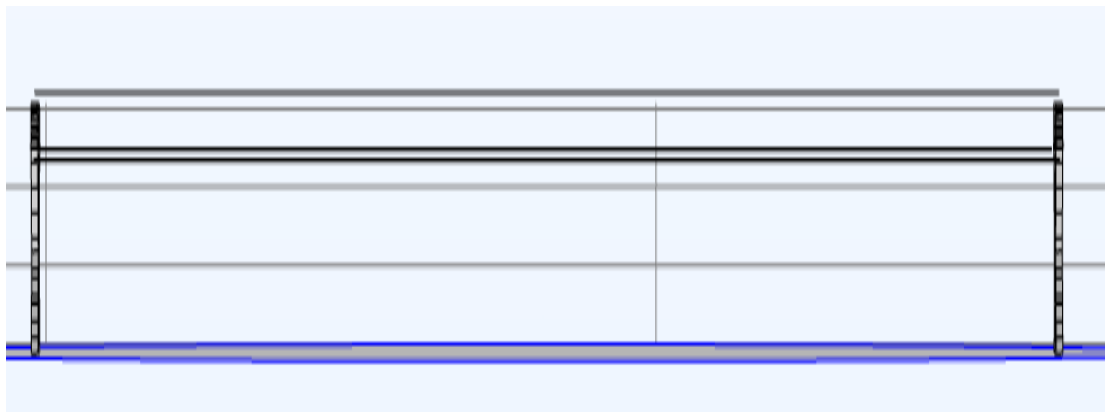
Σχήμα 8.28: Πλευρικά προφίλ μαγνητικού πεδίου για τα επίπεδα από 21m έως 30m.

Από τα παραπάνω σχήματα επίσης παρατηρείται μια αύξηση του μαγνητικού πεδίου κοντά στους αγωγούς φάσης, όπως άλλωστε είναι και αναμενόμενο. Η αύξηση του μαγνητικού πεδίου κοντά στους αγωγούς οφείλεται στο ρεύμα που ρέει μέσω των αγωγών. Το ρεύμα που ρέει μέσω ενός αγωγού δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος που ρέει μέσω του αγωγού και την απόσταση από τον αγωγό [16,17]. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το ρεύμα που ρέει μέσω ενός αγωγού είναι γραμμικό, δηλαδή η ένταση του πεδίου είναι ίδια σε όλες τις κατευθύνσεις. Ωστόσο, η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι μεγαλύτερη κοντά στον αγωγό και μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από τον αγωγό. Υπάρχει μια μικρή μείωση στο πεδίο γύρω από τον μεταλλικό πυλώνα, αλλά αυτή η μείωση δεν προκαλείται άμεσα από την παρουσία του ίδιου του γειωμένου πυλώνα. Αντίθετα, επηρεάζεται από το ρεύμα επαγωγής που δημιουργείται μέσα στον πυλώνα (γνωστά ως δινορεύματα) [17]. Η επαγωγική τάση μειώνεται κάτω από τον μεταλλικό πυλώνα σε μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας επειδή το μέταλλο του πυλώνα λειτουργεί ως πηνίο. Όταν ρέει ρεύμα στις γραμμές μεταφοράς, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από τις γραμμές [11,13]. Αυτό το μαγνητικό πεδίο διαπερνά το μέταλλο του πυλώνα και προκαλεί επαγωγή τάσης στο μέταλλο. Η επαγωγική τάση είναι ανάλογη της ταχύτητας μεταβολής του μαγνητικού πεδίου. Επομένως, η επαγωγική τάση είναι μεγαλύτερη κοντά στις γραμμές μεταφοράς, όπου το μαγνητικό πεδίο είναι πιο ισχυρό. Καθώς το μαγνητικό πεδίο διαπερνά το μέταλλο του πυλώνα, δημιουργεί ένα ηλεκτρικό ρεύμα στο μέταλλο. Αυτό το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί τη δική του μαγνητική ροή, η οποία αντιτίθεται στην αρχική μαγνητική ροή [18]. Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι το μαγνητικό πεδίο παραμένει ανεπηρέαστο από εμπόδια, όπως επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν [2,3,13]. Όπως με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έτσι και με την ένταση του μαγνητικού πεδίου οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση είναι πολύ κάτω από τα όρια που έχει θέσει η Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) με κατευθυντήριες γραμμές πεδίου τα 40μT για το μαγνητικό πεδίο [15,16].

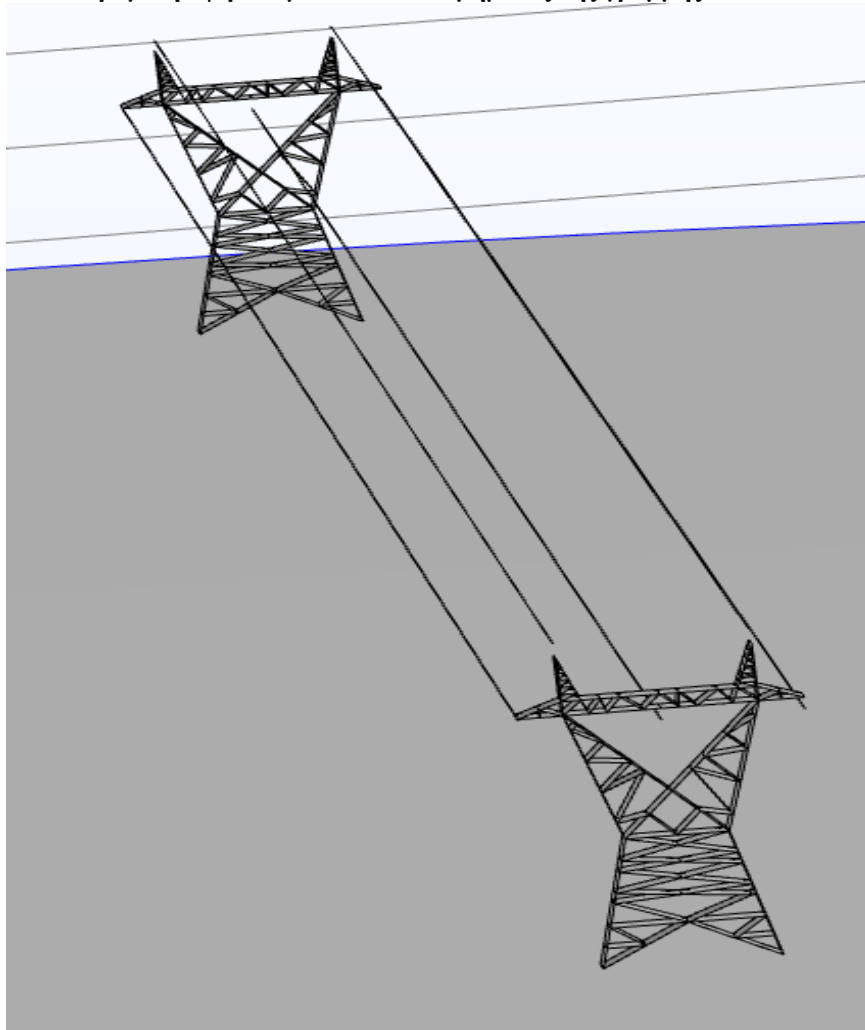
8.4.2 3^η Προσομοίωση

Μοντελοποίηση

Για την προσομοίωση αυτή αξιοποιήθηκαν οι πληροφορίες της παραγράφου 6.4.1 του Κεφαλαίου 6 (3^η μέτρηση) και σχεδιάστηκαν (Σχήμα 8.29) οι γραμμές μεταφοράς και οι δύο χαλύβδινοι πυλώνες AA228/60 και AA228/61. Επίσης, δεν απαιτήθηκε η σχεδίαση κάποιου αντικειμένου που να επηρεάζει τις τιμές στον άξονα μέτρησης.



Σχήμα 8.29: Πανοραμική όψη του μοντέλου του τμήματος της γραμμής AA228/60 και AA228/61.

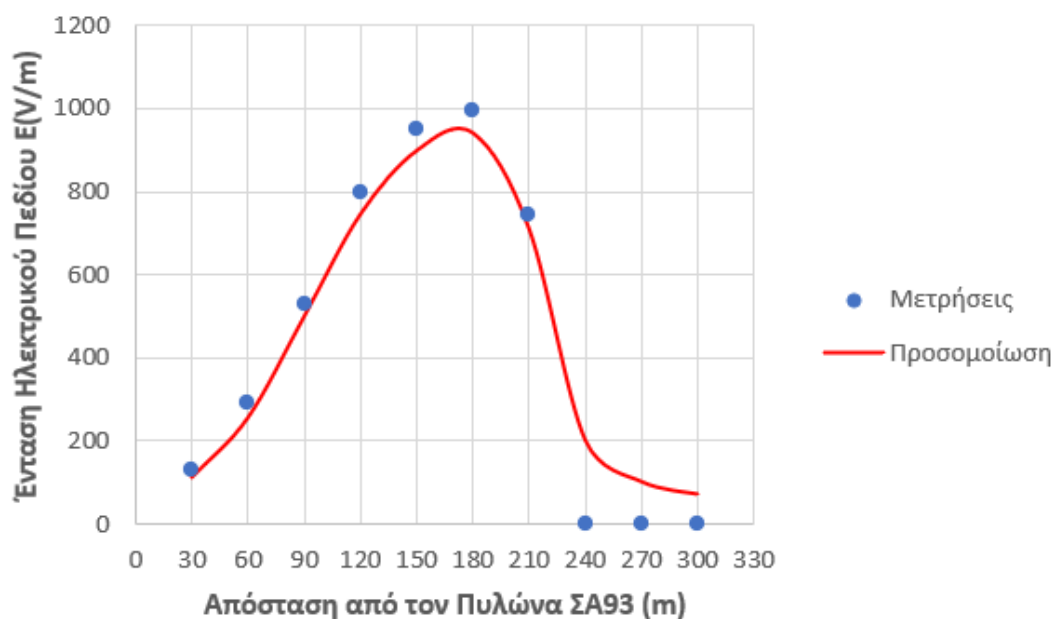


Σχήμα 8.30: Μοντέλο των τμημάτων των γραμμών AA228/60 και AA228/61.

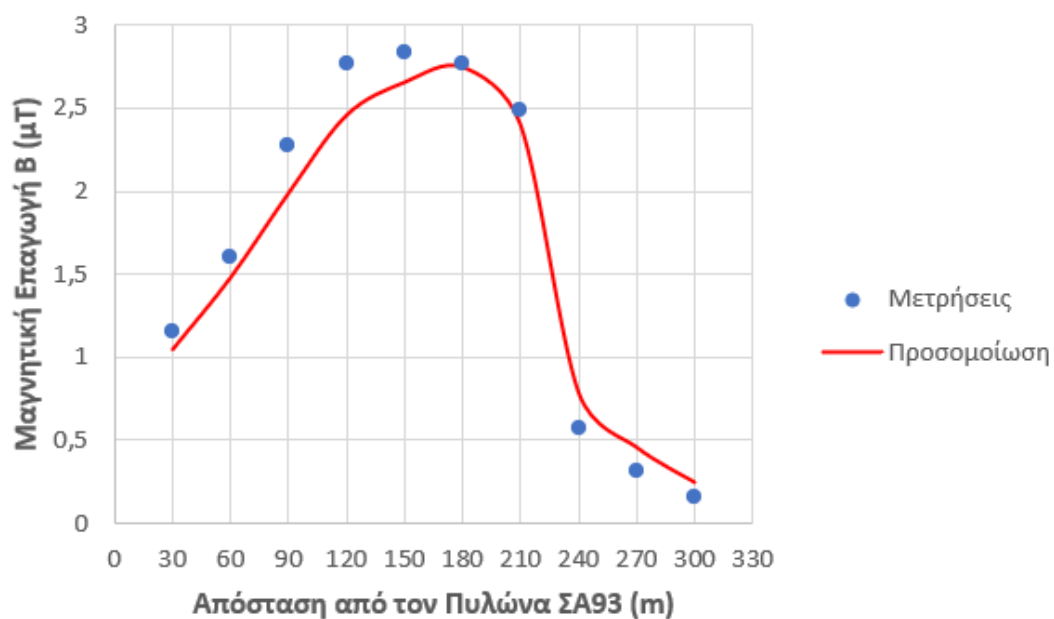
Σύγκριση αποτελεσμάτων

Διάμηκες Προφίλ

Στο Σχήμα 8.31 και Σχήμα 8.32 παρουσιάζονται τα διαμήκη προφίλ μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής αντίστοιχα. Τα σημεία εκκίνησης και λήξης των μετρήσεων είναι 5m μακριά από τους πυλώνες AA228/60 και AA228/61. Ταυτόχρονα, ποσοτικοποιούνται το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο κατά μήκος της υπάρχουσας γραμμής με τη χρήση του COMSOL Multiphysics.



Σχήμα 8.31: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής AA228/60 και AA228/61.



Σχήμα 8.32: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα κατά μήκος του τμήματος της γραμμής ΑΑ228/60 και ΑΑ228/61.

