ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ιωάννης Παστός του Γεωργίου

Αριθμός Μητρώου: 1069591

«Μελέτη σφαλμάτων δικτύων μέσης τάσης της Επαρχίας Λεμεσού»

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Πυργιώτη Ελευθερία

ΠΑΤΡΑ 2025

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών.

Ιωάννης Παστός

© 2025 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Το σύνολο της εργασίας αποτελεί πρωτότυπο έργο, παραχθέν από τον Ιωάννη Παστό, και δεν παραβιάζει δικαιώματα τρίτων καθ' οιονδήποτε τρόπο. Αν η εργασία περιέχει υλικό, το οποίο δεν έχει παραχθεί από τον/την ίδιο/α, αυτό είναι ευδιάκριτο και αναφέρεται ρητώς εντός του κειμένου της εργασίας ως προϊόν εργασίας τρίτου, σημειώνοντας με παρομοίως σαφή τρόπο τα στοιχεία ταυτοποίησής του, ενώ παράλληλα βεβαιώνει πως στην περίπτωση χρήσης αυτούσιων γραφικών αναπαραστάσεων, εικόνων, γραφημάτων κ.λπ., έχει λάβει τη χωρίς περιορισμούς άδεια του κατόχου των πνευματικών δικαιωμάτων για την συμπερίληψη και επακόλουθη δημοσίευση του υλικού αυτού.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

«Μελέτη σφαλμάτων δικτύων μέσης τάσης της Επαρχίας Λεμεσού»

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Ιωάννης Παστός του Γεωργίου

Αριθμός Μητρώου: 1069591

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

18/06/2025

και εξετάστηκε από την ακόλουθη εξεταστική επιτροπή:

Ελευθερία Πυργιώτη, Καθηγήτρια

Παναγής Βοβός, Επίκουρος Καθηγητής

Βασίλειος Καλαντώνης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Η Επιβλέπουσα	Ο Διευθυντής του Τομέα
Ελευθερία Πυργιώτη, Καθηγήτρια	Επαμεινώνδας Μητρονίκας Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελέτη σφαλμάτων δικτύων μέσης τάσης της Επαρχίας Λεμεσού

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ: **ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΟΣ:**

ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΑΣΤΟΣ **ΕΛΕΥΘΕΡΙΑ ΠΥΡΓΙΩΤΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση και καταγραφή των βλαβών που προκαλούνται από κεραυνούς στο εναέριο δίκτυο μέσης τάσης της ΑΗΚ στην Επαρχία Λεμεσού. Γίνεται λεπτομερής μελέτη για τον υπολογισμό των θεωρητικών σφαλμάτων λόγω κεραυνών για όλες τις γραμμές διανομής, ενώ παράλληλα εξετάζονται και επεξεργάζονται τα πραγματικά σφάλματα που έχουν καταγραφεί στη βάση δεδομένων της ΑΗΚ. Στόχος είναι η σύνδεση των πραγματικών σφαλμάτων με τα αντίστοιχα θεωρητικά, ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση και η αξιολόγηση των επιπτώσεων των κεραυνικών πληγμάτων στο δίκτυο μέσης τάσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο της έρευνας, εξετάζεται λεπτομερώς το φαινόμενο της ηλεκτρικής εκκένωσης, γνωστό και ως κεραυνός. Παρουσιάζονται οι κύριες έννοιες που το χαρακτηρίζουν, καθώς και οι διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να προκληθεί.

Το δεύτερο κεφάλαιο εξετάζει την ιστορική ανάπτυξη του τομέα του ηλεκτρισμού, ξεκινώντας από την αρχή των πρώτων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και φτάνοντας μέχρι τη σημερινή μορφή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Παράλληλα, περιγράφεται η δομή των ΣΗΕ και αναλύονται λεπτομερώς οι κύριες λειτουργίες τους, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη και οργανωμένη παρουσίαση του θέματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση του οδηγού IEEE που αφορά τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των γραμμών διανομής μέσης τάσης απέναντι στους κεραυνούς. Αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των γραμμών και προτείνονται μέτρα για την ενίσχυση της προστασίας τους. Ο συγκεκριμένος οδηγός αποτελεί βασικό εργαλείο για τη μελέτη του δικτύου διανομής μέσης τάσης στην Επαρχία Λεμεσού.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται αναλυτική ανάλυση των γραμμών διανομής στην περιοχή της Επαρχίας Λεμεσού. Αρχικά, περιγράφεται η κλιματική και γεωγραφική κατάσταση

της περιοχής που εξετάζεται, ενώ στη συνέχεια διευκρινίζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των γραμμών, βασισμένη στον οδηγό IEEE που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά τα ευρήματα της ανάλυσης για το δίκτυο μέσης τάσης, συνοδευόμενα από στατιστικά στοιχεία για τις βλάβες, από τα οποία προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα.

EXTENSIVE ENGLISH SUMMARY

Study of Faults of Medium Voltage Networks of the Limassol District

STUDENT NAME, SURNAME: **SUPERVISOR NAME, SURNAME:**

IOANNIS PASTOS **ELEFTHERIA PYRGIOTI**

This thesis aims to analyze and record the damages caused by lightning in the medium-voltage overhead network of EAC in the Limassol District. A detailed study is carried out to calculate the theoretical errors due to lightning for all distribution lines, while at the same time the actual errors recorded in the EAC database are examined and processed. The aim is to link the actual faults with the corresponding theoretical ones, in order to facilitate the understanding and evaluation of the effects of lightning strikes on the medium voltage network.

In the first chapter of the research, the phenomenon of electrical discharge, also known as lightning, is examined in detail. The main concepts that characterize it are presented, as well as the various ways in which it can be caused.

The second chapter examines the historical development of the electricity sector, starting from the beginning of the first electricity grids and reaching the current form of Electricity Systems. At the same time, the structure of the Chambers is described, and their main functions are analyzed in detail, providing a comprehensive and organized presentation of the issue.

In the third chapter, an analysis of the IEEE Guide on Improving the Lightning Resistance of Medium Voltage Distribution Lines is carried out. The factors affecting the effectiveness of the lines are analyzed and measures are proposed to strengthen their protection. This guide is a key tool for the study of the medium voltage distribution network in the Limassol District.

In the fourth chapter, a detailed analysis of the distribution lines in the area of the Limassol District is carried out. First, the climatic and geographical situation of the area under examination is described, and then the methodology followed for the study of the lines is clarified, based on the IEEE guide mentioned in the previous chapter. Finally, the findings of the analysis for the medium voltage network are briefly presented, accompanied by breakdown statistics, from which important conclusions emerge.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών, για το Ακαδημαϊκό Έτος 2024 – 2025. Το αντικείμενο της εργασίας αφορά τη μελέτη των σφαλμάτων δικτύων μέσης τάσης στην Επαρχία Λεμεσού για την περίοδο 2021 - 2025. Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη της Καθηγήτριας Πυργιώτη Ελευθερίας, η οποία προσέφερε ανεκτίμητη καθοδήγηση και στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη προς την επιβλέπουσα Καθηγήτρια Πυργιώτη Ελευθερία για την πολύτιμη βοήθειά της, καθώς και προς τον τεχνικό μηχανικό της ΑΗΚ, Κωνσταντίνο Κωνσταντινίδη, για την παροχή κρίσιμων δεδομένων που συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας. Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

Περιεχόμενα

1 Κεφάλαιο 1: Κεραυνός 1

1.1 Μύθος και εξήγηση 1

1.2 Ηλεκτρική κατάσταση του πλανήτη 2

1.3 Η Ηλεκτρική συμπεριφορά του σύννεφου 3

1.4 Ορισμοί του κεραυνού 4

1.5 Είδη κεραυνών 5

1.6 Οι μηχανισμοί του κεραυνού 6

1.6.1 Έναρξη εκκένωσης κεραυνού 6

1.6.2 Φάση οχετού επιστροφής 7

1.6.3 Συνδετικός οχετός 8

1.6.4 Αρχή λειτουργίας των αλεξικέραυνων και απόσταση διάσπασης 9

1.7 Συχνότητα κεραυνών 10

2 Κεφάλαιο 2: Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας 13

2.1 Ιστορική αναδρομή 13

2.2 Ηλεκτρισμός στην Κύπρο 15

3 Κεφάλαιο 3: IEEE – Οδηγός βελτίωσης της αντικεραυνικής συμπεριφοράς στις εναέριες γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 19

3.1 Εισαγωγή 19

3.2 Σκοπός και αναφορές 19

3.3 Ορισμοι 20

3.4 Παράμετροι κεραυνών 25

3.4.1 Πτώση κεραυνών 25

3.4.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κεραυνού 28

3.5 Συμπεριφορά εναέριων γραμμών διανομής σε περίπτωση κεραυνού 31

3.5.1 Κεραυνικά πλήγματα σε εναέριες γραμμές 32
3.5.2 Βραχυκύκλωμα από επαγόμενη τάση 35
3.6 Επίπεδο μόνωσης γραμμών διανομής 38
3.6.1 CFO τάση της συνδυασμένης μόνωσης 39
3.6.2 Προσδιορισμός της CFO τάσης για κατασκευές με μονώσεις σειράς 40
3.6.3 Τεχνικά ζητήματα 43
3.6.4 Ικανότητα ξύλου για διακοπή του τόξου 44
3.6.5 Καταστροφή του ξύλου λόγω κεραυνού 46
3.7 Προστασία γραμμών διανομής με προστατευτικούς αγωγούς 46
3.7.1 Γωνία προστασίας 48
3.7.2 Απαιτήσεις μόνωσης 49
3.7.3 Αποτελεσματικότητα επιπέδου γείωσης και μόνωσης 49
3.7.4 Αγωγοί προστασίας και αλεξικέραυνα 50
3.8 Προστασία γραμμών με αλεξικέραυνα 51
3.8.1 Μήκος αγωγών σύνδεσης αλεξικέραυνων 52
3.8.2 Βραχυκυκλώματα από έμμεσα πλήγματα 52
3.8.3 Βραχυκυκλώματα από άμεσα πλήγματα 53
4 Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις υπολογισμοί και αποτελέσματα 57
4.1 Εισαγωγή 57
4.2 Μεθοδολογία Θεωρητικού Υπολογισμού Σφαλμάτων 58
4.2.1 Βραχυκυκλώματα από άμεσα πλήγματα 58
4.2.2 Βραχυκυκλώματα από έμμεσα πλήγματα 63
4.2.3 Συνολικός αριθμός βραχυκυκλωμάτων 65
4.3 Θεωρητικός Υπολογισμός Σφαλμάτων Γραμμών 66
4.3.1 Βραχυκυκλώματα από άμεσα πλήγματα 67

4.3.2 Επαγόμενα Βραχυκυκλώματα 68
4.3.3 Συνολικά Βραχυκυκλώματα 68
4.4 Σύγκριση Θεωρητικών – Πραγματικών Σφαλμάτων 69
5 Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα 75
6 Βιβλιογραφία 77

1 Κεφάλαιο 1: Κεραυνός

1.1 Μύθος και εξήγηση

Οι κεραυνοί, από την αρχαιότητα, αποτελούσαν ένα εντυπωσιακό φυσικό φαινόμενο που γέμιζε τους ανθρώπους με δέος και θαυμασμό, ενώ παράλληλα πυροδοτούσε τη φαντασία τους. Χωρίς τις γνώσεις και τα εργαλεία για να το εξηγήσουν, οι άνθρωποι τότε το θεωρούσαν είτε σημάδι Θεϊκής οργής είτε παρουσία του Θείου.

Στην ελληνική μυθολογία, ο κεραυνός αποτελούσε ένα από τα ισχυρά όπλα του Δία, με τα οποία επέβαλλε τιμωρίες τόσο στους ανθρώπους όσο και στους θεούς. Σύμφωνα με τον μύθο, οι κεραυνοί ήταν δημιουργήματα του θεού Ήφαιστου. Οι Κύκλωπες, αφού απελευθερώθηκαν από τον Τάρταρο χάρη στον Δία, του χάρισαν τον κεραυνό, τη βροντή και την αστραπή. Αυτά τα δώρα βοήθησαν τον Δία να πολεμήσει τον Κρόνο και τους Τιτάνες, ανοίγοντας τον δρόμο για να κατακτήσει την εξουσία.

Σε αρκετούς μύθους, ο κεραυνός δεν εμφανίζεται ως μέσο τιμωρίας, αλλά ως εργαλείο επίλυσης προβλημάτων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ιστορία της γέννησης του Διόνυσου. Σύμφωνα με τον μύθο, ο Δίας, για να αντιμετωπίσει τη ζήλια της Ήρας, αναγκάστηκε να προκαλέσει τον θάνατο της ερωμένης του (και μητέρας του Διόνυσου), η οποία ήταν έγκυος. Με τη χρήση του κεραυνού, ο Δίας προκάλεσε την πρόωρη γέννηση του γιου του. Στη συνέχεια, για να ολοκληρωθεί η κύηση, έραψε τον Διόνυσο στον μηρό του, προστατεύοντάς τον μέχρι να είναι έτοιμος να γεννηθεί πλήρως.

Σε πολλούς πολιτισμούς, οι κεραυνοί συνδέονταν με θεϊκές οντότητες. Στους Κέλτες, ο Ταράνης θεωρούνταν θεός των κεραυνών, δημιουργώντας τους μέσω της κίνησης ενός κοσμικού τροχού. Στη σλάβικη μυθολογία, ο Περούν ήταν ο θεός του ουρανού και των κεραυνών. Στην σκανδιναβική παράδοση, υπάρχουν δύο αντιλήψεις: είτε ο Θωρ κυριάρχησε στους κεραυνούς ως προστάτης των ανθρώπων, είτε ο θεός Donar ήταν υπεύθυνος για φαινόμενα όπως η αστραπή και η βροντή. Στην Ινδία, ο Ίντρα ήταν ο θεός που χρησιμοποιούσε τους κεραυνούς για να πολεμά δαίμονες. Στη φινλανδική μυθολογία, ο Ούκκο οδηγούσε το άρμα του μέσα από τα σύννεφα ή

δημιουργούσε κεραυνούς όταν συναντιόταν με τη σύζυγό του, Άκκα. Στην Κίνα, ο Ζιν Σιν λατρευόταν ως θεός των κεραυνών, διασχίζοντας τα σύννεφα πάνω από ουράνια τύμπανα κεραυνών. Οι Ρωμαίοι υιοθέτησαν την ελληνική θεολογία, αλλάζοντας μόνο τα ονόματα των θεών. Στους Ίνκας, η αστραπή και η βροντή θεωρούνταν παιδιά του Ήλιου και της Σελήνης, ελεγχόμενα από τον πανίσχυρο Βασιλιά-Θεό.

Το 1972, ο κεραυνός έχασε τη μυστηριώδη και θεϊκή του υπόσταση χάρη στο διάσημο πείραμα με τον χαρταετό που πραγματοποίησε ο Βενιαμίν Φραγκλίνος. Μέσα από αυτό το πείραμα, αποδείχθηκε ότι ο κεραυνός δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας τύπος στατικού ηλεκτρισμού. Έτσι, ο κεραυνός απογυμνώθηκε από την υπερφυσική του διάσταση και εντάχθηκε στα συνηθισμένα φυσικά φαινόμενα.

1.2 Ηλεκτρική κατάσταση του πλανήτη

Η Γη είναι συνεχώς φορτισμένη με ένα αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο που ανέρχεται περίπου στα $5x10^5$ C. Αυτό το φορτίο δημιουργεί, σε συνθήκες καλοκαιρίας, ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνειά της, με κατεύθυνση από την ατμόσφαιρα προς τη Γη, και ένταση περίπου 0.13 kV/m. Στην ατμόσφαιρα, κυρίως στα κατώτερα στρώματα, υπάρχει μια ισοδύναμη ποσότητα θετικού φορτίου. Η κατανομή αυτού του θετικού φορτίου προκαλεί σταδιακή εξασθένιση του ηλεκτρικού πεδίου της Γης όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Εξαιτίας αυτού του κατακόρυφου πεδίου, η Γη διατηρεί διαρκώς μια διαφορά δυναμικού 300 kV σε σχέση με τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Τα ιονισμένα σωματίδια με θετικό και αρνητικό φορτίο, που δημιουργούνται από την κοσμική ακτινοβολία, τη φυσική ραδιενέργεια και άλλους παράγοντες, καθιστούν τον αέρα αγώγιμο. Αυτή η αγωγιμότητα, σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό πεδίο της ατμόσφαιρας, προκαλεί την κίνηση των ιόντων αντίθετων φορτίων σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Κανονικά, αυτό θα οδηγούσε στην εξουδετέρωση του ηλεκτρικού πεδίου της Γης και στην απώλεια του φορτίου της. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει, καθώς η Γη λαμβάνει συνεχώς αρνητικό φορτίο, το οποίο ισοδυναμεί με το ρεύμα των θετικών ιόντων. Οι επιστήμονες εκτιμούν ότι η κύρια πηγή αυτού του αρνητικού φορτίου είναι τα ηλεκτρισμένα σύννεφα και οι κεραυνοί.

1.3 Η Ηλεκτρική συμπεριφορά του σύννεφου

Ένα σύννεφο συνήθως παρουσιάζει μια ηλεκτρική δομή που μοιάζει με δίπολο, όπου το θετικό φορτίο συγκεντρώνεται στην κορυφή και το αρνητικό κοντά στη γη. Δύο κύριες θεωρίες εξηγούν τη συγκέντρωση του ηλεκτρικού φορτίου στο σύννεφο: α) Η πρώτη θεωρεί ότι το φορτίο προκύπτει από τη φόρτιση των σταγονιδίων του νέφους καθώς αρχίζουν να πέφτουν προς το έδαφος, και β) η δεύτερη υποστηρίζει ότι η μεταφορά φορτίων σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας πραγματοποιείται μέσω ανοδικών ρευμάτων που προκαλούνται από θερμοκρασιακές διαφορές.

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ένα σύννεφο με την ηλεκτρική εικόνα που περιεγράφηκε, διαταράσσει το φυσικό πεδίο καλοκαιρίας, οδηγώντας στην αντιστροφή του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει και η κατεύθυνση του ρεύματος καλοκαιρίας που κατευθύνεται προς τη γη. Η χρονική σταθερά για την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου ενός σύννεφου είναι περίπου δύο λεπτά, πράγμα που σημαίνει ότι το σύννεφο μεταβαίνει από ουδέτερη σε ηλεκτρισμένη κατάσταση μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Όταν σχηματιστεί ένα ηλεκτρισμένο νέφος, το ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει σε καιρό καλοκαιρίας πρώτα αντιστρέφεται και στη συνέχεια, με την εμφάνιση της κακοκαιρίας, φτάνει σε εντάσεις που αγγίζουν τα 10 kV/m. Αυτό το πεδίο διαταράσσεται στιγμιαία κάθε φορά που συμβαίνει εκκένωση κεραυνού ή εσωτερική εκκένωση μέσα στο νέφος, αλλά μετά αποκαθίσταται. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο που προκαλείται στην επιφάνεια της γης λόγω της παρουσίας του ηλεκτρισμένου νέφους γίνει αρκετά ισχυρό, ξεκινά ιονισμός από συγκρούσεις σε αιχμηρές προεξοχές του εδάφους. Τα θετικά ιόντα μεταφέρονται από τη γη μέσω αγωγών προς την ατμόσφαιρα. Το ρεύμα που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία ονομάζεται ρεύμα ιονισμού της προεξοχής. Αυτό το ρεύμα, μαζί με τα φορτία που δημιουργούνται στον χώρο, διαδραματίζει ουσιαστικό ρόλο στην εκκένωση του κεραυνού, ειδικά στα τελικά στάδια της εξέλιξής του.

Η ταχύτητα αυτών των ιόντων είναι αρκετά χαμηλή σε σύγκριση με την ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας, με αποτέλεσμα η κίνησή τους να εξαρτάται κυρίως από την κίνηση του ανέμου. Έτσι, πολλά από τα ιόντα διασκορπίζονται μέσα στην ατμόσφαιρα. Συνεπώς, η ένταση του ρεύματος επηρεάζεται από τη δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου, το ύψος του αγωγού

που το δημιουργεί, καθώς και από την ταχύτητα του ανέμου. Για παράδειγμα, σε αγωγούς που βρίσκονται σε ύψος μερικών δεκάδων μέτρων, η ένταση του ρεύματος είναι της τάξης λίγων μA, ενώ σε περιοχές με μεγαλύτερο υψόμετρο, όπου τα σύννεφα είναι πιο πυκνά, μπορεί να φτάσει μερικά mA.

Εκκενώσεις μέσα στα σύννεφα ή προς το έδαφος μπορούν να εμφανιστούν όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου κοντά στην επιφάνεια φτάσει ή ξεπεράσει περίπου τα 3 kV/m. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι όλα τα σύννεφα ικανά να προκαλέσουν ηλεκτρικές εκκενώσεις, ακόμα και αν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες φόρτισης.

1.4 Ορισμοί του κεραυνού

- **Πολικότητα κεραυνού**: Η εκκένωση ενός "αρνητικού νέφους" προς τη γη γίνεται με ένα "αρνητικό κεραυνό" κι ενός θετικού νέφους με ένα "θετικό κεραυνό".

- **Πολικότητα ρεύματος του κεραυνού**: Κατά την εκκένωση ενός "αρνητικού νέφους" ρέει προς την γη ένα "αρνητικό ρεύμα" και αντίθετα.

- **Κατεύθυνση οχετού προεκκένωσης**: Ένας κατερχόμενος οχετός προεκκένωσης οδεύει από το σύννεφο προς το έδαφος ενώ ένας ανερχόμενος από το έδαφος προς το σύννεφο. Ένας ανερχόμενος οχετός σύνδεσης είναι μια εκκένωση που ξεκινά από το έδαφος και συναντά σε μια ενδιάμεση θέση μεταξύ σύννεφου και εδάφους έναν κατερχόμενο

- **Πολικότητα οχετού προεκκένωσης**: Η πολικότητα ενός οχετού προεκκένωσης ταυτίζεται με την πολικότητα του φορτίου της θέσης που ξεκινάει. Οπότε από ένα θετικό σύννεφο ξεκινά ένας θετικός οχετός προεκκένωσης και αντίθετα. Από μια προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο ξεκινά ένας αρνητικός οχετός προεκκένωσης.

- **Πολικότητα ηλεκτρικού πεδίου**: Το ηλεκτρικό πεδίο κάτω από ένα αρνητικό σύννεφο ορίζεται σαν αρνητικό και το αντίθετο.

1.5 Είδη κεραυνών

Ο κεραυνός δημιουργείται λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων που σχηματίζονται από αντίθετα φορτία μέσα σε ένα σύννεφο ή ανάμεσα σε γειτονικά σύννεφα. Αυτή η αλληλεπίδραση μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία έντονων ηλεκτρικών πεδίων, τα οποία με τη σειρά τους ενδέχεται να οδηγήσουν σε ηλεκτρική εκκένωση είτε εντός του ίδιου του σύννεφου είτε ανάμεσα στο σύννεφο και το έδαφος. Το θετικό ή αρνητικό φορτίο που συσσωρεύεται σε ένα μέρος του σύννεφου, μαζί με το αντίθετο φορτίο που προκαλείται στο έδαφος, σχηματίζουν μια περιοχή με εξαιρετικά ισχυρά ηλεκτρικά πεδία. Η διαδικασία εκκίνησης του κεραυνού μπορεί να ξεκινήσει από το σύννεφο με έναν κατερχόμενο οχετό ή από το έδαφος με έναν ανερχόμενο οχετό, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Συνολικά, υπάρχουν τέσσερις βασικές περιπτώσεις και οκτώ διαφορετικοί τρόποι έναρξης της διαδικασίας του οχετού που οδηγεί στον κεραυνό. Αυτές οι περιπτώσεις είναι:

Περίπτωση 1α: Κατερχόμενος αρνητικός οχετός προεκκένωσης που αρχίζει από ένα αρνητικό σύννεφο.

Περίπτωση 1β: Κατερχόμενη αρνητική εκκένωση, πηγάζει από ένα αρνητικό σύννεφο με έναν κατερχόμενο οχετό προεκκένωσης και αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τύπο κεραυνού που παρατηρείται στα 90% περίπου των περιπτώσεων.

Περίπτωση 2α: Ανερχόμενος θετικός οχετός προεκκένωσης που αρχίζει από μια προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα αρνητικό σύννεφο.

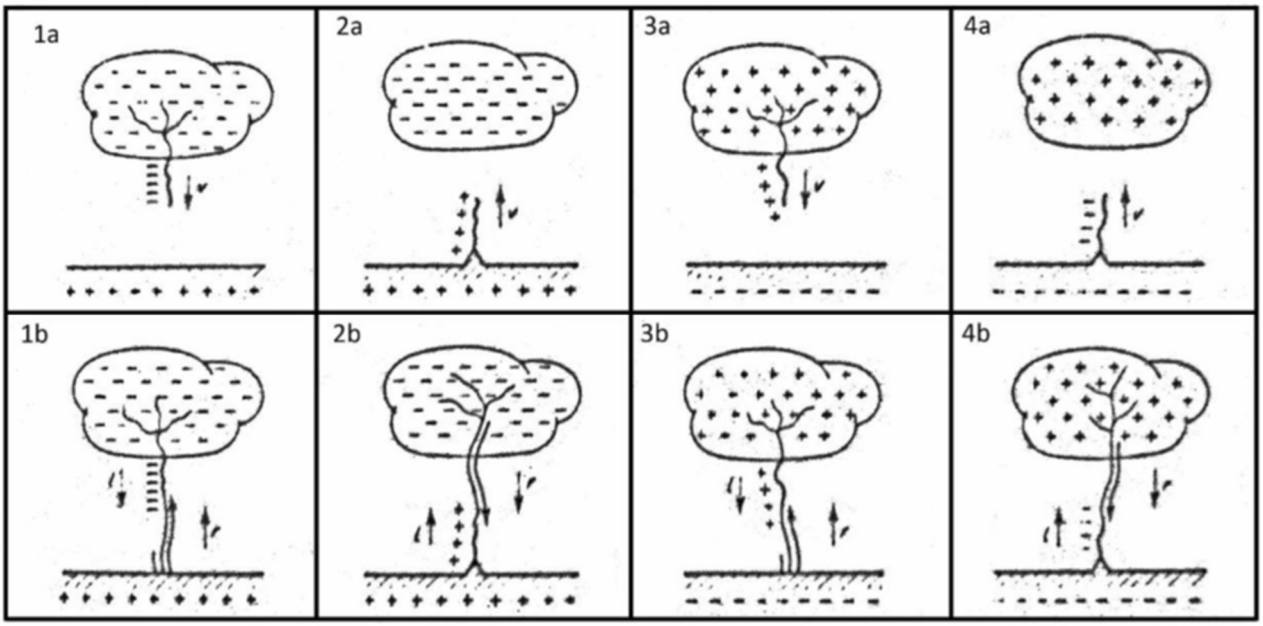
Περίπτωση 2β: Ανερχόμενος θετικός οχετός / αρνητική εκκένωση, πηγάζει από μια προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα αρνητικό σύννεφο.

Περίπτωση 3α: Κατερχόμενος θετικός οχετός προεκκένωσης που αρχίζει από ένα θετικό σύννεφο.

Περίπτωση 3β: Κατερχόμενη θετική εκκένωση , πηγάζει από ένα θετικό σύννεφο (πολύ σπάνια περίπτωση).

Περίπτωση 4α: Ανερχόμενος αρνητικός οχετός προεκκένωσης που αρχίζει από μια προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο.

Περίπτωση 4β: Ανερχόμενος αρνητικός οχετός /θετική εκκένωση , πηγάζει από μια προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο.



Εικόνα 1.1: Είδη κεραυνών [1].

Ο κεραυνός τύπου 4β εντοπίστηκε για πρώτη φορά στον σταθμό του San Salvatore και μελετήθηκε λεπτομερώς από τον Berger. Αυτός ο τύπος κεραυνού θεωρείται ο πιο ισχυρός, καθώς συνδέεται με τις υψηλότερες εντάσεις ρεύματος που έχουν ποτέ καταγραφεί.

1.6 Οι μηχανισμοί του κεραυνού

1.6.1 Έναρξη εκκένωσης κεραυνού

Σε περιοχές του σύννεφου όπου το ηλεκτρικό φορτίο είναι πολύ πυκνό, το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να φτάσει σε υψηλή ένταση. Αυτή η ένταση, σε συνδυασμό με την αραιή πυκνότητα του

αέρα (που οφείλεται στο υψόμετρο) και άλλους παράγοντες που ενισχύουν το πεδίο, μπορεί να προκαλέσει ιονισμό των μορίων του αέρα μέσω συγκρούσεων ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το αρχικό στάδιο μιας εκκένωσης. Στη συνέχεια, σχηματίζονται σφαίρες κατά μήκος των γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου.

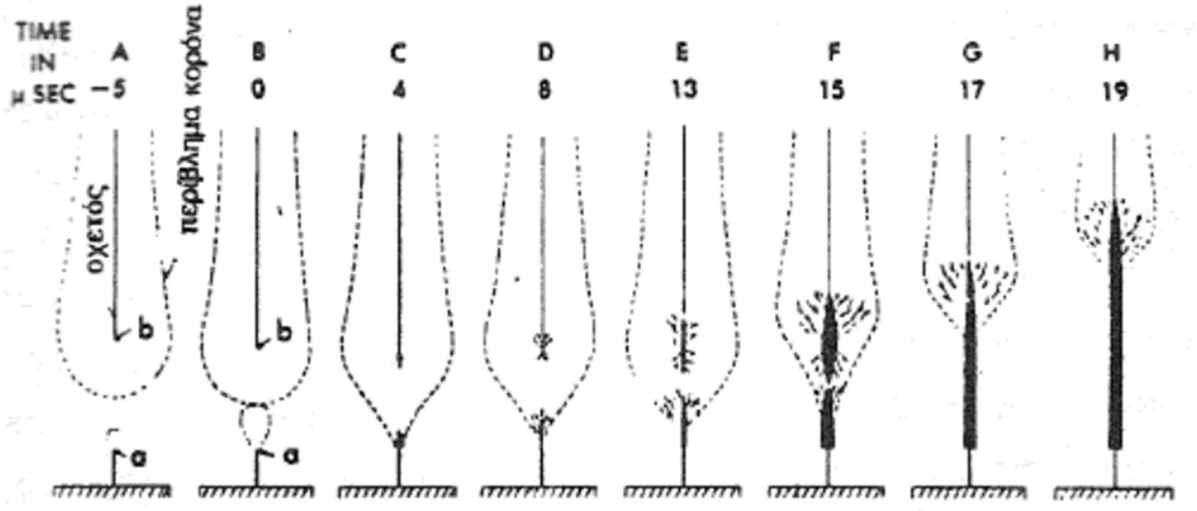
Ένα σύννεφο μπορεί να περιέχει περιοχές με διαφορετικά φορτία, με αποτέλεσμα η μέγιστη ένταση του πεδίου να κατευθύνεται είτε προς άλλη περιοχή του ίδιου σύννεφου είτε προς γειτονικό σύννεφο με ετερογενές φορτίο. Αυτή η διαδικασία οδηγεί στη σύνδεση των δύο φορτίων και τελικά στην εξουδετέρωσή τους. Η εξουδετέρωση συνοδεύεται από την εμφάνιση αστραπής και τον ήχο της βροντής. Στο έδαφος, αυτή η διαδικασία προκαλεί μια παροδική διαταραχή στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, η οποία μπορεί να επηρεάσει τις τηλεπικοινωνίες και τις συσκευές ραδιοφώνου ή τηλεόρασης.