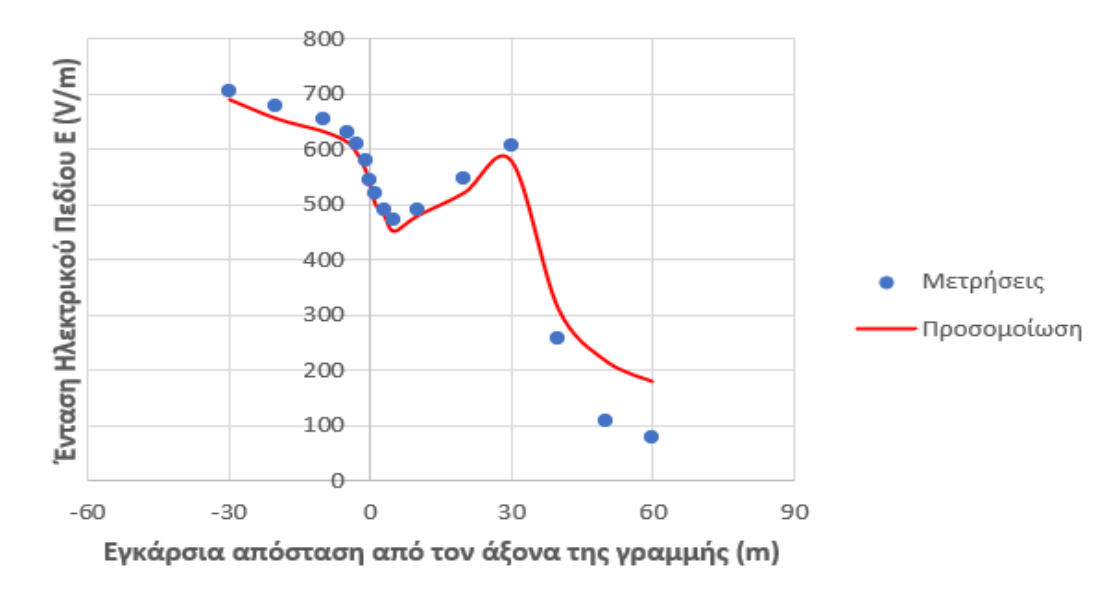
Από τα δύο σχήματα 8.31 και 8.32 παρατηρείται πως οι μετρήσεις έχουν φυσιολογική μορφή με μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου και μαγνητικής επαγωγής 989V/m και 2,7mT αντίστοιχα, οι οποίες σημειώνονται στο μέσο περίπου της γραμμής όπου το βέλος κάμψης λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής εμφανίζεται αριστερά από τον άξονα συμμετρίας της γραμμής λόγω του διαφορετικού ρεύματος που διέρχονται στα δύο κυκλώματα (23,5Α για το 1^ο κύκλωμα και 19,9Α για το δεύτερο κύκλωμα).

Επίσης, σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων και των υπολογισμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου αποδεικνύει μια διαταραχή στα αποτελέσματα λόγω της βλάστησης και των στύλων φωτισμού στις μετρούμενες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου. Αντίθετα, για το μαγνητικό πεδίο δεν παρατηρείται επίδραση του πεδίου από τα προαναφερθέντα αντικείμενα της περιοχής μέτρησης.

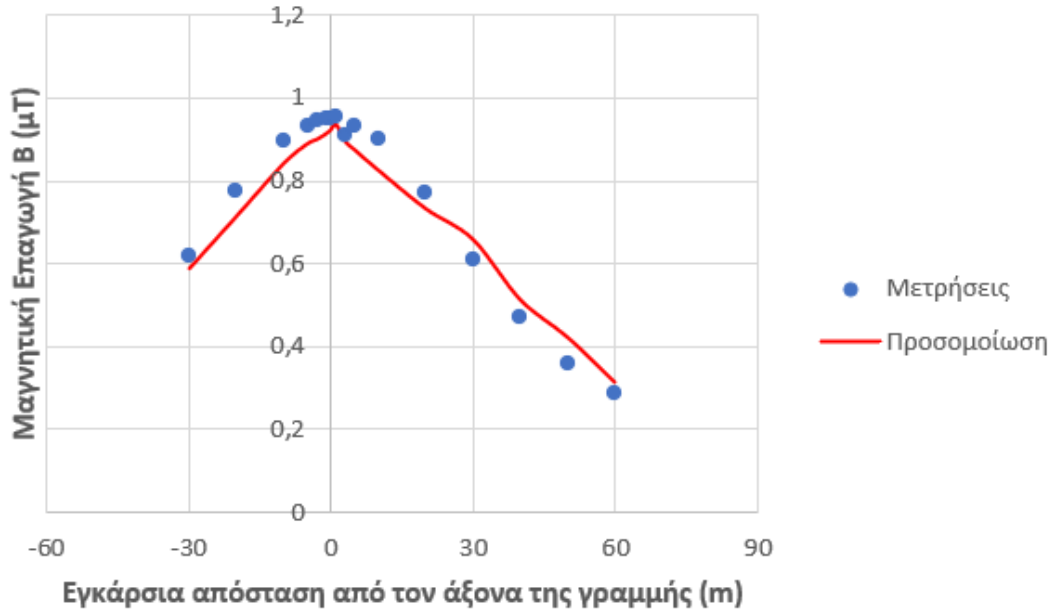
Η σύγκλιση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό COMSOL Multiphysics κρίνεται αρκετά ικανοποιητική. Οι μικρές παρατηρούμενες διαφορές αποδίδονται σε συνθήκες που δεν μπορούσαν να μοντελοποιηθούν, όπως το σύνολο των κτισμάτων και η κατά τόπους μικρή βλάστηση. Ακόμη, παρατηρείται ότι μοντελοποιήθηκε με πολλή καλή ακρίβεια η επίδραση των πυλώνων στις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου. Σχετικά με τη μαγνητική επαγωγή βρίσκονται τα περισσότερα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εντός των ορίων της υπολογισμένης αβεβαιότητας των μετρήσεων. Η διαφορά των μετρήσεων και των υπολογισμών είναι λιγότερο από 5% εκτός από τις θέσεις κοντά στους πυλώνες, όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση. Η διαφορά σε αυτά τα σημεία πιθανώς να οφείλεται σε ρεύματα διαρροής στους μεταλλικούς πυλώνες.

Εγκάρσιος 1 στα +25m (Πλευρικό Προφίλ)

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο εγκάρσια στη γραμμή υπολογίστηκε σε ύψος 1m πάνω από το έδαφος. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν στο εύρος [-30m,+60m] του άξονα της γραμμής μεταφοράς και παρουσιάζονται με τις μετρήσεις στα ακόλουθα σχήματα.



Σχήμα 8.33: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΑΑ228/60 και ΑΑ228/61.

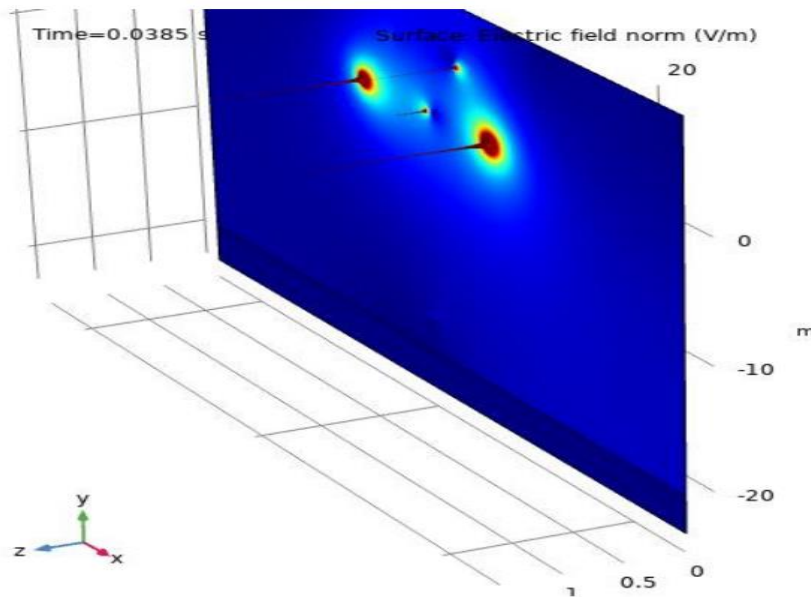


Σχήμα 8.34: Αποτελέσματα προσομοίωσης και μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής σε άξονα εγκάρσιο στο τμήμα της γραμμής ΣΑ 93 και ΣΑ 92.

Από τα δύο σχήματα, είναι προφανές ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν μια τυπική κατανομή με τιμές κορυφής για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τη μαγνητική επαγωγή στα 578,5V/m και 1.113nT, αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής παρατηρείται στα αριστερά του άξονα συμμετρίας της γραμμής, η οποία μπορεί να αποδοθεί στα διαφορετικά ρεύματα που διέρχονται από τα δύο κυκλώματα. Κατά τη σύγκριση των μετρήσεων με τις υπολογιζόμενες τιμές για το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται προφανές ότι η παρουσία υψηλών δέντρων και στύλων φωτισμού έχει επίδραση στις τιμές των μετρούμενων ηλεκτρικών πεδίων. Ωστόσο, δεν παρατηρείται επίδραση αυτών των αντικειμένων στις μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου εντός της περιοχής μέτρησης.

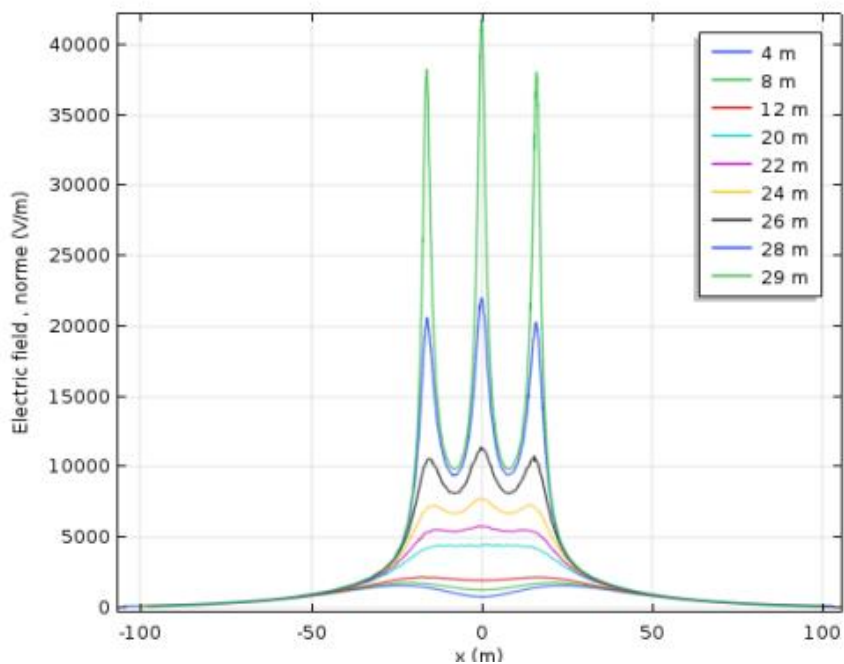
Συνοπτικά, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από το τμήμα της γραμμής μεταφοράς AA228/60 και AA228/61 υπολογίστηκαν με επιτυχία και συγκρίθηκαν με τα μετρούμενα αποτελέσματα. Υπάρχει μια συμφωνία μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών. Οι μικρές διαφορές που παρατηρούνται μπορούν να αποδοθούν στους περιορισμούς της ακριβούς μοντελοποίησης αντικειμένων και στις διακυμάνσεις του ρεύματος. Επιπλέον, υπάρχουν συνθήκες που σχετίζονται με τις μικρές τιμές πεδίου στις ακραίες θέσεις του άξονα μέτρησης και τις διακυμάνσεις στο φορτίο γραμμής. Ακόμη, το λογισμικό χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των αποτελεσμάτων για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και τη μαγνητική επαγωγή σε ύψος 1m πάνω από το έδαφος στην περιοχή μέτρησης. Με βάση το Σχήμα 8.33, είναι προφανές πως το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία δέντρων και στύλων φωτισμού. Από την άλλη πλευρά, το σχήμα δείχνει ότι το μαγνητικό πεδίο δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την παρουσία δέντρων και στύλων φωτισμού.

Παρακάτω παρατίθενται τα γραφήματα για τη διαφορά δυναμικού.



Σχήμα 8.35: Ηλεκτρικό πεδίο για $t=0,0385$.

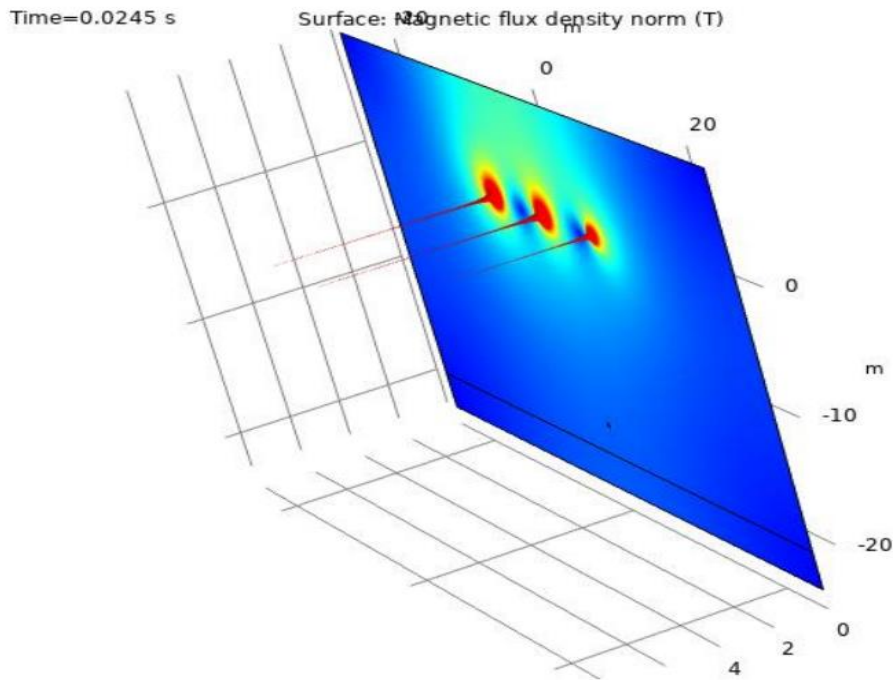
Η αναπαράσταση του ηλεκτρικού πεδίου απαιτεί τη χρήση του ηλεκτροστατικού μοντέλου.



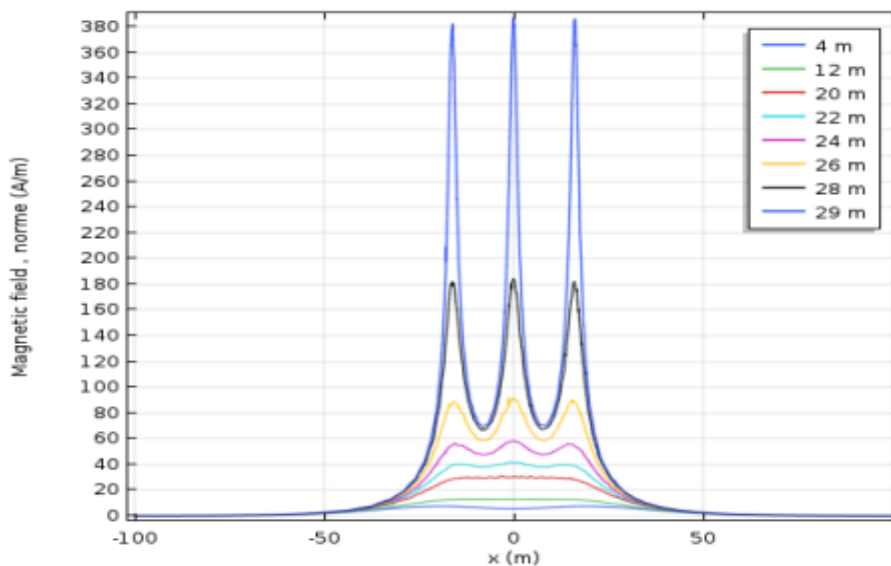
Σχήμα 8.36: Πλευρικά προφίλ ηλεκτρικού πεδίου για τα επίπεδα από 4m έως 30m.

Το Σχήμα 8.36 δείχνει τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε πολλά επίπεδα, το οποίο αυξάνεται και φθάνει στη μέγιστη τιμή του κοντά στους τρεις αγωγούς, ακόμη και κοντά και κάτω από τη γραμμή. Παρατηρείται ότι με την απομάκρυνση από τον άξονα x σε απόσταση $x=\pm 100\text{m}$, οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου θα είναι χαμηλές. Συνεπώς εξάγεται το συμπέρασμα πως η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται ανάλογα με την απόσταση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για το μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 8.37: Γράφημα επιφανείας (Surface) για το μαγνητικό πεδίο.

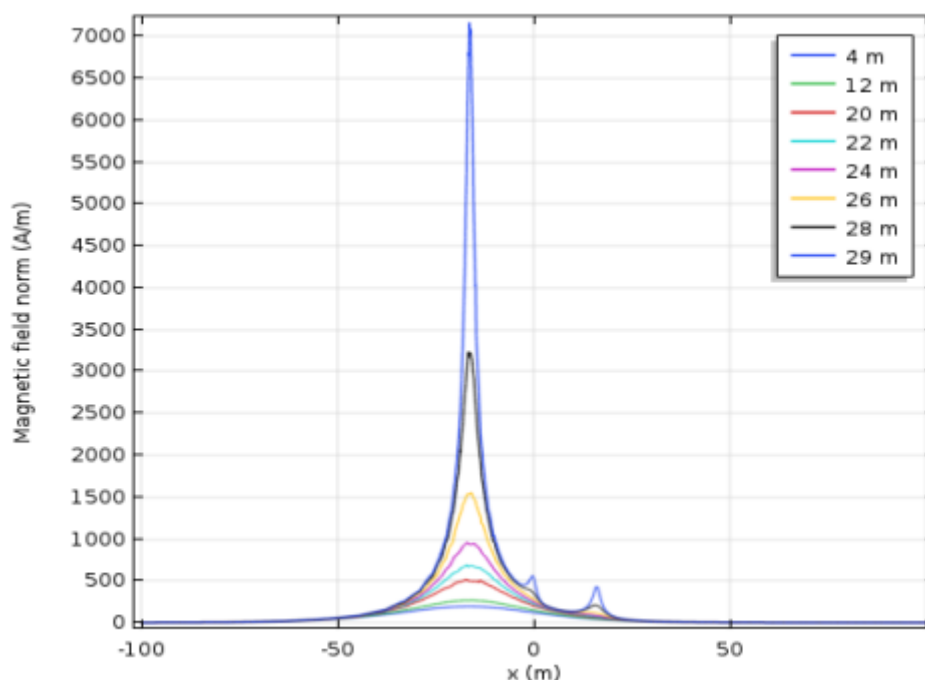


Σχήμα 8.38: Μαγνητική επαγωγή στα επίπεδα από 4m έως 29m.

Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης υποδεικνύει τη διάταξη του μαγνητικού πεδίου τόσο στην διαμήκη όσο και στην εγκάρσια κατεύθυνση (άξονες x και y) κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σχήμα 8.38 απεικονίζει το προφίλ του μαγνητικού πεδίου σε διαφορετικά ύψη πάνω από το έδαφος, δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται με την αύξηση της απόστασης από τους αγωγούς. Το μαγνητικό πεδίο μειώνεται και γίνεται λιγότερο σημαντικό τόσο σε οριζόντια όσο και σε κάθετη κατεύθυνση καθώς απομακρύνεται κανείς από τους αγωγούς.

Όταν ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος (π.χ. ICC=45 kA) ρέει μέσω μια ηλεκτρικής φάσης, δημιουργεί ένα σημαντικό μαγνητικό πεδίο. Στην Σχήμα 8.38, αυτό το μαγνητικό πεδίο παρατηρείται ότι είναι έντονο και κρίσιμο, σε αντίθεση με τα μαγνητικά πεδία των άλλων δύο

φάσεων που παραμένουν ανεπηρέαστα από το βραχυκύκλωμα λόγω της ισχύος που μεταφέρεται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης. Η μέγιστη ισχύς του μαγνητικού πεδίου κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος είναι σχεδόν 18 φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή.



Σχήμα 8.39: Προσομοίωση του μαγνητικού πεδίου με βραχυκύκλωμα μιας ηλεκτρικής φάσης.

Παρατηρείται πως με τη χρήση μιας αριθμητικής προσομοίωσης που διεξήχθη μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας το λογισμικό COMSOL Multiphysics για τη διερεύνηση της κατανομής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μιας εναέριας γραμμής ηλεκτρικής μεταφοράς 400kV που λειτουργεί σε συχνότητα 50Hz προκύπτουν τα ακόλουθα: Τα ευρήματα δείχνουν ότι ένα ρεύμα βραχυκυκλώματος που κυκλοφορεί μέσω μιας ηλεκτρικής φάσης δημιουργεί ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, που φτάνει σε υψηλό επίπεδο, λόγω της σημαντικής ισχύος που μεταδίδεται κατά τη φάση βραχυκυκλώματος [19,20]. Επιπλέον, ένα σφάλμα υπέρτασης 680kV μεταξύ της φάσης και της γείωσης οδηγεί σε ουσιαστική και έντονη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κοντά και κάτω από τη γραμμή μεταφοράς αυξάνεται, ιδιαίτερα κατά τις μεταβατικές καταστάσεις, και αντιστρόφως μεταβάλλεται με την απόσταση. Η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κοντά και κάτω από μια γραμμή μεταφοράς είναι μεγαλύτερη από ό,τι σε απόσταση. Αυτό συμβαίνει επειδή οι αγωγοί της γραμμής μεταφοράς δημιουργούν ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο [20,21]. Το πεδίο αυτό είναι πιο ισχυρό κοντά στους αγωγούς και εξασθενεί καθώς αυξάνεται η απόσταση. Ακόμη η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κοντά και κάτω από μια γραμμή μεταφοράς αυξάνεται επίσης κατά τις μεταβατικές καταστάσεις. Μια μεταβατική κατάσταση συμβαίνει όταν η τάση ή το ρεύμα της γραμμής αλλάζουν γρήγορα [19,21]. Για παράδειγμα, μια μεταβατική κατάσταση μπορεί να συμβεί όταν ένας αγωγός της γραμμής μεταφοράς βραχυκυκλωθεί ή όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο απελευθερωθεί από έναν αγωγό. Επίσης η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εξασθενεί προς τα έξω από την πηγή σε σχέση με το τετράγωνο της απόστασης. Αυτό σημαίνει ότι η ένταση του πεδίου μειώνεται κατά το ήμισυ όταν η απόσταση αυξάνεται κατά δύο φορές [20,21]. Συμπερασματικά το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο κοντά και κάτω από μια γραμμή

μεταφοράς αυξάνεται, ιδιαίτερα κατά τις μεταβατικές καταστάσεις, και αντιστρόφως μεταβάλλεται με την απόσταση. Αυτό σημαίνει ότι η έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία από γραμμές μεταφοράς είναι μεγαλύτερη κοντά στους αγωγούς και μειώνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση [19,20,21].

- [1] S. Nikolovski, Z. Klai, Z. Kraus, M. Stojkov, “Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations”, MIPRO 2010, May 24–28, 2010, Opatija, Croatia.
- [2] S. Nikolovski, Z. Klaić, B. Štefić, “Measurements and Computation of Electromagnetic Field in Transformer Station 400/110 kV Ernestinovo” IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28th – July 2nd, Bucharest, Romania, 2009.
- [3] R.R.Diaz, E.Nanni, J.N.Silva, “Comparison of 2-D and 3-D methods for calculating magnetic fields induced by transmission lines”, XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, Aug. 22–26, 2011.
- [4] B. Anggoro, P. M. Pakpahan, A. Pratomo, “The comparison between measurement and calculation of electric field beneath 500kV transmission line”, 12th International Symposium on High Voltage Engineering, (ISH2001), Bangalore, India, Aug. 20–24, 2001.
- [5] C. Garrido, A. F.Otero, J. Cidra’s, “Low-frequency magnetic fields from electrical appliances and power lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, 18(4), pp. 1310–1319, 2003.
- [6] S. Tupsie, A. Isaramongkolrak, and P. Pao-la-or, “Analysis of Electromagnetic Field Effects Using FEM for Transmission Lines Transposition”, World Academy of Science, Engineering and Technology, 53, 2009.
- [7] J. Liu, W. Ruan, S. Fortin, F. P. Dawalibi, “Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis”, Power System Technology, vol. 1, pp. 401 – 408, 2002.
- [8] www.engineeringtoolbox.com/air-properties-viscosity-conductivity-heat-capacity-d_1509.html
- [9] M.Tkalec, K. Malarić, M. Pavlica, B. Pevalek-Kozlina & Z. Vidaković-Cifrek, “Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of Allium” *cepa L. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 672(2), 76–81, 2009.
- [10] K. Dymek, P. Dejmek, V. Panarese, A.A Vicente, L. Wadsö, C. Finnie & F.G Galindo, (2012), “Effect of pulsed electric field on the germination of barley seeds. *LWT - Food Science and Technology*”, 47(1), 161–166, 2012.
- [11] G. A. Covic, J. T. & Boys, “Inductive Power Transfer”. *Proceedings of the IEEE*, 101(6), 1276–1289, 2013.
- [12] C. Park, S. Lee, S. Y. Jeong, G.-H. Cho, C. T. & Rim, “Uniform Power I-Type Inductive Power Transfer System With DQ-Power Supply Rails for On-Line Electric Vehicles”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(11), 6446–6455, 2015.
- [13] W. Wang, X. Huang, L. Tan, J. Guo, & H. Liu, “ Optimization Design of an Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines. *Energies*”, 9(4), 242, 2016.
- [14] V. Cirimele, M. Diana, F. Freschi, & M. Mitolo, M. “Inductive power transfer for automotive applications state-of-the-art and future trends”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018.

- [15] A. Y. Hoekstra, “Sustainable, efficient, and equitable water use: the three pillars under wise freshwater allocation”. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(1), 31–40, 2018.
- [16] Q. Wang, M. He, J. Yang, H. Gao, B. Jiang, & H. Yu, “Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for longwall mining in coal mines”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 110, 1–8, 2018.
- [17] K. K. Zeming, S. Ranjan, & Y. Zhang, “Rotational separation of non-spherical bioparticles using I-shaped pillar arrays in a microfluidic device”. *Nature Communications*, 4(1), 2013.
- [18] S. Ranjan, K. K. Zeming, R. Jureen, D. Fisher, Y. & Zhang, “DLD pillar shape design for efficient separation of spherical and non-spherical bioparticles”. *Lab Chip*, 14(21), 4250–4262, 2014.
- [19] G. Xu, Z. Wang, J. Zhou, Z. Li, Y. Zhan, H. Zhao, “Rotor Loss and Thermal Analysis of Synchronous Condenser Under Single-Phase Short-Circuit Fault in the Transmission Line”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021.
- [20] Z. Li, S. Liang, L. Ren, X. Tan, Y. Xu, Y Tang, ... J. Shi, “Application of Flux-Coupling-Type Superconducting Fault Current Limiter on Shipboard MVDC Integrated Power System”. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1–1, 2020
- [21] C. Zhang, W. Ge, Y. Xie, & Y. Li, “Comprehensive Analysis of Winding Electromagnetic Force and Deformation During No-Load Closing and Short-Circuiting of Power Transformers”. *IEEE Access*, 9, 73335–73345, 2021.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Σύνοψη και συμπεράσματα

9.1 Υπολογισμός των Ηλεκτρικών και των Μαγνητικών Πεδίων

Αυτή η μελέτη περιλαμβάνει τη διεξαγωγή μετρήσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σε ονομαστικές τάσεις 150kV και 400kV. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα IEEE Std 644-2019, ΕΛΟΤ IEC 61786-1:2014, ΕΛΟΤ IEC-617862:2014 και IEC 62110:2009. Χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός εξοπλισμός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π., μετά από ειδική οδηγία εργασίας που σχεδιάστηκε για τη συγκεκριμένη δοκιμή. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η αβεβαιότητα που σχετίζεται με αυτές τις μετρήσεις και έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης των υπό διερεύνηση γραμμών μεταφοράς, καθώς και διαφόρων στοιχείων του περιβάλλοντος γύρω από τις γραμμές. Για την προσομοίωση και τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό COMSOL Multiphysics. Μέσω αυτού του λογισμικού, προσομοιώθηκε η λειτουργία των γραμμών μεταφοράς για την εκτίμηση των επιπέδων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής εντός των καθορισμένων περιοχών μελέτης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν στη συνέχεια με *in situ* μετρήσεις του πεδίου κάτω από τις θεωρούμενες γραμμές υψηλής τάσης, οι οποίες διεξήχθησαν στο πλαίσιο εκπόνησης αυτής της εργασίας, για να επαληθευθεί η ακρίβεια τους.