Όταν η κατεύθυνση της μέγιστης έντασης του πεδίου είναι προς το έδαφος, οι κεραυνοί ακολουθούν την ίδια πορεία. Η διαδικασία που καθοδηγεί αυτή την πορεία ονομάζεται "οχετός προεκκένωσης" και εξελίσσεται σε μικρά βήματα μήκους λίγων έως δεκάδων μέτρων. Η μέση ταχύτητα αυτής της εξέλιξης είναι περίπου 0.15 μέτρα ανά μικροδευτερόλεπτο.

1.6.2 Φάση οχετού επιστροφής

Η πτώση της τάσης στον οχετό (το τμήμα του οχετού πριν από την επαφή με το έδαφος) διαφέρει από περιοχή σε περιοχή, με μέση τιμή που δεν ξεπερνά τα 0,1 kV/cm. Οι οχετοί προεκκένωσης μοιάζουν με μεταλλικές προεξοχές που εκτείνονται από το σύννεφο προς το έδαφος. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης, ειδικά στο άκρο του, είναι εξαιρετικά υψηλή, υπερβαίνοντας κατά πολύ την ένταση που απαιτείται για κρούση και ιονισμό (30 kV/cm). Εξαιτίας αυτού, ο οχετός περιβάλλεται από έναν στεμματικό μανδύα, ο οποίος εκτείνεται σε αρκετά μέτρα γύρω του. Το πάχος του μανδύα είναι μεγαλύτερο στο υπέργειο άκρο του οχετού και αυξάνεται καθώς η κεφαλή του πλησιάζει το έδαφος. Όταν η κεφαλή του οχετού φτάσει τόσο κοντά στο έδαφος ώστε η μέση ένταση του πεδίου να είναι περίπου 5 kV/cm, το στέμμα γεφυρώνει όλο το μήκος του οχετού και αυτός μετατρέπεται γρήγορα (σε 20-30 ms) σε πλήρη οχετό. Αυτό το τελικό στάδιο ονομάζεται "τελικό πήδημα", κατά το οποίο το φορτίο από

την περιοχή του σύννεφου όπου ξεκίνησε η προεκκένωση συνδέεται αγώγιμα με το έδαφος. Αυτή η σύνδεση οδηγεί σε εκφόρτιση του φορτίου του σύννεφου μέσω ενός ισχυρού ρεύματος (δεκάδες έως εκατοντάδες kA), κάνοντας τον οχετό να θερμαίνεται έντονα και να γίνεται εξαιρετικά φωτεινός (εικόνα 1.2). Η θέρμανση ξεκινά από το σημείο επαφής με τη γη και επεκτείνεται προς το σημείο έναρξης με ταχύτητα που φτάνει σε κλάσματα της ταχύτητας του φωτός, πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα του οχετού προεκκένωσης. Αυτό το στάδιο ολοκλήρωσης της εκκένωσης ονομάζεται "οχετός επιστροφής", ενώ η συνολική διαδικασία εκφόρτισης του σύννεφου προς τη Γη αποκαλείται "κεραυνός".



Εικόνα 1.2: Τα βήματα σχηματισμού του οχετού επιστροφής. Διακρίνεται το κανάλι του οχετού προεκκένωσης και ο σχηματισμός κορόνα περί αυτού [2].

1.6.3 Συνδετικός οχετός

Ο κεραυνός, όπως περιγράφεται παραπάνω, αφορά την περίπτωση όπου ένα σύννεφο βρίσκεται πάνω από επίπεδο έδαφος ή ήρεμα νερά. Ωστόσο, αν ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο βρεθεί πάνω από μια ψηλή και αιχμηρή προεξοχή στο έδαφος (ύψους άνω των 100-150 μέτρων), η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο αυτό μπορεί να αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να ξεκινήσει

ένας οχετός προεκκένωσης από την προεξοχή προς το σύννεφο. Αυτός ο τύπος οχετού προεκκένωσης ονομάζεται «ανερχόμενος».

Αντίθετα, αν η προεξοχή είναι χαμηλότερη, η αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου λόγω της παρουσίας του νέφους μπορεί να μην είναι αρκετή για να προκαλέσει την έναρξη ενός τέτοιου οχετού. Όταν όμως ένας κατερχόμενος οχετός προεκκένωσης πλησιάζει το έδαφος, το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται είναι ιδιαίτερα ισχυρό στις αιχμηρές προεξοχές. Όταν η ένταση του πεδίου φτάσει σε κρίσιμο επίπεδο, ένας συνδετικός οχετός προεκκένωσης ξεκινά από την προεξοχή προς τον κατερχόμενο οχετό. Η σύνδεση αυτών των δύο οχετών οδηγεί στη δημιουργία μιας αγώγιμης διαδρομής μεταξύ νέφους και εδάφους, ολοκληρώνοντας τον κύκλο με τον οχετό επιστροφής και την εκδήλωση του κεραυνού.

Αυτές οι αιχμηρές προεξοχές αποτελούν τα σημεία όπου συνήθως καταλήγουν οι κεραυνοί. Για την προστασία των περιοχών, χρησιμοποιούνται μεταλλικές ράβδοι γείωσης, όπως οι αλεξικέραυνοι Franklin, που λειτουργούν ως προτιμώμενα σημεία τερματισμού των οχετών.

1.6.4 Αρχή λειτουργίας των αλεξικέραυνων και απόσταση διάσπασης

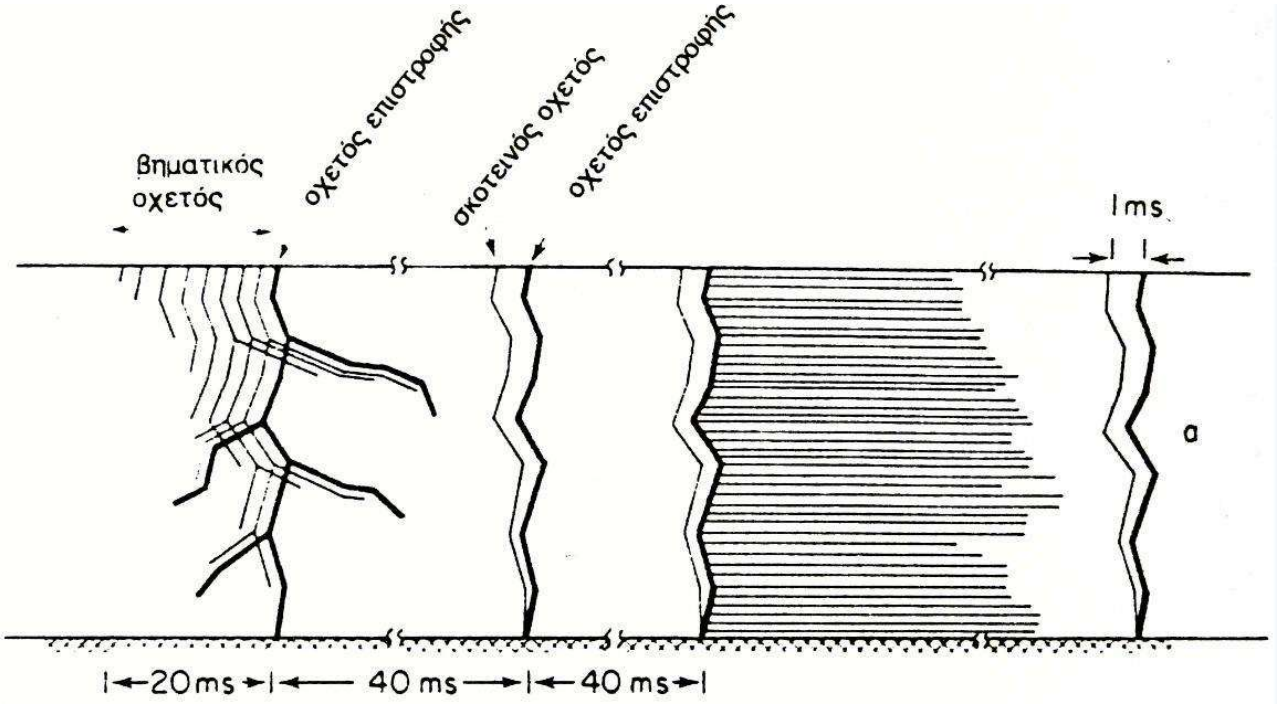
Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι το «σημείο προτίμησης» καθορίζεται όταν ο κατερχόμενος οχετός προεκκένωσης πλησιάσει αρκετά κοντά στο έδαφος, ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες για τη σύνδεσή του με κάποιο σημείο στο έδαφος. Αυτό συμβαίνει όταν η πεδιακή ένταση ανάμεσα στην κεφαλή του κατερχόμενου οχετού και το σημείο προτίμησης μειωθεί στα 5 kV/cm. Η απόσταση στην οποία η πεδιακή ένταση φτάνει αυτήν την τιμή ονομάζεται απόσταση διάσπασης και εξαρτάται από την τάση που υπάρχει μεταξύ της κεφαλής του κατερχόμενου οχετού και της γης. Η συγκεκριμένη τάση επηρεάζεται από το φορτίο που υπάρχει στον θύλακα του νέφους, απ' όπου ξεκινά ο οχετός προεκκένωσης.

Η απόσταση διάσπασης συναρτήσει του ρεύματος δίνεται από τις σχέσεις:

$$r_s=6.7I_o^{0.8} \text{ και } r_s=8I_o^{0.65}, \qquad 1.1$$

όπου r_s η απόσταση διάσπασης (m) και I_o το ρεύμα κεραυνού (kA). Η πρώτη εκκένωση του κεραυνού συνοδεύεται από επόμενες εκκενώσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.3. Αυτές οι

διαδοχικές εκκενώσεις πραγματοποιούνται σε σύντομα χρονικά διαστήματα και κάθε μία περιλαμβάνει τον δικό της συνδετικό οχετό και οχετό επιστροφής. Συνήθως, ακολουθούν την πορεία που έχει καθορίσει η αρχική εκκένωση, αν και υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί να αποκλίνουν από αυτήν. Έχει παρατηρηθεί ότι οι κατερχόμενοι αρνητικοί κεραυνοί, που αποτελούν την πλειονότητα των κεραυνών, παρουσιάζουν συχνά πολλαπλές εκκενώσεις, ενώ το φαινόμενο αυτό είναι εξαιρετικά σπάνιο στους θετικούς κεραυνούς.

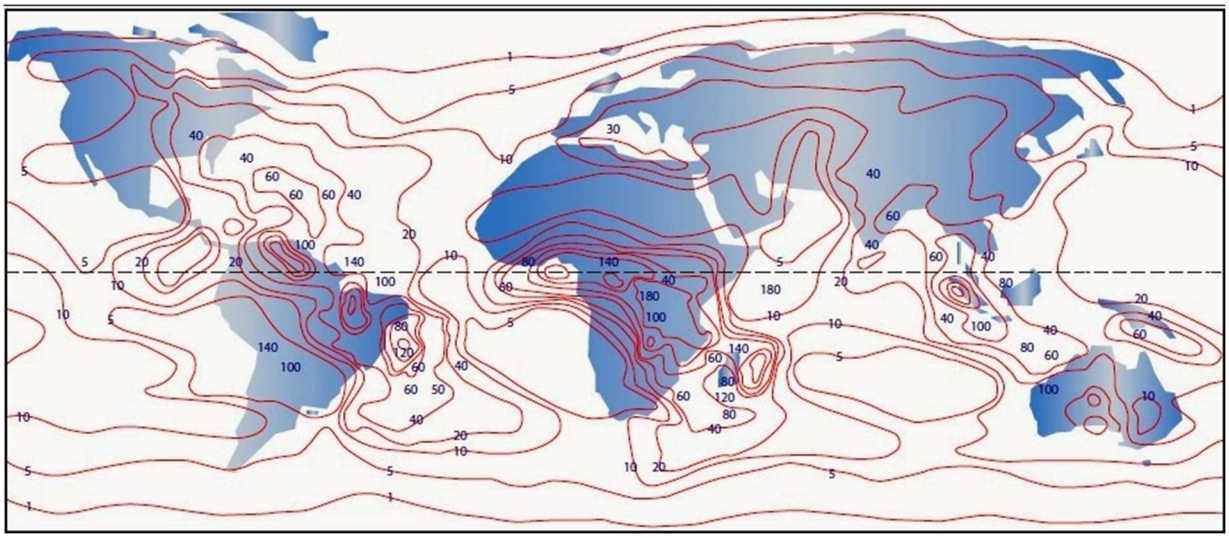


Εικόνα 1.3: Δημιουργία ενός πολλαπλού κεραυνού [2].

1.7 Συχνότητα κεραυνών

Για την εγκατάσταση ενός συστήματος προστασίας, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τον αριθμό Ng, δηλαδή τον αριθμό των κεραυνών που χτυπούν μια συγκεκριμένη περιοχή μέσα σε ένα χρονικό διάστημα. Ωστόσο, αυτή η πληροφορία δεν είναι πάντα διαθέσιμη για όλες τις περιοχές. Επομένως, συχνά χρησιμοποιείται ως εναλλακτική ο αριθμός Td, που αντιστοιχεί στις

ημέρες καταιγίδας. Το Td ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την περιοχή. Γενικά, παρατηρείται ότι οι καταιγίδες με κεραυνούς είναι πιο συχνές κοντά στον ισημερινό και λιγότερο συχνές στους πόλους. Στην εικόνα 1.4 παρουσιάζεται ένας παγκόσμιος χάρτης που απεικονίζει τη συχνότητα των κεραυνών.

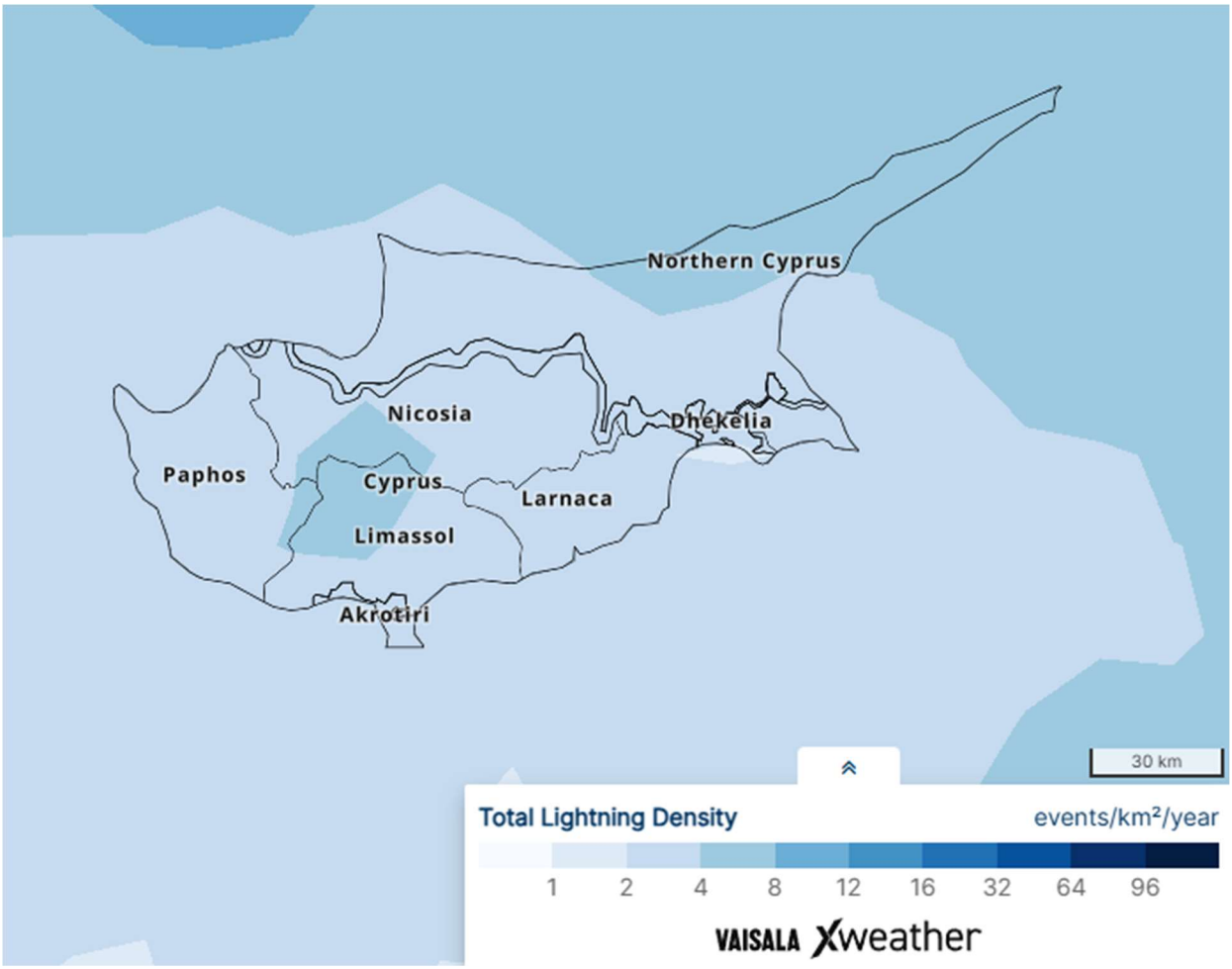


Εικόνα 1.4: Παγκόσμιος ισοκεραυνικός χάρτης [3]

Στην παρούσα διπλωματική δεν ήτανε δυνατή η εύρεση ισοκεραυνικού χάρτη της Κύπρου. Αλλά με τον διαδραστικό παγκόσμιο χάρτη πυκνότητας κεραυνών της Vaisala είναι δυνατόν να βρούμε το Ng κατευθείαν όπως φαίνεται στην εικόνα 1.5.

Η Vaisala είναι μια φινλανδική εταιρεία που παράγει προϊόντα και υπηρεσίες για περιβαλλοντικές και βιομηχανικές μετρήσεις.

Οι κύριες ομάδες πελατών και αγορές της είναι οι εθνικές μετεωρολογικές και υδρολογικές υπηρεσίες, οι αμυντικές υπηρεσίες, ο τομέας ενέργειας που είναι κρίσιμος για τις καιρικές συνθήκες, οι βιομηχανίες βιοεπιστημών και υψηλής τεχνολογίας, καθώς και ο αυτοματισμός κτιρίων.



Εικόνα 1.5: Χάρτης της Κύπρου από τον Interactive Global Lightning Density Map της Vaisala [4]

2 Κεφάλαιο 2: Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Ιστορική αναδρομή

Πριν από το 1800, η κατανόηση του ηλεκτρισμού περιοριζόταν κυρίως στη μελέτη των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων από λίγους πρωτοπόρους επιστήμονες. Αργότερα, έγιναν σημαντικές ανακαλύψεις που διεύρυναν τις γνώσεις γύρω από τον ηλεκτρισμό, αλλά η πρακτική αξιοποίησή τους καθυστέρησε αρκετά. Η πρώτη εμπορική χρήση του ηλεκτρισμού ξεκίνησε περίπου το 1870, με τη χρήση λαμπτήρων τόξου για φωτισμό κατοικιών και δρόμων.

Το πρώτο ολοκληρωμένο ηλεκτρικό σύστημα δημιουργήθηκε από τον Τόμας Έντισον στη Νέα Υόρκη το 1882, στον ιστορικό σταθμό Pearl Street Station. Το σύστημα αυτό, που βασιζόταν σε συνεχές ρεύμα, περιλάμβανε γεννήτρια, καλώδια, ασφάλειες, μετρητές και φορτία. Μια ατμομηχανή κινούσε τη γεννήτρια, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια σε 59 πελάτες σε ακτίνα 1,5 χιλιομέτρου. Το κύριο φορτίο ήταν ο φωτισμός πυρακτώσεως μέσω υπόγειων καλωδίων τάσης 110 V. Ωστόσο, το σύστημα είχε ένα σοβαρό πρόβλημα: η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια ήταν περιορισμένη κατά τη διάρκεια της ημέρας, με αποτέλεσμα να μη λειτουργεί πλήρως το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Η εισαγωγή του ηλεκτροκινητήρα έλυσε αυτό το ζήτημα, επιτρέποντας την ευρεία χρήση του ηλεκτρισμού σε διάφορες εφαρμογές. Αυτή η εξέλιξη έθεσε τις βάσεις για τη δημιουργία μιας από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες παγκοσμίως.

Παρά ταύτα, το σύστημα συνεχούς ρεύματος αντικαταστάθηκε σύντομα από το εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο λόγος ήταν απλός: τα συστήματα συνεχούς ρεύματος δεν μπορούσαν να μεταφέρουν ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις και απαιτούσαν υψηλές τάσεις για να μειώσουν τις απώλειες και τις πτώσεις τάσης. Ωστόσο, οι υψηλές τάσεις δεν ήταν ασφαλείς ούτε για την παραγωγή ούτε για την κατανάλωση λόγω των τεχνολογικών περιορισμών και των κινδύνων για τους καταναλωτές. Η λύση ήταν η μετάδοση ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις με υψηλή τάση και η μείωση της τάσης κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη ανάπτυξης μιας συσκευής που να μπορεί να μετατρέπει την τάση και το ρεύμα σε επιθυμητά επίπεδα.

Η εξέλιξη του μετασχηματιστή έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπλέον, η πρόοδος του πολυφασικού συστήματος από τον Nikola Tesla έθεσε τα θεμέλια για τις καινοτομίες της εποχής, όπως οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές και τα συστήματα μεταφοράς ενέργειας, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για τη σύγχρονη ηλεκτρική βιομηχανία.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, υπήρξε έντονη αντιπαράθεση σχετικά με το αν το συνεχές ή το εναλλασσόμενο ρεύμα θα έπρεπε να καθιερωθεί ως πρότυπο. Τελικά, το εναλλασσόμενο ρεύμα επικράτησε για διάφορους λόγους:

- Οι μετασχηματιστές διευκόλυναν την αλλαγή των επιπέδων τάσης, κάτι κρίσιμο για την προσαρμογή της ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικά στάδια παραγωγής, μετάδοσης και διανομής.

- Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν πιο απλές σε σχεδιασμό σε σύγκριση με αυτές του συνεχούς ρεύματος.

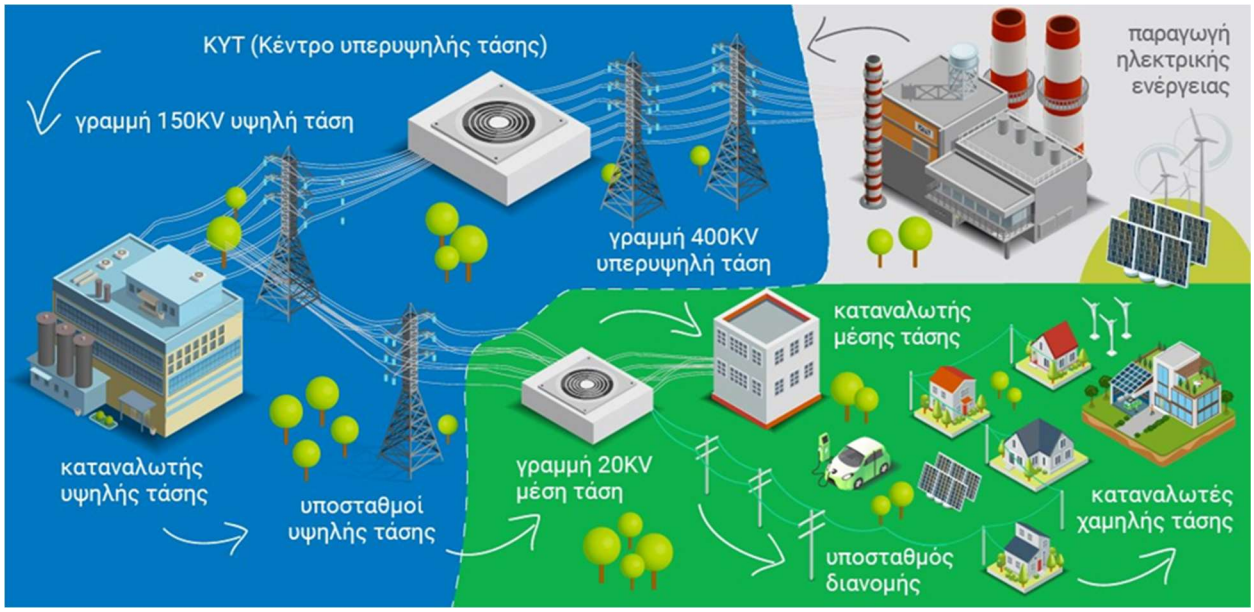
- Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είχαν χαμηλότερο κόστος κατασκευής και ήταν πιο απλοί από τους αντίστοιχους του συνεχούς ρεύματος.

Με την ευρεία αποδοχή του εναλλασσόμενου ρεύματος, δημιουργήθηκαν τοπικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το δίκτυο μεταφοράς και διανομής επεκτάθηκε για να καλύψει τις ανάγκες μικρότερων περιοχών. Σταδιακά, οι γειτονικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής συνδέθηκαν, επιτρέποντας την ανταλλαγή ισχύος και την κάλυψη φορτίων αιχμής από κοινού. Αυτή η διασύνδεση συνέβαλε στη βελτιστοποίηση της χρήσης του εξοπλισμού κάθε σταθμού.

Το σύστημα τυποποιήθηκε σε συχνότητες 50 Hz στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες, τον Καναδά, τη Βραζιλία και σε ορισμένα μέρη της Ιαπωνίας καθιερώθηκαν τα 60 Hz. Οι αρχικές τάσεις των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος (12, 44 και 60 kV) αυξήθηκαν σταδιακά: 165 kV το 1922, 220 kV το 1923, 287 kV το 1935 και έφτασαν έως τα 765 kV το 1966. Για να αποφευχθεί η ανεξέλεγκτη ποικιλία στα επίπεδα τάσης και να διατηρηθεί η

τυποποίηση του εξοπλισμού, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα επίπεδα υψηλής τάσης (115, 132, 138, κ.λπ.) και εξαιρετικά υψηλής τάσης (345, 400, 500 και 765 kV).

Η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας εξελίχθηκε με ταχύτατους ρυθμούς. Για να ανταποκριθούν στη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρισμού, οι μηχανικοί ενέργειας πρέπει να εργάζονται συνεχώς για τη βελτίωση των υφιστάμενων τεχνολογιών και την ανάπτυξη νέων καινοτόμων λύσεων. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ένα τυπικό δυτικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.1: Δίκτυο ηλεκτρισμού [5]

2.2 Ηλεκτρισμός στην Κύπρο

Η ηλεκτρική ενέργεια έκανε την πρώτη της εμφάνιση στην Κύπρο το 1903, όταν η Αγγλική Αποικιακή Κυβέρνηση εγκατέστησε μια ηλεκτρογεννήτρια για τις ανάγκες του Κυβερνήτη στη Λευκωσία. Σύντομα, ακολούθησε και δεύτερη ηλεκτρογεννήτρια στο Γενικό Νοσοκομείο της πόλης.

Η ευρύτερη χρήση του ηλεκτρισμού ξεκίνησε το 1912, όταν άρχισε η παραγωγή και εμπορική του διάθεση. Η Λεμεσός αποτέλεσε την πρώτη πόλη όπου δημιουργήθηκε εταιρεία ηλεκτρισμού. Το 1913, ιδρύθηκε και η Ηλεκτρική Εταιρεία Λευκωσίας, ενώ από το 1922 και μετά, οι ηλεκτρικές υποδομές επεκτάθηκαν σε άλλες περιοχές όπως η Μόρφου, οι Πλάτρες, ο Πεδουλάς, τα Λεύκαρα και το Παραλίμνι.

Τα πρώτα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης εγκαταστάθηκαν στα αστικά κέντρα, εξυπηρετώντας κυρίως ηλεκτροφωτισμό και περιορισμένο αριθμό καταναλωτών. Ωστόσο, μέχρι το 1952, όταν ιδρύθηκε η Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου (ΑΗΚ), η διάδοση του ηλεκτρισμού ήταν αργή, με την ύπαιθρο να παραμένει ουσιαστικά χωρίς ηλεκτροδότηση. Ο αποκεντρωμένος τρόπος παραγωγής και διανομής ήταν αναποτελεσματικός και εμπόδιζε την οικονομική ανάπτυξη του νησιού.

Η ίδρυση της ΑΗΚ στις 30 Οκτωβρίου 1952 αποτέλεσε καθοριστική αλλαγή. Η νέα αρχή ανέλαβε την παραγωγή, μεταφορά και διανομή του ηλεκτρισμού. Στα πρώτα δύο έτη λειτουργίας της, η ΑΗΚ απέκτησε τις μικρές ιδιωτικές εταιρείες ηλεκτρισμού σε όλη την Κύπρο, θέτοντας τις βάσεις για έναν ενιαίο εξηλεκτρισμό.

Το 1953 εγκαινιάστηκε ο πρώτος Ηλεκτροπαραγωγός Σταθμός στη Δεκέλεια με κρατική χρηματοδότηση. Παράλληλα, κατασκευάστηκαν βασικές γραμμές μεταφοράς που συνέδεσαν τη Δεκέλεια με τις κύριες πόλεις όπως τη Λευκωσία, τη Λάρνακα και τη Λεμεσό. Με την ίδρυση της Κυπριακής Δημοκρατίας το 1960, η ΑΗΚ επιτάχυνε τον εξηλεκτρισμό του νησιού.

Οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες της αναπτυσσόμενης κυπριακής οικονομίας οδήγησαν σε σημαντικές επεκτάσεις. Από το 1952, όταν ηλεκτροδοτούνταν μόνο η Λευκωσία και η Λεμεσός, ο αριθμός των ηλεκτροδοτούμενων περιοχών αυξήθηκε σε 11 το 1954 και έφτασε τις 100 το 1960. Ταυτόχρονα, επεκτάθηκαν οι γραμμές μεταφοράς και διανομής, καθώς και οι υποσταθμοί.

Η ΑΗΚ συνέχισε με τη δημιουργία ενός δεύτερου Ηλεκτροπαραγωγού Σταθμού στη Μονή, του οποίου η πρώτη φάση ολοκληρώθηκε το 1966 και η τρίτη το 1976. Το δίκτυο μεταφοράς και διανομής αναβαθμίστηκε στα αστικά κέντρα και επεκτάθηκε σε όλη την επικράτεια της Κύπρου, φέρνοντας σταδιακά τον ηλεκτρισμό σε κάθε κοινότητα.

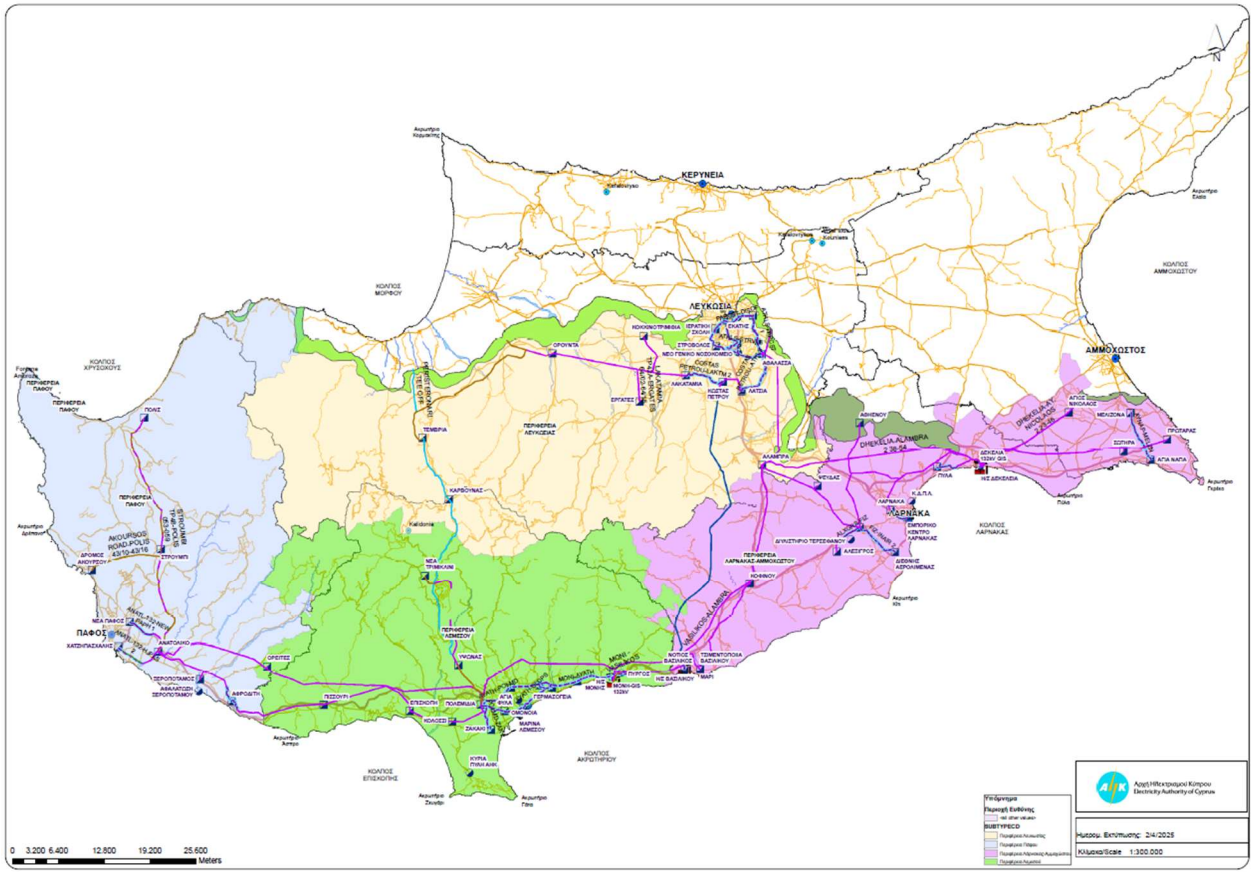
Μετά τα δραματικά γεγονότα του 1974, η κυπριακή οικονομία γνώρισε ξανά μια εντυπωσιακή ανάπτυξη, καθιστώντας απαραίτητη την κατασκευή ενός νέου Ηλεκτροπαραγωγικού Σταθμού (ΗΣ), ικανού να καλύψει τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια και να αντικαταστήσει τις παλαιότερες, πλέον μη αποδοτικές μονάδες του αρχικού σταθμού στη Δεκέλεια. Έτσι, το 1980 ξεκίνησε η ανέγερση της πρώτης φάσης του νέου σταθμού Δεκέλεια Β, ο οποίος ολοκληρώθηκε σε τρία στάδια έως το 1993. Ο παλιός σταθμός στη Δεκέλεια, μετά από τέσσερις δεκαετίες λειτουργίας, κατεδαφίστηκε το 2002.

Το 1997 ξεκίνησαν οι εργασίες για την κατασκευή ενός νέου ΗΣ στην περιοχή του Βασιλικού. Η πρώτη φάση του σταθμού τέθηκε σε λειτουργία το 2000 και περιλάμβανε δύο ατμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής και έναν αεριοστρόβιλο ανοικτού κύκλου. Αργότερα, το 2004 προστέθηκε μία ακόμη ατμοηλεκτρική μονάδα, ενώ το 2010 και το 2011 εγκαταστάθηκαν δύο μονάδες αεριοστροβίλων συνδυασμένου κύκλου. Παράλληλα, στη Δεκέλεια εγκαταστάθηκαν μηχανές εσωτερικής καύσης που τέθηκαν σε λειτουργία το 2009 και το 2010.

Η καταστροφική έκρηξη στη Ναυτική Βάση στο Μαρί στις 11 Ιουλίου 2011 προκάλεσε σοβαρές ζημιές στον ΗΣ Βασιλικού. Η ΑΗΚ ξεκίνησε άμεσα ένα τεράστιο έργο αποκατάστασης και, μέσα σε μόλις δύο χρόνια, ο σταθμός αποκαταστάθηκε πλήρως και όλες οι μονάδες του επανήλθαν σε εμπορική λειτουργία έως το καλοκαίρι του 2013.

Με βάση ευρωπαϊκή οδηγία και αποφάσεις της ΡΑΕΚ το 2014, η ΑΗΚ αναδιοργανώθηκε σε τέσσερις βασικούς ανεξάρτητους τομείς ρυθμιζόμενων δραστηριοτήτων και έναν τομέα μη ρυθμιζόμενων δραστηριοτήτων. Κάθε τομέας λειτουργεί αυτόνομα για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αγοράς. Ο λειτουργικός διαχωρισμός των δραστηριοτήτων εξασφαλίζει ίση μεταχείριση όλων των συμμετεχόντων στην αγορά, διαφάνεια και αποφυγή επιδοτήσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων. Οι τομείς Μεταφοράς και Διανομής παραμένουν μονοπωλιακές δραστηριότητες υπό τη ρύθμιση της ΡΑΕΚ, ενώ οι τομείς Παραγωγής και Προμήθειας λειτουργούν πλέον σε συνθήκες ελεύθερου ανταγωνισμού.

Τον Φεβρουάριο του 2022 υπογράφηκε η συμφωνία για την κατασκευή της 6ης Μονάδας Αεριοστροβίλων Συνδυασμένου Κύκλου στον ΗΣ Βασιλικού, με μέγιστη δυναμικότητα 160MW. Η νέα μονάδα, που θα χρησιμοποιεί κυρίως φυσικό αέριο αλλά και διυλισμένο πετρέλαιο ως εναλλακτικό καύσιμο, αναμένεται να τεθεί σε εμπορική λειτουργία πριν από το καλοκαίρι του 2024.



Εικόνα 2.2: Χάρτης Δικτύου Υψηλής Τάσης Κύπρου [6]

3 Κεφάλαιο 3: IEEE – Οδηγός βελτίωσης της αντικεραυνικής συμπεριφοράς στις εναέριες γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

3.1 Εισαγωγή

Ο παρών οδηγός αποτελεί έναν σημαντικό οδηγό για τη βελτίωση της προστασίας από κεραυνούς στις εναέριες γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, παίζοντας καθοριστικό ρόλο για τους μηχανικούς και τους μελετητές αυτών των γραμμών. Ο οδηγός τονίζει ότι η δημιουργία μιας ιδανικής γραμμής διανομής είναι πρακτικά αδύνατη, γεγονός που αναγκάζει τους σχεδιαστές να κάνουν ορισμένες παραχωρήσεις. Οι παράμετροι σχεδίασης μπορεί να είναι είτε προκαθορισμένες, όπως η διαδρομή, η τάση και η χωρητικότητα, είτε να προσαρμόζονται σύμφωνα με τις ανάγκες και την κρίση του σχεδιαστή, όπως η εγκατάσταση αλεξικέραυνων, οι μέθοδοι γείωσης, το επίπεδο μόνωσης, η θωράκιση, η γεωμετρία και τα υλικά κατασκευής. Ακολουθώντας τις οδηγίες, ο σχεδιαστής μπορεί να βρει την ιδανική ισορροπία ανάμεσα στον σχεδιασμό και την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων οικονομικών πόρων.

3.2 Σκοπός και αναφορές

Ο στόχος του παρόντος οδηγού είναι να αναλύσει τους παράγοντες που συμβάλλουν στις ζημιές από κεραυνό στις εναέριες γραμμές διανομής και να προτείνει μέτρα για την ενίσχυση της μόνωσης των γραμμών με τάση μικρότερη από 69kV. Παράλληλα, παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για την προστασία του εξοπλισμού, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Std C62.22-1991. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται εναλλακτικές προσεγγίσεις για τη μείωση των βραχυκυκλωμάτων που προκαλούνται από κεραυνό στις εναέριες γραμμές διανομής Μέσης Τάσης.

Η εφαρμογή αυτής της οδηγίας θα πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με τους ισχύοντες κανονισμούς. Σε περίπτωση αναθεωρήσεων των κανονισμών αυτών, οι αλλαγές θα πρέπει να

λαμβάνονται υπόψη. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στο IEEE Std C62.22-1991 και στην Οδηγία IEEE για τη Χρήση Αλεξικέραυνων Μεταλλικών Οξειδίων σε Συστήματα Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ANSI).

3.3 Ορισμοι

Παρακάτω παρατίθενται οι βασικοί ορισμοί των εννοιών και των μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν για την πλήρη κατανόηση του αντικειμένου.

Το **back flashover** (**ανάστροφο βραχυκύκλωμα**) είναι ένα είδος βραχυκυκλώματος που συμβαίνει όταν η μόνωση ενός μέρους του δικτύου ή της ηλεκτρικής εγκατάστασης αποτυγχάνει ως αποτέλεσμα ενός κεραυνικού πλήγματος σε δυναμικό εδάφους. Κατά τη διάρκεια του back flashover, το ρεύμα αντιστρέφεται και διαρρέει την αντίστροφη διαδρομή μέσω του αέρα μεταξύ των αγωγών του δικτύου ή της εγκατάστασης.

Το **βασικό επίπεδο μόνωσης** (**BIL**) αναφέρεται στο επίπεδο αντοχής της μόνωσης ενός ηλεκτρικού συστήματος ή εξοπλισμού σε περίπτωση κεραυνού ή άλλου είδους υπέρταση. Αυτό το επίπεδο εκφράζεται ως σχέση μεταξύ της κρουστικής τάσης κεραυνού και της μέγιστης τάσης που μπορεί να αντέξει η μόνωση χωρίς να υποστεί ζημιά ή αποσυντέλεση. Το BIL είναι σημαντικό για το σχεδιασμό και την επιλογή του εξοπλισμού του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και για τη διασφάλιση της ασφάλειας του προσωπικού και του κοινού.

Η **κρίσιμη κρουστική τάση κεραυνών** (**critical impulse flashover voltage - CFO**) αναφέρεται στη μέγιστη τιμή κορυφής του κρουστικού κύματος κεραυνού που μπορεί να αντέξει μια μονάδα μόνωσης προτού προκαλέσει βραχυκύκλωμα στο περιβάλλον μέσο. Συγκεκριμένα, η τιμή CFO είναι η τιμή κρουστικής τάσης κεραυνού στην οποία το 50% των δοκιμών οδηγεί σε βραχυκύκλωμα στο περιβάλλον μέσο. Η CFO αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη της αντοχής της μόνωσης σε κεραυνικές επιδράσεις και είναι σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων και συστημάτων.

Το **άμεσο πλήγμα** (**direct strike**) είναι όταν ένα κεραυνός χτυπάει απευθείας ένα τμήμα του δικτύου ή της ηλεκτρικής εγκατάστασης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές και κίνδυνο

για τη ζωή ανθρώπων και ζώων. Η προστασία από το άμεσο πλήγμα περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλης γείωσης και κεραυνοαπορροής.

Οι **γραμμές διανομής** (**distribution lines**) αποτελούν το τελικό στάδιο του ηλεκτρικού δικτύου πριν την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Η τάση που χρησιμοποιείται στις γραμμές διανομής είναι συνήθως χαμηλότερη από αυτή που χρησιμοποιείται στις μεταφορικές γραμμές, που μεταφέρουν την ενέργεια σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Η τάση αυτή μπορεί να είναι για παράδειγμα 34,5kV ή και λιγότερο. Οι γραμμές διανομής μπορούν να είναι απότομες ή αεροκαλωδιώσεις, ενώ σε ορισμένες περιοχές χρησιμοποιούνται και υπόγειες γραμμές διανομής.

Το **βραχυκύκλωμα** (**flashover**) είναι η διακοπή της μόνωσης μεταξύ δύο τμημάτων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος, με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού τόξου μέσω του αέρα. Κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, η τάση μειώνεται σχεδόν στο μηδέν και η ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα στοιχεία του κυκλώματος απελευθερώνεται με μια έκρηξη. Τα βραχυκυκλώματα συνήθως οφείλονται σε ανεπαρκή μόνωση, φθορά ή βλάβη στο κυκλωματικό εξοπλισμό, ή από εξωτερικούς παράγοντες όπως κεραυνούς ή διαρροή ρευμάτων.

Το **ηλεκτρόδιο γείωσης** (**ground electrode**) ορίζεται ως μια συσκευή που αποτελείται από έναν ή περισσότερους αγωγούς, οι οποίοι είναι σε άμεση επαφή με το έδαφος. Ο σκοπός του ηλεκτροδίου γείωσης είναι να διασφαλίσει μια σταθερή σύνδεση μεταξύ της ηλεκτρικής εγκατάστασης και του εδάφους, προστατεύοντας έτσι το σύστημα από την υπερβολική τάση και τη διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η **πυκνότητα κεραυνού εδάφους** (**ground flash density - GFD**) αναφέρεται στον μέσο αριθμό κεραυνών που σημειώνονται σε μια συγκεκριμένη περιοχή στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος (Ng). Συνήθως εκφράζεται ως ο μέσος αριθμός κεραυνοεκπομπών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά έτος.

Ο **μονωτήρας επιτόνων** (**guy insulator**) ορίζεται ως στοιχείο μόνωσης, συνήθως επιμηκυμένης μορφής με εγκάρσιες τρύπες ή σχισμές, το οποίο χρησιμοποιείται για να μονώσει δύο τομείς ενός επιτόνου ή να παρέχει μόνωση μεταξύ της κατασκευής και του στηρίγματος. Επιπλέον, παρέχει προστασία σε περίπτωση κομμένων καλωδίων.

Το **επίτονο** (**guy wire**) είναι ένα απομονωμένο καλώδιο ή σύνολο καλωδίων που χρησιμοποιείται για τη στήριξη κατασκευών ή ημιελαστικών τάσεων. Το επίτονο στερεώνεται στη γη και συνδέεται με την κατασκευή που υποστηρίζει με σκοπό να παρέχει σταθερότητα και αντίσταση στον αέρα ή στα σεισμικά κύματα. Επίσης, χρησιμοποιείται για τη στήριξη των καλωδίων ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

Η **επαγόμενη τάση** (**induced voltage**) είναι μια τάση που δημιουργείται σε ένα δίκτυο ή σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση λόγω της αλληλεπίδρασής της με το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από ένα κοντινό κεραυνικό πλήγμα. Η επαγόμενη τάση μπορεί να προκαλέσει δυνατά ρεύματα στο σύστημα, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν ζημιές στον εξοπλισμό ή ακόμη και τραυματισμούς στους ανθρώπους. Για τη μείωση της επαγόμενης τάσης συχνά χρησιμοποιούνται μέτρα προστασίας, όπως απομάκρυνση των καλωδίων από πηγές κεραυνών, προστατευτικά κυκλώματα και αποσταθεροποιητές τάσης.

Το **πρώτο πλήγμα κεραυνού** (**lightning first return stroke**) αναφέρεται στην πρώτη εκροή ρεύματος από την ατμόσφαιρα προς το έδαφος κατά τη διάρκεια ενός κεραυνού. Συνήθως αυτό συμβαίνει όταν το αρνητικός φορτίο κατευθύνεται από το έδαφος προς την ατμόσφαιρα και συναντά ένα θετικό αντίβαρο από τις αντίθετες περιοχές της ατμόσφαιρας που έχουν φορτιστεί θετικά από την προηγούμενη διάρκεια του κεραυνού. Το πρώτο πλήγμα κεραυνού είναι συνήθως το πιο ισχυρό και το πιο επικίνδυνο μέρος του κεραυνού, καθώς μπορεί να προκαλέσει ζημιές σε δομές και συσκευές που βρίσκονται στο δρόμο του.

Ο **κεραυνός** (**lightning flash**) αποτελεί μια ηλεκτρική εκκένωση μεγάλης ισχύος που δημιουργείται μεταξύ σύννεφου, εδάφους, ή μεταξύ δύο σύννεφων. Η εκκένωση διαρκεί μόνο για μερικά εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου αλλά μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασίες πάνω από 30.000 βαθμούς Κελσίου, παράγοντας έντονο φωτεινό φως και εκκωφαντικό θόρυβο.

Το **κεραυνικό σφάλμα** (**lightning outage**) είναι μια από τις πιο συχνές αιτίες διακοπής ισχύος σε ηλεκτρικά δίκτυα. Κατά τη διάρκεια ενός κεραυνού, η υψηλή τάση και η υψηλή ενέργεια του κεραυνού μπορούν να δημιουργήσουν ένα βραχυκύκλωμα στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό το βραχυκύκλωμα μπορεί να προκαλέσει μια διακοπή ισχύος, καθώς οι διακοπτικές συσκευές του συστήματος απενεργοποιούνται αυτόματα για να προστατεύσουν το δίκτυο από το μετασφαλματικό ρεύμα. Η διάρκεια της διακοπής ισχύος εξαρτάται από τη σοβαρότητα του βραχυκυκλώματος και την ταχύτητα αντίδρασης των διακοπτικών συσκευών. Συνήθως, η

διάρκεια αυτή κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές ώρες, ανάλογα με τη θέση και την έκταση του κεραυνού και το μέγεθος του δικτύου.

Το **ακόλουθο πλήγμα κεραυνού** (**lightning subsequent stroke**) αναφέρεται σε μια επιπλέον εκκένωση κεραυνού που ακολουθεί το μονοπάτι που διαμορφώθηκε από το πρώτο πλήγμα κεραυνού. Η επανεμφάνιση του κεραυνού στο ίδιο μονοπάτι είναι συνηθισμένη και μπορεί να συμβεί λόγω του γεγονότος ότι το πρώτο πλήγμα δεν κατάφερε να αποφορτίσει πλήρως την ηλεκτρική ενέργεια στο σημείο που έπεσε. Το ακόλουθο πλήγμα κεραυνού μπορεί να είναι πιο αδύναμο από το πρώτο πλήγμα και μπορεί να μην παρατηρείται από τον ανθρώπινο μάτι, αλλά μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στα ηλεκτρικά συστήματα και τις εγκαταστάσεις.

Η **συμπεριφορά μιας γραμμής σε κεραυνό** (**line lightning performance**) αναφέρεται στο πώς αντιδρά η γραμμή στη διέγερση από τον κεραυνό και πόσο συχνά βρίσκεται υπό επίθεση από κεραυνούς. Η απόδοση μιας γραμμής μπορεί να μετρηθεί με τον ετήσιο αριθμό βραχυκυκλωμάτων από κεραυνό σε βάση ενός χιλιόμετρου της γραμμής ή ενός χιλιομέτρου πύργου-γραμμής. Αυτή η μέτρηση μας δίνει μια εκτίμηση της αντοχής της γραμμής σε κεραυνούς και της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας της λόγω βλάβης από κεραυνό. Η συμπεριφορά της γραμμής σε κεραυνό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η σχεδίαση της γραμμής, το υλικό της κατασκευής, οι συνθήκες του περιβάλλοντος και η περιοχή όπου βρίσκεται η γραμμή.

Ο **απαγωγέας υπερτάσεων** ή **αλεξικέραυνο μεταλλικού οξειδίου** (**metal-oxide surge arrester** - *MOSA*) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά δίκτυα για την προστασία των εγκαταστάσεων από υπερτάσεις που προκαλούνται από κεραυνούς ή άλλες αιτίες. Ο MOSA αποτελείται από μια σειρά από βαλβίδες που αποτελούνται από μεταλλικά οξείδια, τα οποία έχουν μη γραμμική αντίσταση. Κατά τη διάρκεια μιας υπερτάσης, ο MOSA αντιδρά γρήγορα και απορροφά την υπερβολική ενέργεια της υπερτάσης προτού αυτή προκαλέσει ζημιά στο σύστημα.

Το **κοντινό/έμμεσο πλήγμα** (**nearby / indirect strike**) μπορεί να προκαλέσει μια υπέρταση στο δίκτυο λόγω του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από την κεραυνική εκκένωση. Αυτή η υπέρταση μπορεί να προκαλέσει διακοπή ρεύματος ή ζημιές σε εξοπλισμό. Επίσης, η υπέρταση μπορεί να προκαλέσει έναν κατακόρυφο κεραυνό (λεγόμενο άμεσο πλήγμα), που μπορεί να πλήξει το δίκτυο και τον εξοπλισμό. Σε κάθε περίπτωση, οι ζημιές που προκαλούνται από ένα κοντινό/έμμεσο πλήγμα μπορούν να είναι σημαντικές και να απαιτούν δαπανηρές επισκευές.

Οι **εναέριοι αγωγοί γείωσης** (**Overhead ground wire**) συνήθως χρησιμοποιούνται σε υψηλές τάσεις μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, για την προστασία των αγωγών φάσης από κεραυνούς και άλλες υπερτάσεις. Σε περιοχές με υψηλό κίνδυνο κεραυνού, οι εναέριοι αγωγοί γείωσης είναι απαραίτητοι για τη διατήρηση της σταθερότητας του ηλεκτρικού δικτύου και τη μείωση της πιθανότητας πυρκαγιάς στις καλωδιακές γραμμές.

Η **γωνία προστασίας** (**shielding angle**) είναι ένα σημαντικό μέγεθος στην προστασία από κεραυνούς. Αντιπροσωπεύει τη γωνία μεταξύ της κατακόρυφης γραμμής διαμέσου του εναέριου αγωγού γείωσης και της γραμμής που συνδέει τον εναέριο αγωγό γείωσης με τον αγωγό προστασίας. Από τη γωνία αυτή εξαρτάται η προστασία του κυκλώματος από την υπέρταση που δημιουργείται από το κεραυνό. Συνήθως, η γωνία προστασίας υπολογίζεται με βάση τις γεωμετρικές διαστάσεις του δικτύου και των συστημάτων προστασίας και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του δικτύου και τον τύπο της προστασίας που χρησιμοποιείται. Μια μικρότερη γωνία προστασίας σημαίνει μεγαλύτερη προστασία από την υπέρταση, αλλά μπορεί να απαιτήσει περισσότερο κόστος για την εγκατάσταση του συστήματος προστασίας.

Ο **αγωγός προστασίας**, γνωστός και ως **shield wire** ή **ground wire**, είναι ένας γειωμένος αγωγός που τοποθετείται κοντά στους αγωγούς φάσης σε ένα εναέριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια λειτουργία του είναι να προστατεύει τους αγωγούς φάσης από απευθείας κεραυνικά πλήγματα, καθώς και να μειώνει την επαγόμενη τάση από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Επιπλέον, ο αγωγός προστασίας μπορεί να βελτιώνει την κυματική εμπέδηση και να αυξάνει την αμοιβαία κυματική εμπέδηση στους προστατευόμενους αγωγούς φάσης, προσφέροντας έτσι πρόσθετη προστασία από βλάβες στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Το **προστατευτικό διάκενο** (**spark gap**) είναι ένα εξάρτημα που χρησιμοποιείται σε πολλά ηλεκτρικά συστήματα για την προστασία από υπερτάσεις και κεραυνούς. Αποτελείται από δύο αγωγούς, οι οποίοι τοποθετούνται σε απόσταση ηλεκτρικής μόνωσης, ώστε να δημιουργούν ένα κενό αέρος ανάμεσά τους. Κατά τη διάρκεια μιας υπερτάσης ή κεραυνού, οι αγωγοί αυτοί επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του αέρα, αντί να περάσει μέσα από το ηλεκτρικό μόνωμα. Με αυτόν τον τρόπο, το προστατευτικό διάκενο αποτρέπει την υπερτάση να φτάσει στο ευαίσθητο εξοπλισμό και μειώνει τον κίνδυνο πυρκαγιάς και ζημιάς στο σύστημα. Σημειώνεται ότι το προστατευτικό διάκενο δεν αποτελεί απόλυτη προστασία από κεραυνούς και υπερτάσεις, αλλά μπορεί να μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο και τις ζημιές.

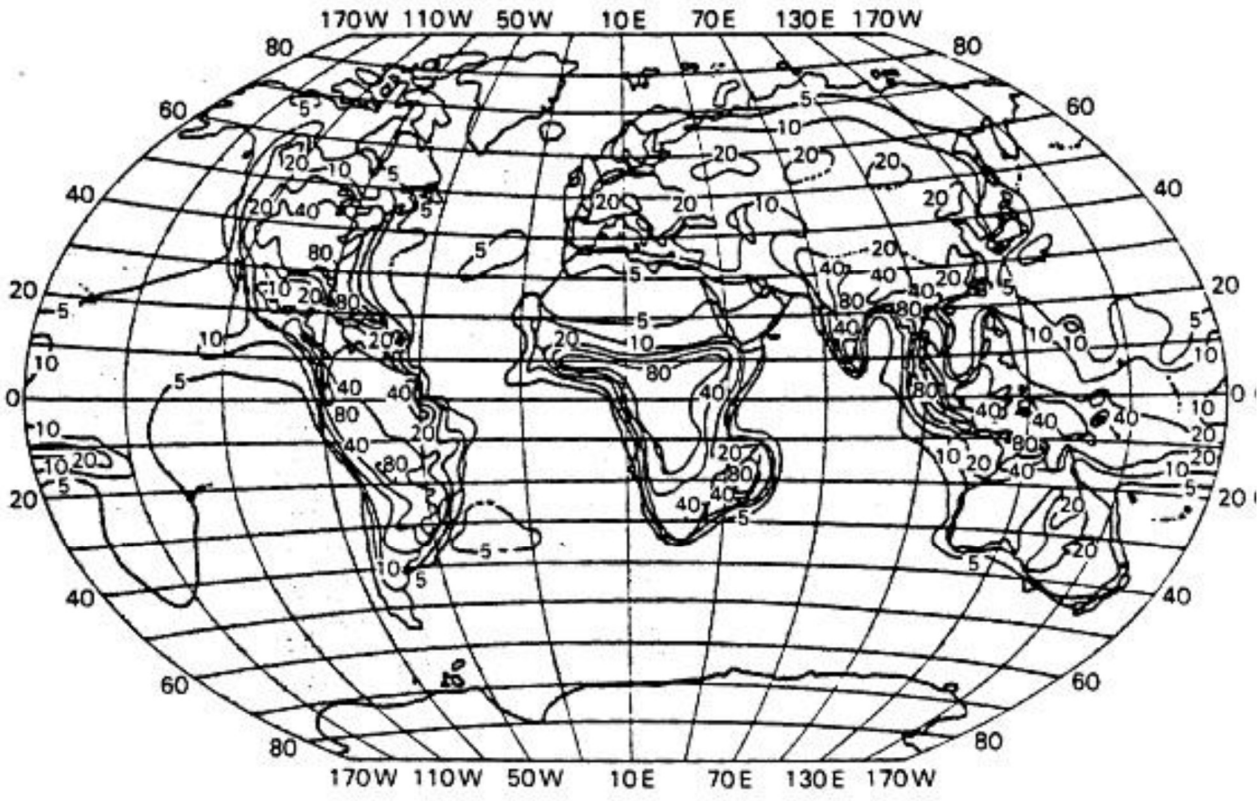
Ο **αλεξικέραυνος** (**απαγωγέας υπέρτασης**) (**surge arrester**) αποτελείται από έναν ηλεκτρικό αγωγό που συνδέεται στη γείωση και ένα σύνολο μεταλλικών ημισφαιρικών θωρακισμένων ηλεκτροδίων. Όταν η τάση στον εξοπλισμό ξεπερνά ένα συγκεκριμένο επίπεδο, η απόσταση μεταξύ των ημισφαιρικών ηλεκτροδίων μειώνεται και η υπέρταση διακόπτεται με τη διέλευση του ρεύματος στους αγωγούς του αλεξικεραύνου προς τη γείωση. Αυτό μειώνει την υπέρταση στον εξοπλισμό και προστατεύει το σύστημα από ζημιές ή βλάβες που μπορεί να προκληθούν από υψηλές τάσεις.