Η διπλωματική εργασία ξεκινά παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εισαγωγή στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας, συζητώντας τα χαρακτηριστικά τους, τις πηγές παραγωγής και τις παραμέτρους που τα επηρεάζουν. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι ανησυχίες που εκφράζονται από την επιστημονική κοινότητα και το ευρύ κοινό σχετικά με αυτούς τους τομείς, τονίζοντας τις πιθανές επιπτώσεις τους στην ανθρώπινη υγεία. Ακολούθως περιγράφονται οι μετρητές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας επισημαίνοντας τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά και τις προδιαγραφές τους. Παρουσιάζεται ο ειδικός εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη, προσδιορίζονται, επίσης, πιθανές πηγές αβεβαιότητας στη μέτρηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας και βεβαίως υπολογίζεται η συνολική αβεβαιότητα που υφίσταται στις μετρήσεις.

Ξεκινώντας το κύριο μέρος της εργασίας, τα προκαταρκτικά στάδια της πειραματικής διαδικασίας (όπως η προετοιμασία των μετρήσεων, η ίδια η διαδικασία μέτρησης και η αναφορά αποτελεσμάτων), συμμορφώνονται πλήρως προς τα σχετικά πρότυπα. Οι σημειακές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν επικεντρώθηκαν στον προσδιορισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής σε περιοχές όπου υπήρχαν γραμμές μεταφοράς. Επιπλέον, εξετάστηκαν τα ειδικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς και της θέσης μέτρησης σε κάθε περίπτωση. Για κάθε μέτρηση παρέχεται μια ολοκληρωμένη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένων συγκεκριμένων λεπτομερειών όπως η ώρα έναρξης και λήξης των μετρήσεων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός μέτρησης, η θέση μέτρησης (συνοδευόμενη από σχέδια, σκίτσα και φωτογραφίες) και τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς. Αυτές οι μετρήσεις συγκρίθηκαν με τα ισχύοντα όρια έκθεσης για την ασφάλεια του κοινού και διαπιστώθηκε ότι οι τιμές του πεδίου είναι πολύ χαμηλότερες από αυτά σε όλες τις περιπτώσεις των γραμμών που εξετάστηκαν.

Στη συνέχεια ακόμα διερευνήθηκε και η ταύτιση των μοντελοποιημένων αναπαραστάσεων των γραμμών μεταφοράς με τις αντίστοιχες πραγματικές κατασκευές, συγκρίνοντας τις μετρούμενες τιμές πεδίου κατά μήκος των ίδιων αξόνων μελέτης που χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχες περιοχές των γραμμών. Αυτά τα μοντέλα περιλάμβαναν τα τριφασικά κυκλώματα, τους αγωγούς γείωσης και τις δομές στήριξης, όπως επίσης ενσωμάτωσαν και πρόσθετα αντικείμενα που υπήρχαν στις περιοχές μέτρησης τα οποία επηρέασαν σημαντικά τις μετρήσεις της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής. Σε γενικές γραμμές, οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις του COMSOL Multiphysics και των πραγματικών μετρήσεων ήταν ελάχιστες, ιδιαίτερα εντός της ζώνης δουλειάς των γραμμών μεταφοράς.

Η ανάλυση μελέτης ολοκληρώθηκε με την παραμετρική εξέταση των οριστικοποιημένων μοντέλων των γραμμών μεταφοράς με χρήση του προαναφερθέντος λογισμικού. Μια σειρά από σενάρια διερευνήθηκαν μέσω αυτής της παραμετρικής ανάλυσης, εστιάζοντας στην επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως η διάταξη των αγωγών φάσης, η απόσταση των αγωγών, η απόσταση μεταξύ των αγωγών και το έδαφος, το φορτίο γραμμής, η ειδική αντίσταση του εδάφους και η παρουσία αγωγών προστασίας, η ενεργοποίηση παρακείμενων γραμμών μεταφοράς και η επίδραση των κοντινών αντικειμένων στην ένταση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που προκύπτει.

9.2 Συμπεράσματα και αξιολόγηση

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια υπογραμμίζει τη σημασία της τήρησης προτύπων για την εξασφάλιση αξιόπιστων μετρήσεων. Η εξοικείωση με αυτά τα πρότυπα είναι ζωτικής σημασίας για την επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού, την προετοιμασία του χειριστή, την ορθή επιλογή των θέσεων μέτρησης, την ακριβή αναφορά αποτελεσμάτων και την αξιολόγηση των αβεβαιοτήτων. Επιπλέον, η εμπειρία του χειριστή είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αποτελεσματική επίλυση τυχόν προβλημάτων ή τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων όταν οι πληροφορίες είναι ελλιπείς. Όσον αφορά την έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που εκπέμπονται από τις καταγεγραμμένες γραμμές μεταφοράς, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές σε όλα τα σημεία ενδιαφέροντος εμπίπτουν εντός των ορίων της ασφαλούς έκθεσης και μάλιστα είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτά τα όρια.

Επιπλέον, αυτή η μελέτη καταδεικνύει ότι η χρήση του λογισμικού COMSOL Multiphysics αποφέρει εξαιρετικά ευνοϊκά αποτελέσματα κατά την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με το πεδίο. Η εφαρμογή αυτού του λογισμικού για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ζητημάτων που σχετίζονται με τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων κατά μήκος διαφόρων αξόνων μέτρησης οδήγησε σε συνεπή και ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σύγκριση με τις μετρήσεις που ελήφθησαν. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τις γραμμές μεταφοράς πέτυχαν ικανοποιητική σύγκλιση, με σφάλματα μικρότερα από 5% για τις τιμές πεδίου εντός της ζώνης δουλειάς. Ωστόσο, εκτός αυτής της ζώνης, παρατηρήθηκε μια σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση, κυρίως λόγω των πολύ μικρών τιμών των πεδίων (βρίσκονται στα όρια του δυναμικού εύρους του πεδιομετρητή), των αντικειμένων (αφορά το ηλεκτρικό πεδίο), των πεδίων υποβάθρου (κυρίως για το μαγνητικό πεδίο) και οι διακυμάνσεις των φορτίων (αφορά μόνο το μαγνητικό πεδίο). Σε περιπτώσεις όπου υπήρχαν σημαντικές επιδράσεις από κοντινά αντικείμενα, τόσο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσο και των μετρήσεων για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου παρουσίασαν διακυμάνσεις έως

και 20%. Επιπλέον, εμφανίστηκαν μεγαλύτερα σφάλματα όταν η επιφάνεια του εδάφους δεν ήταν επίπεδη, καθώς το λογισμικό αντιπροσώπευε μόνο επίπεδο έδαφος.

Η απλούστερη μέθοδος για τη μείωση των πεδίων είναι η μεταγωγή των αγωγών φάσεων. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την αλλαγή των τερματικών στους υποσταθμούς αναχώρησης και άφιξης της γραμμής. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου σε γραμμές διπλού κυκλώματος έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξασθένηση (που ποικίλει ανάλογα με την περίπτωση) της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής στο κέντρο συμμετρίας της γραμμής, καθώς και σε απομακρυσμένα σημεία. Ο βαθμός μείωσης επηρεάζεται από το ύψος ανάρτησης των εναέριων γραμμών και σε ορισμένες περιπτώσεις, η μετάθεση του αγωγού μπορεί να προκαλέσει τοπική αύξηση στο πεδίο. Επομένως, είναι απαραίτητη μια παραμετρική ανάλυση, λαμβάνοντας υπόψη το ύψος των εναέριων γραμμών. Οι υπολογισμοί μας αφορούν γραμμές με σχετικά κοντινή απόσταση περίπου 20m μεταξύ του κάτω αγωγού και του εδάφους. Η μείωση αυτής της απόστασης οδηγεί σε μείωση της αποτελεσματικότητας του ρυθμού μείωσης.

Ένα πλεονέκτημα των αγωγών αλλαγής φάσης είναι η εμφάνιση πλήρως συμμετρικών πεδίων που αφορούν το κέντρο της γραμμής. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα με άλλες τεχνικές μείωσης πεδίου. Η μείωση της απόστασης μεταξύ των αγωγών της γραμμής παράγει ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δε διαφέρουν σημαντικά από αυτά των τυπικών γραμμών. Ωστόσο, όταν συνδέεται με μια βέλτιστη διάταξη φάσεων μπορεί να επιτευχθεί δραστική μείωση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Η μείωση της απόστασης μεταξύ των ρευματοφόρων αγωγών μιας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία με επίπεδα τιμών που είναι παρόμοια με αυτά των παραδοσιακών γραμμών. Ωστόσο, όταν συνδυαστεί με τη βέλτιστη διάταξη των φάσεων, η μείωση της απόστασης οδηγεί σε δραστική μείωση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Η προσθήκη μιας νέας γραμμής μεταφοράς παράλληλα με μια υπάρχουσα γραμμή δεν οδηγεί απαραίτητα σε αύξηση της έκθεσης στο πεδίο. Εάν έχει σχεδιαστεί για να μοιράζεται το φορτίο, είναι πιθανόν να οδηγήσει σε χαμηλότερες τιμές μαγνητικής επαγωγής. Επιπλέον, η εφαρμογή μιας βέλτιστης διάταξης μειώνει περαιτέρω το μαγνητικό πεδίο.

Το ύψος ανάρτησης των αγωγών αναδείχθηκε ως σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Η αύξηση του ύψους της ανάρτησης είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση των πεδίων σε κοντινά σημεία και στις 2 πλευρές της γραμμής, ιδιαίτερα σε ύψη μέτρησης κοντά στο έδαφος. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι τα επίπεδα μαγνητικής επαγωγής κατά τη διάρκεια των σεναρίων λειτουργίας, όπως το μέσο και το μέγιστο φορτίο, παρέμειναν κάτω από τα όρια ασφαλούς έκθεσης σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Σε περιπτώσεις που εξετάστηκε παράλειψη αγωγών προστασίας, παρατηρήθηκαν ελάχιστες αλλαγές στα επίπεδα ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στην υψηλότερη τοποθέτηση των αγωγών προστασίας σε σχέση με τους αγωγούς φάσης, στη στενή εγγύτητα μεταξύ τους και στη σημαντική απόστασή τους από τα σημεία παρατήρησης κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Έτσι, η διάταξη των αγωγών φάνηκε να είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που επηρεάζει τα επίπεδα πεδίου σε αυτές τις περιπτώσεις.

Επιπλέον, η παρουσία γειτονικών αντικειμένων είχε σημαντικό αντίκτυπο στις τιμές του πεδίου, ιδιαίτερα για το ηλεκτρικό πεδίο. Η εγγύτητα και το μέγεθος αυτών των αντικειμένων επηρέασαν τις τιμές του πεδίου και είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη αυτή η παράμετρος

καθώς μπορεί να μεταβάλλει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραμετρική ανάλυση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος δεν δημιουργούν απαραίτητα υψηλότερες τιμές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων από τις γραμμές μονού κυκλώματος. Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ένταση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι η γεωμετρική διάταξη των αγωγών φάσης, οι μεταξύ τους αποστάσεις και η απόσταση τους από το έδαφος. Ο αριθμός των κυκλωμάτων δεν είναι καθοριστικός παράγοντας. Οι δύο πρώτοι παράγοντες καθορίζουν την αποτελεσματικότητα της αλληλεξουδετέρωσης των φασικών τάσεων και ρευμάτων, η οποία με τη σειρά της μειώνει την ένταση των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

9.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος

Τα ευρήματα δείχνουν ότι το λογισμικό COMSOL Multiphysics είναι πολύ ακριβές στον υπολογισμό και στην προσομοίωση των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων των γραμμών μεταφοράς. Η εφαρμογή αυτού του λογισμικού, μαζί με τα κατασκευασμένα μοντέλα γραμμής, απέδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά και να επεκταθεί για διάφορες άλλες περιπτώσεις ενδιαφέροντος, όπως η διερεύνηση ασυμμετριών ή σφαλμάτων φόρτισης, η διερεύνηση μεθόδων μείωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων και η μελέτη διαφορετικών διατάξεων γραμμών.

Για να βελτιωθεί η ακρίβεια του μοντέλου στον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου μπορούν να γίνουν περαιτέρω σκέψεις. Για παράδειγμα, το έδαφος, το οποίο επίσης υποτίθεται ότι είναι ομοιογενές, θα μπορούσε να αναπαρασταθεί ως στρωματοποιημένο, με ποικίλες ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες σε κάθε στρώμα. Αυτή η παράμετρος δίνει τη δυνατότητα να βελτιωθεί σημαντικά η ακρίβεια υπολογισμού. Επιπλέον, ο ακριβής προσδιορισμός του ύψους ανάρτησης των αγωγών γραμμής θα συνέβαλε στη βελτίωση του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να συγκριθούν με άλλα πακέτα λογισμικού ή δισδιάστατα μοντέλα ως προς τις τιμές και τον χρόνο υπολογισμού για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας.

Ένας σημαντικός τομέας μελέτης θα περιλάμβανε την ακριβή προσδιορισμό του μέσου και του μέγιστου επιπέδου έκθεσης που είναι αποδεκτό από το κοινό. Θα ήταν αρκετό να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες του μέσου ετήσιου φορτίου και του πραγματικού μέγιστου φορτίου της γραμμής για αυτά τα σενάρια λειτουργίας.

Σε μελλοντική έρευνα, μετρήσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν εντός ενός ΚΥΤ. Οι αβεβαιότητες των μετρήσεων θα μπορούσαν περαιτέρω να υπολογιστούν και να επαληθευτούν μέσω προσομοιώσεων στο λογισμικό COMSOL Multiphysics, ή σε άλλους επιλύτες.

Μια σημαντική μελέτη θα ήταν διερεύνηση της ανάπτυξης υπερτάσεων σε δίκτυα μεταλλικών αγωγών όπως οι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου, υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναπτύσσεται από τις γραμμές μεταφοράς.

Επιπλέον, οι μέθοδοι μοντελοποίησης που στοχεύουν στην εξουδετέρωση του πεδίου της γραμμής με ένα αντίθετο εξωτερικό πεδίο, όπως παθητικούς και ενεργητικούς βρόχους, μπορούν να θεωρηθούν ως θέμα για μελλοντική έρευνα. Μια παραμετρική ανάλυση μπορεί να διεξαχθεί για να εξεταστούν οι επιπτώσεις παραγόντων όπως ο τύπος της γραμμής, ο αριθμός των βρόχων ακόμα η χωρική τους θέση και άλλα.