3.4 Παράμετροι κεραυνών

3.4.1 Πτώση κεραυνών

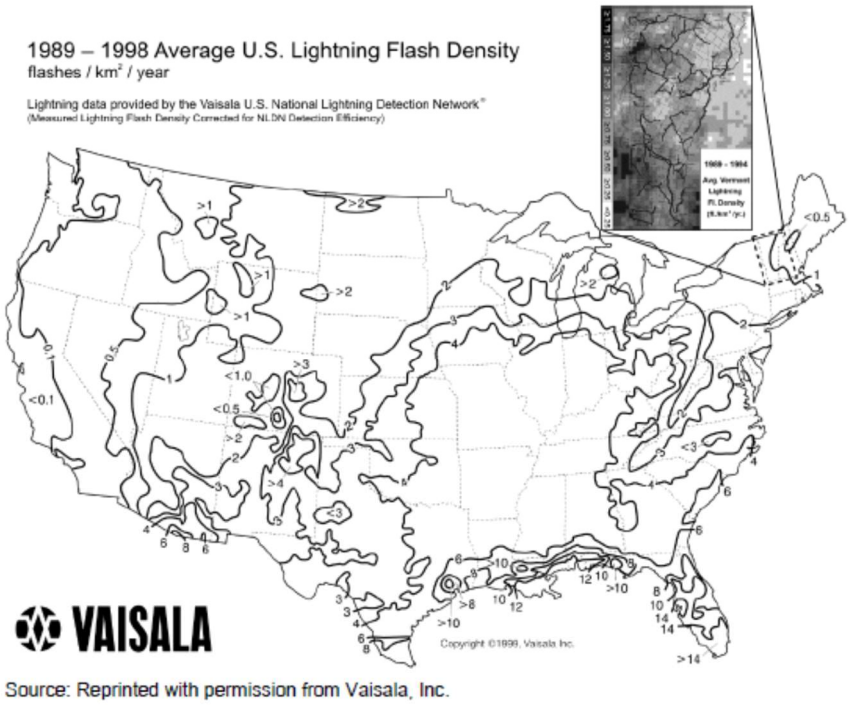
Ο κεραυνός κάνει την εμφάνισή του κατά τη διάρκεια φυσικών φαινομένων όπως οι καταιγίδες και οι χιονοθύελλες. Κατά κανόνα, οι καταιγίδες αποτελούν την κύρια αιτία δημιουργίας κεραυνών στις περισσότερες περιοχές. Οι κεραυνοί μπορούν να σχηματιστούν μέσα στα σύννεφα, ανάμεσα σε σύννεφα ή μεταξύ σύννεφου και εδάφους. Οι πιο συχνές περιπτώσεις είναι οι κεραυνοί μέσα στα σύννεφα, ενώ οι κεραυνοί που συνδέουν σύννεφο με έδαφος ενδέχεται να προκαλέσουν διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις γραμμές διανομής. Επιπλέον, διακοπές ρεύματος μπορούν να προκληθούν από ισχυρούς ανέμους, πτώσεις δέντρων ή ζημιές στον εξοπλισμό, γεγονός που συχνά λανθασμένα αποδίδεται στους κεραυνούς. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική εκτίμηση του αριθμού των διακοπών που αποδίδονται στους κεραυνούς.

Σε πολλές περιοχές του κόσμου, μπορούμε να εκτιμήσουμε τη δραστηριότητα των κεραυνών μέσω δεδομένων που σχετίζονται με αυτούς, όπως ο αριθμός των ημερών καταιγίδων με κεραυνούς ετησίως. Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται ένας παγκόσμιος χάρτης ισοκεραυνικών γραμμών.



Εικόνα 3.1: Παγκόσμιος ισοκεραυνικός χάρτης. [7]

Το επίπεδο δραστηριότητας κεραυνών αναφέρεται στα τοπικά ποσοστά εμφάνισης κεραυνών, τα οποία υπολογίζονται με βάση τον μέσο ετήσιο αριθμό κεραυνών, λαμβάνοντας υπόψη ιστορικά δεδομένα από την περιοχή. Επιπλέον, υπάρχουν πιο εξειδικευμένες πληροφορίες για τους κεραυνούς, όπως και χάρτες που απεικονίζουν την πυκνότητα των κεραυνών που πλήττουν το έδαφος (GFD). Αυτά τα δεδομένα παράγονται μέσω ειδικών δικτύων ανίχνευσης κεραυνών και προσφέρουν μια πιο λεπτομερή κατανόηση της κεραυνικής δραστηριότητας σε συγκεκριμένα μέρη του πλανήτη. Ένας χάρτης GFD για τις Ηνωμένες Πολιτείες παρουσιάζεται στην εικόνα 3.2.



Source: Reprinted with permission from Vaisala, Inc.

Εικόνα 3.2: Χάρτης GFD των Η.Π.Α.[7].

Στη Βόρεια Αμερική και σε πολλές περιοχές του πλανήτη έχουν δημιουργηθεί δίκτυα παρακολούθησης κεραυνών και συστήματα μέτρησης, τα οποία παρέχουν αναλυτικούς χάρτες GFD. Οι χάρτες αυτοί είναι πιο ακριβείς και λεπτομερείς από τις καταγραφές βροντών και προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες, όπως την ημερομηνία, την ώρα, τη γεωγραφική θέση, τον αριθμό των κεραυνών και την πολικότητά τους. Επιπλέον, τα συστήματα εντοπισμού προσφέρουν πιο εξειδικευμένες μετρήσεις που είναι πιο χρήσιμες από τα γενικά δεδομένα για τους κεραυνούς. Σε ορισμένες περιοχές, τα δεδομένα από αυτά τα συστήματα είναι αρκετά για να χρησιμοποιηθούν σε σχεδιαστικές εφαρμογές, ενώ οι χάρτες GFD αξιοποιούνται για τον σχεδιασμό δικτύων διανομής, την εκτίμηση βραχυκυκλωμάτων και άλλες αναλύσεις που σχετίζονται με κεραυνούς.

Η GFD τιμή μπορεί να υπολογιστεί απο το κεραυνικό επίπεδο χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$N_g=0.04T_d^{1.25}\ [\text{κεραυνοί/Km}^2/\text{έτος}] \qquad 3.1$$

όπου T_d είναι ο αριθμός των ημερών καταιγίδας ανά έτος (κεραυνικό επίπεδο).

Ένας άλλος τρόπος υπολογισμού του GFD μπορεί να ληφθεί από τις καταγεγραμμένες ώρες καταιγίδας, όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$N_g=0.054T_h^{1.1}\ [\text{κεραυνοί/km}^2/\text{έτος}] \qquad 3.2$$

Η μέση τιμή GFD μπορεί να υπολογιστεί αξιοποιώντας δεδομένα από συστήματα εντοπισμού κεραυνών ή μετρητές κεραυνών, εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες για αρκετά χρόνια. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα να εντοπίζει τοπικές διαφοροποιήσεις.

Η ένταση των κεραυνών και τα βραχυκυκλώματα που προκαλούν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις με την πάροδο του χρόνου. Οι ετήσιες μετρήσεις κεραυνικής δραστηριότητας παρουσιάζουν στατιστική απόκλιση που κυμαίνεται από 20% έως 50% σε σχέση με τη μέση τιμή. Όταν εξετάζουμε μικρές περιοχές, όπως 10x10 χλμ., η στατιστική απόκλιση αυξάνεται και φτάνει στο 30%-50%, ενώ για μεγαλύτερες περιοχές, όπως 500x500 χλμ., μειώνεται στο 20%-25%. Σε περιοχές με χαμηλή δραστηριότητα κεραυνών, οι αποκλίσεις είναι συνήθως πιο έντονες.

Για ακριβή υπολογισμό της μέσης τιμής, απαιτείται μεγάλο χρονικό εύρος δεδομένων λόγω των υψηλών τυπικών αποκλίσεων. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στην ανάλυση δεδομένων κεραυνικής δραστηριότητας για μια συγκεκριμένη περιοχή ή στην εκτίμηση των βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυα διανομής, όπου χρειάζονται στοιχεία διακοπών λειτουργίας για μακρά χρονική περίοδο.

3.4.2 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του κεραυνού

Σύμφωνα με τον πίνακα της Ομάδας Εργασίας CIGRE 33.01 (Πίνακας 3.1), γίνεται φανερό ότι η μεταβολή στο μέγιστο ρεύμα ενός κεραυνού, Io, μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας

λογαριθμοκανονικής κατανομής. Η μαθηματική έκφραση για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτής της κατανομής, για οποιαδήποτε τιμή x, δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} e^{-\frac{z}{2}} \qquad 3.3$$

Όπου:

$$z = \frac{\ln \frac{x}{M}}{\beta} \qquad 3.4$$

Όπου:

f(x) : πυκνότητα πιθανότητας

M: είναι η μέση παραμετρική τιμή και

B: είναι η λογαριθμική-τυπική απόκλιση (με βάση e).

Για να υπολογίσουμε την πιθανολογική κατανομή των κορυφαίων τιμών ρεύματος χρησιμοποιούμε την παρακάτω συνάρτηση [Anderson] που μας δίνει την πιθανότητα το μέγιστο ρεύμα του κεραυνού I_o να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από μια συγκεκριμένη τιμή i_o[kA]:

$$P(I_o \geq i_o) = \frac{1}{1 + \left(\frac{i_o}{31}\right)^{2.6}} \qquad 3.5$$

Όπου:

$P(I_o > i_o)$: η πιθανότητα ότι το πρώτο πλήγμα που επιστρέφει να έχει μέγιστη τιμή ρεύματος $I_o > i_o$.

i_o : η μέγιστη τιμή ρεύματος του πρώτου πλήγματος που επιστρέφει.

Πίνακας 3.1 – CIGRE παράμετροι του ρεύματος κεραυνού [7].

Parameters of log-normal distribution for negative downward flashes				
Parameter	**First stroke**		**Subsequent stroke**	
	Median	**β, logarithmic standard deviation**	**Median**	**β, logarithmic standard deviation**
FRONT, μs	—	—	—	—
$t_{d10/90}$ = T10/90/0.8	5.63	0.576	0.75	0.921
$t_{d30/90}$ = $T_{30/90}$/0.6	3.83	0.553	0.67	1.013
t_m=I_F/S_m	1.28	0.611	0.308	0.708
STEEPNESS kA/μs	—	—	—	—
S_m, Maximum	24.3	0.599	39.9	0.852
S_{10}, at 10%	2.6	0.921	18.9	1.404
$S_{10/90}$, 10-90%	5.0	0.645	15.4	0.944
$S_{30/90}$, 30-90%	7.2	0.622	20.1	0.967
CREST CURRENT, kA	—	—	—	—
I_I, initial	27.7	0.461	11.8	0.530
I_F, final	31.1	0.484	12.3	0.530
Initial/final	0.9	0.230	0.9	0.207
TAIL, t_n, μs	77.5	0.577	30.2	0.933
CHARGE, Q_I, C	4.65	0.882	0.938	0.882
$\int I^2 dt$, $(kA)^2 s$	0.057	1.373	0.0055	1.366
Inter stroke interval, ms	—	—	35	1.066

Description of waveshape parameters (see Figure 3)

I_{10} = 10% intercept along the stroke current waveshape

I_{30} = 30% intercept along the stroke current waveshape

I_{90} = 90% intercept along the stroke current waveshape

$T_{10/90}$ = time between I_{10} and I_{90} intercepts on the wavefront

$T_{30/90}$ = time between I_{30} and I_{90} intercepts on the wavefront

Sm = tan G, maximum rate-of-rise of current along wavefront

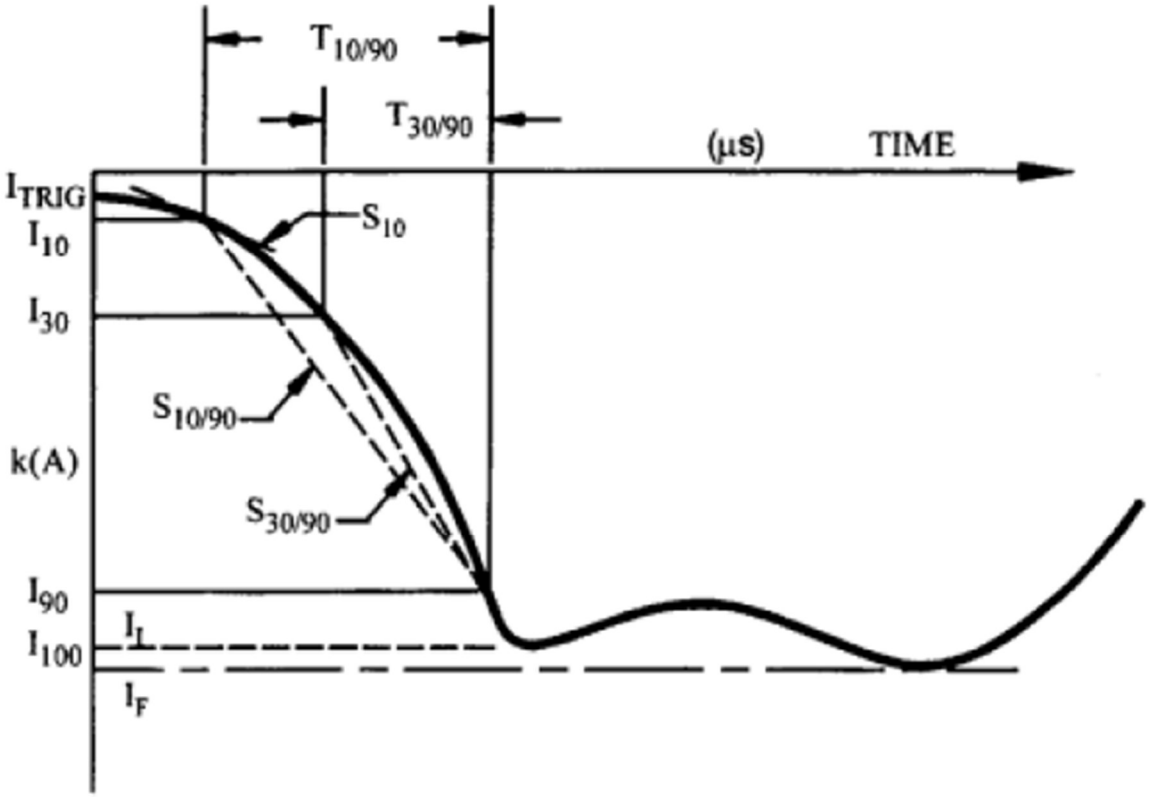
S_{10} = instantaneous rate-of-rise of current at I_{10}

$S_{10/90}$ = average steepness (through I_{10} and I_{90} intercepts)

$S_{30/90}$ = average steepness (through I_{30} and I_{90} intercepts)

Q_I = impulse charge in stroke current waveshape

Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζεται η περιγραφή των παραμέτρων της κεραυνικής κυματομορφής



Εικόνα 3.3: Περιγραφή παραμέτρων της κεραυνικής κυματομορφής [7]

3.5 Συμπεριφορά εναέριων γραμμών διανομής σε περίπτωση κεραυνού

Αυτό το τμήμα εξετάζει τον υπολογισμό του αριθμού των άμεσων και έμμεσων βραχυκυκλωμάτων σε δίκτυα διανομής. Οι κεραυνοί συχνά ευθύνονται για διακοπές ρεύματος σε γραμμές διανομής, είτε λόγω άμεσων χτυπημάτων είτε λόγω μεταβολών τάσης από κοντινά πλήγματα. Όταν ένας κεραυνός πλήττει απευθείας μια γραμμή διανομής, μπορεί να προκαλέσει βλάβες στις μονώσεις, καθώς δημιουργεί υπέρταση που ξεπερνά τα ανεκτά όρια μόνωσης των εναέριων γραμμών διανομής με ονομαστική τάση 69 kV. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι πολλές από τις διακοπές που συνδέονται με κεραυνούς σε γραμμές με χαμηλή μόνωση οφείλονται

σε κεραυνούς που χτυπούν το έδαφος κοντά στη γραμμή. Οι περισσότερες τάσεις που προκαλούνται από κεραυνούς κοντά σε γραμμές διανομής είναι συνήθως κάτω από 300 kV. Η αντίδραση της γραμμής σε περίπτωση κεραυνού εξαρτάται από το ύψος της.

3.5.1 Κεραυνικά πλήγματα σε εναέριες γραμμές

3.5.1.1 Ύψος κατασκευής

Η αξιοπιστία του δικτύου μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τους κεραυνούς, ιδιαίτερα όταν οι στύλοι έχουν τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Οι κεραυνοί συνήθως προσελκύονται από ψηλότερες δομές. Ο αριθμός των κεραυνών που πλήττουν μια περιοχή, όταν αυτή βρίσκεται σε ανοιχτό χώρο χωρίς την παρουσία δέντρων ή κτιρίων, μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον τύπο του Eriksson, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$N = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \qquad 3.6$$

όπου:

h: ύψος του στύλου (m)

b: το πλάτος της κατασκευής (m)

N_g: πυκνότητα των κεραυνών [κεραυνοί/km^2/έτος]

N: συχνότητα συλλογής κεραυνών [κεραυνοί/100km/έτος]

Οι γραμμές διανομής συχνά δεν επηρεάζονται σημαντικά από τον παράγοντα πλάτους της κατασκευής b. Σύμφωνα με την εξίσωση 3.6, αν το ύψος των στύλων αυξηθεί κατά 20%, το ποσοστό κεραυνικών πληγμάτων στις εναέριες γραμμές διανομής θα αυξηθεί κατά 12%. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι γραμμές διανομής μπορεί να δέχονται περισσότερα κεραυνικά πλήγματα από

ό,τι προβλέπει το μοντέλο 4×Η, το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και μεγάλο χρονικό διάστημα. Το συγκεκριμένο μοντέλο εκτιμά τον αριθμό των κεραυνικών πληγμάτων που δέχονται οι γραμμές διανομής, λαμβάνοντας υπόψη ένα πλάτος ίσο με το διπλάσιο του ύψους της γραμμής.

Η πιθανότητα κεραυνικών πληγμάτων στις γραμμές διανομής εξαρτάται από το πόσο εξέχουν από το περιβάλλον τους. Οι κατασκευές που βρίσκονται σε περιοχές όπως βουνά, οροσειρές ή κορυφές λόφων είναι πιο εκτεθειμένες σε κεραυνούς, σε σύγκριση με εκείνες που προστατεύονται από φυσικά εμπόδια στο περιβάλλον τους.

3.5.1.2 Θωράκιση από κοντινές κατασκευές και δέντρα

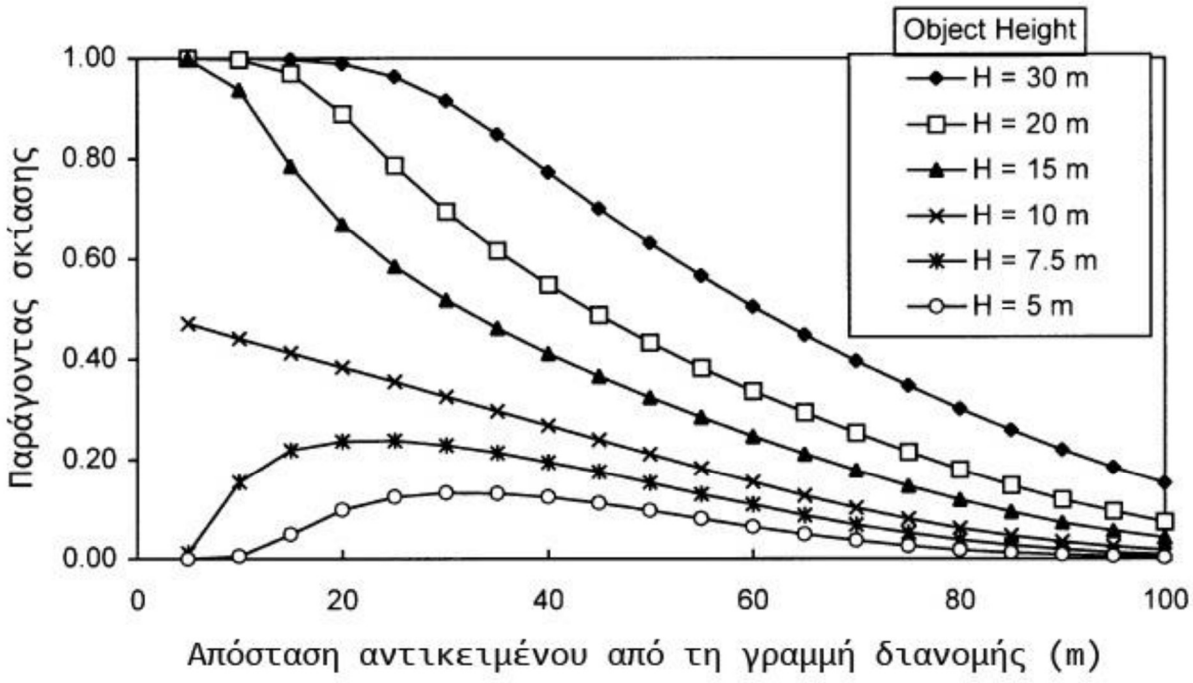
Τα δέντρα και τα κτίρια μπορούν να έχουν καθοριστικό ρόλο στην προστασία των γραμμών διανομής από κεραυνούς. Συχνά, αποτελούν σημεία έλξης για κεραυνούς που διαφορετικά θα χτυπούσαν τις γραμμές διανομής. Ο συντελεστής προστασίας Sf εκφράζει το ποσοστό της γραμμής διανομής που καλύπτεται από γειτονικά αντικείμενα. Ο παρακάτω τύπος περιγράφει τον αριθμό των κεραυνών που πλήττουν αυτή τη γραμμή.

$$N_s=N(1-S_f) \qquad 3.7$$

Ένας συντελεστής προστασίας 0.0 υποδηλώνει ότι η γραμμή διανομής βρίσκεται σε ανοιχτή περιοχή χωρίς κάλυψη από κοντινά αντικείμενα, ενώ ένας συντελεστής 1.0 σημαίνει πλήρη προστασία της γραμμής από άμεσες επιπτώσεις. Στην εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή θωράκισης για μια γραμμή διανομής ύψους 10 μέτρων, με την υπόθεση ότι τα αντικείμενα, όπως δέντρα και κτίρια, είναι τοποθετημένα παράλληλα με τη γραμμή. Το διάγραμμα μπορεί να εφαρμοστεί και στις δύο πλευρές της γραμμής διανομής, συνυπολογίζοντας τους συντελεστές θωράκισης τόσο από την αριστερή όσο και από τη δεξιά πλευρά. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας υπόψη μια γραμμή διανομής ύψους 10 μέτρων:

(α) Στην αριστερή πλευρά, σε απόσταση 30 μέτρων, υπάρχει σειρά κτιρίων ύψους 7.5 μέτρων ($S_{fLEFT} = 0.23$).

(β) Στη δεξιά πλευρά, σε απόσταση 40 μέτρων, βρίσκεται σειρά δέντρων ύψους 15 μέτρων ($S_{fRIGHT} = 0.4$).



Εικόνα 3.4: Παράγοντες προστασίας λόγω κοντινών αντικειμένων σε διαφορετικά ύψη για μια γραμμή διανομής ύψους 10m [7].

Υποθέτοντας ότι η GFD είναι 1 κεραυνός/km^2/έτος, ο αριθμός των άμεσων χτυπημάτων στις εναέριες γραμμές διανομής σε ανοικτή γη θα είναι 11,15 κεραυνοί/100 km/έτος (από την εξίσωση 3.6), με τον αριθμό των άμεσων χτυπημάτων να μειώνεται με τις σειρές των κτιρίων:

$N_s = N\,[1-(S_{fleft}+S_{fright})]$

= (11.15 κεραυνοί/100km/έτος) [1- (0.23+0.4)]

= 4.12 κεραυνοί/100km/έτος

Η μόνωση της γραμμής διανομής, είτε προστατεύεται μέσω αγωγών είτε από προστατευτικά κεραυνών, δεν μπορεί να αποτρέψει τα βραχυκυκλώματα που προκαλούνται από κεραυνικά πλήγματα. Ανεξάρτητα από το επίπεδο μόνωσης, την απόσταση μεταξύ των αγωγών ή τη γείωση, κάθε κεραυνός θα οδηγήσει σε βραχυκύκλωμα. Για τον υπολογισμό του αριθμού των βραχυκυκλωμάτων που οφείλονται σε άμεσες κεραυνικές προσβολές, εφαρμόζεται η εξίσωση 3.6 για γραμμές διανομής που βρίσκονται σε ανοικτές περιοχές, ενώ για μερικώς προστατευμένες γραμμές χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις 3.6 και 3.7. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως θεωρείται ότι όλα τα βραχυκυκλώματα προκαλούν ζημιές στις γραμμές διανομής.

3.5.2 Βραχυκύκλωμα από επαγόμενη τάση

Η θεωρία του Rusck εξηγεί ότι η μέγιστη τάση που προκαλείται σε μια γραμμή μεταφοράς ενέργειας στο πιο κοντινό σημείο του πλήγματος πάνω στην γραμμή υπολογίζεται από :

$$V_{\max} = 38.8 \frac{I_o h_a}{y} [kV] \qquad 3.8$$

Όπου:

I_o = μέγιστη τιμή ρεύματος του κεραυνού

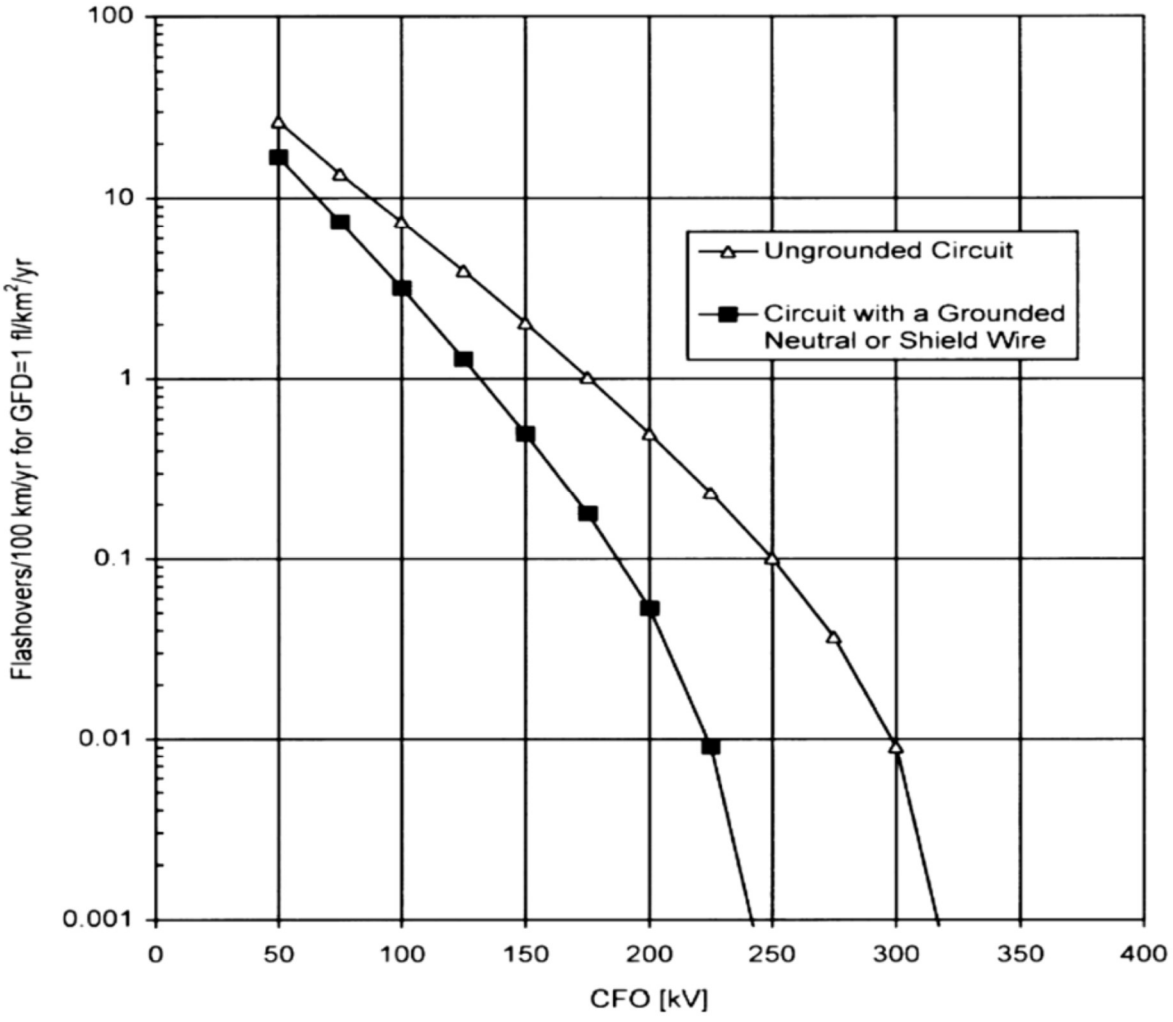
h_α = μέσο ύψος της γραμμής πάνω από το επίπεδο του εδάφους

y = η πιο κοντινή απόσταση ανάμεσα στο κεραυνικό πλήγμα και την γραμμή

Η παραπάνω μαθηματική σχέση εφαρμόζεται σε έναν άπειρα μακρύ μονό αγωγό που βρίσκεται πάνω σε ένα τέλεια αγώγιμο έδαφος. Οι εναέριοι αγωγοί προστασίας και οι ουδέτεροι αγωγοί που είναι γειωμένοι μειώνουν την τάση που ασκείται στη μόνωση, σε ένα ποσοστό που

κυμαίνεται από 0,6 έως 0,9. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από την απόσταση του γειωμένου αγωγού από τη γη, καθώς και από τη θέση των αγωγών φάσης.