Μπορούν να γίνουν συγκρίσεις μεταξύ διαφόρων διατάξεων αγωγών φάσης που χρησιμοποιούνται σε δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας διαφορετικών χωρών και εκείνων που χρησιμοποιούνται στο ελληνικό δίκτυο.

Επιπλέον, η συμβολή των επαγόμενων ρευμάτων που ρέουν μέσω των αγωγών γείωσης στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορεί να μελετηθεί μεταβάλλοντας το υλικό ή τις θέσεις τους. Εμφανείς θα είναι οι μεταβολές με την τοποθέτηση των αγωγών γης εσωτερικά των αγωγών φάσεων. Αρχικά η αποτελεσματικότητα της αλληλεξουδετέρωσης των μαγνητικών πεδίων θα βελτιωθεί σημαντικά. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τους αγωγούς φάσης θα διαπερνούν τον αγωγό γης. Ο αγωγός γης θα λειτουργεί ως πηνίο και θα προκαλεί την τάση που δημιουργείται από τον αγωγό φάσης. Η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς θα αυξηθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αγωγός γης θα έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τον αγωγό φάσης. Η αύξηση της αντίστασης θα οδηγήσει σε αυξήσεις στις απώλειες ενέργειας. Τέλος η ασφάλεια της γραμμής μεταφοράς θα βελτιωθεί. Αυτό συμβαίνει επειδή ο αγωγός γης θα παρέχει μεγαλύτερη προστασία από τις υπερτάσεις. Η τοποθέτηση των αγωγών γης εσωτερικά στους αγωγούς φάσης είναι μια πρακτική που χρησιμοποιείται σε ορισμένες χώρες. Αυτή η πρακτική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κυρίως σε περιοχές με υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία ή σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο κεραυνών.

Παρά τη μικρή επίδραση της ειδικής αντίστασης στο εύρος τιμών που μελετήσαμε και για συνθήκες κανονικής φόρτισης μελλοντικά μπορεί να εξεταστεί σε συνθήκες βραχυκυκλώματος όπου υψηλά ασύμμετρα ρεύματα ρέουν στις φάσεις της γραμμής και ρεύματα διεισδύουν στο έδαφος από τους πυλώνες. Σε αυτές τις περιπτώσεις προβλέπεται η ειδική αντίσταση εδάφους να παίζει κρίσιμο ρόλο στις τιμές των παραγόμενων πεδίων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α.ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

Αυτό το παράρτημα παρέχει μια περιγραφή των γραμμών μεταφοράς, με βάση την ονομαστική τάση λειτουργίας τους, τον αριθμό των κυκλωμάτων τους και τη διάταξη των αγωγών φάσεων. Επιπλέον, προσφέρει σχετικές πληροφορίες για το θέμα.

1. Εναέρια γραμμές μεταφοράς

Οι εναέρια γραμμές μεταφοράς 400kV και 150kV που εξετάζονται στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας είναι αυτές του ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το αν φέρουν ένα ή δύο τριφασικά κυκλώματα, οι προαναφερθείσες γραμμές ταξινομούνται ως μονού ή διπλού κυκλώματος. Για γραμμές μονού κυκλώματος, οι αγωγοί είναι διατεταγμένοι οριζόντια ή κάθετα, ενώ για τις γραμμές διπλού κυκλώματος, οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι σε κατακόρυφη διάταξη συμμετρικά ως προς τον άξονα της γραμμής. Επιπλέον, οι γραμμές 150kV του συστήματος μεταφοράς χρησιμοποιούν έναν αγωγό ενώ οι γραμμές 400kV χρησιμοποιούν 2 αγωγούς ανά φάση.

Τα ανοίγματα των γραμμών μεταφοράς κυμαίνονται συνήθως από 150m έως 500m, ενώ με ανοίγματα μεγαλύτερα από 1km χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε εξαιρετικές περιπτώσεις για τη γεφύρωση ποταμών ή μεγάλων κοιλάδων. Επιπλέον, η επίγεια ζώνη (επίσης γνωστή ως ζώνη δουλείας ή ζώνη διέλευσης) που απαιτεί γραμμή μεταφοράς στα 150kV έχει πλάτος 40m και πλάτος 50m στα 400kV. Οι πυλώνες των γραμμών μεταφοράς είναι δικτυωτές χαλύβδινες δομές αν και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συμπαγείς χαλύβδινοι στύλοι. Ανάλογα με τις διαμήκειες και εγκάρσιες μηχανικές καταπονήσεις που ασκούν πάνω τους οι αγωγοί, οι πύργοι από χαλύβδινο δικτυωτό πλέγμα ταξινομούνται ως «ίσιου» (τύπος S), «γωνιακού» (τύποι R, T και Z) και «τέρματος» (τύπος Z).

Οι παρακάτω πίνακες δείχνουν το ύψος στο οποίο οι αγωγοί φάσης αναρτώνται πάνω από το έδαφος για έναν πύργο μέσου ύψους. Κάθε τύπος ανεξαρτήτως σκελών πύργου (π.χ. $\pm 1,5M$, $\pm 2,0M$, $\pm 3,0M$ κ. τ. λ.). Παρέχεται συνήθως για αλλαγή του ύψους ανάρτησης των αγωγών ή και για χρήση σε βραχώδες έδαφος. Η τυπική τροποποίηση του βασικού ύψους ανάρτησης υποδεικνύεται από την επιμήκυνση κάθε στελέχους ή άκρου. Επιπροσθέτως, οι ελάχιστοι διαχωρισμοί αγωγού και αγωγού γείωσης, οι οποίοι διέπονται από τους «Κανονισμούς Εγκατάστασης και Συντήρησης Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας» σύμφωνα με την Υ.Α. αρ. 70261 (ΦΕΚ Β' 608/6-10-1967, περί «Εγκρισης Κανονισμών Ίδρυσης και Συντήρησης Υπαίθριων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας»), διαφέρουν σημαντικά και κυμαίνονται από 7m περίπου στις ελεύθερες εκτάσεις έως 12 ή 15m στις αγροτικές περιφέρειες.

Λόγω της ικανοποιητικής αγωγιμότητας και της μηχανικής τους αντοχής, οι ενισχυμένοι αγωγοί αλουμινίου (ACSR), ιδιαίτερα αυτοί των τμημάτων 35,630 και 954 των 336 MCM, χρησιμοποιούνται στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς. Ο ισχύων πίνακας Α.1 παρέχει τις τιμές των διατομών, που τις ορίζουν ως αγωγούς (ACSR), καθώς και τη διάμετρο των κλώνων από αλουμίνιο και χάλυβα.

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

Είδος Αγωγού	ACSR		
	66/150 kV	150 kV	400 kV
Ονομαστική Τάση Γ.Μ			
Κωδική ονομασία αγωγού	LINNET	GROSBEAK	GARDINAL

Εξωτερική Διάμετρος (mm)	18,31	25,15	30,42
Διατομή Αγωγού (mm ²)	198,19	374,77	546,06
Διατομή Αλουμινίου (CM)	336,400	636,000	954,000
Διατομή Αλουμινίου (mm ²)	170,45	322,26	483,42
Διάμετρος Συρματιδίων (mm)	2,89	3,97	3,38
Διάμετρος Χάλυβα (mm)	6,75	9,27	10,13
Διατομή Χάλυβα (mm ²)	27,74	52,51	62,64

Προκειμένου να θωρακιστούν οι αγωγοί φάσης από απευθείας κεραυνούς, ένας ή 2 αγωγοί γείωσης τοποθετούνται συχνά ψηλότερα από τους αγωγούς φάσης. Οι αγωγοί γείωσης είναι συνήθως κατασκευασμένοι από συνεστραμμένα νήματα χάλυβα και δε διαρρέονται από ρεύμα υπό κανονικές συνθήκες. Στις ελληνικές γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι αγωγοί γείωσης με διάμετρο 9,4mm σε γραμμές 150kV και 12,6mm σε γραμμές 400kV.

Μετά τη λήψη των στοιχείων από τον ΑΔΜΗΕ [2], παρέχονται όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για τη μεταφορά εναερίων γραμμών του ελληνικού συστήματος.

2. Γραμμή Μεταφοράς 150kV - Δικτυωτοί Πύλώνες

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Σύμφωνα με τον Πίνακα Α.2, υπάρχουν 4 διαφορετικοί τύποι πύργων από χαλύβδινο πλέγμα για καθεμία από τις τρεις ταξινομήσεις γραμμών μεταφοράς.

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

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

Τα γενικά χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς για δικτυωτούς πύργους είναι:

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

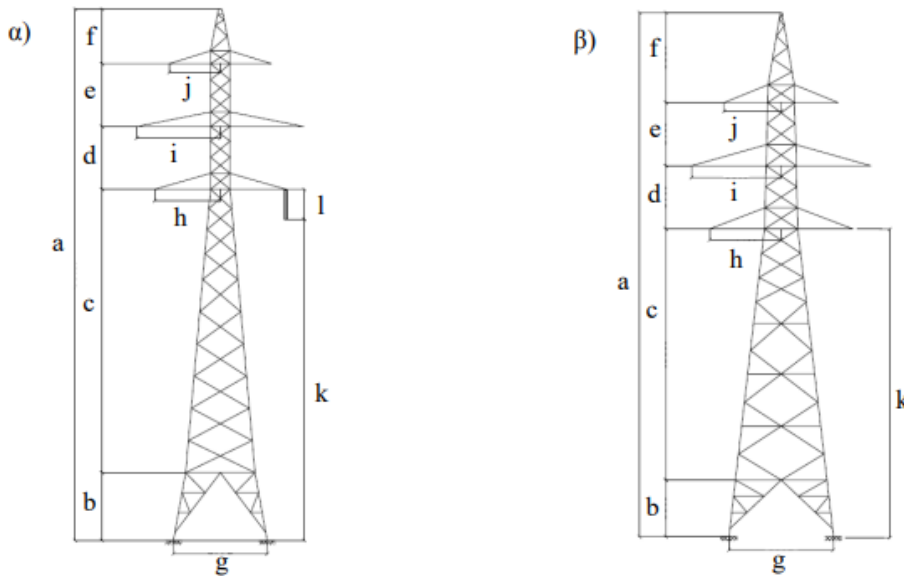
	Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 150 kV		
	Απλό κύκλωμα ελαφρού τύπου (E)	Απλό κύκλωμα βαρέος τύπου (B)	Διπλό κύκλωμα βαρέος τύπου (2B)
	Τριφασικά κυκλώματα		
Αριθμός	Ένα κύκλωμα	Ένα κύκλωμα	Δύο κυκλώματα
Διάταξη	Οριζόντια	Οριζόντια	Κατακόρυφη (σχεδόν)
Αγωγοί Φάσεων	ACSR LINNET 336 MCM	ACSR GROSBEAK 636 MCM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

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Ο Πίνακας Α.4 και το Σχήμα Α.1 παραθέτουν αμφότερα τις διαστάσεις και το σχήμα των πύργων δίδυμων κυκλωμάτων.

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

Τύπος Πύργου	Διαστάσεις												Σχήμα
	a(m)	b(m)	c(m)	d(m)	e(m)	f(m)	g(m)	h(m)	i(m)	j(m)	k(m)	l(m)	
S4	33,010	4,210	17,600	3,900	3,900	3,400	5,775	4,050	5,150	3,150	19,950	1,860	Σχήμα B.1α
R4	34,265	4,300	17,915	4,250	4,250	3,550	6,0615	4,550	5,650	3,650	19,950	2,265	Σχήμα B.1α
T4	32,350	3,500	15,500	3,900	3,900	5,550	6,392	4,400	5,500	3,500	19,00	-	Σχήμα B.1β
Z4	33,900	3,500	15,500	3,900	3,900	7,100	6,961	5,100	6,350	4,000	19,00	-	Σχήμα B.1β

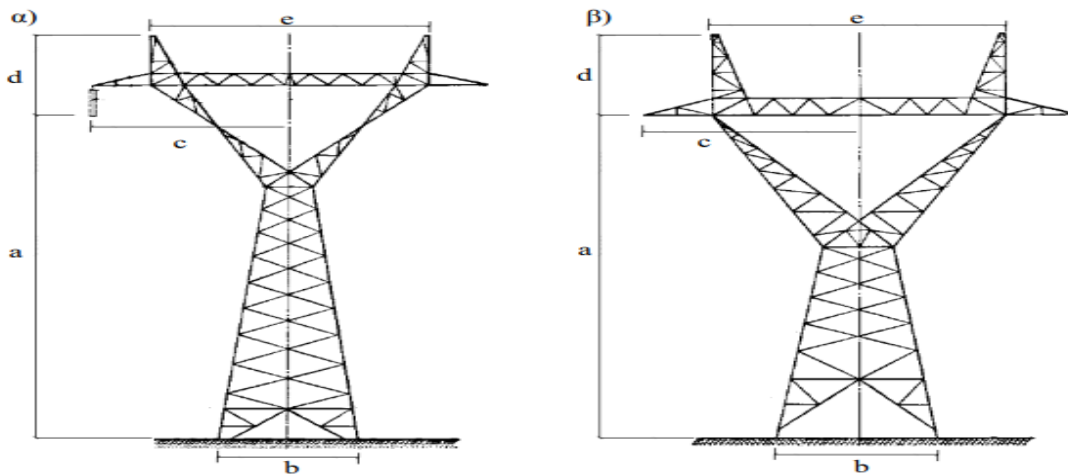


Σχήμα Α.1: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 150kV διπλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.

Το μέγεθος και το σχήμα των πύργων μονού κυκλώματος παρουσιάζονται στη συνέχεια στους Πίνακες Α.5 και Σχήμα Α.2, αντίστοιχα.

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

Τύποι Πύργου	Διαστάσεις					Σχήμα
	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	
S2	19,95	5,00	6,60	4,75	9,30	Σχήμα B.2α
R2	19,95	4,99	7,10	4,75	9,60	Σχήμα B.2α
T2	19,00	5,78	7,67	4,80	10,40	Σχήμα B.2β
Z2	19,00	5,14	8,95	4,75	12,10	Σχήμα B.2β
S3	19,95	5,24	6,28	3,86	8,50	Σχήμα B.2α
R3	19,95	5,24	6,82	3,82	9,30	Σχήμα B.2α
T3	19,00	5,78	6,70	3,75	9,20	Σχήμα B.2β
Z3	19,00	5,78	7,78	4,25	10,60	Σχήμα B.2β



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

3. Γραμμή Μεταφοράς 150kV - Συμπαγείς Πυλώνες

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ως εναλλακτική λύση στους πύργους ευθυγράμμισης, διατίθενται επίσης συμπαγείς κολώνες μονού και διπλού κυκλώματος. Ο Πίνακας Α.6 παραθέτει τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

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

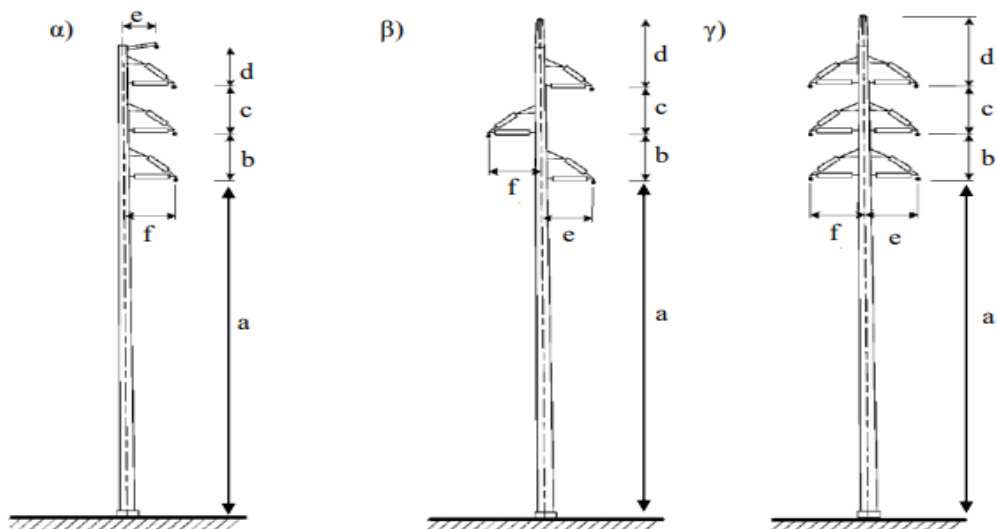
	Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 150kV		
	Απλό Κύκλωμα (Vertical)	Απλό Κύκλωμα (Triangular)	Διπλό Κύκλωμα
	Τριφασικά Κυκλώματα		
Αριθμός	Ένα Κύκλωμα	Ένα Κύκλωμα	Δύο Κυκλώματα
Διάταξη	Οριζόντια	Κατακόρυφη	Κατακόρυφη
Αγωγοί Φάσεων	ACSR GROSBEAK 636 MCM		
	Αγωγοί Προστασίας		
Αριθμός	Ένας Αγωγός		
Διάταξη	2 m από τον άξονα της Γ.Μ.	Στον άξονα της Γ.Μ.	
Αγωγοί Γης	Επτάκλωνος χαλύβδινος επιψευδαργυρωμένος		

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Ο Πίνακας Α.7 και το Σχήμα Α.3 περιέχουν μια λίστα με τις διαστάσεις και το σχήμα των συμπαγών πύργων μονού και διπλού κυκλώματος, αντίστοιχα.

Πίνακας Α.7: Γενικές διαστάσεις συμπαγών πύργων γραμμών μεταφοράς 150kV.

Τύποι Πύργου	Διαστάσεις						Σχήμα
	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	f (m)	
Απλό Κύκλωμα (Vertical)	19,95	2,80	2,80	2,50	2,00	2,30	Σχήμα Β.3α
Απλό κύκλωμα (Triangular)	19,95	2,80	2,80	4,50	2,30	2,30	Σχήμα Β.3β
Διπλό Κύκλωμα	19,95	2,80	2,80	4,50	2,30	2,30	Σχήμα Β.3γ



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

4. Γραμμή μεταφοράς 400kV

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Υπάρχουν τύποι πύργων για τις ταξινομήσεις γραμμών μεταφοράς 400kV και παρατίθενται στον Πίνακα Α.8:

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

	Κατηγορίες γραμμών μεταφοράς 400kV	
Τύπος Πύργου	Απλό Κύκλωμα	Διπλό Κύκλωμα
Ευθυγραμμίας	S6	S15
Μεγάλων Ανοιγμάτων	-	G5
Μικρής Γωνίας	R6	R5
Γωνίας 45°	T6	T5
Γωνίας 75° ή τέρματος	Z6	Z5

Επιπλέον, το κύκλωμα διπλού αγωγού ανά φάση και τα γενικά χαρακτηριστικά μονών και διπλών γραμμών μεταφοράς είναι :

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

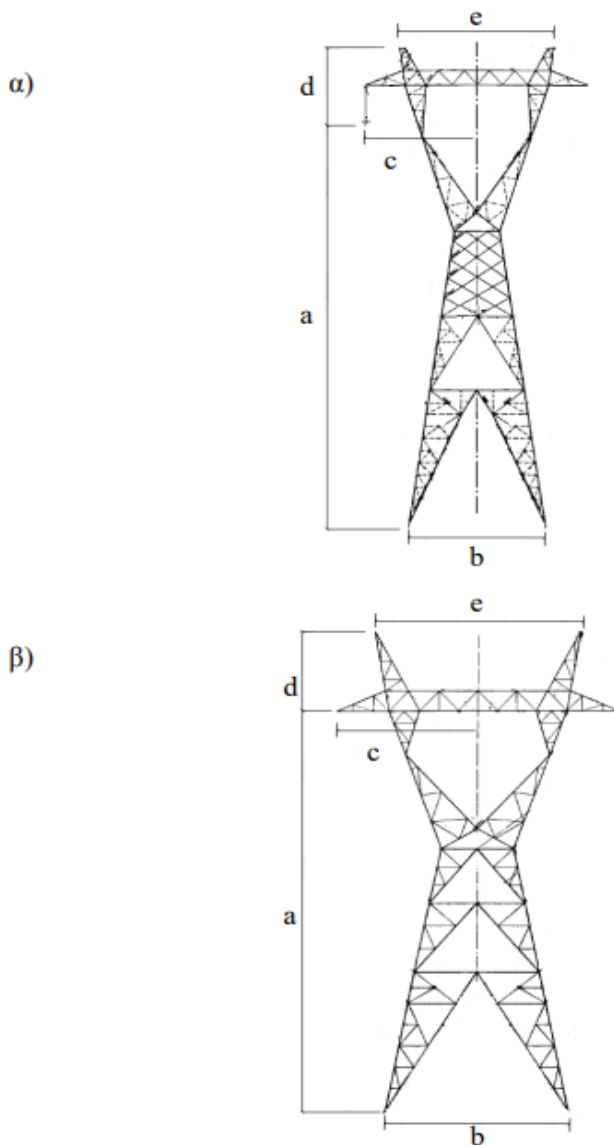
	Κατηγορία γραμμών μεταφοράς 400 kV	
	Απλό Κύκλωμα	Διπλό Κύκλωμα
	Τριφασικά Κυκλώματα	
Αριθμός Κυκλωμάτων	Ένα Κύκλωμα	Δύο Κυκλώματα
Διάταξη	Οριζόντια	Κατακόρυφη(σχεδόν)
Αριθμός Αγωγών	Δύο ανά φάση	Δύο ανά φάση
Αγωγοί Φάσεων	Αγωγοί Προστασίας	
Αριθμός	Δύο Αγωγοί	Ένας Αγωγός
Διάταξη	Συμμετρικά ως προς τον άξονα της Γ.Μ.	
Αγωγοί Γης	Επτάκλωνοι χαλύβδινοι επιψευδαργυρωμένοι	

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ

Ο Πίνακας Α.10 παρέχει μια λίστα προδιαγραφών πύργων μονού κυκλώματος. Επιπλέον, το Σχήμα Α.4 δείχνει τις γραμμές μεταφοράς 400kV τύπου πυλώνα που χρησιμοποιεί ο ΑΔΜΗΕ.

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

Τύποι Πύργου	Διαστάσεις					Σχήμα
	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)	e (m)	
S6	20	6,80	8,60	7,15	12,20	Σχήμα Β.4α
R6	20	7,20	9,80	7,15	13,60	Σχήμα Β.4α
T6	20	8,10	8,20	5,90	12,20	Σχήμα Β.4β
Z6	20	8,50	10,10	6,40	14,80	Σχήμα Β.4β

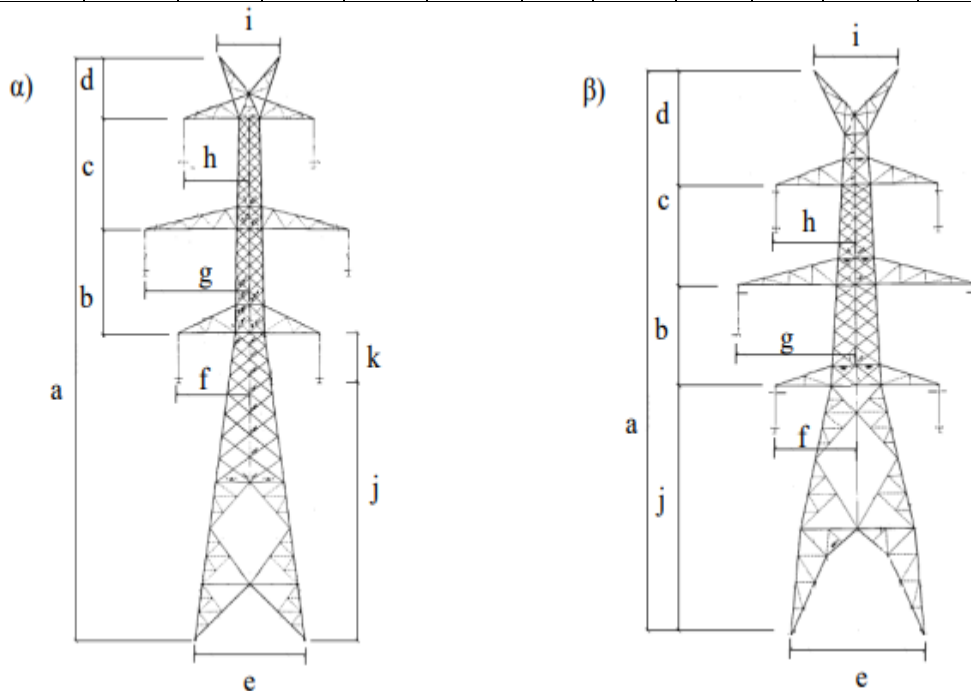


Σχήμα Α.4: Πύργοι γραμμών μεταφοράς 400kV απλού κυκλώματος ελληνικού δικτύου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαστάσεις και το σχήμα των πύργων διπλού κυκλώματος, όπως υποδεικνύεται στον Πίνακα Α.11 και στο Σχήμα Α.4, αντίστοιχα.

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

Τύπος Πύργου	Διαστάσεις											Σχήμα
	a(m)	b(m)	c(m)	d(m)	e(m)	f(m)	g(m)	h(m)	i(m)	j(m)	k(m)	
S15	45,195	8,000	8,500	4,800	9,200	6,4	9,4	5,8	5,6	20,000	3,895	Σχήμα Β.5α
G5	45,195	8,000	8,500	4,800	9,200	6,4	9,4	5,8	5,6	20,000	3,895	Σχήμα β.5α
R5	47,210	8,000	8,400	6,300	10,800	7,85	11,35	6,85	6,7	20,000	4,510	Σχήμα Β.5β
T5	45,000	8,000	8,000	9,000	11,300	7	10,5	7	7,00	20,000	-	Σχήμα Β.5β
Z5	45,300	8,000	8,000	9,30	11,700	7,7	11,2	7,7	8,40	20,000	-	Σχήμα Β.5α



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

B. Θεωρητικό Υπόβαθρο για την Προσομοίωση

1. Η Προσομοίωση και οι Στόχοι της

Αυτή η εργασία περιλαμβάνει μοντελοποίηση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε εναέρια καλώδια υψηλής τάσης κόμα καθώς και θερμικές επιπτώσεις από την τακτική λειτουργία του συστήματος. Θα διερευνηθούν 3 απλά κυκλώματα αποτελούμενα από τις 3 φάσεις αγωγών τύπου GROSSBEAK και τον αγωγό προστασίας ο οποίος βρίσκεται πάνω από τους αγωγούς φάσης και ολοκληρώνει το κύκλωμα. Η κάθε προσομοίωση θα χωριστεί σε 2 ενότητες.

Για τις 2 πρώτες περιόδους, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από τις γραμμές μεταφοράς και ο τρόπος με τον οποίο εξαπλώνονται στο διάστημα θα εξεταστούν υπό κανονικές συνθήκες εργασίας. Στη συνέχεια ακόμα θα αξιολογήσουμε αν τα ευρήματα είναι όπως είχαν προβλεφθεί με βάση τις μετρήσεις της γραμμής των γραμμών μεταφοράς. Θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τους περιορισμούς που θέτει η ελληνική νομοθεσία και οι ευρωπαϊκές οδηγίες.

Στη συνέχεια θα μοντελοποιηθεί η θερμική συμπεριφορά της γραμμής. Η συμπεριφορά του συστήματος για ένα τυπικό ημερήσιο φορτίο με υψηλό κόστος θα προσομοιώνεται, δηλαδή σε ώρες αιχμής της ημέρας θα ζητείται από το ηλεκτρικό αγωγό, Το οποίο ισοδυναμεί με το

θερμικό του ορίου. Για να συγκριθούν τα ευρήματα ακόμα η γραμμή θα προσομοιωθεί με την παροχή ρεύματος να λειτουργεί συνεχώς στο θερμικό της όριο. Οι προσομοιώσεις θα περιλαμβάνουν τη λειτουργία της γραμμής για 48 ώρες. Θα συνεχίσουμε να συμπεριλαμβάνουμε στους υπολογισμούς τον άνεμο της μεταβλητής ταχύτητας του, ο οποίος θα έχει μηδενική τιμή, αλλά θα διευκολύνει την ανάκτηση δεδομένων από μελλοντική έρευνα.