Όταν το επίπεδο μόνωσης είναι χαμηλό, η πιθανότητα εμφάνισης βραχυκυκλωμάτων λόγω επαγόμενης τάσης αυξάνεται δραματικά. Στην εικόνα 3.5 παρουσιάζεται η συχνότητα των βραχυκυκλωμάτων σε συνάρτηση με την κρίσιμη τάση διάσπασης (CFO) για γραμμές που διαθέτουν δύο διαφορετικές διατάξεις γείωσης.



Εικόνα 3.5: Αριθμός βραχυκυκλωμάτων από επαγόμενη τάση έναντι του επιπέδου μόνωσης της γραμμής διανομής με ύψος γραμμής διανομής 10 μέτρα [7].

Όπως δείχνει το παρακάτω διάγραμμα, μία γραμμή αναπαριστά ένα μη γειωμένο κύκλωμα χωρίς ουδέτερο ή προστατευτικό αγωγό, ενώ η άλλη γραμμή απεικονίζει ένα γειωμένο κύκλωμα με ουδέτερο ή εναέριο προστατευτικό αγωγό που έχει γείωση. Η γείωση των αγωγών συμβάλλει στη μείωση της τάσης στους μονωτήρες και περιορίζει τα βραχυκυκλώματα, αρκεί η τιμή CFO να παραμείνει αμετάβλητη. Οι κοινές γειώσεις ή οι μη γειωμένες δομές παρουσιάζουν υψηλότερη CFO σε σχέση με τις πολλαπλά γειωμένες, εξαιτίας της έλλειψης γειωμένου ουδέτερου αγωγού. Οι τιμές έχουν κανονικοποιηθεί για GFD = 1 κεραυνό ανά km2 ετησίως και για γραμμές διανομής ύψους 10 μέτρων. Τα αποτελέσματα μπορούν να μεταβληθούν γραμμικά ανάλογα με το μήκος της γραμμής και την GFD. Τα δεδομένα του διαγράμματος 3.5 αφορούν γραμμές διανομής σε ανοιχτό έδαφος, χωρίς την παρουσία δέντρων ή κτιρίων κοντά. Ο αριθμός των επαγόμενων βραχυκυκλωμάτων εξαρτάται από την ύπαρξη κοντινών αντικειμένων που ενδέχεται να προστατεύουν τη γραμμή από άμεσες κρούσεις κεραυνών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα βραχυκυκλώματα λόγω τάσης μπορεί να αυξηθούν εξαιτίας περισσότερων χτυπημάτων στην περιοχή.

Για παράδειγμα, μια γραμμή διανομής ύψους 10 μέτρων σε ανοιχτό έδαφος με GFD = 1 [κεραυνός/km^2/έτος] θα δεχθεί περίπου 11 κεραυνούς ανά 100 km ετησίως από άμεσες κρούσεις, σύμφωνα με την εξίσωση 3.6. Σε τέτοιες συνθήκες, οι επαγόμενες τάσεις αποτελούν πρόβλημα μόνο σε γραμμές με πολύ χαμηλή μόνωση. Εάν το CFO είναι κάτω από 75 kV, ο αριθμός των βραχυκυκλωμάτων που προκαλούνται από τάση ξεπερνά εκείνον των βραχυκυκλωμάτων από άμεσες κρούσεις σε μη γειωμένα κυκλώματα. Σε προστατευόμενες περιοχές, τα βραχυκυκλώματα λόγω τάσης αποκτούν μεγαλύτερη σημασία. Κατά κανόνα, θεωρείται ότι στις γραμμές διανομής τα επαγόμενα βραχυκυκλώματα περιορίζονται όταν το CFO υπερβαίνει τα 300 kV. Ωστόσο, οι περισσότερες μετρήσεις τάσης βρίσκονται κάτω από αυτό το όριο, ενώ οι γραμμές με CFO πάνω από 300 kV παρουσιάζουν ελάχιστα βραχυκυκλώματα λόγω τάσης.

Ένα επιπλέον στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι οι περισσότερες γραμμές διανομής διαθέτουν μετασχηματιστές εξοπλισμένους με απαγωγείς υπερτάσεων, οι οποίοι μειώνουν τα βραχυκυκλώματα τάσης σε κάποιο βαθμό. Παρόλα αυτά, η επίδραση αυτής της μείωσης είναι συνήθως περιορισμένη.

3.6 Επίπεδο μόνωσης γραμμών διανομής

Η παρούσα κατευθυντήρια οδηγία στοχεύει να υποστηρίξει τους μηχανικούς των συστημάτων διανομής να ενισχύσουν την αντοχή των εναέριων γραμμών διανομής απέναντι στους κεραυνούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εναέριες γραμμές περιλαμβάνουν τη χρήση δύο ή περισσότερων ειδών μονωτικών υλικών για την προστασία από κεραυνούς.

Τα πιο διαδεδομένα υλικά μόνωσης που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις κατασκευές είναι η πορσελάνη, ο αέρας, το ξύλο, τα πολυμερή και ο υαλοβάμβακας. Κάθε ένα από αυτά διαθέτει τη δική του χαρακτηριστική μονωτική ικανότητα. Όταν συνδυάζονται διαφορετικά μονωτικά υλικά σε σειρά, η συνολική μόνωση που επιτυγχάνεται είναι μικρότερη από το άθροισμα των ατομικών επιπέδων μόνωσης κάθε υλικού.

Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν τη στάθμη βραχυκυκλώματος λόγω κεραυνών στις γραμμές διανομής, καθιστώντας δύσκολη την ακριβή εκτίμηση της συνολικής μόνωσης. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν:

α) Τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως η πυκνότητα του αέρα, η υγρασία, οι βροχοπτώσεις και η ατμοσφαιρική ρύπανση.

β) Την πολικότητα και τον ρυθμό αύξησης της τάσης.

γ) Φυσικά χαρακτηριστικά, όπως το σχήμα των μονωτικών στοιχείων, το σχήμα των μεταλλικών εξαρτημάτων και η διάταξη του μονωτήρα (κάθετη, οριζόντια ή διαγώνια).

Όταν το ξύλο βρίσκεται στην πορεία εκφόρτισης ενός κεραυνού, η επίδραση του στην αντοχή της μόνωσης μπορεί να ποικίλει σημαντικά, κυρίως λόγω της υγρασίας στην επιφάνειά του. Η αντοχή του ξύλου στη μόνωση δεν εξαρτάται τόσο από τις φυσικές του διαστάσεις.

Παρόλο που οι σχεδιαστές μπορεί να γνωρίζουν τα βασικά επίπεδα μόνωσης κεραυνών (BIL) για συγκεκριμένους συνδυασμούς μονωτικών υλικών, τα αποτελέσματα της παρούσας οδηγίας βασίζονται στο CFO των συνδυασμών αυτών. Το CFO ορίζεται ως το επίπεδο τάσης που δίνει στατιστικά 50% πιθανότητα βραχυκυκλώματος και 50% πιθανότητα αντοχής στον κεραυνό, όπως καθορίζεται σε εργαστηριακές συνθήκες. Με βάση την γκαουσιανή κατανομή των δεδομένων

βραχυκυκλώματος, μπορεί να υπολογιστεί στατιστικά οποιαδήποτε πιθανότητα αντοχής από την τιμή CFO και την τυπική απόκλιση.

Καθώς συγκεντρώνονταν εργαστηριακά δεδομένα, εξετάστηκαν διάφορες μέθοδοι για τον υπολογισμό της αναμενόμενης CFO για συγκεκριμένους συνδυασμούς μονωτικών υλικών. Η πιο πρακτική μέθοδος αποδείχθηκε να είναι αυτή της "προστιθέμενης αντοχής μόνωσης".

Αυτή η μέθοδος, βασισμένη σε τεχνικές που είχαν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως για τον σχεδιασμό γραμμών μεταφοράς, προσαρμόστηκε ώστε να καλύπτει τα πολλαπλά υλικά που χρησιμοποιούνται στις γραμμές διανομής. Εστιάζει στη CFO του βασικού μονωτικού υλικού και την ενισχύει με την αύξηση που προκύπτει από τα πρόσθετα υλικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι η πρόσθετη μονωτική αντοχή είναι πάντα μικρότερη από την αντίστοιχη του ίδιου του πρόσθετου στοιχείου.

3.6.1 CFO τάση της συνδυασμένης μόνωσης

Η κύρια μέθοδος για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση των γραμμών διανομής περιλαμβάνει τη χρήση ξύλινων στηριγμάτων για τη στήριξή τους, ενώ οι στύλοι συνδέονται διαδοχικά με βασική μόνωση, προκειμένου να ενισχυθεί η αντοχή τους απέναντι σε χτυπήματα από κεραυνούς. Στις εναέριες γραμμές διανομής, η πιο ευάλωτη μόνωση συχνά δεν βρίσκεται ανάμεσα στους αγωγούς στον αέρα, αλλά στους ίδιους τους στύλους.

Στη σύγχρονη εποχή, διεξάγονται μελέτες για τον συνδυασμό διαφορετικών μονωτικών υλικών που εφαρμόζονται στα ηλεκτρικά συστήματα. Αυτές οι έρευνες επικεντρώνονται στις γραμμές διανομής και μεταφοράς, καθώς και στην αντοχή του ξύλου όταν εκτίθεται σε κεραυνούς, μηχανικές καταπονήσεις ή αιχμηρά χτυπήματα. Πρόσφατα, έχουν εισαχθεί πολυμερείς μονωτήρες και στηρίγματα από υαλοβάμβακα στις γραμμές διανομής, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα και την ανθεκτικότητά τους.

3.6.2 Προσδιορισμός της CFO τάσης για κατασκευές με μονώσεις σειράς

Οι έρευνες έχουν καταδείξει ότι η προσθήκη ενός μέτρου ξύλου ή υαλοβάμβακα μπορεί να αυξήσει την κρουστική αντοχή της υπάρχουσας μόνωσης κατά περίπου 330-500 kV. Σε μεγαλύτερα μήκη, η αντοχή της μόνωσης σε κεραυνικά πλήγματα για έναν ξύλινο ή υαλοβάμβακα βραχίονα σε συνδυασμό με έναν μονωτήρα εξαρτάται κυρίως από τον ίδιο τον βραχίονα. Συνεπώς, η προστασία από εναλλασσόμενες τάσεις παρέχεται αποκλειστικά από τον μονωτήρα, ενώ ο ξύλινος ή υαλοβάμβακας βραχίονας λειτουργεί ως επιπλέον προστασία απέναντι στις κεραυνικές υπερτάσεις.

Αν όμως η διαδρομή του κεραυνού προς τη γη περιλαμβάνει περισσότερους από έναν τύπους μόνωσης που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, η συνολική κρίσιμη τάση βραχυκύκλωσης (CFO) δεν υπολογίζεται απλά προσθέτοντας τις τιμές CFO των μεμονωμένων στοιχείων. Αντίθετα, είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων που απαιτούν ξεχωριστή ανάλυση για κάθε στοιχείο.

Για να υπολογιστεί η συνολική CFO μιας δομής διανομής, χρησιμοποιείται η προσθετική μέθοδος CFO, η οποία περιλαμβάνει:

- Την αξιολόγηση της συμβολής της επιπλέον μόνωσης στην τελική CFO του συστήματος.

- Την εκτίμηση της συνολικής CFO, γνωρίζοντας τις τιμές CFO των επιμέρους μονωτικών στοιχείων.

Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε πίνακες και γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα, τα οποία αναδεικνύουν πώς η προσθήκη μόνωσης επηρεάζει τη συνολική απόδοση. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν βασικές τιμές CFO για κάθε στοιχείο και πρόσθετες τιμές CFO που αφορούν συγκεκριμένα εξαρτήματα.

Όταν συνδυάζονται δύο στοιχεία, η συνολική CFO τους είναι σημαντικά μικρότερη από το άθροισμα των ξεχωριστών τιμών τους. Οι μονωτήρες θεωρούνται βασικά πρωτεύοντα στοιχεία μόνωσης. Η συνολική CFO που προκύπτει ισούται με την CFO του πρωτεύοντος στοιχείου (ins) συν την πρόσθετη CFO του δευτερεύοντος στοιχείου (add.sec). Έτσι, καταλήγουμε στον εξής τύπο:

$$CFO_{total} = CFO_{ins} + CFO_{add.sec} \quad 3.9$$

Η αντίστοιχη σχέση για n στον αριθμό υλικά έχει την μορφή:

$$CFO_{total} = CFO_{ins} + CFO_{add.sec} + CFO_{add.third} + ... + CFO_{add.nth} \quad 3.10$$

Η ευρέως χρησιμοποιούμενη τιμή κρίσιμης τάσης βραχυκύκλωσης (CFO), καθώς επίσης και η CFO των προστιθέμενων υλικών δίδεται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 3.2 – Κύρια μόνωση (CFOins)[7].

Insulators		**kV**
Pin	ANSI 55-4	105
	ANSI 55-5	120
	ANSI 55-6	140
Porcelain Suspension	1–10.2 cm (4 in)	75
	2–10.2 cm (4 in)	165
	3–10.2 cm (4 in)	250
Insulation		**kV/m**
Air		600
Wooden pole		330
Wooden crossarm		360
Fiberglass standoff		500

Πίνακας 3.3 – Επιπρόσθετη CFO δευτερευόντων συστατικών (CFOadd.sec) [7].

Second component	With first component of	kV/m
Wooden crossarm	Vertical pin insulator	250
Wooden crossarm	Vertical suspension insulator	160
Wooden crossarm	Horizontal suspension insulator	295
Wooden pole	Vertical pin insulator	235
Wooden pole	Suspension insulator	90
Fiberglass crossarm	Insulator	250
Fiberglass standoff	Insulator	315

Πίνακας 3.4 – Επιπρόσθετη CFO τριτευόντων συστατικών (CFOadd.third) [7].

Third component	kV/m
Wooden pole	65
Fiberglass standoff	200

Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται σε επίπεδα υγρασίας που συνιστώνται για τους υπολογισμούς του CFO. Συνήθως, αν υπάρχει διαθέσιμη τιμή CFO από τον κατασκευαστή ή από εργαστηριακές δοκιμές υπό ξηρές συνθήκες, η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται με 0,8 για να υπολογιστεί μια εκτίμηση της τιμής CFO σε υγρές συνθήκες. Κατά κανόνα, η τιμή που αντιστοιχεί σε "υγρές" συνθήκες κυμαίνεται μεταξύ 70% και 90% της τιμής που προκύπτει για "ξηρές" συνθήκες.

Για υλικά που δεν περιλαμβάνονται στον παραπάνω πίνακα, η συνολική τιμή CFO μπορεί να εκτιμηθεί μειώνοντας το δεύτερο και τρίτο συστατικό σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$CFO_{add.sec} = 0.45 \times CFO_{ins} \qquad 3.11$$

$$CFO_{add.third} = 0.20 \text{ x } CFO_{ins} \quad 3.12$$

Η εκτεταμένη μέθοδος προσδιορισμού του CFO και οι πίνακες που περιλαμβάνονται στο παρόν εγχειρίδιο επιτρέπουν την εξαγωγή αποτελεσμάτων με περιθώριο σφάλματος περίπου ±20%. Για πιο ακριβείς υπολογισμούς, μπορούν να εφαρμοστούν οι εξής τεχνικές:

- Διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών υπό συνθήκες υγρασίας κατά τη φάση της κατασκευής, προσφέροντας τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.
- Πραγματοποίηση δοκιμών αντίστασης σε κεραυνούς σε ξηρό περιβάλλον και προσαρμογή των αποτελεσμάτων με συντελεστή 0,8 για την εκτίμηση του CFO σε υγρές συνθήκες.
- Χρήση της πλέον λεπτομερούς τιμής για την κρίσιμη τάση βραχυκύκλωσης CFO.

3.6.3 Τεχνικά ζητήματα

Οι κρίσιμες τάσεις βραχυκυκλώματος σε συστήματα διανομής μπορούν να περιοριστούν μέσω κατάλληλου εξοπλισμού και υλικών. Αυτά τα "ευάλωτα σημεία" μπορούν να ενισχύσουν τις υπερτάσεις που προκύπτουν από επαγόμενες τάσεις. Ακολουθούν μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

Επίτονα: Τα επίτονα αποτελούν συχνά βασικό παράγοντα στη μείωση της CFO μιας γραμμής, καθώς τοποθετούνται ψηλά στους στύλους, κοντά στη βασική μόνωση, για μηχανική σταθερότητα. Ως μονοπάτια προς τη γη, μειώνουν την CFO του συστήματος. Οι πορσελάνινοι μονωτές που χρησιμοποιούνται συνήθως προσφέρουν χαμηλή μόνωση (CFO κάτω από 30 kV). Αντίθετα, μονωτήρες υαλοβάμβακα μήκους 50 cm προσφέρουν CFO περίπου 250 kV.

Διακόπτες ασφαλείας: Οι διακόπτες ασφαλείας, ως μη προστατευόμενα στοιχεία, μειώνουν την CFO των στύλων. Σε δίκτυα 15 kV, οι διακόπτες ασφαλείας με BIL 95 kV μπορούν να περιορίσουν την CFO της κατασκευής σε αυτό το επίπεδο, ανάλογα με την εγκατάστασή τους. Για ξύλινους στύλους, η σωστή τοποθέτηση των διακοπτών μπορεί να μειώσει τα προβλήματα, απομακρύνοντας τον βραχίονα σύνδεσης από τους αγωγούς γείωσης και ουδέτερους αγωγούς.

Ύψος ουδέτερου αγωγού: Η απόσταση μεταξύ ουδέτερου και φάσης εξαρτάται από τον τύπο στήριξης. Σε ξύλινους στύλους, όσο πιο κοντά είναι ο ουδέτερος αγωγός στη φάση, τόσο χαμηλότερη είναι η CFO.

Αγώγιμα στηρίγματα και κατασκευές: Η χρήση σκυροδέματος και μετάλλων αυξάνεται στις εναέριες γραμμές διανομής, αλλά μειώνει την CFO. Εάν τα μεταλλικά στοιχεία είναι γειωμένα, η μόνωση εξαρτάται αποκλειστικά από τους μονωτήρες. Οι σχεδιαστές πρέπει να εξισορροπούν τις απαιτήσεις προστασίας από κεραυνούς με τον μηχανικό σχεδιασμό και το κόστος, χρησιμοποιώντας υλικά όπως ξύλο ή υαλοΐνες για καλύτερη μόνωση.

Πολλαπλά κυκλώματα: Σε στύλους με πολλαπλά κυκλώματα, η μόνωση αποδυναμώνεται λόγω μικρότερων αποστάσεων φάσεων και λιγότερου ξύλου. Σε γραμμές μεταφοράς με γειωμένους προστατευτικούς αγωγούς, η μόνωση μπορεί να βελτιωθεί με χρήση υαλοβάμβακα για απομόνωση.

Γραμμές με διαχωριστές αγωγών: Οι κοντινές αποστάσεις διαχωρισμού στις γραμμές διανομής παρέχουν στήριξη και μόνωση, αλλά έχουν χαμηλή CFO (150-200 kV), καθιστώντας την προστασία από κεραυνούς λιγότερο αποτελεσματική. Η καλύτερη γείωση μπορεί να βελτιώσει την απόδοση αυτών των γραμμών.

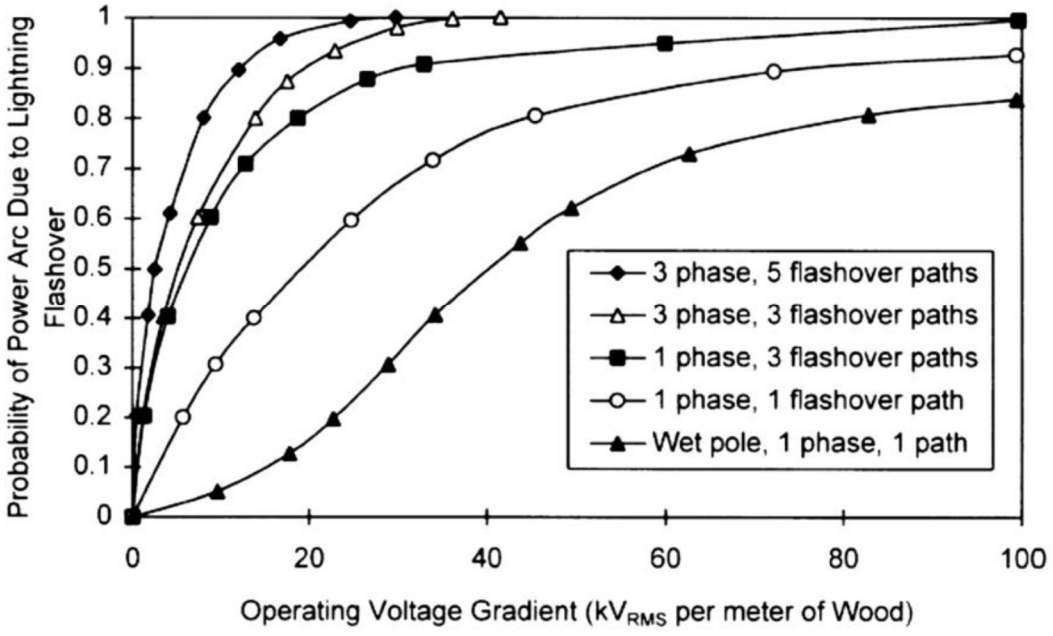
Προστατευτικά διάκενα και σύνδεσμοι μονωτήρων: Χρησιμοποιούνται για την αποφυγή ζημιών από κεραυνούς σε ξύλινα μέρη και την πρόληψη πυρκαγιών στους στύλους. Ωστόσο, μειώνουν σημαντικά την CFO της κατασκευής. Η χρήση συνδέσμων μονωτήρα-ξύλου στη βάση των μονωτήρων αποτελεί μια καλύτερη λύση για την προστασία των ξύλινων στοιχείων.

3.6.4 Ικανότητα ξύλου για διακοπή του τόξου

Οι ξύλινοι στύλοι και οι βραχίονες έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν τα ηλεκτρικά τόξα που δημιουργούνται από κεραυνούς, προστατεύοντας έτσι το δίκτυο από διαταραχές. Η ικανότητα του ξύλου να διακόπτει το τόξο εξαρτάται κυρίως από την τάση που υπάρχει τη στιγμή του κύματος που προκαλεί ο κεραυνός. Αν η τάση είναι πολύ χαμηλή, κοντά στο μηδέν, οι πιθανότητες να μην

προκληθεί ζημιά είναι αυξημένες. Κρατώντας την ονομαστική τάση στον ξύλινο βραχίονα κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο, η πιθανότητα ζημίας μπορεί να μειωθεί δραστικά.

Σε περιπτώσεις πολλαπλών υπερβάσεων, η ικανότητα του ξύλου να αντέχει τα τόξα μειώνεται αισθητά (όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6). Οι περισσότερες γραμμές διανομής υπόκεινται σε πολλαπλές υπερβάσεις λόγω άμεσων ερπυσμών. Ωστόσο, οι δομές διανομής που εμφανίζουν RMS τάσεις άνω των 10 kV/m δεν επηρεάζουν σημαντικά την ικανότητα του ξύλου να αντέχει τα τόξα. Για παράδειγμα, σε μια γραμμή διανομής 13,2 kV με απόσταση 0,5 m ξύλου μεταξύ του μονωτήρα φάσης και του ουδέτερου αγωγού, η RMS πτώση τάσης κατά μήκος του ξύλου υπολογίζεται σε 132 kV/√3/0,5 m = 15,2 kV/m. Σε αυτά τα επίπεδα τάσης, η παρεμπόδιση μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο, εφόσον εξασφαλιστεί διάκενο ξύλου 1 m ανάμεσα σε όλους τους αγωγούς φάσης και τα γειωμένα αντικείμενα στον στύλο. Αυτό είναι ήδη εφικτό σε κυκλώματα με υψηλή μόνωση και μεγάλες αποστάσεις ξυλείας. Υποθέτουμε, ωστόσο, ότι κάθε κεραυνός θα μπορούσε να προκαλέσει σφάλμα.



Εικόνα 3.6: Πιθανότητα σχηματισμού τόξου λόγω βραχυκυκλώματος από κεραυνό σε υγρό ξύλινο βραχίονα [7].

3.6.5 Καταστροφή του ξύλου λόγω κεραυνού

Η μακροχρόνια εμπειρία στον τομέα της τεχνικής συντήρησης έχει αποδείξει ότι οι περιπτώσεις θραύσης στύλων και βραχιόνων είναι εξαιρετικά ασυνήθιστες. Παρ' όλα αυτά, σε περιοχές με συχνά κεραυνικά φαινόμενα, μπορεί να προκύψουν ορισμένες ανησυχίες. Η πιθανότητα ζημιών από κεραυνούς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τα επίπεδα υγρασίας και η κατάσταση γήρανσης του ξύλου. Η καταστροφή του ξύλου συμβαίνει μόνο αν η θραύση ξεκινήσει από το εσωτερικό του τόξου και όχι από την εξωτερική του επιφάνεια. Ξύλα με πιο ανοιχτό χρώμα έχουν μεγαλύτερη ευπάθεια σε εσωτερικές ζημιές.

Σε περιπτώσεις όπου το ξύλο παρουσιάζει φθορά σύμφωνα με τα ιστορικά δεδομένα, είναι κρίσιμο να προστατεύεται η ξύλινη δομή μέσω της χρήσης μονωτικών υλικών. Ωστόσο, η εφαρμογή μόνωσης μπορεί να προκαλέσει βραχυκύκλωμα. Συνεπώς, προτιμάται η τοποθέτηση επιφανειακών ηλεκτροδίων κοντά στις άκρες των μονωτήρων. Μεταλλικές επεκτάσεις, όπως καλύμματα ή λωρίδες αγωγών, μπορούν να τοποθετηθούν σε θέσεις που είναι πιθανότερο να παρουσιαστούν βραχυκυκλώματα. Αυτές οι προσθήκες δεν προκαλούν εσωτερικές ζημιές, αλλά περιορίζονται σε επιφανειακούς κινδύνους.

Η προστασία της ξυλείας από κεραυνούς συμβάλλει στη μείωση της πιθανότητας πυρκαγιών στην κορυφή των στύλων, οι οποίες συχνά οφείλονται σε διαρροές στις μεταλλο-ξύλινες συνδέσεις. Χρήση τοπικών συνδέσμων, λωρίδων αγωγών ή καλυμμάτων μπορεί να καλύψει τα ευάλωτα σημεία επαφής μεταξύ μετάλλου και ξύλου, μειώνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιών. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται πιο αποτελεσματική από τη χρήση ενιαίων συνδέσεων μονωτήρων.

3.7 Προστασία γραμμών διανομής με προστατευτικούς αγωγούς

Ο αγωγός προστασίας είναι ένας γειωμένος αγωγός που τοποθετείται πάνω από τον αγωγό φάσης με σκοπό να απορροφά τα κεραυνικά πλήγματα που κατευθύνονται προς τη φάση. Με αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα του κεραυνού οδηγείται στο έδαφος μέσω των γειωμένων στύλων. Ο αγωγός προστασίας γειώνεται σε κάθε στύλο της γραμμής.

Το κρουστικό ρεύμα που παράγεται από τον κεραυνό περνά από τον στύλο μέσω του αντιστάτη προς το έδαφος, αυξάνοντας το δυναμικό του και προκαλώντας μεγάλη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στον αγωγό γείωσης και τον αγωγό φάσης. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να οδηγήσει σε αντίστροφο βραχυκύκλωμα, το οποίο επηρεάζει αρνητικά την αποτελεσματικότητα των αγωγών προστασίας στις γραμμές διανομής. Για να είναι αποδοτικοί οι αγωγοί προστασίας, πρέπει:

1. Να διαθέτουν κατάλληλη μόνωση που εξασφαλίζει επαρκή CFO μεταξύ του αγωγού γείωσης και του αγωγού φάσης.

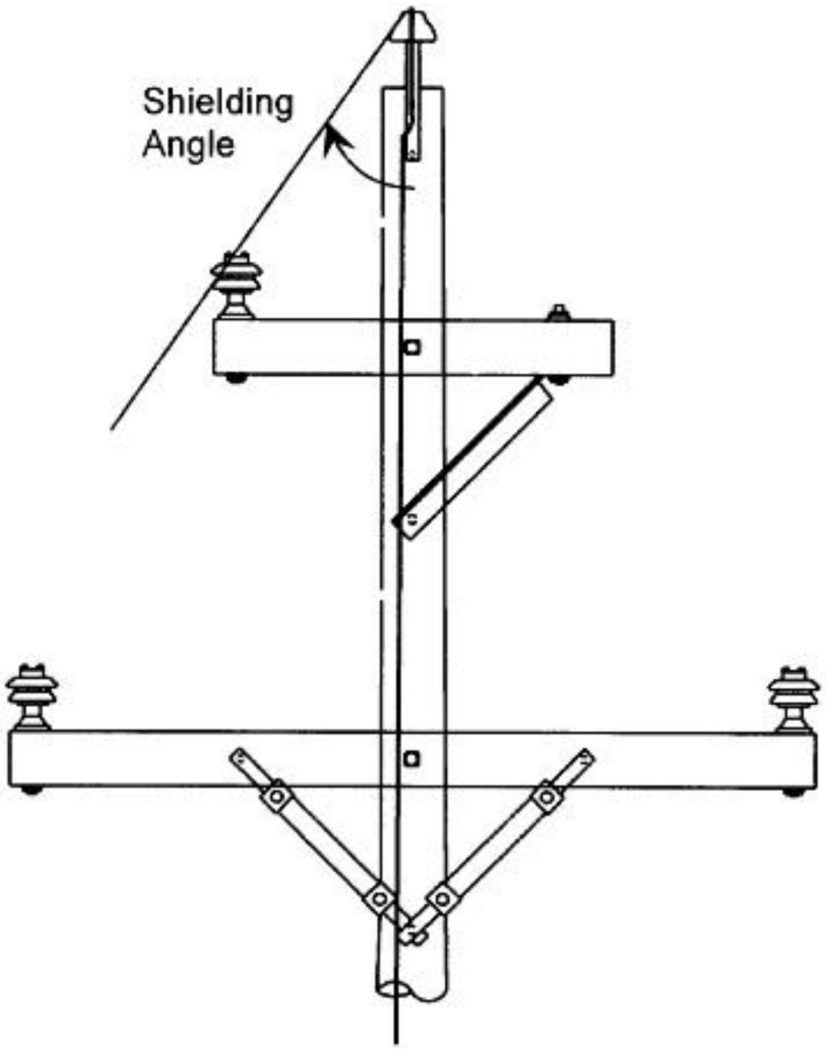
2. Να επιτυγχάνεται χαμηλή αντίσταση στη γείωση.