2. Εξισώσεις του Maxwell

Σε αυτή την προσομοίωση, το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί είναι ένα πρόβλημα ηλεκτρομαγνητισμού. Οι εξισώσεις του Maxwell μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση όλων των ζητημάτων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Πίνακας B.1: Εξισώσεις του Maxwell [6].

Διαφορική Μορφή	Ολοκληρωτική Μορφή	Σημασία
$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_C E dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}$	Νόμος Faraday
$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_C H dl = I + \oint_S \frac{\partial D}{\partial t} ds$	Νόμος Ampere με την προσθήκη του Maxwell
$\nabla \cdot D = \rho$	$\oint_C D ds = Q$	Νόμος Gauss
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_C B dl = 0$	Όχι μεμονωμένο μαγνητικό φορτίο (Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό)

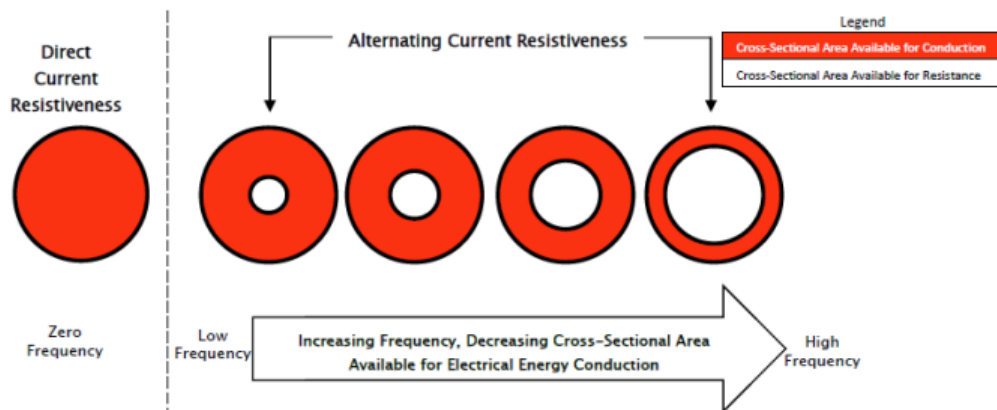
Ακόμα χρήσιμες είναι οι σχέσεις:

- $B = \mu \cdot H$
- $D = \varepsilon \cdot E$
- $J = \sigma \cdot E$

Όπου $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ και $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, με τον δείκτη r να υποδηλώνει την σχετική διαπερατότητα και σχετική επιτρεπτότητα αντίστοιχα του κάθε υλικού. Για μη μαγνητικά υλικά ισχύει συνήθως $\mu_r=1$. Σημειώνεται πως $\mu_0=4\pi 10^{-7} \frac{Ns^2}{c^2}$ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και $\varepsilon_0 = 8.85410^{-12} \frac{A^2s^4}{kgm^3}$ είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού. Ως σ συμβολίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού [6].

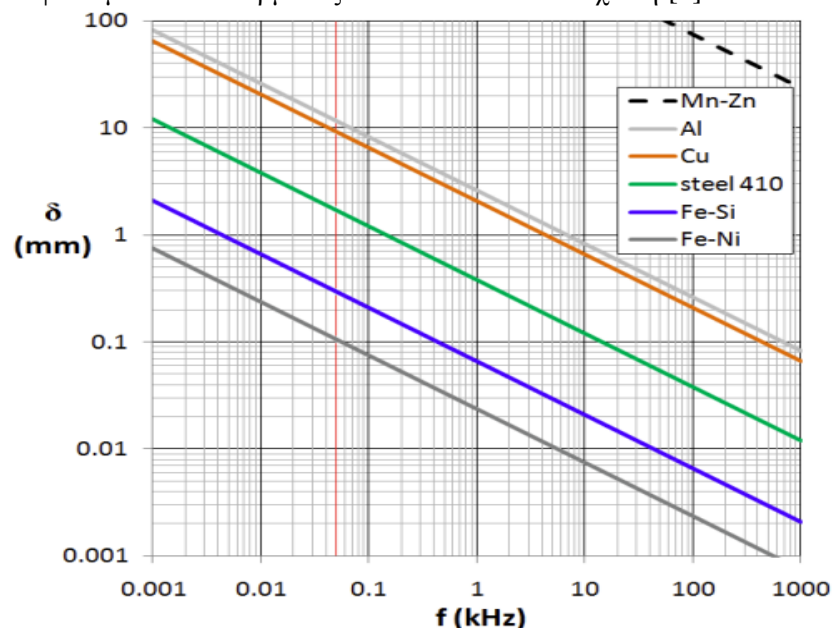
Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία θα διερευνηθούν σε εξαιρετικά χαμηλές συχνότητες στην προσομοίωση. Η συχνότητα είναι συγκεκριμένα ισοδυναμεί με 50Hz. Αυτό δείχνει ότι οι όροι $\frac{\partial B}{\partial t}$ και $\frac{\partial D}{\partial t}$ στις εξισώσεις του Maxwell είναι σχετικά ήσσονος σημασίας και η παράλειψή τους δεν θα έχει ως αποτέλεσμα σημαντική ανακρίβεια στα ευρήματα. Αυτό σημαίνει ότι στις χαμηλές συχνότητες κομμάτια ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μπορούν να μελετηθούν χωριστά. Αυτό είναι γνωστό ως ομοιοστατική ανάλυση. Ωστόσο, για να είναι σωστή αυτή η υπόθεση, ο χρόνος διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος πρέπει να είναι ουσιαστικά μικρότερος από τον χρόνο μιας περιόδου η μέγιστη διάσταση της διάταξης d πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος στα ηλεκτρομαγνητικά πυκνότερη διάταξη υλικού της.

Στις επερχόμενες προσομοιώσεις, η ακτίνα του αγωγού είναι χαμηλότερη από την επιφάνεια του βάθους, υπονοώντας ότι το ρεύμα ρέει σε ολόκληρη την περιοχή. Το δηλώνει το βάθος στο οποίο η πυκνότητα ρεύματος ισούται με το 37% της τιμής στην επιφάνεια του αγωγού. Αναμένεται ότι δε ρέει ρεύμα μέσω του χαλύβδινου πυρήνα λόγω της μεγαλύτερης ηλεκτρικής του αντιστάσεις (δύο τάξεις μεγέθους μικρότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα), οπότε το ρεύμα θα μεταφερθεί κυρίως μέσω του πολύ πιο αγωγίμο τμήματος αλουμινίου του αγωγού.



Εικόνα Β.1: Το επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγούς [4].

Ένας άλλος λόγος που αυτό το φαινόμενο δεν επηρεάζεται πραγματικά είναι επειδή ο αγωγός δεν είναι συμπαγής, αλλά μάλλον αποτελείται από κλώνους με εξαιρετικά μικρή ακτίνα και η επίδραση του φαινομένου του δέρματος είναι ουσιαστικά ελάχιστη [4].



Εικόνα Β.2: Συνάρτηση $\delta(f)$ για διάφορα υλικά.

Όταν ρέει ρεύμα υψηλής συχνότητας, το φαινόμενο του δέρματος αυξάνει την ενεργό αντίσταση του αγωγού επειδή η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη στα εξωτερικά στρώματα του αγωγού [4].

Γ. Θεωρητική Ανάλυση του Προβλήματος

Αυτή η ενότητα θα καλύψει εξισώσεις που απαιτούνται για την αντιμετώπιση ηλεκτρικών και θερμικών ζητημάτων. Θα εξεταστούν οι εξισώσεις για ηλεκτρικό δυναμικό και ηλεκτρικό πεδίο, ένταση ηλεκτρικού ρεύματος και μαγνητικό πεδίο, 6 ίσως για την αντιμετώπιση θεμάτων θερμικής θερμοκρασίας.

A. Ηλεκτρικό Δυναμικό και Ηλεκτρικό Πεδίο

Στις προσομοιώσεις που θα γίνουν υπάρχει τριφασική γραμμή απλού κυκλώματος ονομαστικής τάσης 150kV rms, τριφασική γραμμή απλού κυκλώματος ονομαστικής τάσης 400kV rms και τριφασική γραμμή διπλού κυκλώματος ονομαστικής τάσης 400kV rms. Την τάση την ορίζει ο χρήστης σαν μεταβλητή εισόδου στο πρόβλημα και την θέτει σε κάθε φάση ξεχωριστά ως εξής:

- Φάση 1: $\sqrt{2} \cdot 150 \sin(\omega t)$ kV
- Φάση 2: $\sqrt{2} \cdot 150 \sin(\omega t + 120)$ kV
- Φάση 3: $\sqrt{2} \cdot 150 \sin(\omega t + 240)$ kV
- Γη: $V = 0$ V

Ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται με τις εξισώσεις:

- $E = \nabla V$ (Εξίσωση Poisson για ηλεκτρικό δυναμικό)
- $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ (Καταστατική Εξίσωση)

Όπου:

E: το ηλεκτρικό πεδίο

V: το ηλεκτρικό δυναμικό

D: το ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης

$\epsilon_0 \epsilon_r$: οι σχετικές επιτρεπτότητες του κενού και του μέσου.

Επειδή το μοντέλο είναι γυμνή, δηλαδή χωρίς θωράκιση, αναμένουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν θα ταξιδεύει στον περιβάλλοντα χώρο και τελικά θα φτάσει στη γη. Όπως είναι φυσικό, όσο προχωράμε πιο μακριά από τους σωλήνες, η ένταση θα μειώνεται [5,9].

B. Το Μαγνητικό Πεδίο

Θεωρείται πως σε κάθε αγωγό φάσης ρέει συμμετρικό τριφασικό ρεύμα I.

Οι Εξισώσεις των ρευμάτων ενδεικτικά είναι οι:

- Φάση 1: $\sqrt{2} \cdot I_{rms} \sin(\omega t)$ A
- Φάση 2: $\sqrt{2} \cdot I_{rms} \sin(\omega t + 120)$ A
- Φάση 3: $\sqrt{2} \cdot I_{rms} \sin(\omega t + 240)$ A

Οι φάσεις ρεύματος και τάσης εξισώθηκαν χωρίς να επηρεαστούν οι υπολογισμοί γενικότητας. Πιστεύεται επίσης ότι το ρεύμα στον αγωγό διαχέεται ομοιόμορφα. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η συνάρτηση του ρεύματος I ως προς την ακτίνα του αγωγού. Ισχύει πως: $J = \frac{I_{ολικό}}{\pi R^2} \vec{z}$ και αν ολοκληρωθεί ως προς την επιφάνεια που σχηματίζουν τα διανύσματα θέσης \vec{r} , $\vec{\varphi}$

$$\text{έχουμε πως } I(r) = \iint r dr d\varphi = J \pi r^2 = \frac{I_{ολικό} \pi r^2}{\pi R^2} = \frac{I_{ολικό} r^2}{R^2}$$

Για την ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι γνωστό πως ισχύει:

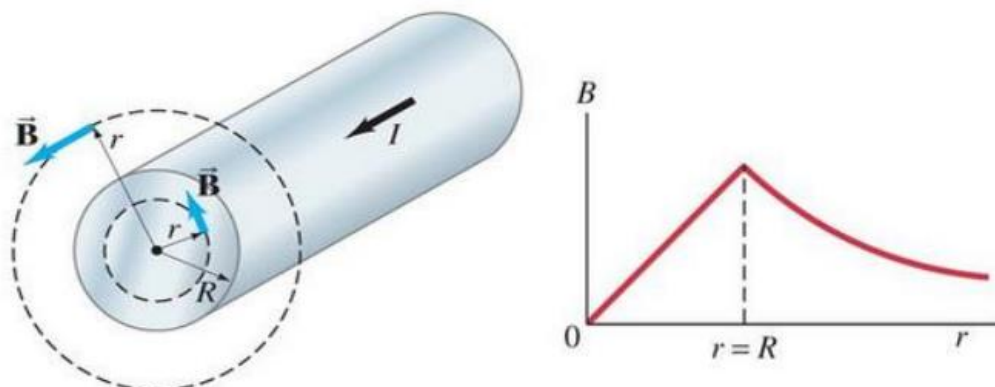
$$\oint H r d\varphi = I_{\text{εγκλειστο}} \Rightarrow 2\pi r H = \frac{I_{ολικό} r^2}{R^2} \Leftrightarrow H(r) = \frac{I_{ολικό} r}{2\pi R^2}$$

Η παραπάνω λύση ισχύει όταν επιδιώκει κανείς να υπολογίσει το μαγνητικό πεδίο εντός του αγωγού. Για τιμές του r μεγαλύτερες της ακτίνας του αγωγού θα ισχύει:

$$\oint H r d\varphi = I_{\text{εγκλειστο}} \Rightarrow 2\pi r H = I_{ολικό} \Leftrightarrow H = \frac{I_{ολικό}}{2\pi R^2}$$

Η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε έναν κυλινδρικό αγωγό που εκτείνεται κατά μήκος του άξονα Z είναι πάντα στο $\vec{\varphi}$. Είναι επίσης γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο B σχετίζεται

με την ένταση του μαγνητικού πεδίου H μέσω του συντελεστή που υποδεικνύεται στην προηγούμενη ενότητα, υπονοώντας ότι έχουν γραμμική σύνδεση.



Εικόνα Γ.1: Μαγνητικό πεδίο μέσα και έξω από αγωγό

Έτσι, μέσα στον αγωγό, το πεδίο προβλέπεται να αυξάνεται γραμμικά μέχρι την ακτίνα του αγωγού και στη συνέχεια να πέφτει με την απόσταση σε μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση [2,9].