Η εικόνα 3.5 χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του αριθμού των επαγόμενων βραχυκυκλωμάτων σε συστήματα με αγωγούς προστασίας. Η προσθήκη τέτοιων αγωγών σε γραμμές διανομής με τρεις αγωγούς μειώνει τα επαγόμενα βραχυκυκλώματα. Δεδομένου ότι ο αγωγός προστασίας είναι γειωμένος, μειώνει την τάση στον αγωγό φάσης μέσω χωρητικής σύζευξης. Όσο πιο κοντά είναι ο αγωγός φάσης στον προστατευτικό αγωγό, τόσο καλύτερη είναι η σύζευξη και τόσο λιγότερα επαγόμενα βραχυκυκλώματα παρατηρούνται (αν και η CFO μπορεί να μειώνεται). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τοποθέτηση ενός γειωμένου αγωγού κάτω από τον αγωγό φάσης έχει παρόμοια αποτελέσματα με έναν εναέριο αγωγό προστασίας.

Ακόμη κι αν ο ουδέτερος αγωγός αντικατασταθεί από έναν εναέριο αγωγό προστασίας σε σύστημα πολλαπλών γειώσεων τεσσάρων πυρήνων, ο αριθμός των επαγόμενων βραχυκυκλωμάτων δεν μειώνεται. Ωστόσο, καλύτερη απόδοση μπορεί να επιτευχθεί με τη συνδυασμένη χρήση προστατευτικών και ουδέτερων αγωγών. Παρά το υψηλό κόστος εγκατάστασης, που περιλαμβάνει τους ίδιους τους αγωγούς, τη γείωση των στύλων, την επιπλέον μόνωση και την ανάγκη για μεγαλύτερο ύψος στύλων, οι προστατευτικοί αγωγοί αποδεικνύονται εξαιρετικά αποτελεσματικοί. Το μεγαλύτερο ύψος αυξάνει τα απευθείας χτυπήματα κεραυνών, αλλά ο μειωμένος αριθμός βραχυκυκλωμάτων καθιστά τη χρήση τους πολύτιμη παρά τις προκλήσεις σχεδιασμού και κόστους.

3.7.1 Γωνία προστασίας

Για να αποτραπούν ζημιές στους αγωγούς φάσης από πλήγματα κεραυνού, συνιστάται η χρήση ενός προστατευτικού αγωγού με γωνία προστασίας 45° ή λιγότερο (εικόνα 3.7), ειδικά σε γραμμές με ύψος μικρότερο από 15 μέτρα και αποστάσεις μεταξύ αγωγών μικρότερες από 2 μέτρα. Για ψηλότερες γραμμές, απαιτείται μικρότερη γωνία προστασίας, σύμφωνα με τις οδηγίες του IEEE Std 1243-1997.



Εικόνα 3.7: Προστατευτική γωνία προστατευτικού αγωγού [7].

3.7.2 Απαιτήσεις μόνωσης

Η απόδοση του προστατευτικού αγωγού στις γραμμές διανομής εξαρτάται κυρίως από την απόσταση που υπάρχει ανάμεσα στον καθοδικό αγωγό γείωσης και τους αγωγούς φάσης. Όταν ο καθοδικός αγωγός γείωσης βρίσκεται σε επαφή με τον στύλο καθ' όλο το ύψος του, ενδέχεται να δυσκολεύεται η επίτευξη επαρκούς μόνωσης. Στις περιπτώσεις ξύλινων στύλων, συνήθως απαιτείται η απομόνωση των καθοδικών αγωγών γείωσης από τα σημεία επαφής τους με τους μονωτήρες φάσεων και τους βραχίονες. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση ράβδων από fiberglass ή οριζόντιων στηριγμάτων που απομακρύνουν τον γειωμένο αγωγό κατά 30-60 εκατοστά από τον στύλο. Η πιο κρίσιμη παράμετρος είναι η μικρότερη απόσταση CFO ανάμεσα στον γειωμένο αγωγό και την πλησιέστερη φάση. Παράλληλα, είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη μόνωση των επιτόνων για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής CFO.

Για την αποτελεσματική προστασία των γραμμών διανομής σε τάσεις 250-330 kV με τη χρήση προστατευτικών αγωγών, απαιτείται υψηλό επίπεδο CFO. Παρόλα αυτά, η επίτευξη αυτής της μόνωσης μπορεί να γίνει σχετικά εύκολα με τη χρήση στηριγμάτων που διαθέτουν γειωμένους πόλους.

3.7.3 Αποτελεσματικότητα επιπέδου γείωσης και μόνωσης

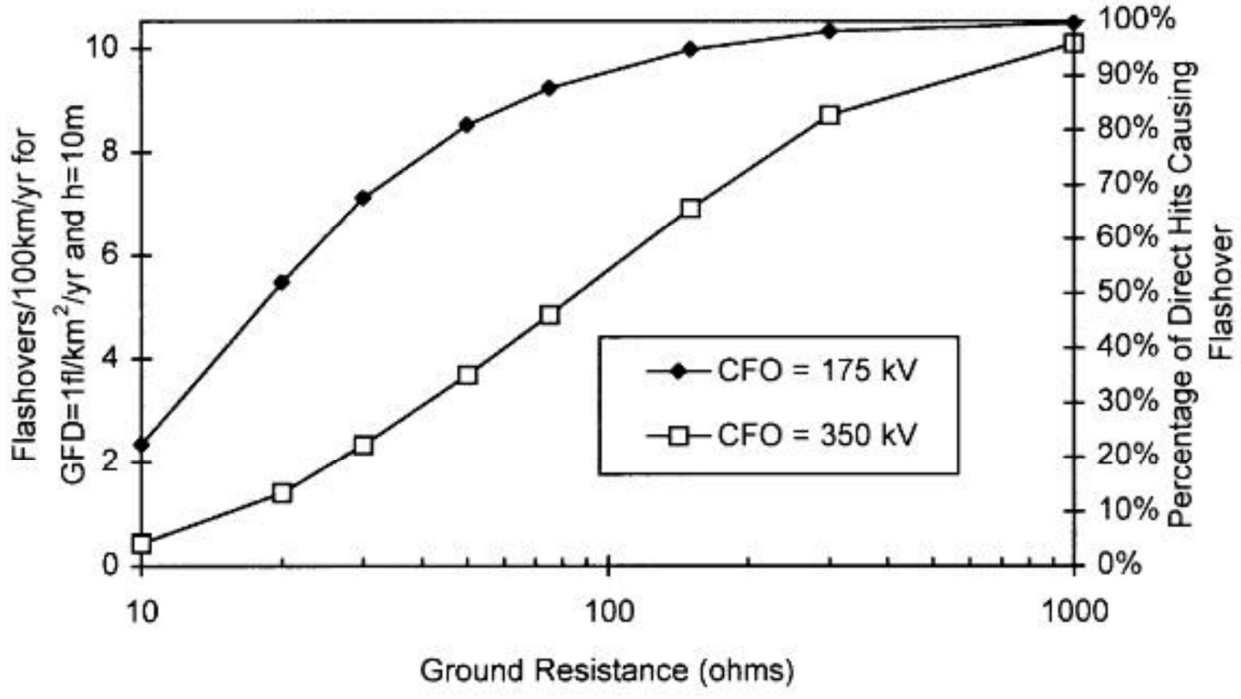
Η αποτελεσματικότητα ενός αγωγού προστασίας εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της γείωσης. Για να λειτουργεί σωστά, η αντίσταση του εδάφους πρέπει να είναι μικρότερη από 10Ω όταν η επιτρεπτή τάση είναι κάτω από 200kV. Εάν ληφθούν υπόψη η τάση και η μόνωση, μια αντίσταση γείωσης έως και 40Ω μπορεί να προσφέρει ικανοποιητική απόδοση για CFO που κυμαίνεται μεταξύ 300-350kV. Είναι απαραίτητο ο αγωγός προστασίας να συνδέεται στη γείωση κάθε πόλου για να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη προστασία. Στην εικόνα 3.8 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του αγωγού προστασίας και ο ρόλος της γείωσης, μέσω προσομοίωσης για προστατευτικό αγωγό με CFO 175kV και 350kV.

Οι γραμμές διανομής που τοποθετούνται κάτω από γραμμές μεταφοράς ενδέχεται να αντιμετωπίσουν σοβαρούς κινδύνους λόγω ανάστροφων βραχυκυκλωμάτων. Η ανύψωση των

γραμμών σε μεγαλύτερο ύψος και η εγκατάσταση ευρύτερων δομών μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο άμεσων πληγμάτων στις κατασκευές. Για την αποφυγή τέτοιων κινδύνων, είναι κρίσιμη η διατήρηση υψηλής ποιότητας μόνωσης, ώστε να περιοριστούν τα περιστατικά υπερβολικών βραχυκυκλωμάτων.

3.7.4 Αγωγοί προστασίας και αλεξικέραυνα

Για να περιορίσουμε τα φαινόμενα βραχυκυκλωμάτων στις γραμμές μεταφοράς, μπορούμε να τοποθετήσουμε αλεξικέραυνα σε κάθε στύλο για κάθε φάση, συνοδευόμενα από έναν προστατευτικό αγωγό. Τα αλεξικέραυνα προστατεύουν τη μόνωση από πιθανά ανάστροφα βραχυκυκλώματα, ενώ ο προστατευτικός αγωγός κατευθύνει το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος προς το έδαφος, μειώνοντας έτσι την ένταση του ρεύματος που περνάει από τα αλεξικέραυνα. Με αυτόν τον τρόπο, η προστασία των γραμμών μεταφοράς εξαρτάται λιγότερο από την ποιότητα της μόνωσης και της γείωσης.



Εικόνα 3:8 Αποτέλεσμα της αντίστασης γείωσης στην απόδοση του προστατευτικού αγωγού [7].

3.8 Προστασία γραμμών με αλεξικέραυνα

Τα αλεξικέραυνα χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά για την προστασία εξοπλισμού όπως οι μετασχηματιστές και οι ρυθμιστές στις γραμμές διανομής. Υπό κανονικές συνθήκες τάσης, λειτουργούν ως υψηλές αντιστάσεις, ενώ κατά τη διάρκεια κρουστικών τάσεων από κεραυνούς μετατρέπονται σε χαμηλές αντιστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο, κατευθύνουν το κρουστικό ρεύμα προς τη γη, περιορίζοντας παράλληλα την τάση που επηρεάζει τον εξοπλισμό, η οποία αποτελείται από την τάση εκφόρτισης του αλεξικέραυνου και το επαγωγικό ρεύμα που δημιουργείται στις γραμμές του αλεξικέραυνου και στους γειωμένους αγωγούς.

Η χρήση αλεξικέραυνων είναι κρίσιμη για την προστασία των γραμμών διανομής από βραχυκυκλώματα και διακοπές κυκλώματος, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια της μόνωσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι αλεξικέραυνων, όπως εκείνοι με διάκενο από καρβίδιο σιλικόνης ή απαγωγείς υπερτάσεων με ή χωρίς διάκενο από οξείδιο μετάλλου. Παρόλο που μπορεί να υπάρχουν διαφορές στις τάσεις και τα ρεύματα μεταξύ των διαφόρων τύπων, όλοι λειτουργούν παρόμοια ως προς την προστασία της μόνωσης των γραμμών διανομής. Αυτές οι διαφορές δεν επηρεάζουν ουσιαστικά την αποτελεσματικότητα της προστασίας, εφόσον υπάρχει ένα επαρκές περιθώριο ασφάλειας.

Για την επιλογή του κατάλληλου αλεξικέραυνου, μπορούμε να συμβουλευτούμε το πρότυπο IEEE Std C62.22-1991 ή τις οδηγίες του κατασκευαστή. Συνήθως, για την προστασία εξοπλισμού (ειδικά σε μη-γειωμένες γραμμές), προτιμάται ένα αλεξικέραυνο με το χαμηλότερο δυνατό επίπεδο προστασίας. Ωστόσο, για τη μόνωση των γραμμών, δεν είναι απαραίτητο να επιλέγεται το χαμηλότερο επίπεδο προστασίας, καθώς η προστασία που παρέχει το αλεξικέραυνο είναι γενικά ανώτερη από την αντοχή της μόνωσης της γραμμής. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το ποσοστό αποτυχίας των αλεξικέραυνων που προστίθενται σε σχέση με τη συνολική βελτίωση της γραμμής που επιτυγχάνεται μέσω της εγκατάστασής τους.

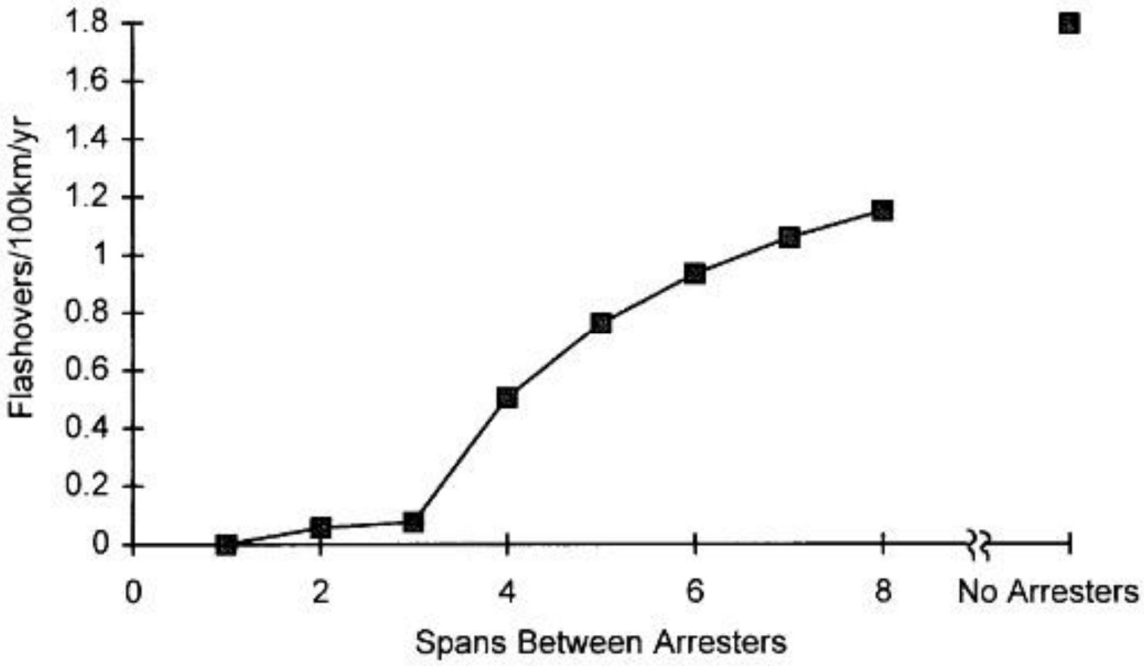
3.8.1 Μήκος αγωγών σύνδεσης αλεξικέραυνων

Οι αγωγοί που συνδέουν τη γραμμή διανομής με τα σημεία γείωσης των αλεξικέραυνων έχουν εσωτερική επαγωγή, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε πτώσεις τάσης κατά μήκος του αγωγού όταν εκδηλώνεται κεραυνός. Αυτές οι πτώσεις τάσης προστίθενται στην τάση εκφόρτισης του αλεξικέραυνου, αυξάνοντας έτσι την τάση που φτάνει στις προστατευόμενες συσκευές.

Παρόλο που το μήκος της γραμμής σύνδεσης δεν επηρεάζει σοβαρά την προστασία της μόνωσης των γραμμών διανομής, είναι κρίσιμο για την προστασία του εξοπλισμού. Ωστόσο, ο εναέριος εξοπλισμός διαθέτει αρκετά μεγάλο περιθώριο ασφαλείας. Επιπλέον, η μόνωση των γραμμών διανομής είναι γενικά υψηλότερης στάθμης από την τυπική βασική στάθμη μόνωσης (BIL). Παρά ταύτα, συνιστάται οι γραμμές διανομής με αλεξικέραυνα και οι γειωμένοι αγωγοί να παραμένουν όσο το δυνατόν πιο κοντά και ευθύγραμμοι. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη σωστή τοποθέτηση των αλεξικέραυνων, μπορεί κανείς να ανατρέξει στο πρότυπο IEEE Std C62.22-1991.

3.8.2 Βραχυκυκλώματα από έμμεσα πλήγματα

Η εγκατάσταση αλεξικέραυνων μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση των επαγόμενων τάσεων που δημιουργούνται από κεραυνούς σε κοντινή απόσταση. Στην εικόνα 3.9 φαίνονται τα αποτελέσματα για ένα κύκλωμα χωρίς γείωση και με μόνωση στα 150 kV. Ακόμη και αν οι αλεξικέραυνοι τοποθετηθούν σε αραιά διαστήματα, η πιθανότητα βραχυκυκλωμάτων λόγω επαγόμενων τάσεων μειώνεται αισθητά. Για παράδειγμα, εάν οι αλεξικέραυνοι τοποθετηθούν κάθε 8 στύλους, τα σφάλματα μπορούν να μειωθούν κατά τουλάχιστον 25%. Σε δίκτυα διανομής που περιλαμβάνουν πολλούς μετασχηματιστές, η χρήση αλεξικέραυνων για την προστασία τους μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική απέναντι στις επαγόμενες τάσεις.



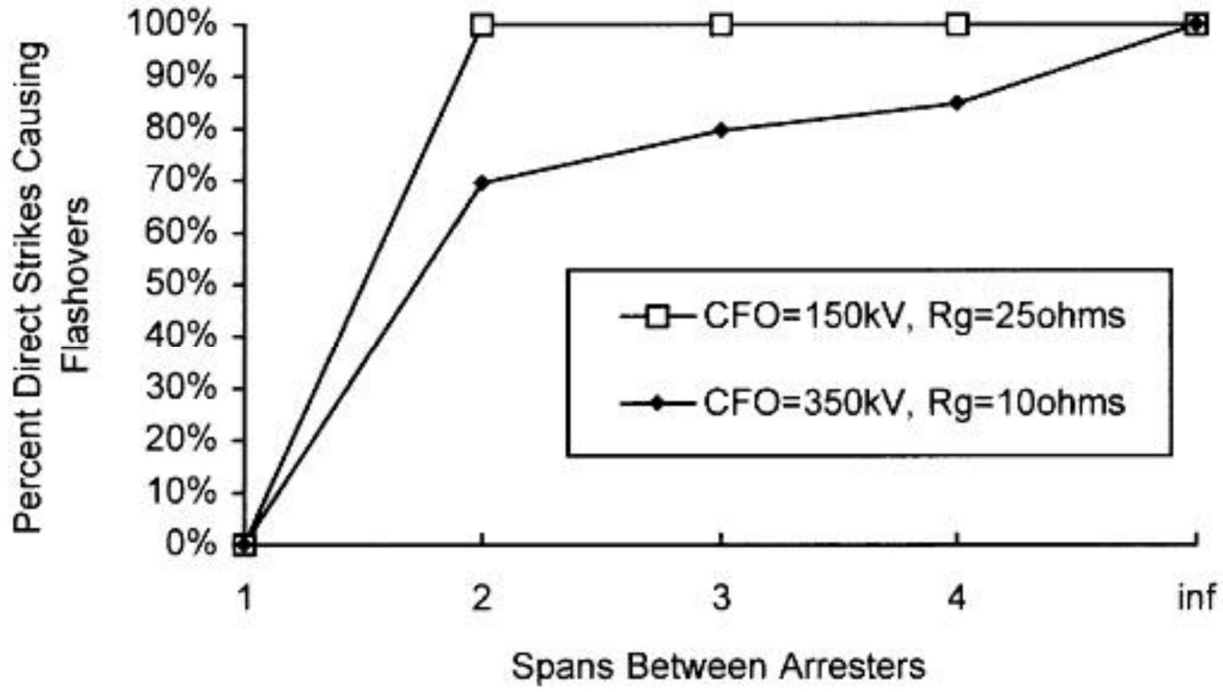
Εικόνα 3.9 Αποστάσεις αλεξικέραυνων για βραχυκυκλώματα από επαγόμενη τάση [7].

Η τοποθέτηση αλεξικέραυνων για την προστασία των πιο ευάλωτων σημείων του συστήματος, όπως οι διακόπτες, οι τερματικοί στύλοι ή οι στύλοι διασταυρώσεων, μπορεί να αποδειχθεί μια πιο αποδοτική λύση σε σχέση με την ενίσχυση της μόνωσης της γραμμής. Αυτή η προσέγγιση είναι οικονομικότερη και συμβάλλει ουσιαστικά στη μείωση των βραχυκυκλωμάτων που προκαλούνται από επαγόμενες τάσεις. Ειδικά σε δίκτυα διανομής με πολλούς μετασχηματιστές, οι αλεξικέραυνοι που προστατεύουν τους μετασχηματιστές παρέχουν κρίσιμη άμυνα απέναντι στις επαγόμενες τάσεις.

3.8.3 Βραχυκυκλώματα από άμεσα πλήγματα

Η προστασία από άμεσες προσβολές κεραυνών αποτελεί μια περίπλοκη πρόκληση, εξαιτίας των ισχυρών κρουστικών ρευμάτων, των απότομων μεταβολών και της υψηλής ενέργειας που περιέχουν οι κεραυνοί. Παρόλο που τα αλεξικέραυνα θεωρητικά προσφέρουν σημαντική ασφάλεια απέναντι σε τέτοιες προσβολές, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από την

τοποθέτησή τους σε πολύ κοντινές αποστάσεις, ουσιαστικά απαιτείται κάθε στύλος να είναι εξοπλισμένος με αλεξικέραυνο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10, για να διασφαλίσουμε την προστασία από άμεσες κεραυνικές χτυπήματα, υπολογίζουμε τις μεταξύ τους αποστάσεις. Η ανάλυση της εικόνας 3.10 βασίζεται στην υπόθεση ότι ο ουδέτερος αγωγός είναι γειωμένος σε κάθε στύλο. Παρ' όλα αυτά, η συχνότητα των βραχυκυκλωμάτων μπορεί να προκαλέσει σύγχυση, εκτός από τις περιπτώσεις όπου τα αλεξικέραυνα εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις και η μόνωση από τον γειωμένο ουδέτερο αγωγό είναι επαρκώς ενισχυμένη.



Εικόνα 3.10 Απόσταση αλεξικέραυνων για προστασία από άμεσα πλήγματα [7] .

3.8.3.1 Προστασία αλεξικέραυνου άνω φάσης

Η εγκατάσταση ενός αλεξικέραυνου στην κορυφή του αγωγού μπορεί να λειτουργήσει ως προστατευτικός μηχανισμός, αποτρέποντας τα χτυπήματα κεραυνών. Σε περίπτωση κεραυνού, το αλεξικέραυνο διοχετεύει το ρεύμα εκκένωσης στο έδαφος, προστατεύοντας έτσι το ηλεκτρικό σύστημα. Για να είναι ο προστατευτικός αγωγός αποτελεσματικός, είναι απαραίτητο η αντίσταση

γείωσης να είναι χαμηλή και η μόνωση των μη προστατευμένων φάσεων να είναι υψηλή. Επιπλέον, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στη διατήρηση της κατάλληλης μόνωσης στις μη προστατευμένες φάσεις, όπως και σε κάθε αγωγό προστασίας. Οι καμπύλες που σχετίζονται με τον προστατευτικό αγωγό μπορούν να αξιοποιηθούν για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλεξικέραυνου στην ανώτερη φάση. Για την καλύτερη δυνατή προστασία, συνιστάται η χρήση αλεξικέραυνων σχεδόν σε κάθε στύλο ή πύργο.

3.8.3.2 Ικανότητα αλεξικέραυνου σε άμεσο πλήγμα

Σε περιπτώσεις όπου οι κεραυνοί συχνά πλήττουν (όπως σε ανοιχτές γραμμές διανομής χωρίς προστατευτικό αγωγό), τα αλεξικέραυνα που ανήκουν στις κατηγορίες διανομής και μεταλλικών οξειδίων μπορεί να υποστούν ζημιές εξαιτίας άμεσων κεραυνικών χτυπημάτων. Ορισμένα από αυτά τα χτυπήματα ενδέχεται να οδηγήσουν σε υπερφόρτωση των αλεξικέραυνων με ενέργεια πέρα από τα όρια που έχουν θέσει οι κατασκευαστές ή τα πρότυπα δοκιμών των 4/10 μs κρουστικών κυμάτων. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι τα αλεξικέραυνα έχουν δείξει ικανότητα απορρόφησης ενέργειας μεγαλύτερη από αυτήν που έχει καταγραφεί επίσημα. Επιπλέον, ένας άλλος παράγοντας αποτυχίας στα αλεξικέραυνα από οξείδια μετάλλου είναι η εμφάνιση βραχυκυκλωμάτων στην επιφάνεια γύρω από εμπόδια, όταν αυτά δέχονται επανειλημμένα πλήγματα. Τα επιφανειακά βραχυκυκλώματα από πολλαπλά χτυπήματα είναι λιγότερο πιθανά σε αλεξικέραυνα χωρίς διάκενα, όπως εκείνα με πολυμερικό περίβλημα.

4 Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις υπολογισμοί και αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Η Επαρχία Λεμεσού, μία από τις έξι επαρχίες της Κύπρου, βρίσκεται στη νότια πλευρά του νησιού και συνδυάζει μοναδικά τη φυσική ομορφιά, την πλούσια ιστορία και την οικονομική δραστηριότητα. Με στρατηγική γεωγραφική θέση, σημαντική πολιτιστική κληρονομιά και δυναμική ανάπτυξη, αποτελεί ένα από τα πιο ζωντανά κέντρα της Κύπρου.

Η Επαρχία Λεμεσού συνορεύει δυτικά με την Επαρχία Πάφου, ανατολικά με την Επαρχία Λάρνακας και βόρεια με την Επαρχία Λευκωσίας. Το κλίμα της περιοχής είναι τυπικά μεσογειακό, με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες, χαρακτηριστικό που ευνοεί τόσο τον τουρισμό όσο και τις γεωργικές δραστηριότητες.

Το τοπίο της επαρχίας είναι ιδιαίτερα ποικιλόμορφο, περιλαμβάνοντας εντυπωσιακές παραλίες όπως η Κύμη και το Lady's Mile, ορεινές περιοχές όπως το Τρόοδος, καθώς και εκτεταμένους αμπελώνες. Η καλλιέργεια σταφυλιού για την παραγωγή κρασιού αποτελεί βασικό στοιχείο της τοπικής αγροτικής οικονομίας.

Η Επαρχία Λεμεσού έχει μακρά ιστορία που ξεκινά από την αρχαιότητα. Σημαντικές αρχαιολογικές τοποθεσίες όπως το Κούριον, μια αρχαία πόλη-βασίλειο του 12ου αιώνα π.Χ., με εντυπωσιακό θέατρο και ψηφιδωτά, και η Αμαθούς, ένα φοινικικό λιμάνι με ιερό αφιερωμένο στην Αφροδίτη, μαρτυρούν τη σημασία της περιοχής κατά την αρχαιότητα.

Κατά τη μεσαιωνική περίοδο, η Λεμεσός γνώρισε ιδιαίτερη άνθηση. Το Κάστρο Λεμεσού, χτισμένο τον 14ο αιώνα από τους Λουζινιανούς, αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα της εποχής. Σήμερα στεγάζει το Μουσείο Μεσαιωνικής Ιστορίας, προσφέροντας στους επισκέπτες μια ματιά στη ζωή του παρελθόντος.

Στη σύγχρονη εποχή, η Λεμεσός εξελίχθηκε σε ένα από τα σημαντικότερα οικονομικά κέντρα της Κύπρου. Το λιμάνι της Λεμεσού αποτελεί σήμερα το κύριο εμπορικό λιμάνι του νησιού, συμβάλλοντας περίπου στο 20% του κυπριακού ΑΕΠ και διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο στη ναυτιλία της Μεσογείου.

Η περιοχή προσελκύει περίπου το 40% των εισερχομένων τουριστών στην Κύπρο, χάρη στις παραλίες, τα αξιοθέατα και τις πολιτιστικές εκδηλώσεις. Με το 30% της εθνικής παραγωγής κρασιού να προέρχεται από την περιοχή, η αμπελουργία αποτελεί πυλώνα της τοπικής αγροτικής οικονομίας. Το λιμάνι της Λεμεσού είναι η δεύτερη μεγαλύτερη λιμενοδεξαμενή στη Μεσόγειο, ενισχύοντας τη θέση της Κύπρου ως ναυτιλιακό κέντρο.