C. Θερμοκρασία – Θερμότητα

Διαφορετικά είδη απωλειών μπορεί να προκύψουν σε έναν αγωγό. Οι απώλειες θερμότητας που παράγονται από την ωμική αντίσταση της γραμμής είναι ακόμα πιο σημαντικές. Οι απώλειες ισχύος λόγω αντίστασης ταξινομούνται ως εξής:

- $P = I^2 R W$

Όπου:

P: η ισχύς απωλειών λόγω θερμότητας

I: η rms τιμή του ρεύματος που διαρρέει τους αγωγούς

R: η ωμική αντίσταση των αγωγών

Για την μεταφορά της θερμότητας και της θερμοκρασίας στα υλικά ισχύει ο νόμος του Fourier για την μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής:

- $Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v + \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T)$

Όπου:

Q: πηγή θερμότητας W/m^3

ρ : πυκνότητα kg/m^3

C_p : ειδική θερμοχωρητικότητα $J/kg \cdot K$

T: θερμοκρασία K

k: θερμική αγωγιμότητα $W/m \cdot K$

v: ταχύτητα υγρού/ αερίου αν υπάρχει γύρω από στερεό (αν δεν υπάρχει $v=0$) m/s

Αυτή η εξίσωση είναι η διαφορική εκδοχή του νόμου του Fourier για τη μεταφορά θερμότητας παρουσία εξωτερικών πηγών θερμότητας. Έτσι ορίζεται η διαφορά θερμοκρασίας

τους προς τους ρυθμούς με τους οποίους η ενέργεια παρέχεται στα υλικά με τη μορφή θερμότητας.

Ακόμα πρέπει να ισχύει η καταστατική εξίσωση:

- $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

Οι απώλειες λόγω αγωγής που υπάρχουν στο δικό μας μοντέλο, δίνονται από τον τύπο:

- $$Q = h_A(T - T_{\text{ext}})$$

Όπου:

Q: η μεταφερόμενη ενέργεια ως θερμότητα από αγωγή

h: συντελεστής θερμότητας που εκφράζει τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν μεταξύ υλικού θερμοκρασίας T και εξωτερικού συνόρου θερμοκρασίας T_{ext} . Μονάδα μέτρησης είναι $W/m^2 \cdot K$

A: είναι η επιφάνεια του υλικού m^2

T: Θερμοκρασία υλικού

T_{ext} : Θερμοκρασία εξωτερικού συνόρου

Αυτή η εξίσωση προέρχεται από το νόμο της αγωγιμότητας θερμότητας του Fourier, ο οποίος δηλώνει ότι μεταδιδόμενη ενέργεια q είναι ανάλογη με τη θερμοκρασία στην οποία μεταφέρεται:

- $$q_i = -k \frac{\partial T}{\partial x_i} W/m^2$$

Το i υποδηλώνει τον αριθμό διαστάσεων του προβλήματος, $i=1,2,3 \dots$ και το x_i η απόσταση από το υλικό μέχρι το σύνορο που αλλάζει η θερμοκρασία.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για όλα τα υλικά όταν είναι ομογενή ιστροπικά.

Στα στερεά αν το υλικό δεν είναι ομογενές τότε η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να είναι ανανιστροπική, δηλαδή δεν είναι ίδια προς όλες τις κατευθύνσεις του υλικού.

Τότε ισχύει πως:

$$K = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix}$$

Δηλαδή το k από σταθερά έγινε τένσορας.

Έτσι η εξίσωση πλέον γίνεται:

- $$q_i = -\sum_j k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} W/m^2$$

D. Σύνδεση Θερμοκρασίας – Ηλεκτρικού Προβλήματος

Οι δύο προκλήσεις, η θερμική και ηλεκτρική, συνδέονται με την εξάρτηση από τη θερμοκρασία της ωμικής αντίστασης του αγωγού. Ως αποτέλεσμα των απωλειών, η θερμοκρασία και η αντίσταση των σωλήνων ανεβαίνουν αρχικά, οδηγώντας σε αύξηση των απωλειών. Όταν το σύστημα αγωγού-περιβάλλοντος φτάσει σε ισορροπία ακόμα αυτή η διαδικασία τελειώνει. Στη συνέχεια ακόμα η θερμοκρασία του αγωγού παραμένει σταθερή υπό την προϋπόθεση ότι το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό είναι παρόμοια σταθερό.

Χρήζει αναφοράς σε κάποιες ιδιότητες που ισχύουν γενικά στους αγωγούς καθώς διαρρέονται από ρεύμα και βρίσκονται σε κάποια θερμοκρασία.

➤ Ισχύει ο Νόμος του Ohm: $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

Όπου:

J: η χωρική πυκνότητα ρεύματος A/m³

σ: η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού S/m

E: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου V/m

➤ Από την μεριά των υλικών, έχουμε πως τα μέταλλα έχουν πολύ μεγάλη αγωγιμότητα της τάξεως 10⁶-10⁸S/m, οι ημιαγωγοί 10⁻⁴-10⁵S/m και οι μονωτές 10⁻¹⁵-10⁻¹⁶S/m.

➤ Η ειδική αγωγιμότητα σ συνδέεται με την ειδική αντίσταση του υλικού ρ (Ωm) με την σχέση:

$$\Sigma = \frac{1}{\rho} \text{ S/m}$$

➤ Η ειδική αντίσταση συνδέεται με την θερμοκρασία μέσω του μοντέλου της γραμμικής αντίστασης, από τον τύπο:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_{\text{ext}})) \text{ } \Omega\text{m}$$

Όπου:

ρ₀: ειδική αντίσταση υλικού στην θερμοκρασία αναφοράς Ωm.

α: θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης 1/κ.

T: θερμοκρασία

T_{ext}: θερμοκρασία αναφοράς

Έτσι προκύπτει και η εξάρτηση της ειδικής αγωγιμότητας από την θερμοκρασία $s = 1/\rho = \rho_0(1 + \alpha(T - T_{\text{ext}}))$.

➤ Η συνολική αντίσταση ενός αγωγού συνδέεται με την ειδική αντίσταση του υλικού με την σχέση:

$$R = \rho \frac{l}{A} \Omega.$$

Όπου:

l: το μήκος του αγωγού m.

A: η επιφάνεια της διατομής του αγωγού m²

ρ: ειδική αντίσταση του υλικού Ωm.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα ακόμα η σύνδεση μεταξύ της θερμοκρασίας και του ηλεκτρικού προβλήματος είναι σαφής, και ως εκ τούτου οι δυσκολίες θα συνδεθούν με την προσομοίωση[6,7,8].

Δ. Πακέτα Φυσικής του COMSOL Multiphysics

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει αναφορά στα μοντέλα της φυσικής που χρησιμοποιήθηκαν για να πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις των γραμμών μεταφοράς. Χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι επιλύτες:

- Electric Currents
- Magnetic Fields
- Heat Transfer in Solids

a. Electric Currents (ec)

Αυτός ο επιλύτης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της έντασης και της πυκνότητας του ηλεκτρικού πεδίου, της κατανομής ρεύματος και του ηλεκτρικού δυναμικού σε ένα αγωγίμο μέσο υπό συνθήκες όπου τα φαινόμενα επαγωγής θεωρούνται αμελητέα ακόμα δηλαδή όταν το βάθος του δέρματος του αγωγού είναι μεγαλύτερο από τον ίδιο τον αγωγό. Ανακαλύφθηκε κατά τους υπολογισμούς ότι το βάθος του δέρματος είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα του

αγωγού, επομένως είναι ασφαλές να χρησιμοποιηθεί το καθορισμένο πακέτο φυσικής για τους υπολογισμούς.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιεί αυτός ο επιλύτης για την επίλυση του μοντέλου είναι:

- $\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_{j,v}$
- $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_e$
- $\mathbf{E} = -\nabla V$

Όπου:

J: Χωρική πυκνότητα ρεύματος A/m³

Q: Πηγή ρεύματος A/m³

E: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου V/m

D: Ηλεκτρικό πεδίο μετατόπισης V/m

J_e: Χωρική πυκνότητα δέσμιων ρευμάτων A/m³

σ: Ειδική Ηλεκτρική Αγωγιμότητα S/m

Το ηλεκτρικό δυναμικό γίνεται αποδεκτό ως μεταβλητή εισόδου από το πρόγραμμα φυσικής. Ο χρήστης είναι σε θέση να παρέχει περιορισμούς ή τιμές για το ηλεκτρικό δυναμικό προκειμένου να λύσει σωστά την προσομοίωση ορίζοντας όρια οι χωρικές απαιτήσεις στη γεωμετρία του μοντέλου. Αυτοί οι ορισμοί θα συζητηθούν σε μεγαλύτερο βάθος στο κεφάλαιο 8 [6].

b. Magnetic Fields (mf)

Αυτή η διεπαφή φυσικής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, της ισχύος του και των επαγόμενων ρευμάτων σε ποινή ακόμα μαγνήτες και αγωγούς. Οι εξισώσεις αυτού του πακέτου φυσικής είναι οι εξισώσεις του Maxwell, ωστόσο βασίζονται στο διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό A, το οποίο έχει μονάδες μέτρησης WB/m:

- $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$
- $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$
- $\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \mathbf{J}_e$
- $\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$

Όπου:

J_e: Χωρική πυκνότητα δέσμιων ρευμάτων A/m³

σ: Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα S/m

E: Ένταση ηλεκτρικού πεδίου V/m

J: Χωρική πυκνότητα ρεύματος A/m³

V: Ταχύτητα m/s

B: Μαγνητικό πεδίο T

H: Ένταση Μαγνητικού πεδίου A/m

A: Διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό Wb/m

Στο πακέτο φυσικής μαγνητικό δυναμικό A, το διάνυσμα εισάγεται ως μεταβλητή εισόδου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσφέρει τους απαραίτητους αριθμούς και να ορίσει τους περιορισμούς για την προσομοίωση για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ορισμούς ρευμάτων σε επιφάνειες ή χώρους [6].

c. Heat Transfer in Solids (ht)

Αυτή η διεπαφή φυσικής προσομοιώνει τη μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγιμότητας, ακτινοβολίας και μεταγωγής. Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την επίλυση του μοντέλου από αυτό το πρόγραμμα φυσικής είναι η διαφορική μορφή της εξίσωσης του Fourier για τη θερμότητα, η οποία μπορεί να έχει και άλλες συνεισφορές θερμότητας, όπως πηγές:

- $$Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p v \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T)$$

Όπου:

Q: Πηγή θερμότητας W/m³

ρ: Πυκνότητα kg/m³

C_p: Ειδική Θερμοχωρητικότητα J/kg·K

T: Θερμοκρασία K

k: Θερμική Αγωγιμότητα W/m·K

v: Ταχύτητα υγρού/αερίου αν υπάρχει γύρω από στερεό (αν υπάρχει v=0) m/s

Όταν η θερμοκρασία T παρέχεται ως μεταβλητή εισόδου στο πακέτο φυσικής, δίνεται στον χρήστη η επιλογή, μέσω ορισμών στη γεωμετρία του μοντέλου, να εισάγει τιμές για τη θερμοκρασία σε επιφάνειες ή χώρους και να τροφοδοτεί θερμικά την ισχύ του συστήματος σε διάφορες περιοχές ή περιθώρια του μοντέλου [6].

3. Επιλογή Μεθόδου Επίλυσης

Το COMSOL δίνει τη δυνατότητα να επιλεγεί τι τύπος μελέτης θα διεκπεραιωθεί, ανάλογα με τα πακέτα φυσικής που έχουν οριστεί. Όλες οι μελέτες που μπορεί να διεξάγει κανείς από το λογισμικό είναι οι εξής:

Πίνακας Δ.1: Αναλύσεις στο COMSOL [6].

Ανάλυση Ιδιοσυχνότητας
Ανάλυση Ιδιοτιμής
Μελέτη στο πεδίο της συχνότητας
Μελέτη στο πεδίο του χρόνου
Στατική ανάλυση

Έχοντας διαλέξει τα πακέτα φυσικής που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα το COMSOL μας δίνει τις εξής επιλογές:

Πίνακας Δ.2: Πακέτα φυσικής και μελέτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν [6].

<ul style="list-style-type: none">• Electric Currents• Magnetic Fields• Heat Transfer in Solids	<ul style="list-style-type: none">• Μελέτη στο πεδίο της συχνότητας• Μελέτη στο πεδίο του χρόνου
---	---

Η επιλογή της έρευνας του χρήστη εξαρτάται αποκλειστικά από τον ίδιο και τις δύο μελέτες θα αποδώσουν τα ίδια αποτελέσματα. Η μελέτη στο αντικείμενο του θα ευνοηθεί καθώς απαιτεί λιγότερους πόρους υπολογιστή και, κατά συνέπεια, χρειάζεται λιγότερος χρόνος για την παροχή ευρημάτων και την επίλυση του μοντέλου [6].

Βιβλιογραφία

- [1] Βασίλειος Κ. Παπαδιάς, “Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής τάσης – Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας”, Αθήνα 1999.
- [2] ΔΕΗ - Διεύθυνση Μελετών Κατασκευών Έργων Μεταφοράς (Τομέας Μελετών Εξοπλισμού Γραμμών Μεταφοράς), “ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΔΕΗ & ΣΧΕΔΙΑ”, Δεκέμβριος 1997.
- [3] <http://www.admie.gr>
- [4] Janusz Tuśnio, “Overhead Power Transmission Lines As A Threat To Public Health And Safety” Proc. Of the 10th International Conference of Modern Building Materials Structures And Techniques 2010.
- [5] «ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ Τόμος Α & Τόμος Β», Ρουμελιώτης Ι & Τσαλαμέγκας Ι, ΕΛΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, 2013.
- [6] «ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΚΥΜΑΤΑ 2η έκδοση», David K. Cheng, ΕΚΔΟΣΕΙΣ Fountas.
- [7] «Εισαγωγή στον Υπολογιστικό Ηλεκτρομαγνητισμό», Κωνσταντίνος Σώρας, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- [8] Chima Clement, “Skin Effect in Electrical Conductors: Any Commercially Viable Solution?”, University of Aberdeen, 2014.
- [9] <https://www2.ph.ed.ac.uk/~mevans/em/lec4.pdf>.
- [10] “ComSol Multiphysics User’s Guide”, Version 5.6.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity.
- [12] S. L. Rickman, C. J. Iannello, “Heat Transfer Analysis In Wire Bundles For Aerospace Vehicles”, Proc. of the 14th International Conference of Simulation and Experiments in Heat Transfer and its Applications, 2016.
- [13] Janusz Tuśnio, “Overhead power transmission lines as a threat to public health and safety”, Proc. of the 10th International Conference of Modern Building Materials Structures and Techniques, 2010.