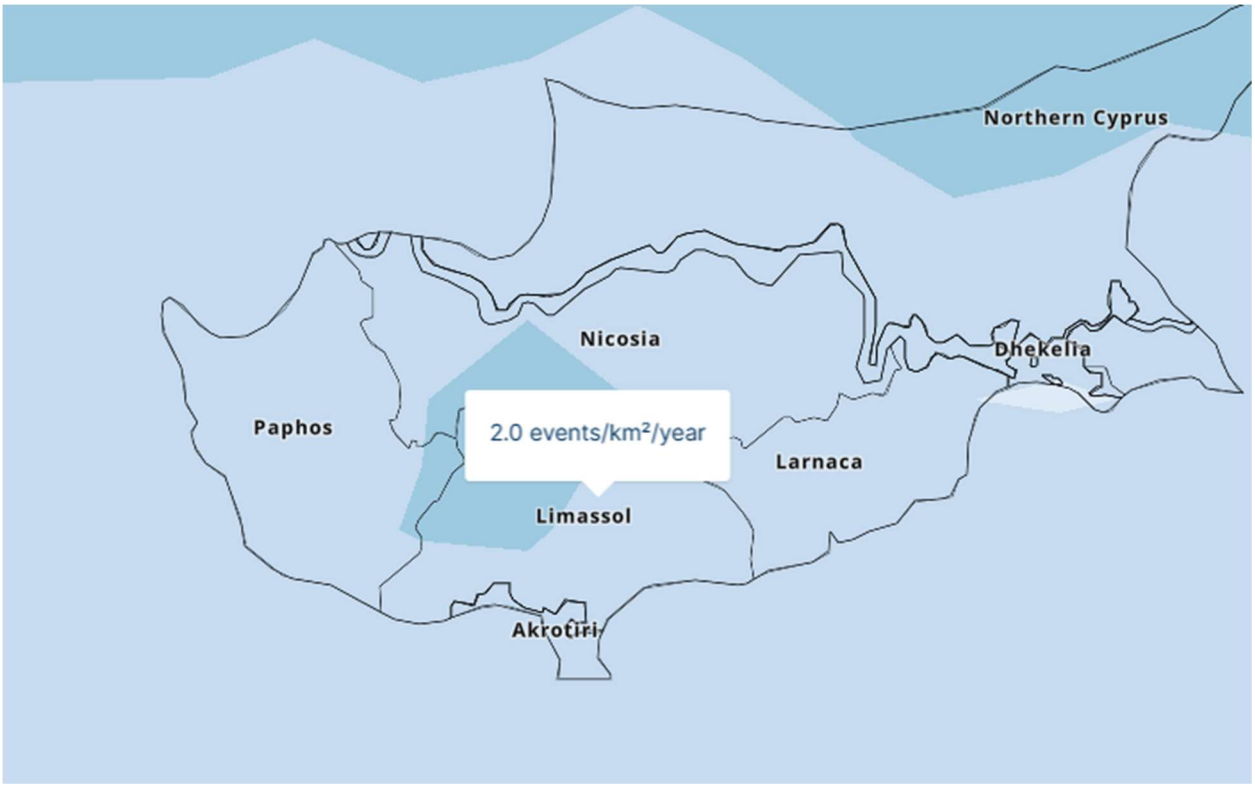
Η επαρχία Λεμεσού αποτελεί την δεύτερη σε έκταση επαρχία της χώρας. Έχει έκταση 1393,314 τ.χλμ. που αποτελεί το 15,07% της έκτασης της Κύπρου. Σύμφωνα με τις απογραφές πληθυσμού που πραγματοποιήθηκαν στην Κύπρο 2011, ο πληθυσμός της επαρχίας είναι 235.330.

Το σύστημα διανομής συνδέει τους υποσταθμούς μεταφοράς με τις εγκαταστάσεις των καταναλωτών. Περιλαμβάνει 6.266 υποσταθμούς διανομής, 10.849 μετασχηματιστές επί στύλων, 11.264 χιλιόμετρα υπόγειων καλωδίων και 16.358 χιλιόμετρα εναέριων γραμμών. Η Επαρχία Λεμεσού καταλαμβάνει περίπου το 21% του δικτύου που συνεπάγεται σε 3400 χιλιόμετρα εναέριων γραμμών.

4.2 Μεθοδολογία Θεωρητικού Υπολογισμού Σφαλμάτων

4.2.1 Βραχυκυκλώματα από άμεσα πλήγματα

Στο αρχικό στάδιο του υπολογισμού της πυκνότητας κεραυνών εδάφους, δεν χρειάζεται η χρήση ενός χάρτη ισοκεραυνικών καμπυλών αφού μπορούμε να βρούμε κατευθείαν τους κεραυνούς ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά έτος από τον χάρτη της VAISALA (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Χάρτης πυκνότητας κεραυνών εδάφους από τον ιστοτοπο της VAISALA [4],

Στο επόμενο στάδιο, υπολογίζουμε τον βαθμό συλλογής κεραυνών N σε ανοικτό έδαφος (χωρίς σημαντικά δέντρα ή κτίρια κοντά), βάσει της εξίσωσης του Eriksson, όπως φαίνεται στην σχέση:

$$N = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \qquad 4.1$$

όπου:

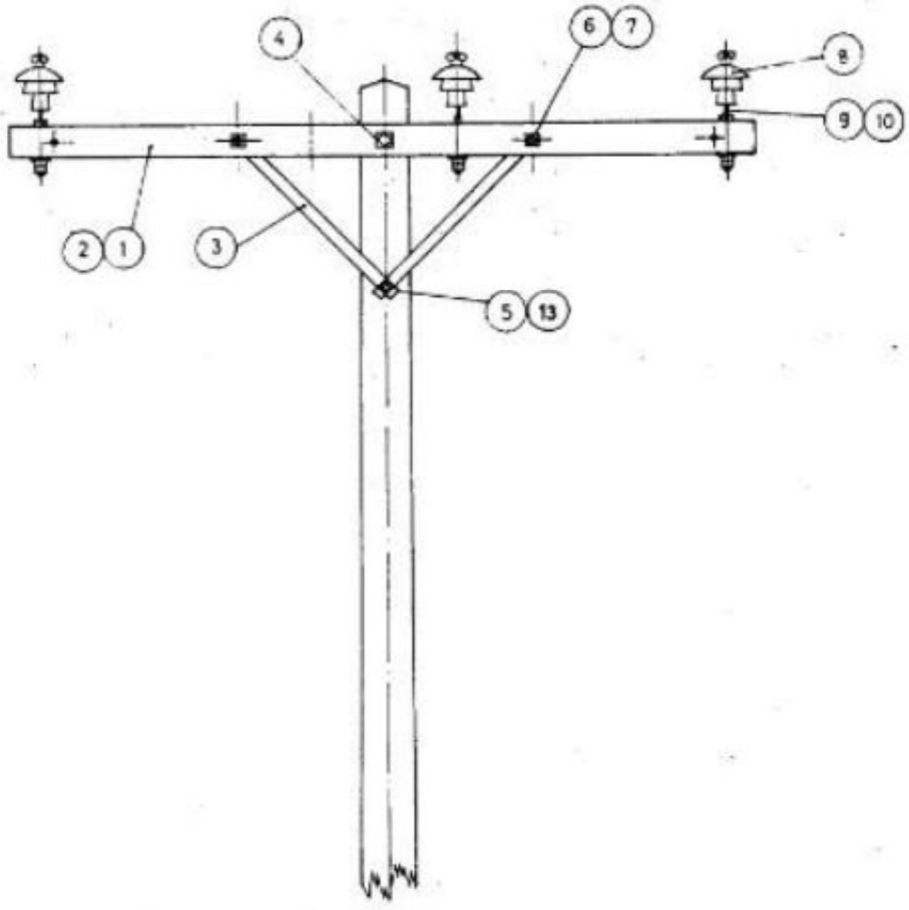
h: ύψος του στύλου (m)

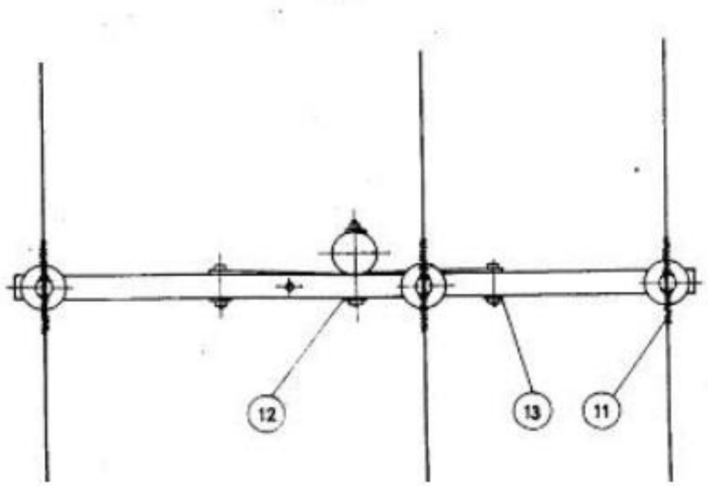
b: το πλάτος της κατασκευής (m)

N_g: πυκνότητα των κεραυνών [κεραυνοί/km^2/έτος]

N: συχνότητα συλλογής κεραυνών [κεραυνοί/100km/έτος]

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ΑΗΚ για τυποποιημένες κατασκευές διανομής, οι διαστάσεις των γραμμών μέσης διανομής είναι τυποποιημένες και ισχύουν για όλες τις γραμμές. Στην εικόνα 4.2 που ακολουθεί, παρατηρούμε έναν στύλο στην απλούστερη μορφή του, με ύψος μέσου όρου 12 m από το έδαφος και πρόσθετα 2 m κάτω από αυτόν.





Α/Α	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ	
		Ρ-3	Ρ-3Ε
1	ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΞΥΛΙΝΟΣ 2500Χ120Χ100 mm	1	-
2	ΒΡΑΧΙΟΝΑΣ ΞΥΛΙΝΟΣ 2500Χ176Χ125 mm	-	1
3	ΑΝΤΗΡΙΔΑ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΠΕΠΛΑΤΥΣΜΕΝΗ	2	2
4	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ Μ 20 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	1	1
5	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ Μ 16 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	1	1
6	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ Μ 16 ΜΗΚΟΥΣ 130 mm	2	-
7	ΚΟΧΛΙΑΣ ΜΕ ΠΕΡΙΚΟΧΛΙΟ Μ 16 ΜΗΚΟΥΣ 150 mm	-	2
8	ΜΟΝΩΤΗΡΑΣ ΤΥΠΟΥ ΚΩΔΩΝΟΣ Μ.Τ. ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΕΡΠΥΣΜΟΥ	3	3
9	ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΜΟΝΩΤΗΡΑ Μ.Τ. ΤΥΠΟΥ 1Α Η' 1Β ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ	3	-
10	ΣΤΗΡΙΓΜΑ ΜΟΝΩΤΗΡΑ Μ.Τ. ΤΥΠΟΥ 2Α Η' 2Β ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΜΟΝΩΤΗΡΑ	-	3
11	ΥΛΙΚΑ ΠΡΟΣΔΕΣΕΩΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΣΤΟΝ ΜΟΝΩΤΗΡΑ ΚΑΤΑ FC-9Ε Η' FC-11 Η' FC-27Ι Η' FC-27ΙΙ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ	3	3
12	ΠΑΡΑΚΥΚΛΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟΣ 60Χ60 mm ΟΠΗΣ 22 mm (ΕΙΔΟΣ 2)	2	2
13	ΠΑΡΑΚΥΚΛΟΣ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟΣ 50Χ50 mm ΟΠΗΣ 18 mm (ΕΙΔΟΣ 1)	3	3

246B

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

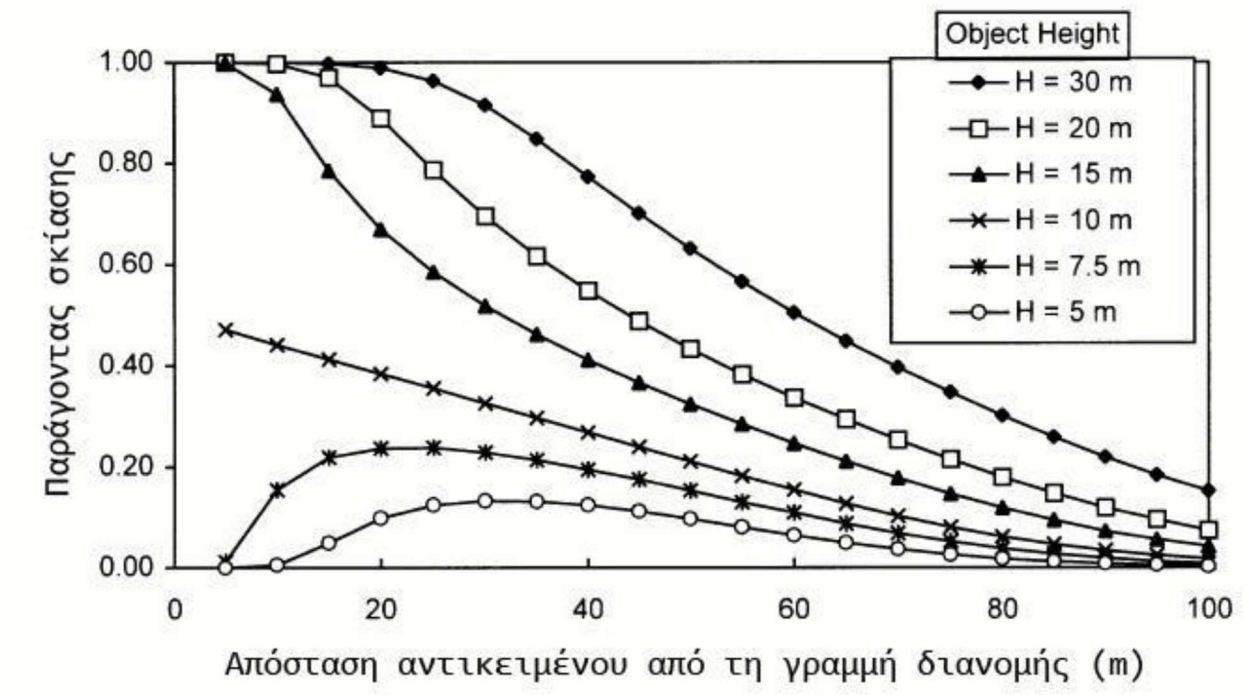
1 Η κατασκευή Ρ-3Ε εφαρμόζεται για μεγάλα κατακόρυφα ανοίγματα σύμφωνα με τις οδηγίες.

Εικόνα 4.2 – Γραμμή Μέσης Τάσης, κατασκευή ευθυγράμμιας ή μικρής γωνίας, απλή στήριξη με βραχίονα.

Συνεχίζουμε με τον υπολογισμό της προστασίας της γραμμής από κοντινές κατασκευές και δέντρα, λαμβάνοντας υπόψιν τον παράγοντα σκίασης Sf. Ο παράγοντας Sf ορίζεται ως η ανά μονάδα ποσότητα της γραμμής διανομής που θωρακίζεται από κοντινά αντικείμενα. Μηδενικός παράγοντας Sf (0.0) υποδηλώνει ότι η γραμμή βρίσκεται σε ανοιχτό μέρος, ενώ ο παράγοντας σκίασης (1.0) υποδηλώνει πλήρη κάλυψη από γειτνιάζουσες κατασκευές και δέντρα. Ο αριθμός των πληγμάτων στη γραμμή δίνεται από την εξίσωση του Eriksson:

$$N_s=N(1-S_f) \qquad 4.2$$

Για να εκτιμήσουμε τον παράγοντα σκίασης S_f, αξιοποιούμε στην εικόνα 4.3, το οποίο περιλαμβάνει αντικείμενα διαφόρων υψών για μια γραμμή διανομής ύψους 10 μέτρων. Υποθέτουμε ότι τα αντικείμενα είναι ευθυγραμμισμένα παράλληλα με τη γραμμή διανομής και βρίσκονται σε μια πλευρά της. Αυτό μπορεί να αντιπροσωπεύει μια συνεχή σειρά από δέντρα ή κτίρια.



Εικόνα 4.3: Παράγοντες θωράκισης λόγω κοντινών αντικειμένων σε διαφορετικά ύψη, για μια γραμμή διανομής ύψους 10m.

Μπορούμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε την εικόνα για τις δύο πλευρές της γραμμής διανομής, προσθέτοντας απλώς τους παράγοντες προστασίας της δεξιάς και της αριστερής πλευράς (σχέση [4.3]). Εάν το άθροισμα υπερβαίνει την τιμή 1, τότε ο συνολικός παράγοντας προστασίας ορίζεται ως 1.

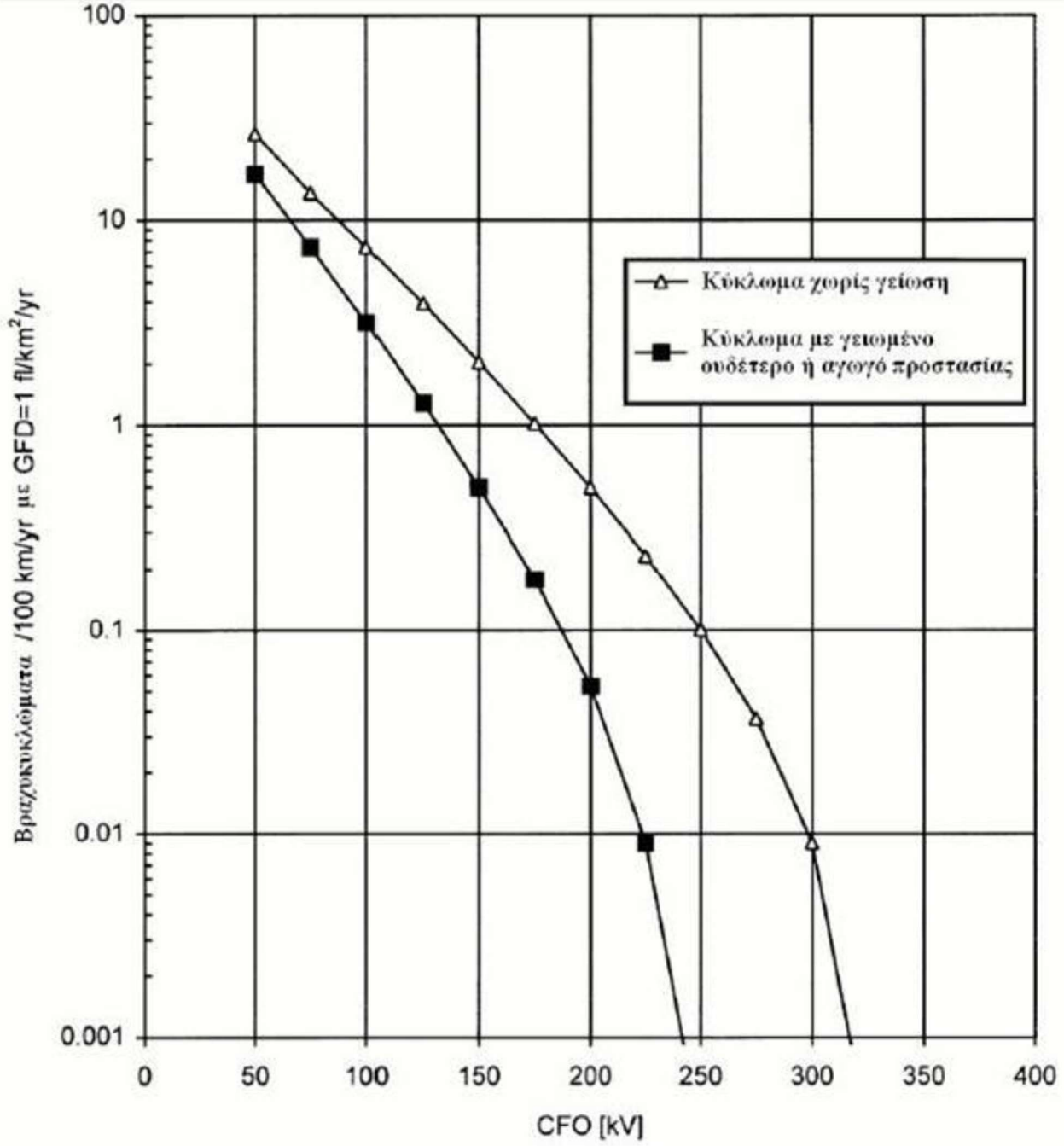
$$N_s = N\,[1-(S_{fleft}+S_{fright})] \qquad 4.3$$

όπου N_s ο αριθμός των πληγμάτων, αφού λάβουμε υπόψιν μας και τον παράγοντα σκίασης Sf.

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων, θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση [4.1], εάν το έδαφος είναι "ανοιχτό". Αντίθετα, εάν η γραμμή προστατεύεται μερικώς από γειτονικές κατασκευές και δέντρα, θα συνυπολογίσουμε και τον παράγοντα σκίασης Sf, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις [4.2] και [4.3].

4.2.2 Βραχυκυκλώματα από έμμεσα πλήγματα

Σε αυτό το στάδιο, υπολογίζουμε πόσα βραχυκυκλώματα από έμμεσα κεραυνικά πλήγματα προκαλούνται στη γραμμή. Για να το κάνουμε αυτό, λαμβάνουμε υπόψιν το μικρότερο μονοπάτι CFO για γραμμές μέσης τάσης, που είναι 125 kV (σύμφωνα με τα τυπικά επίπεδα μόνωσης για 20 kV). Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε την εικόνα 4.4 για να υπολογίσουμε προσεγγιστικά τη συχνότητα των βραχυκυκλωμάτων σε σχέση με την κρίσιμη τάση διάσπασης.



Εικόνα 4.4: Πλήθος βραχυκυκλωμάτων λόγω επαγόμενης τάσης σε σχέση με το επίπεδο μόνωσης της γραμμής διανομής,

Οι παραπάνω τιμές έχουν προσαρμοστεί για GFD 1 κεραυνού ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο το χρόνο και για γραμμές ύψους 10 μέτρων. Τα αποτελέσματα είναι ευθέως ανάλογα με το μήκος

της γραμμής και την τιμή της GFD. Συνεπώς, για να υπολογίσουμε τον αριθμό των βραχυκυκλωμάτων ανά μονάδα μήκους γραμμής ετησίως, πολλαπλασιάζουμε την τιμή του διαγράμματος με την GFD που έχουμε υπολογίσει για τα άμεσα πλήγματα από κεραυνούς.

Επιπλέον, εξετάζουμε τον παράγοντα σκίασης S_f. Εάν η περιοχή γύρω από την πλειονότητα της γραμμής προστατεύεται από ψηλές κατασκευές (S_f=0.75), τότε μεγαλύτερης έντασης κεραυνοί μπορούν να πλησιάσουν τη γραμμή χωρίς να την πλήξουν απευθείας, αυξάνοντας τον αριθμό των επαγόμενων βραχυκυκλωμάτων. Συνήθως, ο αριθμός των βραχυκυκλωμάτων λόγω υπέρτασης βρίσκεται μεταξύ των αριθμών των άμεσων και έμμεσων κεραυνικών πληγμάτων σε εξωτερικό περιβάλλον. Θεωρούμε προσεγγιστικά ότι τα έμμεσα βραχυκυκλώματα, όταν S_f=0.75, είναι διπλάσια από εκείνα που συμβαίνουν στην ύπαιθρο.

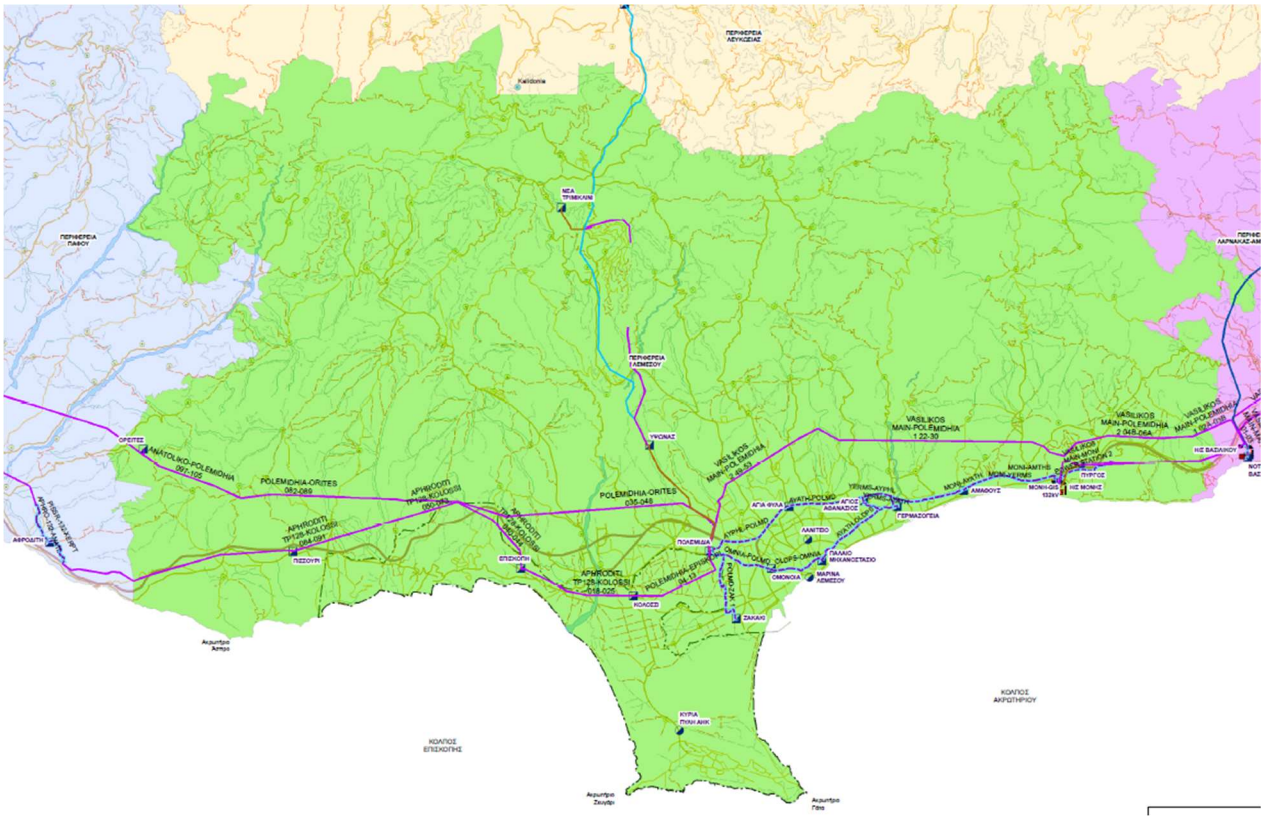
Στην περίπτωση που η πλειονότητα της γραμμής είναι εκτεθειμένη και μη προστατευμένη, η σκίαση επηρεάζει διαφορετικά τον αριθμό των βραχυκυκλωμάτων λόγω υπέρτασης. Σε αυτήν την περίπτωση, μειώνεται η πιθανότητα πλήγματος στο μεγαλύτερο μέρος της γραμμής, με συνέπεια τη μείωση του συνολικού αριθμού των επαγόμενων βραχυκυκλωμάτων. Επομένως, ο αριθμός των βραχυκυκλωμάτων λόγω υπέρτασης θα είναι μικρότερος από τη διπλάσια τιμή που εκτιμήθηκε προηγουμένως για περιοχές με υψηλές κατασκευές γύρω από τη γραμμή.

4.2.3 Συνολικός αριθμός βραχυκυκλωμάτων

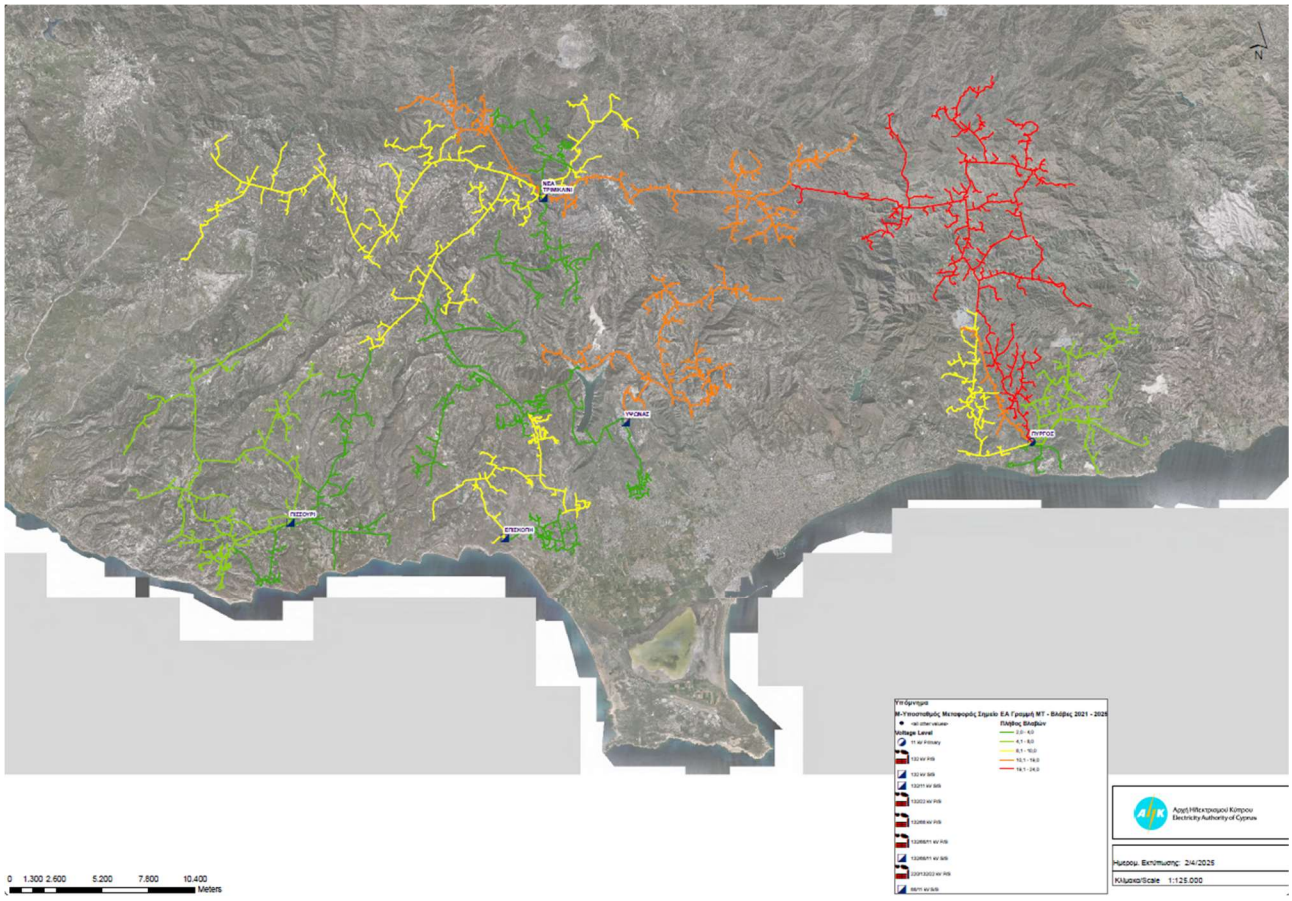
Λαμβάνοντας υπόψη πως κάθε βραχυκύκλωμα δημιουργεί πρόβλημα στη γραμμή, και έχοντας ήδη υπολογίσει τα βραχυκυκλώματα που προκύπτουν από άμεσα και έμμεσα χτυπήματα κεραυνών, μπορούμε να προσδιορίσουμε τον συνολικό αριθμό βραχυκυκλωμάτων στη γραμμή διανομής. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας τον αριθμό των βραχυκυκλωμάτων από άμεσα χτυπήματα (N_s) και από έμμεσα χτυπήματα (N_i) και προσαρμόζοντας την τιμή στο πραγματικό μήκος της γραμμής διανομής. Με αυτήν τη μέθοδο, υπολογίζεται το σύνολο των σφαλμάτων στη γραμμή για κάθε έτος. Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη ανάλυση θεωρείται πως ο αριθμός των σφαλμάτων λόγω δυσλειτουργίας των προστατευτικών συστημάτων (N_p) είναι μηδενικός.

4.3 Θεωρητικός Υπολογισμός Σφαλμάτων Γραμμών

Αρχικά θα αξιολογήσουμε τον αριθμό των βραχυκυκλωμάτων που μπορούν να προκληθούν από άμεσα πλήγματα στις γραμμές διανομής μέσης τάσης. Έπειτα, θα εξετάσουμε τα βραχυκυκλώματα που προκαλούνται από πλήγματα σε παραπλήσια αντικείμενα με επαγωγή τάσης. Συνδυάζοντας αυτούς τους δύο τύπους βραχυκυκλωμάτων, θα υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των βραχυκυκλωμάτων στην εκάστοτε γραμμή που μελετάμε.



Εικόνα 4.4: Χάρτης που απεικονίζει την επαρχία Λεμεσού.



Εικόνα 4.5: Χάρτης που απεικονίζει το δίκτυο της επαρχίας Λεμεσού. Το χρώμα κάθε γραμμής εκφράζει πόσες βλάβες είχε το δίκτυο για την περίοδο 2021-2025.

4.3.1 Βραχυκυκλώματα από άμεσα πλήγματα

Το πρώτο βήμα είναι να υπολογίσουμε το συνολικό μήκος της γραμμής. Σύμφωνα με τη ΑΗΚ, έχει μήκος 3400 km. Σε αυτό, εκτός από το μήκος των κορμών, συνυπολογίζεται και το μήκος των διακλαδώσεων της γραμμής.

4.3.1.1 $N_g = 3$

Από τον τύπο $N = N_g \{(28h^{0.6} + b)/10\}$ υπολογίζουμε N = 38.06 κεραυνοί/100km/έτος τον ρυθμό απορρόφησης κεραυνών σε ανοικτό έδαφος.

Υπολογίζουμε από προηγούμενο διάγραμμα τον παράγοντα σκίασης $S_f = S_{fright}+S_{fleft} = 0.35+0.35 = 0.70$.

Άρα ο συνολικός αριθμός άμεσων πληγμάτων προκύπτει $N_s = N(1-S_f) = 11.42$ κεραυνοί/100km/έτος.

4.3.2 Επαγόμενα Βραχυκυκλώματα

4.3.2.1 $N_g = 3$

Με βάση την εικόνα 4.4 βρίσκουμε τον αριθμό των επαγόμενων βραχυκυκλωμάτων ίσο με 3 και κάνουμε αναγωγή στην πυκνότητα των κεραυνών ($N_g = 3$). Δηλαδή 3 x 3= 9 κεραυνοί/100km/έτος.

Ακόμη θεωρώντας την προσαύξηση της τάξης του 70% όπως εξηγήθηκε παραπάνω προκύπτει $N_i = 9 \times 1.7 = 15.3$ κεραυνοί/100km/έτος.

4.3.3 Συνολικά Βραχυκυκλώματα

4.3.3.1 $N_g = 2$

Τέλος από τον τύπο $N_{final} = N_s + N_i + N_p$ και για $N_p = 0$ έχουμε $N_{final} = 26.72$ κεραυνοί/100km/έτος.

Κάνοντας αναγωγή στο πραγματικό μήκος της γραμμής που είναι 3400 km βρίσκουμε $N_{ολ} = 9.08$ κεραυνοί/έτος συνολικά για τη γραμμή.

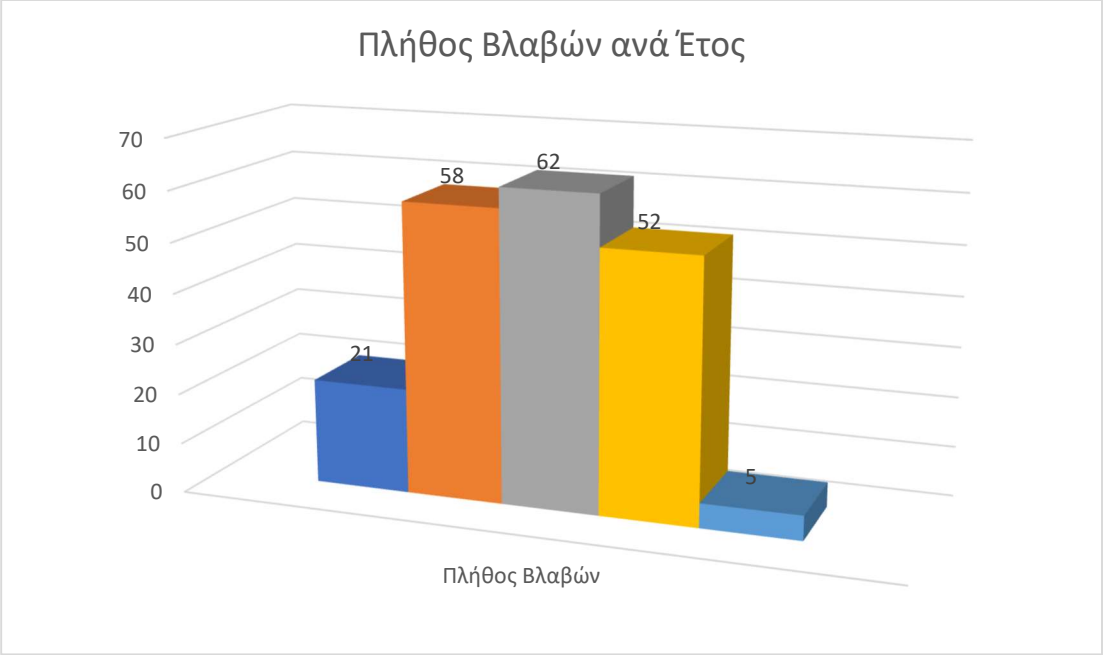
Παρακάτω συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα στο πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Υπολογισμοί θεωρητικών σφαλμάτων της επαρχίας Λεμεσού.

Υπολογισμοί θεωρητικών σφαλμάτων της επαρχίας Λεμεσού		
	Ng [κεραυνοί/km^2/ έτος]	*3*
	h [m]	*12*
	b [m]	*2.5*
	N	*25.37*
	Sf-left	*0.35*
	Sf-right	*0.35*
	Sf	*0.7*
	Ns [βραχ/100km/ έτος]	*7.61*
Επαγόμενα βραχυκυκλώματα	*Επαγόμενα*	*3*
	Αναγωγή στο GFD	*9*
	Ni [βραχ/100km/ έτος]	*15.3*
Λοιπά βραχυκυκλώματα	*Np [βραχ/100km/ έτος]*	*0*
Συνολικά βραχυκυκλώματα	*N [βραχ/100km/ έτος]*	*38.06*
	Συνολικό μήκος [km]	*3400*
Συνολικά βραχυκυκλώματα – αναγωγή στο πραγματικό μήκος	*N_{final} [βραχ/πρ.km/έτος]*	*26.717*

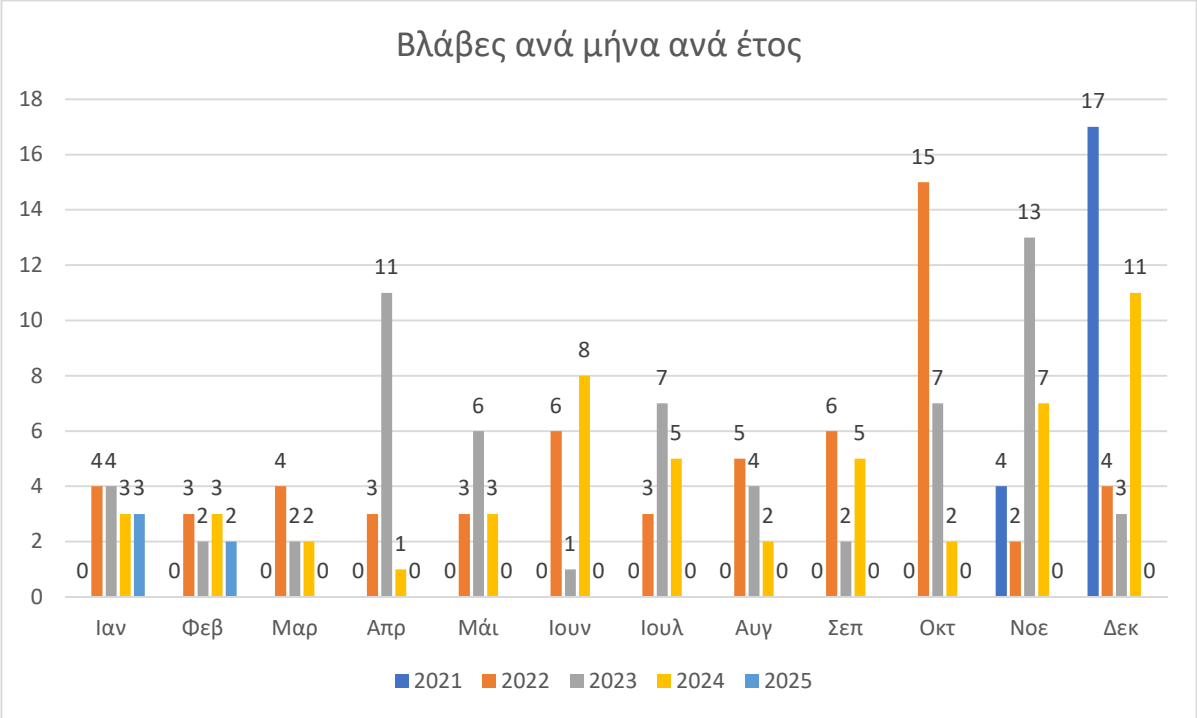
4.4 Σύγκριση Θεωρητικών – Πραγματικών Σφαλμάτων

Στην εικόνα 4.6 παρατίθενται τα στοιχεία για τις γραμμές μέσης τάσης όπως δόθηκαν από το αρχείο της ΑΗΚ για της χρονιές από το 2021 μέχρι το 2025. Σημειώνεται ότι για το 2021 ήτανε διαθέσιμοι μόνο οι τελευταίοι 3 μήνες ένα για το 2025 μόνο οι 2 πρώτοι.



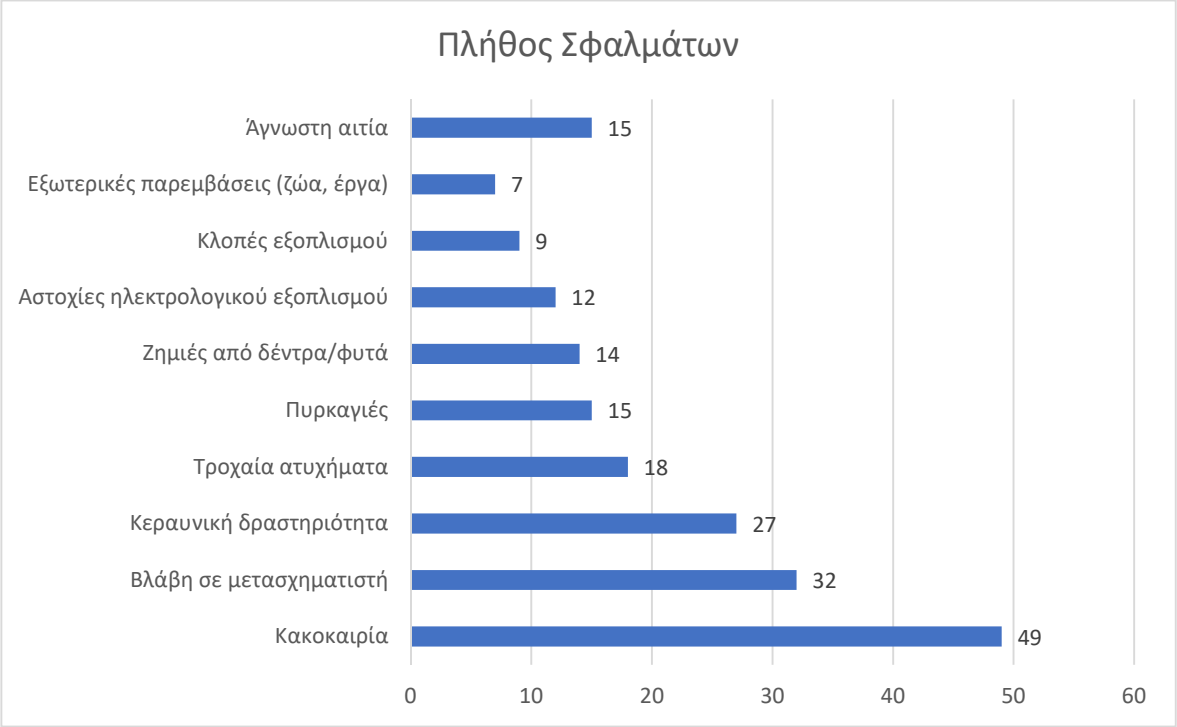
Εικόνα 4.6: Σφάλματα από κεραυνούς στις γραμμές για όλους του μήνες του έτους 2018

Στην εικόνα 4.7 παρατίθενται τα στοιχεία για τις βλάβες ανά μήνα ανά έτος.



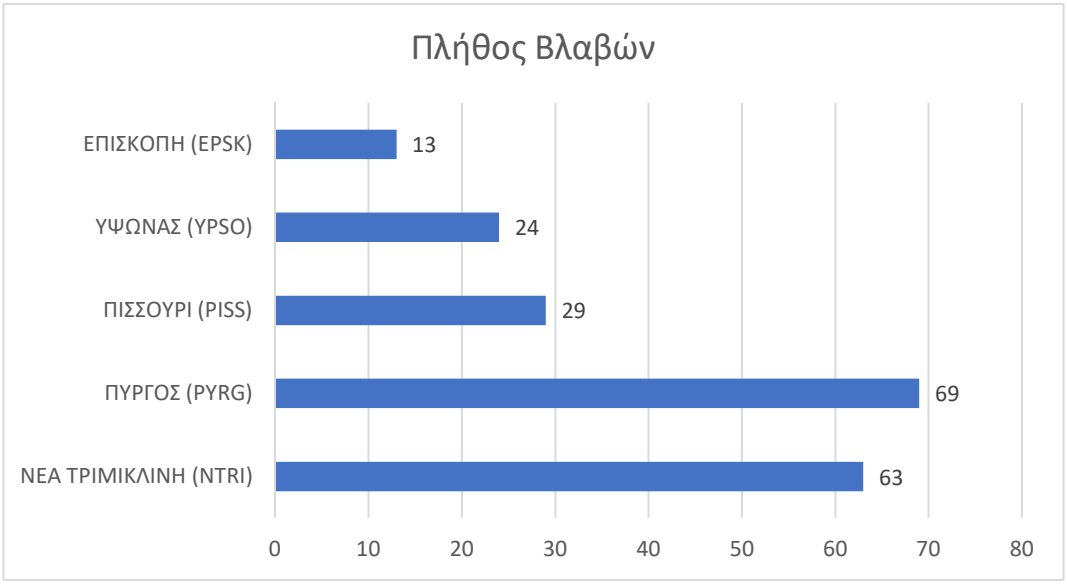
Εικόνα 4.7: Σφάλματα στις γραμμές βλάβες ανά μήνα ανά έτος

Στην εικόνα 4.8 παρατίθενται οι αιτίες σφαλμάτων.



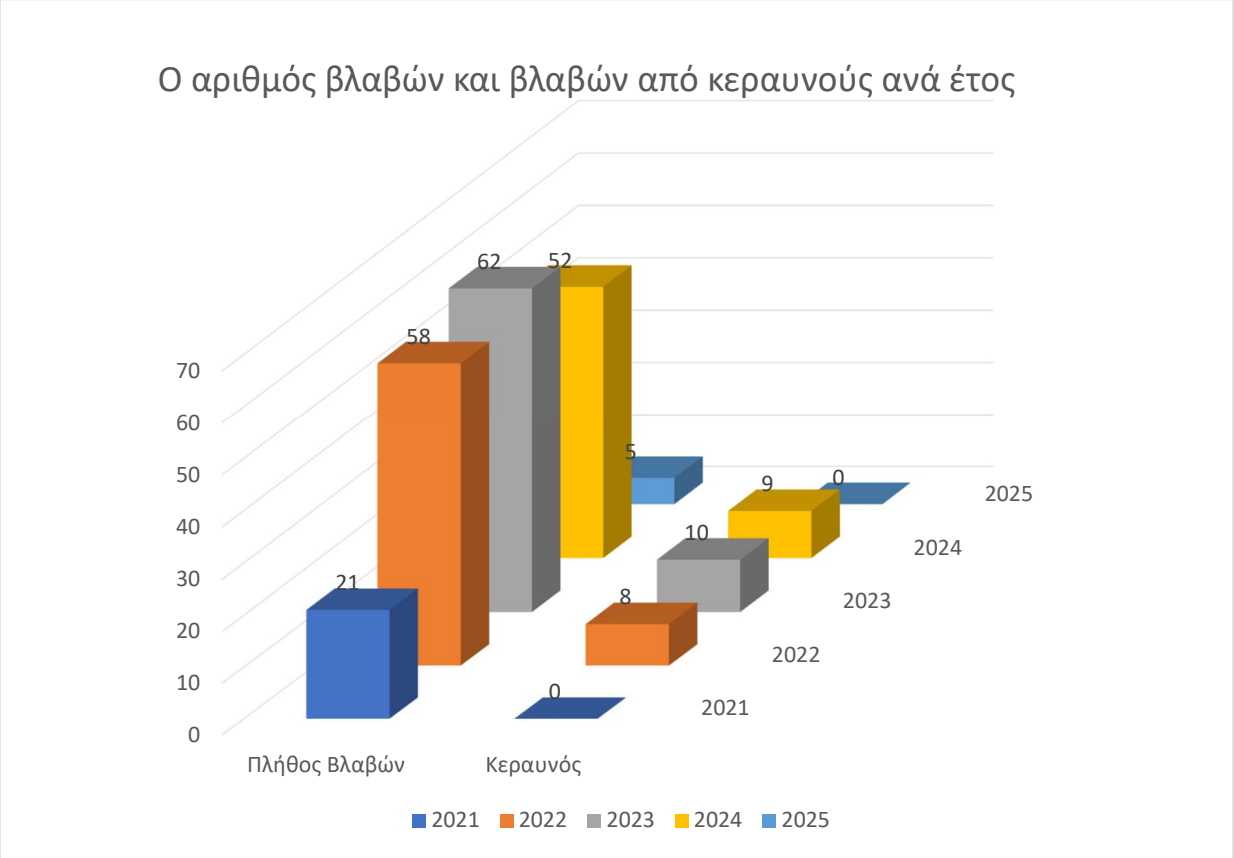
Εικόνα 4.8: Αιτίες σφαλμάτων.

Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζει τα σφάλματα ανά περιοχή.



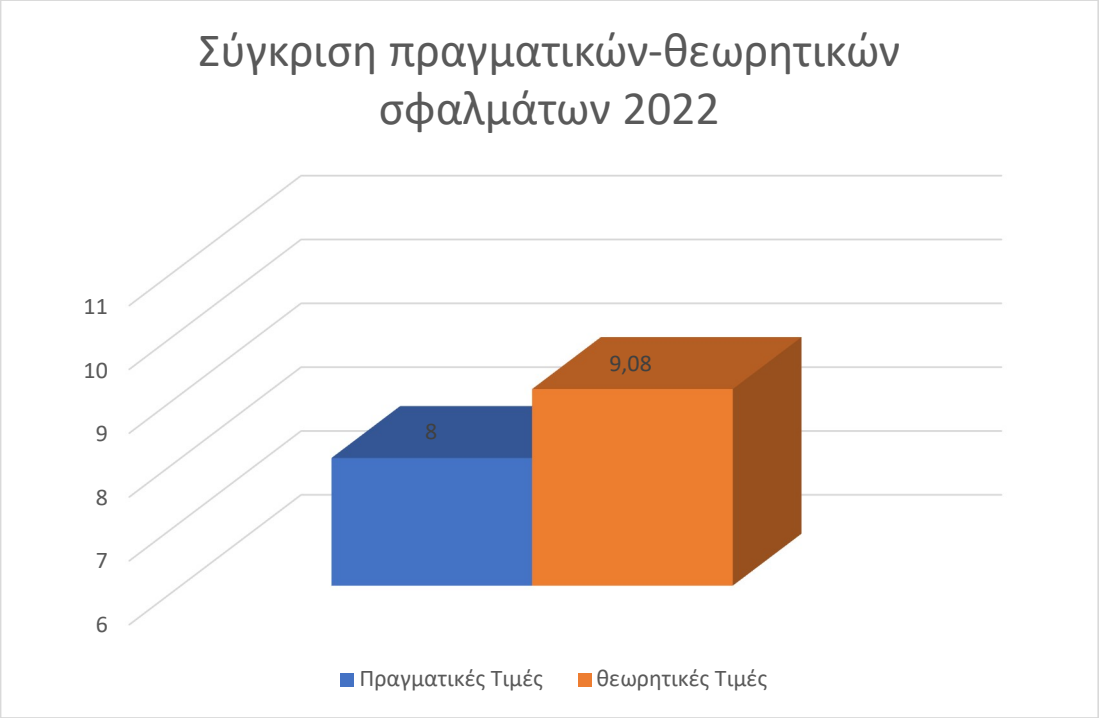
Εικόνα 4.9: Σφάλματα ανά περιοχή.

Στην εικόνα 4.10 παρουσιάζεται ο αριθμός βλαβών ανά έτος και ποιες από αυτές προέρχονται από κεραυνικά πλήγματα.

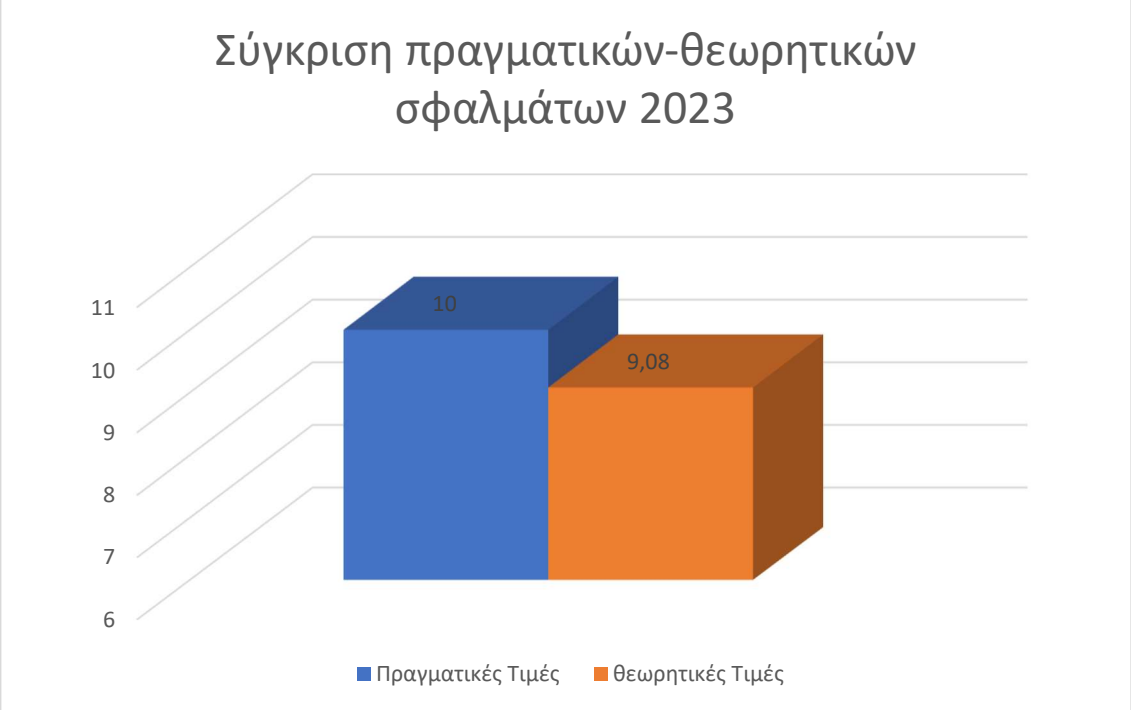


Εικόνα 4.10: Ο αριθμός βλαβών και βλαβών από κεραυνούς ανά έτος.

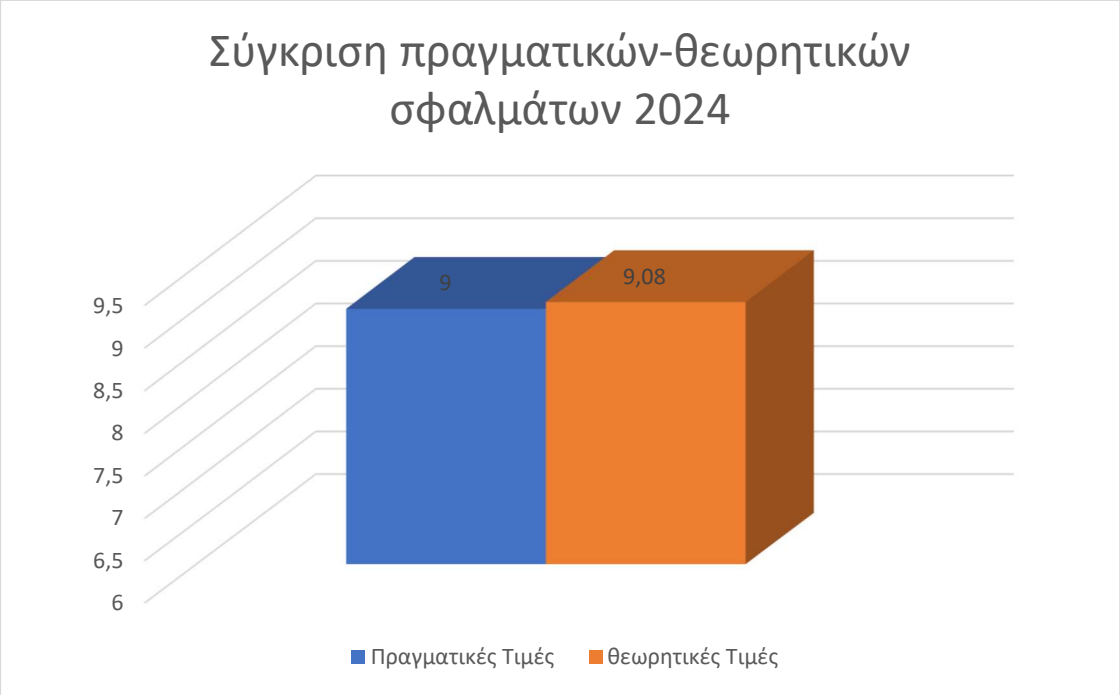
Στις παρακάτω εικόνες (4.11-4.13) φαίνονται τα τελικά αποτελέσματα των συγκρίσεων μεταξύ των θεωρητικών και πραγματικών τιμών για τα έτη 2022, 2023 και 2024. Τα έτη 2021 και 2025 δεν θα παρουσιαστούν καθώς τα δεδομένα τους είναι ελάχιστα ως προς το σύνολο ολοκλήρων των χρόνων.



Εικόνα 4:11 Σύγκριση πραγματικών-θεωρητικών σφαλμάτων για το 2022.



Εικόνα 4:12 Σύγκριση πραγματικών-θεωρητικών σφαλμάτων για το 2023.



Εικόνα 4:13 Σύγκριση πραγματικών-θεωρητικών σφαλμάτων για το 2024.

5 Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στη μελέτη των σφαλμάτων που προκαλούνται στο δίκτυο μέσης τάσης της Επαρχίας Λεμεσού λόγω κεραυνών. Μέσα από την ανάλυση τόσο των θεωρητικών δεδομένων όσο και των πραγματικών περιστατικών που καταγράφηκαν στη βάση δεδομένων της ΑΗΚ.

Η σύγκριση των θεωρητικών υπολογισμών με τα πραγματικά δεδομένα έδειξε ότι οι αποκλίσεις είναι ελάχιστες. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την ακρίβεια και τη λειτουργικότητα του θεωρητικού μοντέλου που βασίζεται στον οδηγό του IEEE. Το μοντέλο αποδείχθηκε ικανό να προβλέψει με μεγάλη ακρίβεια τις επιπτώσεις των κεραυνών στο δίκτυο μέσης τάσης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι το θεωρητικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία στις πραγματικές συνθήκες του δικτύου της Επαρχίας Λεμεσού. Η γεωγραφική και κλιματική ιδιαιτερότητα της περιοχής δεν επηρέασε σημαντικά την ακρίβεια του μοντέλου, γεγονός που υποδηλώνει την ευελιξία και τη γενική του εφαρμοσιμότητα.

Η σύγκλιση των θεωρητικών και πραγματικών δεδομένων υποδεικνύει ότι το δίκτυο μέσης τάσης της Επαρχίας Λεμεσού έχει σχεδιαστεί με τρόπο που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις προστασίας από κεραυνούς. Αυτό ενισχύει την αξιοπιστία του δικτύου και μειώνει την ανάγκη για συχνές επεμβάσεις συντήρησης.

Συνοψίζοντας, η εργασία κατέδειξε ότι το θεωρητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των κεραυνικών σφαλμάτων είναι εξαιρετικά λειτουργικό και αξιόπιστο. Η σύγκλιση των θεωρητικών και πραγματικών δεδομένων αποδεικνύει τη δυνατότητα χρήσης του για την πρόβλεψη και την πρόληψη σφαλμάτων, συμβάλλοντας στη βελτίωση της λειτουργικότητας και της ασφάλειας των δικτύων μέσης τάσης.

6 Βιβλιογραφία

1. Golde R.H., (1977). LIGHTNING Volume 1 Physics of Lightning. ACADEMIC PRESS. London, New York, San Fransisco.
2. Πυργιώτη Ε. (2012) Προστασία κατασκευών από κεραυνούς, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πανεπιστήμιο Πατρών
3. https://www.bredengen.no/gb/en/emp-and-lightning-protection-1
4. https://interactive-lightning-map.vaisala.com/
5. https://deddie.gr/el/deddie/to-diktuo-ilektrismou/
6. https://www.eac.com.cy/EL/Pages/default.aspx
7. IEEE Std 1410-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines.