



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟΥ
ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ
ΡΕΥΜΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΙΩΑΝΝΗ Δ. ΚΟΥΣΤΕΛΛΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού

Αθήνα, ΙΟΥΛΙΟΣ 2013



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

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΤΟΥ

ΙΩΑΝΝΗ Δ. ΚΟΥΣΤΕΛΛΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού

Συμβουλευτική Επιτροπή: Π. Μπούρκας

Κ. Καραγιαννόπουλος

Ν. Θεοδώρου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 11^η Ιουλίου 2013.

Π. Μπούρκας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Καραγιαννόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Θεοδώρου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Κ. Δέρβος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Ψαρράς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ε. Ξυφιάτη

Επικ. Καθηγήτρια

Παν. Πατρών

Αθήνα, Ιούλιος 2013

ΙΩΑΝΝΗΣ Δ. ΚΟΥΣΤΕΛΛΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Πολυτεχνείο Βιέννης

Copyright © I. Κουστέλλης 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. - All rights reserved

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

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

Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανολόγων και Μηχανικών Υπολογιστών υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα.

Κατά την εκπόνηση αυτής της διατριβής είχα την τιμή να εργαστώ υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα, ο οποίος μου προσέφερε όλο αυτό το διάστημα την εμπειρία του, την επιστημονική του γνώση και την ηθική του υποστήριξη. Οι πολύτιμες συμβουλές του και η καθοδήγησή του συνέβαλλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Η επαγγελματική του κατάρτιση και η ηθική του ακεραιότητα αποτελούν για μένα παράδειγμα και θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής Καθηγητή κ. Ν. Θεοδώρου και Καθηγητή κ. Κ. Καραγιαννόπουλο για την αμέριστη συμπαράστασή τους.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στην αξιότιμη Διδάκτορα κα Αικατερίνη Πολυκράτη για την βοήθεια και υποστήριξη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια. Χαίρομαι ιδιαίτερα για το γεγονός ότι μέσα από την άψογη επιστημονική μας συνεργασία δημιουργήθηκε και μια βαθιά φιλία. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους μου που εργάστηκαν μαζί μου όλο αυτό το διάστημα στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων.

Τέλος θα ήθελα να αναφερθώ στη σύζυγό μου Άννα, η οποία όλα αυτά τα χρόνια με στήριξε ψυχικά, με βοήθησε με τις καίριες επιστημονικές της παρατηρήσεις και μου χάρισε τη μικρή μας Μαρία Χριστίνα.

Ιωάννης Κουστέλλης

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αφορά στους κινδύνους που προέρχονται από το ηλεκτρικό ρεύμα, μέσα από την ανάλυση πραγματικών περιστατικών και ατυχημάτων που συνέβησαν σε διάφορους χώρους εργασίας.

Στη παράγραφο 1 καθορίζεται ο σκοπός της εργασίας και γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες που έχουν άμεση σχέση με το ηλεκτρικό ρεύμα και την πρακτική εφαρμογή του. Έτσι περιγράφονται οι δοκιμές ποιοτικού ελέγχου του ηλεκτρολογικού υλικού, γίνεται μια σύντομη αναφορά σε βασικά θέματα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων μεταφοράς και διανομής (όπως: το βραχυκύκλωμα, η θερμική και διηλεκτρική συμπεριφορά ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού καθώς και η μηχανική συμπεριφορά των εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής) και τέλος παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες μέθοδοι ανάλυσης εργατικών ατυχημάτων.

Στη παράγραφο 2 γίνεται ανάλυση πραγματικών ηλεκτρικών ατυχημάτων με σκοπό την κατανόηση των βασικών αιτιών που τα προκάλεσαν προκειμένου να γίνουν προτάσεις που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην μείωση παρόμοιων περιστατικών στο μέλλον.

Συγκεκριμένα η ανάλυση ενός θανατηφόρου ατυχήματος που προκλήθηκε από την επαφή βαρέως οχήματος με τους εναέριους ηλεκτροφόρους αγωγούς διανομής, καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό παρόμοιων ηλεκτρικών ατυχημάτων που συμβαίνουν σε παγκόσμιο επίπεδο σε διάφορους παραγωγικούς τομείς. Από την εν λόγω ανάλυση βγήκαν σημαντικά συμπεράσματα και έγιναν πολλές οργανωτικές και τεχνικές προτάσεις με σκοπό την επίτευξη διαρθρωτικών αλλαγών τόσο σε επίπεδο οργάνωσης όσο και σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής.

Από την ανάλυση ενός πραγματικού ατυχήματος που προκλήθηκε λόγω εσφαλμένου χειρισμού ασφαλειοαποξεύκτη έγινε κατανοητό ότι ακόμα και σε συνηθισμένες και τυποποιημένες εργασίες αποκατάστασης βλαβών του δικτύου, είναι δυνατό να προκληθούν θανατηφόρα ατυχήματα και βγήκαν σημαντικά συμπεράσματα για τον ασφαλή χειρισμό του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του δικτύου. Για το λόγο αυτό, γίνεται μια σειρά προτάσεων που αφορούν στην ενημέρωση των τεχνικών που απαρτίζουν τα συνεργεία αποκατάστασης βλαβών, ενώ προτείνεται και μια τεχνική λύση για την αποφυγή παρόμοιων ατυχημάτων.

Από την ανάλυση πραγματικών περιστατικών σε ιδιωτικούς χώρους καταναλωτών, έγινε κατανοητό το μέγεθος του κινδύνου από το ηλεκτρικό ρεύμα λόγω έλλειψης βασικών προστατευτικών διατάξεων. Για το λόγο αυτό προτείνονται μέτρα προστασίας από κινδύνους στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών με την τοποθέτηση ισοδυναμικών συνδέσεων, διακόπτη διαφυγής έντασης, επιτηρητή τάσης και αξιόπιστου ηλεκτροτεχνικού υλικού γενικότερα που έχει υποστεί τις δοκιμές τύπου και σειράς που προβλέπονται από τους διεθνείς κανονισμούς.

Εξετάζεται επίσης η συμπεριφορά των εναέριων αγωγών διανομής σε διάφορες επιφορτίσεις (βάρος αγωγού, ανεμοπίεση, επίστρωση πάγου, πυρκαγιά) και βγαίνουν σημαντικά συμπεράσματα για την μηχανική αντοχή τους. Από την εν λόγω ανάλυση με την βοήθεια μιας απλοποιημένης προσέγγισης διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στην περίπτωση πυρκαγιάς επηρεάζει σε τέτοιο βαθμό το σύστημα των αγωγών ώστε οι επιφορτίσεις του βάρους και του ανέμου να μπορούν να αγνοηθούν. Όταν μάλιστα ο αγωγός αποτελείται από κλώνους αλουμινίου διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ πιθανή η αποκοπή του.

Μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στο οποίο εκτίθεται το τεχνικό προσωπικό κατά την διάρκεια της δοκιμής υπερθέρμανσης ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού (διακόπτες, μετασχηματιστές, καλώδια κλπ.) παρουσιάζονται στην παράγραφο 3. Από την ανάλυση της διαδικασίας δοκιμής και από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι η έκθεση των εργαζομένων στο μαγνητικό πεδίο είναι σημαντική και μάλιστα σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια που έχουν θεσπιστεί. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζεται μια πρόταση για την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που πρέπει να τηρείται ανάλογα με το είδος της συσκευής και του ονομαστικού ρεύματος.

Στο τέλος της εργασίας αυτής, γίνεται μια επισκόπηση των θεμάτων που εξετάστηκαν και αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε. Η κατανόηση και ανάλυση των συγκεκριμένων ατυχημάτων είναι πολύ σημαντική, προκειμένου να γίνουν προτάσεις που θα μπορούσαν να μειώσουν τα θανατηφόρα ατυχήματα που οφείλονται στο ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτός είναι και ο πρωταρχικός στόχος της διατριβής και οι προτάσεις που προβάλλονται μέσα από αυτή μπορούν να θεωρηθούν ως η κυριότερη συμβολή της στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές.

Abstract

This thesis focuses on the electrical current hazards through the analysis of real accidents that occurred in various working environments.

In the first section, the aim of this work is determined and an introduction of basic terms related to electrical current and its applications, is given. Several quality tests of the electrical equipment are described, while a brief report of important subjects regarding the distribution network is given (eg. the short circuit, the dielectric behavior of the electrotechnical equipment and the mechanical behavior of the overhead power lines). At the end of the section there is a short introduction to the main accident-analysis methods.

The analysis carried out in the second section refers to real accidents that occurred in Greece, while emphasis has been placed on possible ways to avoid similar accidents in the future.

In particular, the analysis of the accident where a heavy vehicle came in contact with the medium voltage power lines of the national distribution network system covers a wide range of similar accidents that occur in production industries worldwide. The significant conclusions arrived at through the analysis helped in the formulation of recommendations regarding measures that should be taken, not only on an organizational level but on a technical level as well.

Through the analysis of the fatal accident that occurred during restoration works due to improper use of switch operation, it became clear that even in routine repair works on the network, any failure to implement the safety rules can have a dire outcome. In order to avoid similar unfortunate fatalities in the future, many proposals have been made concerning compliance with regulations and approved working procedures.

Electrical installations with inadequate protection system, in conjunction with unfortunate events like the abruption of an overhead power line, have often caused fatal accidents and property damage. In order to ensure the required reliability of an electrical installation it is very important that every electrical material used, should satisfy the European Standards and it is highly recommended that equipotential bonding systems be implemented in every household.

Furthermore, the analysis of the mechanical behavior of overhead power lines under the exertion of several loads (weight, wind, weight of ice, fire) showed that the temperature rise is the main factor that influences the mechanical strain to a great extent. In the case of an aluminum conductor in particular, the temperature rise can cause the abruption of the overhead power line.

In the third section, low frequency magnetic fields were measured during the temperature-rise test of various electrotechnical equipment. The number of workers subjected to magnetic fields from the temperature-rise test is small; however, the exposure can be significant as the testing currents can be in the order of hundred amperes. The magnetic field exposure was recorded and statistics were calculated for three electrotechnical apparatus. Additionally, in order to minimize the exposure, a rule of thumb regarding safety distances has been proposed. It is shown that the use of this rule of thumb can reduce magnetic field exposure.

In the last section there is a review of the main topics and the most significant conclusions are summarized. The analysis of the examined occupational electrical accidents is essential in order to propose appropriate measures that could help to prevent such unfortunate consequences in the future. This was the initial aim of this thesis, and all the proposed prevention measures can be considered to be the main contribution of this work to scientific research.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περίληψη	ii
Abstract	iv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Οι δοκιμές ποιοτικού ελέγχου του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού.....	1
1.2 Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής	3
1.2.1 Το βραχυκύκλωμα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής	3
1.2.2 Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης	7
1.2.3 Θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών συνδέσμων υπό το ονομαστικό τους ρεύμα	9
1.2.4 Θερμική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς και διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας τους	11
1.2.5 Η διηλεκτρική συμπεριφορά του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού ...	11
1.2.6 Σπινθηρισμοί σε μονωτήρες και αγωγούς και έρπουσες εκκενώσεις σε μονωτήρες	13
1.2.7 Η δημιουργία αλλοιώσεων επί των γυμνών αγωγών αλουμινίου μεταφοράς και διανομής.....	18
1.2.8 Η Μηχανική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής	21
1.3 Μέθοδοι ανάλυσης εργατικών ατυχημάτων.....	33
1.3.1 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω χαρτογράφησης των γεγονότων και των αιτιωδών παραγόντων ..	35
1.3.2 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω εξέτασης των προβλεπόμενων μέσων και μέτρων ασφάλειας	36
1.3.3 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω της ροής της ενέργειας	37
1.3.4 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω εξέτασης των μεταβολών στη λειτουργία του συστήματος	38
1.3.5 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω ιεράρχησης της διοικητικής αβλεψίας και της επικινδυνότητας ...	39

1.3.6	Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω εξέτασης της ακολουθίας των γεγονότων	40
2	Χαρακτηριστικά παραδείγματα ηλεκτρικών ατυχημάτων	43
2.1	Επαφή βαρέων οχημάτων με ηλεκτροφόρους αγωγούς διανομής	43
2.1.1	Εισαγωγή	43
2.1.2	Περιγραφή του ατυχήματος που συνέβη	44
2.1.3	Περιγραφή λειτουργίας του Αυτόματου Διακόπτη στο κέντρο διανομής από όπου ηλεκτροδοτείται η γραμμή μέσης τάσης	46
2.1.4	Αιτιολόγηση του συγκεκριμένου ατυχήματος	47
2.1.5	Σχόλια και Προτάσεις	47
2.1.6	Συμπεράσματα	52
2.2	Εσφαλμένος χειρισμός ασφαλειοαποζεύκτη σε υπαίθριο υποσταθμό διανομής μέσης τάσης	52
2.2.1	Εισαγωγή	53
2.2.2	Περιγραφή του ατυχήματος που συνέβη	53
2.2.3	Περιγραφή του συγκεκριμένου δικτύου διανομής	55
2.2.4	Ανάλυση του συγκεκριμένου ατυχήματος	57
2.2.5	Θερμική συμπεριφορά του ασφαλειοαποζεύκτη υπό κανονικές συνθήκες χειρισμού	61
2.2.6	Σχόλια και Προτάσεις	63
2.3	Μέτρα προστασίας από κινδύνους σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών	65
2.3.1	Εισαγωγή	65
2.3.2	Πρόκληση πυρκαγιάς σε κλιματιστικό λόγω διαρροής ρεύματος σε συνδυασμό με την ανυπαρξία ισοδυναμικών συνδέσεων	66
2.3.3	Θανατηφόρος ηλεκτροπληξία σε μπάνιο λόγω αποκοπής του αγωγού του ουδετέρου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης ...	67
2.3.4	Μέτρα πρόληψης και προστασίας	72
2.3.5	Συμπέρασμα	73
2.4	Παράδειγμα μηχανικής συμπεριφοράς εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής	73
2.4.1	Εισαγωγή	73
2.4.2	Επιφόρτιση αγωγού από το βάρος του, την επίστρωση πάγου και την ανεμοπίεση	74
2.4.3	Μηχανική καταπόνηση του αγωγού σε περιβάλλον πυρκαγιάς ...	77
2.4.4	Επιφόρτιση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας	80
2.4.5	Αποκοπή αγωγού σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον του	81
2.4.6	Περίπτωση εναέριου αγωγού με ανισοϋψή στήριξη	82
2.4.7	Αποκοπή αγωγού αλουμινίου λόγω μετάδοσης θερμότητας σε αυτόν με ακτινοβολία και μεταφορά	86

3 Έκθεση εργαζομένων σε μαγνητικό πεδίο χαμηλών συχνοτήτων	87
3.1 Μαγνητικό πεδίο και όρια ασφαλείας	87
3.2 Η διαδικασία των μετρήσεων κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης	88
3.3 Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου και η έκθεση των εργαζομένων σε αυτό κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής υπερθέρμανσης σε δοκίμια	89
3.4 Σχόλια	93
3.5 Συμπεράσματα	95
4 Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές	97
Βιβλιογραφία	99
Κατάλογος σχημάτων	109
Κατάλογος πινάκων	111
Κατάλογος Συντμήσεων	112
Κατάλογος Συμβόλων	115
Κατάλογος δημοσιεύσεων του συγγραφέα	117
Βιογραφικό σημείωμα του συγγραφέα	119

1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια έχει σήμερα ένα τεράστιο φάσμα εφαρμογών και αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της καθημερινής ζωής. Το ηλεκτρικό ρεύμα όμως αν και είναι τόσο σημαντικό αποτελεί σε παγκόσμιο επίπεδο μια από τις βασικότερες αιτίες εργατικών ατυχημάτων. Η δημιουργία διεθνών προτύπων για όλες σχεδόν τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις σε συνδυασμό με τους κανόνες ασφαλείας που έχουν θεσπιστεί σε κάθε χώρα, έχουν συνεισφέρει σε πολύ μεγάλο βαθμό στην ασφάλεια της ζωής και της περιουσίας. Παρ' όλα αυτά όμως, λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος άνθρωποι χάνουν τη ζωή τους ή τραυματίζονται.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στους κινδύνους που προέρχονται από το ηλεκτρικό ρεύμα, μέσα από την ανάλυση πραγματικών περιστατικών και ατυχημάτων που συνέβησαν σε διάφορους χώρους εργασίας. Η κατανόηση και ανάλυση αυτών των ατυχημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική προκειμένου να γίνουν προτάσεις ώστε να εξαλειφθούν ή έστω να μειωθούν τα ηλεκτρικά ατυχήματα και να περιοριστούν οι δυσάρεστες συνέπειές τους.

1.1 Οι δοκιμές ποιοτικού ελέγχου του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής πρέπει, πριν αυτή διατεθεί σε χρήση, να δοκιμαστεί σε λειτουργικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις της στο δίκτυο. Οι δοκιμές αυτές, που συνήθως αποτελούν την τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, προβλέπονται στους κανονισμούς (VDE, IEC κλπ.) και διακρίνονται στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς [61, 77]. Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε περιορισμένο αριθμό των παραχθέντων και ετοιμών προς διάθεση προϊόντων (π.χ. για την παραγωγή εκατό μετασχηματιστών 20kV/400kVA, σε ένα μόνο τυχαίο δείγμα), ενώ οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα τεμάχια (π.χ. και στους εκατό παραπάνω μετασχηματιστές) [61, 77].

Όταν μία συσκευή δεν αντεπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες γι' αυτή δοκιμές τύπου και σειράς, τότε κρίνεται ακατάλληλη. Για την κατανόηση

των δοκιμών τύπου, που προβλέπονται στους κανονισμούς (VDE, IEC κλπ.) έχουν παρασταθεί στο σχήμα 1.1 [61, 77], οι διάφορες κατηγορίες τους, οι οποίες βέβαια πραγματοποιούνται μόνο όταν έχουν νόημα για την υπό έλεγχο κατασκευή. Σε ένα μονωτήρα για παράδειγμα δεν έχει νόημα η δοκιμή βραχυκύκλωσης, οι δοκιμές μηχανικής αντοχής αφορούν τις επαφές διακοπών κλπ.. Το σκεπτικό για την κατάταξη και διεξαγωγή των δοκιμών όπως αυτές δίνονται στο σχήμα 1.1, προήλθε από την ανάγκη να δοθεί μια αξιόπιστη απάντηση στις εξής βασικές ερωτήσεις για κάθε κατασκευή [61, 77].

- Μέχρι ποιο ρεύμα μπορεί να λειτουργεί μια κατασκευή (ονομαστικό ρεύμα);
- Ποιά είναι η τάση λειτουργίας της (ονομαστική τάση);
- Τι απαιτήσεις μηχανικής αντοχής πρέπει να έχει;
- Αντέχει η συσκευή το βραχυκύκλωμα μέχρι να γίνει διακοπή του από τα μέσα προστασίας του δικτύου;
- Ποιές είναι οι ειδικές απαιτήσεις που θα χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της;



Σχήμα 1.1: Κατηγορίες δοκιμών τύπου [61, 77]

Οι απαντήσεις στους παραπάνω προβληματισμούς δίνονται με την διεξαγωγή συγκεκριμένων δοκιμών τύπου που περιλαμβάνονται στους διάφορους κανονισμούς και είναι αντίστοιχα για τις τέσσερις πρώτες ερωτήσεις:

- Η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή αύξησης της θερμοκρασίας)
- Οι διηλεκτρικές δοκιμές
- Η δοκιμή μηχανικής αντοχής
- Η δοκιμή βραχυκύκλωσης

Η αξιοπιστία μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής βασίζεται στις εν λόγω δοκιμές και όσον αφορά στις ονομαστικές τιμές του ρεύματος και της τάσης, αυτές επιβεβαιώνονται με τις δοκιμές υπερθέρμανσης και τις διηλεκτρικές δοκιμές αντίστοιχα [29, 52, 61, 77]. Για τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος της εν λόγω κατασκευής πρέπει να μετρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας που εκδηλώνεται από αυτό. Έτσι, όταν η θερμοκρασία σταθεροποιηθεί περίπου στους 50-60°C, τότε το ρεύμα λειτουργίας της συσκευής εκείνη τη στιγμή θεωρείται ονομαστικό. Η θερμοκρασία θεωρείται σταθεροποιημένη

όταν μεταξύ δύο μετρήσεων μέσα σε μια ώρα η διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρότερη από 1°C.

Σε ότι αφορά στην τελευταία ερώτηση ως προς τις «ειδικές» απαιτήσεις μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής, προβλέπονται «ειδικές» δοκιμές οι οποίες περιλαμβάνονται αναλυτικά στους κανονισμούς. Έτσι έχουμε για παράδειγμα μέτρηση απωλειών ενός μετασχηματιστή ή έλεγχο της ποιότητας βαφής ενός πίνακα εξωτερικού χώρου, δοκιμές δηλαδή που αναφέρονται σε συγκεκριμένες «ειδικές» απαιτήσεις που καθορίζονται από το είδος και τη χρήση του υπό έλεγχο εξοπλισμού.

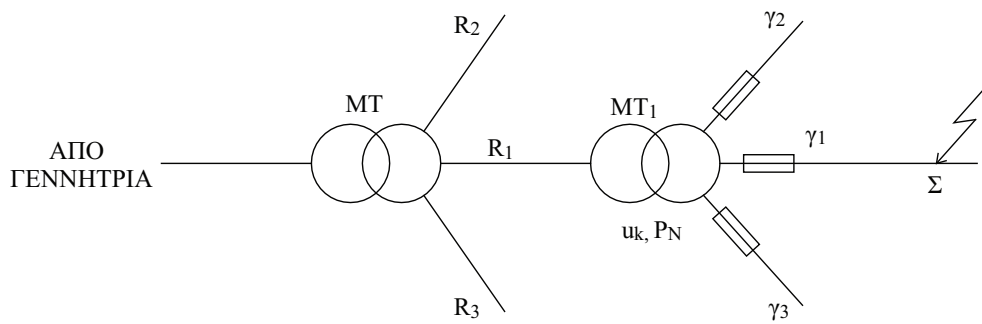
Η πραγματοποίηση της δοκιμής υπερθέρμανσης γίνεται σε πολύ κοντινή απόσταση από τον ελεγχόμενο ηλεκτροτεχνικό εξοπλισμό, με αποτέλεσμα το προσωπικό που διεξάγει τις μετρήσεις να βρίσκεται υπό την άμεση επίδραση της μαγνητικής επαγωγής, η τιμή της οποίας στο εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 ή 60 Hz δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 500 μT για την ασφάλεια των εργαζομένων. Στην εργασία αυτή γίνεται μια σύντομη αναφορά στην δοκιμή υπερθέρμανσης του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού των εγκαταστάσεων που αποσκοπεί στην πρόταση μέτρων για την διασφάλιση των εργαζομένων από το μαγνητικό πεδίο. Ως παραδείγματα εξετάζονται οι δοκιμές σε διακόπτες με ονομαστικό ρεύμα άνω των 400 A και σε μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης (π.χ. 20kV/400V) 400 kVA ως 1000 kVA οι οποίοι συναντώνται συχνά τόσο στο δίκτυο διανομής όσο και σε ιδιωτικούς υποσταθμούς.

1.2 Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής

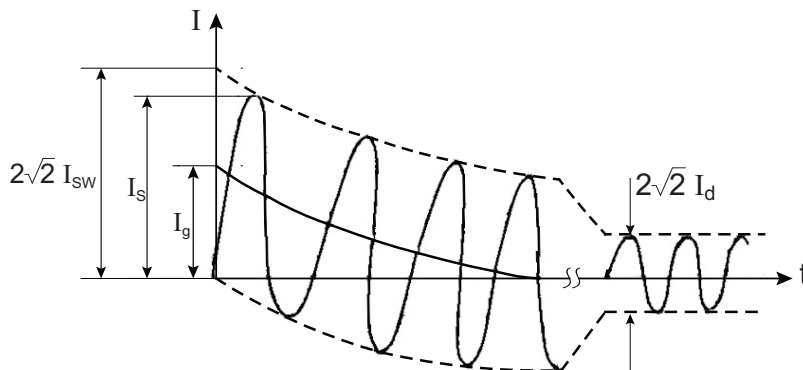
1.2.1 Το βραχυκύκλωμα σε γραμμές μεταφοράς και διανομής

Ο εξοπλισμός κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ελέγχεται, προκειμένου να διαπιστωθεί αν είναι σε θέση να αντέχει στα σφάλματα κατά την δυσμενέστερη κατάσταση λειτουργίας, η οποία θεωρείται ότι είναι το βραχυκύκλωμα [61]. Γι' αυτό ο υπολογισμός των εν λόγω εγκαταστάσεων βασίζεται στην πιθανή καταπόνησή τους κατά το βραχυκύκλωμα. Αν θεωρηθεί ότι εκδηλώνεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα σε ένα σημείο Σ της εγκατάστασης που απεικονίζεται στο σχήμα 1.2 [61, 85] τότε η συνολική ισχύς του δικτύου θα οδεύσει προς το σημείο αυτό. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η τιμή του ρεύματος στο σημείο Σ και η τιμή αυτή εξαρτάται από την ισχύ του δικτύου μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης [52, 61, 77].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3, το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται αρχικά ως ασύμμετρο και κατόπιν ως συμμετρικό [61, 96]. Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sw}) και το συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης



Σχήμα 1.2: Απλοποιημένο παράδειγμα τριφασικού βραχυκυκλώματος [61, 85] όπου:
 MT: μετασχηματιστής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. 150kV/20kV) με σχετική τάση βραχυκύκλωσης u_k περίπου 20% για το φανταστικό μέρος και σχετική τάση βραχυκύκλωσης $u_r=0,6\%$ για το πραγματικό μέρος
 R_1, R_2, R_3 : γραμμές κορμού μέσης τάσης,
 MT1: μετασχηματιστής διανομής ονομαστικής ισχύος P_N σχετικής τάσης βραχυκύκλωσης u_k περίπου 4%,
 γ_1 : 1η γραμμή χαμηλής τάσης,
 γ_2 : 2η γραμμή χαμηλής τάσης,
 γ_3 : 3η γραμμή χαμηλής τάσης



Σχήμα 1.3: Μορφή του ρεύματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα [61, 96] όπου:
 I_s : κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης,
 I_{sw} : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης,
 I_d : διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης,
 I_g : συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης

(I_g). Το συμμετρικό τμήμα βραχυκύκλωσης αποτελείται από το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_d). Η μέγιστη τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_s) ονομάζεται κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης. Για τις προαναφερθείσες τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_s) ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις [52, 61, 77]:

$$I_s = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sw} \quad (1.1)$$

$$I_{sw} = \frac{1,1 \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{o\lambda}^2 + X_{o\lambda}^2}} \quad (1.2)$$

όπου κ ένας συντελεστής, η τιμή του οποίου δίνεται στον πίνακα 1.1 και είναι $\kappa = f(R_{o\lambda} + X_{o\lambda})$, U_N η ονομαστική τάση στη θέση βραχυκύκλωσης, $R_{o\lambda}$ η ολική ωμική αντίσταση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης και $X_{o\lambda}$ η ολική επαγωγική αντίδραση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης. Ισχύει ακόμη [52, 61, 77]:

$$I_d = \mu_d \cdot I_{sw} \quad (1.3)$$

όπου μ_d ένας συντελεστής η τιμή του οποίου δίνεται στον πίνακα 1.2 και είναι $\mu_d = f(I_{sw}/I_g)$ με I_g το ονομαστικό ρεύμα της πηγής (δηλαδή των γεννητριών). Η συνισταμένη των $R_{o\lambda}$ και $X_{o\lambda}$ στη σχέση 1.2 είναι η ολική σύνθετη αντίσταση ($Z_{o\lambda}$) της διαδρομής βραχυκύκλωσης [61, 96]:

$$Z_{o\lambda}^2 = R_{o\lambda}^2 + X_{o\lambda}^2 \quad (1.4)$$

Από τις συνιστώσες του ρεύματος βραχυκύκλωσης υπολογίζεται η δυναμική και η θερμική καταπόνηση στη θέση βραχυκύκλωσης. Ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{sw}) μπορεί να γίνει από το ονομαστικό ρεύμα (I_N) και τη σχετική τάση βραχυκύκλωσης (u) του μετασχηματιστή που προηγείται της θέσης βραχυκύκλωσης. Στην περίπτωση αυτή ισχύει η σχέση [96]:

$$I_{sw} \leq \frac{100 \cdot I_N}{u} \quad (1.5)$$

όπου I_N σε kA και το u σε %.

Οι τιμές που υπολογίζονται από την σχέση 1.5 είναι μεγαλύτερες από τα ακριβή αποτελέσματα της μεθόδου των αντιστάσεων και μάλιστα αυξάνουν με την απόσταση της θέσης βραχυκύκλωσης από τη πηγή της ενέργειας. Συνεπώς η μέθοδος αυτή αν και προσεγγιστική, μπορεί να μην ενδείκνυται για τους υπολογισμούς αντοχής των γραμμών σε βραχυκύκλωμα, είναι όμως η πλέον κατάλληλη για τη μέγιστη θερμική καταπόνηση γιατί δε λαμβάνει καθόλου τις αντιστάσεις και είναι σαν να εξετάζεται το βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή [61, 85]. Για τη θερμική καταπόνηση ενός αγωγού κατά το βραχυκύκλωμα ισχύει η παρακάτω σχέση [52, 61, 96]:

$$\Delta\theta = \frac{\kappa}{A^2} \cdot I_d^2 \cdot \left[t + T \cdot \left(\frac{I_{sw}}{I_d} \right)^2 \right] \quad (1.6)$$

Πίνακας 1.1: Τιμές του συντελεστή κ
 $\kappa = f(R_{o\lambda} + X_{o\lambda})$

$R_{o\lambda}/X_{o\lambda}$	κ
0,00	1,800
0,05	1,680
0,10	1,590
0,15	1,500
0,20	1,440
0,25	1,380
0,30	1,330
0,35	1,290
0,40	1,250
0,45	1,220
0,50	1,190
0,55	1,170
0,60	1,140
0,65	1,120
0,70	1,110
0,75	1,100
0,80	1,095
0,85	1,090
0,90	1,080
0,95	1,075
1,00	1,070
1,05	1,065
1,10	1,060
1,15	1,055
1,20	1,050

Πίνακας 1.2: Τιμές του συντελεστή μ_d
 $\mu_d = f(I_{sw}/I_g)$

I_{sw}/I_g	μ_d για $\cos \varphi = 0,8$
0,1	1,00
0,2	0,97
0,3	0,96
0,4	0,93
0,5	0,90
0,6	0,89
0,7	0,87
0,8	0,85
0,9	0,82
1,0	0,80
1,6	0,70
2,0	0,67
3,0	0,58
4,0	0,52
5,0	0,49
6,0	0,44
7,0	0,41
8,0	0,40
9,0	0,39
10,0	0,35

όπου I_d το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης και I_{sw} η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου τμήματος του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε A, $\Delta\theta$ η αύξηση της θερμοκρασίας σε °C, κ σταθερά του υλικού (για χαλκό $\kappa = 0,0058$, για αλουμίνιο $\kappa = 0,0135$), A η διατομή του αγωγού σε mm^2 , t ο χρόνος σε sec από την εμφάνιση μέχρι τη διακοπή του βραχυκυκλώματος και T ένας συντελεστής χρόνου (η τιμή του οποίου είναι για τριφασικό βραχυκύκλωμα T= 0,3 έως 0,15 ενώ για διφασικό βραχυκύκλωμα είναι T= 0,6 έως 0,25) [52, 61, 96]. Η τιμή T μειώνεται με την απόσταση από τη θέση βραχυκύκλωσης.

Η δυναμική καταπόνηση μεταξύ αγωγών κατά το βραχυκύκλωμα, υπολογίζεται μέσω του κρουστικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_s) από τη σχέση [96]:

$$F = \frac{\mu_o \cdot I_s^2 \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot d} \quad (1.7)$$

όπου $\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am, L το μήκος των αγωγών και d η απόσταση μεταξύ τους.

1.2.2 Η συνθήκη βραχυκύκλωσης (ή ουδετέρωσης) στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

Στους πίνακες 1.3 και 1.4 δίνονται τιμές των ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, ανάλογα με τον μετασχηματιστή και το μήκος της γραμμής. Το μικρότερο μήκος αφορά την γραμμή με το καλώδιο παροχής (για παράδειγμα συγκεντρικό καλώδιο 2 x 6mm² μήκους 30m) και το μεγαλύτερο μήκος, τη γραμμή χωρίς το καλώδιο παροχής [20, 61]. Τα μήκη των γραμμών στους πίνακες 1.3 και 1.4 προκύπτουν από τη παρακάτω σχέση 1.8 η οποία έχει αποδειχθεί θεωρητικά [78, 92]:

$$l \leq \sqrt{\left(\frac{220}{3Z_\gamma I_{Na}}\right)^2 - \left(\frac{R_\gamma X_{MT} - X_\gamma R_{MT}}{Z_\gamma^2}\right)^2} - \left(\frac{R_\gamma X_{MT} + X_\gamma X_{MT}}{Z_\gamma^2}\right) \quad (1.8)$$

όπου l το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος της γραμμής (σε km), I_{Na} η ονομαστική τιμή της ασφάλειας της γραμμής (σε A), η οποία επιλέγεται βάσει του M/Σ που χρησιμοποιείται κάθε φορά, Z_γ η σύνθετη αντίσταση της γραμμής χαμηλής τάσης (σε Ω/km), R_γ , X_γ η ωμική και αυτεπαγωγική αντίσταση της γραμμής χαμηλής τάσης (σε Ω) και R_{MT} , X_{MT} η ωμική και αυτεπαγωγική αντίσταση του M/Σ στη χαμηλή τάση (σε Ω).

Σε περίπτωση που μία γραμμή αποτελείται από γυμνούς αγωγούς διαφορετικών διατομών, τότε το ισοδύναμο μήκος της γραμμής βρίσκεται με μετατροπή των επιμέρους αγωγών σε ένα είδος αγωγού σταθερής διατομής. Για τη μετατροπή α μέτρων αγωγού αντίστασης Z_a (σε Ω/km) σε αντίσταση Z_β (σε Ω/km) ισχύει η σχέση 1.9 [20, 61]:

$$\beta = \alpha \cdot (Z_a/Z_\beta) \quad (1.9)$$

Στον πίνακα 1.5 δίνεται το πηλίκο Z_a/Z_β για γυμνούς αγωγούς και συγκεντρικά καλώδια. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι όταν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις κατά τους ανωτέρω πίνακες, τότε ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης (ή βραχυκύκλωσης), που σημαίνει ότι κατά το βραχυκύκλωμα συμβαίνει ακαριαία (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) τήξη της ασφάλειας, με αποτέλεσμα να θερμαίνονται οι αγωγοί μόνο μερικούς βαθμούς Κελσίου και συνεπώς να μη δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από αυτούς [85, 96].

Πίνακας 1.3: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες Χ.Τ. της Δ.Ε.Η (15kVA έως 100kVA)

Ισχύς P [KVA]	Ασφάλεια I _{ασφ.} [A]	Μήκος γραμμής σε m										
		Γυμνοί Αγωγοί [16 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί [35 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί [50 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί [70 mm ²]	Συμπετραμμένο Καλώδιο [3x35 + 54,6 mm ²]	Συμπετραμμένο Καλώδιο [3x70 + 54,6 mm ²]					
15	25	950	1030									
	32	690	760									
25	32	770	850									
	40	580	660					380	1000			
50	50	480	560	30	1070			720	840	1010	1130	
	63	360	440	690	830	920	1090	540	660	750	920	
	80	250	330	490	630	660	830	820	1010	500	700	
75	63	370	450	730	870	970	1140	560	680	780	950	
	80	270	350	530	670	710	880	1080	410	530	740	
	100	200	280	380	530	510	690	840	300	420	580	
	125	140	220	270	410	360	530	640	650	330	450	
100	63	380	460	750	890	990	1160	570	690	800	970	
	80	280	360	550	690	730	900	910	1110	420	540	760
	100	210	280	400	540	530	710	670	870	310	430	600
	125	150	220	270	420	380	550	480	680	220	340	440
	160	90	170	180	320	240	420	310	510	140	260	360

Πίνακας 1.4: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες Χ.Τ. (150kVA ως 1000kVA)

Ισχύς P [KVA]	Ασφάλεια I _{ασφ.} [A]	Μήκος γραμμής σε m										
		Γυμνοί Αγωγοί [16 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί [35 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί [50 mm ²]	Γυμνοί Αγωγοί [70 mm ²]	Συμπετραμμένο Καλώδιο [3x35 + 54,6 mm ²]	Συμπετραμμένο Καλώδιο [3x70 + 54,6 mm ²]					
150-200	80	290	370	750	890	990	1160	570	690	800	970	
	100	210	300	550	690	730	900	910	1110	420	540	760
	125	150	230	400	540	530	710	670	870	310	430	600
	160	100	180	270	420	380	550	480	680	220	340	440
	200			270	420	380	550	480	680	220	340	440
	250			180	320	240	420	310	510	140	260	360
250-400	80	290	370	580	720	770	960	970	1170	440	560	780
	100	220	300	480	580	580	760	730	940	330	450	620
	125	160	240	310	460	420	600	540	740	240	360	500
	160	110	180	210	360	280	470	360	580	160	280	400
500-630	200			140	280	180	370	240	460	100	220	310
	250			80	230	100	300	40	360			250
750-1000	315					40	230	50	280			80
	400								220			

Πίνακας 1.5: Τιμές Z_{α}/Z_{β} για γυμνούς αγωγούς Cu ή ισοδύναμου Al και συγκεντρικά καλώδια

Διατομή γυμνού αγωγού Cu ή ισοδύναμου Al	16 mm ² ($Z_{\beta} = 2,570$ Ω/km)	35 mm ² ($Z_{\beta} = 1,310$ Ω/km)	50 mm ² ($Z_{\beta} = 0,967$ Ω/km)	70 mm ² ($Z_{\beta} = 0,797$ Ω/km)
16 mm ² $Z_{\alpha} = 2,570$ Ω/km	1,000	1,962	2,658	3,224
35 mm ² $Z_{\alpha} = 1,310$ Ω/km	0,509	1,000	1,355	1,644
50 mm ² $Z_{\alpha} = 0,967$ Ω/km	0,376	0,738	1,000	1,213
70 mm ² $Z_{\alpha} = 0,797$ Ω/km	0,310	0,608	0,824	1,000
Διατομή συγκεντρικού καλωδίου Cu				
6 mm ² $Z_{\alpha} = 7,754$ Ω/km	3,017	5,917	8,020	9,730
10 mm ² $Z_{\alpha} = 4,334$ Ω/km	1,685	3,307	4,482	5,438
16 mm ² $Z_{\alpha} = 2,804$ Ω/km	1,091	2,140	2,900	3,518
25 mm ² $Z_{\alpha} = 1,788$ Ω/km	0,695	1,364	1,850	2,243

1.2.3 Θερμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών συνδέσεων υπό το ονομαστικό τους ρεύμα

Ένα από τα βασικότερα στοιχεία μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης αποτελούν οι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι, οι οποίοι μπορούν να διαχωριστούν σε μόνιμους και σε λυόμενους. Οι μόνιμοι ηλεκτρικοί σύνδεσμοι αποτελούνται από δύο μέρη τα οποία συνδέονται μεταξύ τους σταθερά μέσω κοχλιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων συνδέσεων είναι οι συνδέσεις των αγωγών σε ένα μετασχηματιστή, οι συνδέσεις μέσω σφικτήρων σε γραμμές διανομής, κλπ.. Λύσιμοι σύνδεσμοι είναι αυτοί που επιτρέπουν το χειρισμό τους μέσω εξωτερικά εφαρμοζόμενης δύναμης, όπως οι επαφές των διακοπών γενικά, καθώς και οι επαφές μεταξύ των ασφαλειών και ασφαλειοθηκών. [23, 61, 62, 67].

Ως ηλεκτρική επαφή ορίζεται η αγωγή σύνδεση δύο αγωγών, η οποία έχει τη δυνατότητα να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ αντίσταση διάβασης θεωρείται η αντίσταση που παρουσιάζει μια επαφή κατά την διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος [67]. Η

τιμή της αντίστασης διάβασης εξαρτάται από το είδος των υλικών, τη δύναμη σύσφιξης των επαφών και γενικά από τη γεωμετρία του συνδέσμου, ενώ πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν οι ξένες επικαθίσεις που μπορεί να είναι οξειδία, οργανικές ουσίες, σκόνη κλπ. [23, 62, 67].

Έτσι η αντίσταση διάβασης R περιλαμβάνει, κατά την βιβλιογραφία [23, 61, 62, 67] την αντίσταση στένωσης R_C (constriction resistance) και την αντίσταση R_f του στρώματος επικαθίσεων στις επαφές, όπου η αντίσταση στένωσης είναι το αποτέλεσμα της εξαναγκασμένης ροής του ηλεκτρικού ρεύματος από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο, ενώ η αντίσταση του στρώματος επικαθίσεων οφείλεται στη δυσκολία των ηλεκτρικών φορέων να διαπεράσουν το στρώμα αυτό.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στένωσης R_C μιας επαφής, είναι η θερμοκρασία η οποία προκαλείται από το ηλεκτρικό ρεύμα που την διαπερνά και η τιμή της δίνεται από την παρακάτω σχέση [13, 67]:

$$R_c(\theta) = R_c(\theta_0)[1 + \frac{2}{3}\alpha(\theta - \theta_0)] \quad (1.10)$$

Όπου $R_c(\theta)$, $R_c(\theta_0)$ οι αντιστάσεις στένωσης στις θερμοκρασίες θ , θ_0 με $\theta > \theta_0$ και α ο θερμικός συντελεστής του υλικού των επαφών.

Θεωρώντας ως $\Delta\theta$ την αύξηση της θερμοκρασίας σε μια ηλεκτρική επαφή ως προς την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η οποία λειτουργεί υπό το ονομαστικό της ρεύμα και ως U την πτώση τάσης στην εν λόγω επαφή, τότε ισχύει η μεταξύ τους σχέση [67]:

$$\rho\lambda \cdot \Delta\theta = \frac{U^2}{8} \quad \text{ή αλλιώς} \quad U = \sqrt{8 \cdot \rho\lambda \cdot \Delta\theta} \quad (1.11)$$

όπου ρ η ειδική αντίσταση και λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Πειραματικά δεδομένα για συνήθεις επαφές πρακτικών εφαρμογών δίνουν γενικά μικρές τιμές της αντίστασης R_c και για αυτό το λόγο μπορεί κανείς να υποθέσει ότι η αντίσταση των ξένων επικαθίσεων R_f σε μία επαφή, έχει τον πρωτεύοντα ρόλο στην διαμόρφωση της ολικής αντίστασης διάβασης [62, 67]. Σημειώνεται ότι η επίδραση της θερμοκρασίας συμβάλλει στη δημιουργία οξειδίων σε επαφές, που με τη σειρά τους προκαλούν αύξηση της αντίστασης διάβασης και συνεπώς επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας [67]. Αυτό το ανακυκλώμενο φαινόμενο σε μια επαφή υπό την επίδραση της θερμοκρασίας είναι δυνατό να προκαλέσει συγκόλλησή της ή ακόμα και δημιουργία τήγματος με κίνδυνο πρόκλησης πυρκαγιάς σε ένα εύφλεκτο περιβάλλον.

Θα πρέπει δε να σημειωθεί ότι το πρόβλημα της υπερθέρμανσης των επαφών υπάρχει κυρίως στην χαμηλή τάση όπου οι τιμές του ρεύματος είναι μεγάλες. Γί αυτό,

κατά την διαχρονική λειτουργία των ηλεκτρικών επαφών (σε διακόπτες, σφικτήρες, ακροδέκτες κλπ.) θα πρέπει να επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της αντίστασης διάβασης ώστε να επιτυγχάνεται η προβλεπόμενη αγωγιμότητα, όπως αυτή έχει προκύψει από την δοκιμή υπερθέρμανσης (Παρ. 1.1).

1.2.4 Θερμική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς και διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας τους

Η θερμική συμπεριφορά των γραμμών μεταφοράς και διανομής υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας τους είναι άνευ σημασίας γιατί το ονομαστικό ρεύμα των αγωγών είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας και ως εκ τούτου η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς (ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος) είναι μικρότερη από 50°C (Παρ. 1.1).

1.2.5 Η διηλεκτρική συμπεριφορά του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού

Η συμπεριφορά κάθε ηλεκτροτεχνικής κατασκευής αντιστοιχεί, ως προς την ικανότητα μόνωσης της, με αυτήν ενός πυκνωτή όπου το ζητούμενο είναι να μην υπάρχουν ρεύματα διαρροής [96]. Έτσι προκειμένου να αξιολογηθεί η διηλεκτρική συμπεριφορά ενός ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού θα πρέπει να ελέγχονται κυρίως η διηλεκτρική αντοχή, η αντίσταση μόνωσης και η tgd [61, 96].

Ως διηλεκτρική αντοχή (E_d) ενός μονωτικού υλικού (ή μιας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής), έχει οριστεί η ελάχιστη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (σε ομογενές πεδίο) κατά την οποία συμβαίνει διάσπαση, δηλαδή όταν δημιουργείται αγωγή σύνδεση μεταξύ δύο μονωμένων ηλεκτροδίων μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης [52, 96]. Ο έλεγχος της διηλεκτρικής αντοχής γίνεται με την βοήθεια διηλεκτρικών δοκιμών (Παρ. 1.1), γιατί οι εν λόγω δοκιμές αποσκοπούν στην επιβεβαίωση της ονομαστικής τάσης ανάλογα με την οποία μπορεί να καταπονείται η κατασκευή σε κεραυνικές υπερτάσεις και τάσεις χειρισμών χωρίς να προκαλείται από αυτές μείωση της διηλεκτρικής αντοχής [61].

Όσον αφορά στην αντίσταση μόνωσης του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού πρέπει να ισχύει $R \geq 1000 \Omega/V$ [61, 96], δηλαδή για μια συσκευή που λειτουργεί για παράδειγμα στα 12 V, η αντίσταση μόνωσης πρέπει να είναι $R \geq 12 \text{ k}\Omega$, ενώ στα 400 V η αντίσταση μόνωσης πρέπει να είναι $R \geq 400 \text{ k}\Omega$.

Στην περίπτωση των οικιακών ηλεκτρικών συσκευών, η ασφάλειά τους διέπεται από διεθνείς κανονισμούς, όπως για παράδειγμα οι κανονισμοί "DIN VDE 0700" και "DIN VDE 0701" [98, 40, 49], όπου η διηλεκτρική αντοχή που πρέπει να παρέχουν διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες [98, 96]:

- Κλάση I, στην οποία ανήκουν ηλεκτρικές συσκευές με αγωγό γείωσης
- Κλάση II, όπου υπάγονται συσκευές με διπλή προστατευτική μόνωση (δεν έχουν αγωγό γείωσης)
- Κλάση III, που αφορά σε συσκευές με μικρή ακίνδυνη τάση

Προκειμένου να διαπιστωθεί η διηλεκτρική αντοχή μιας ηλεκτρικής συσκευής, εφαρμόζεται σε αυτή, ανάλογα με την κλάση προστασίας της, εναλλασσόμενη τάση επί ένα λεπτό της ώρας. Η τιμή της τάσης για την κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα 1.6:

Πίνακας 1.6: Δοκιμή της αντοχής της συσκευής σε τάση [96]

Κλάση προστασίας	I	II	III
Εφαρμοζόμενη εναλλασσόμενη τάση (σε V) στα 50 Hz επί 1 min	1000	3000	400

Όσον αφορά στην αξιολόγηση της μονωτικής ικανότητας μεταξύ αγωγών και γης ή μεταξύ αγωγών μιας γραμμής μέσης τάσης (π.χ. 20 kV) ή υψηλής τάσης (π.χ. 150 kV) σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα, μπορεί να εξεταστεί η ικανότητα μόνωσης της δυσμενέστερης περίπτωσης ηλεκτροδίων πρακτικών εφαρμογών που είναι αντίστοιχα η διάταξη "ακίδα - πλάκα" ή "ακίδα - ακίδα", αφού έτσι ικανοποιείται και η διάταξη "κύλινδρος - γη" ή "κύλινδρος - κύλινδρος" που αντιστοιχεί σε δύο παράλληλους αγωγούς, όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι λιγότερο ανομοιογενές ως προς εκείνο των διατάξεων ηλεκτροδίων που προαναφέρθηκαν [96].

Έτσι για την απόσταση μόνωσης μιας διάταξης ηλεκτροδίων "ακίδα - πλάκα" σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα υπό μέση ή υψηλή εναλλασσόμενη τάση ισχύει [7, 52, 96]:

$$d \geq (0,935 \div 0,99) \cdot U/E_d \quad (1.12)$$

όπου U η ενεργός τιμή της τάσης και E_d η ειδική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, για την οποία ισχύει ότι για d μέχρι 150cm $E_d \approx 3,5kV/cm$, ενώ για $d > 150cm$ η τιμή E_d μεταβάλλεται. Σύμφωνα με πειραματικές μετρήσεις [7, 96] για $d = 200cm$ ισχύει $E_d \approx 2,5kV/cm$, ενώ για $d = 300cm$ ισχύει $E_d \approx 3kV/cm$.

Στον πίνακα 1.7 δίνονται οι τιμές της ελάχιστης απόστασης μόνωσης d καθώς και οι αποστάσεις ασφαλείας που τηρούνται στην πράξη στις γραμμές μέσης και υψηλής τάσης [96].

Πίνακας 1.7: Ελάχιστη απόσταση (d) και απόσταση ασφαλείας σε γραμμές μέσης τάσης (Μ.Τ.) και υψηλής τάσης (Υ.Τ.) [96]

Γραμμή	d	Απόσταση ασφαλείας μεταξύ αγωγών στις γραμμές	Σύνηθες ύψος γραμμής
Μ.Τ. (20 kV)	5,34 cm ÷ 5,66 cm	85 cm ÷ 125 cm	~ 10 m
Υ.Τ. (150 kV)	40 cm ÷ 42,4 cm	~ 7,67 m	~ 20 m

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, οι αποστάσεις ασφαλείας που τηρούνται στην πράξη είναι πολύ μεγάλες γιατί είναι πολλαπλάσιες της κατά περίπτωση ελάχιστης απόστασης μόνωσης.

Όσον αφορά στον υπολογισμό των αποστάσεων μόνωσης στις γραμμές χαμηλής τάσης σε μικρά διάκενα, μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία του Townsend [52, 96], σύμφωνα με την οποία η συνθήκη ιονισμού κατά την "α - γ" θεωρία, που είναι κυρίως ο μηχανισμός δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων, δίνεται από την σχέση [3, 52, 96]:

$$\alpha \cdot d = \ln\{1 + (1/\gamma)\} \quad (1.13)$$

όπου α τα παραγόμενα ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια και ισάριθμα θετικά ιόντα), d η απόσταση του διακένου και γ ο συντελεστής ιονισμού, ο οποίος για το χαλκό είναι [3]: $\gamma=0,025$. Επομένως η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\alpha \cdot d = \ln\{1 + (1/0,025)\} \approx 3,71 \quad (1.14)$$

Επομένως προκειμένου να μην εμφανιστεί ιονισμός, δηλαδή για $\alpha < 1$, θα πρέπει $d > 3,71mm$. Στην πράξη η απόσταση που τηρείται μεταξύ των γυμνών αγωγών των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης (400 V) είναι 30cm, δηλαδή πολλαπλάσια της ελάχιστης απαιτούμενης.

1.2.6 Σπινθηρισμοί σε μονωτήρες και αγωγούς και έρπουσες εκκενώσεις σε μονωτήρες

Ως σπινθηρισμούς επί των μονωτήρων εννοεί κανείς φωτεινές μερικές εκκενώσεις (δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής επί της επιφάνειας των μονωτήρων) συνοδευόμενες από θόρυβο. Ως σπινθηρισμοί συνηθίζεται να αποκαλούνται επίσης στην πράξη και οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις περί τους αγωγούς, που συνοδεύονται με θόρυβο (φαινόμενο Korona). Οι σπινθηρισμοί είναι ένα αρκετά σύνηθες ηλεκτρικό

φαινόμενο στις γραμμές υψηλής τάσης (π.χ. στα 150 kV) και στις γραμμές μέσης τάσης (π.χ. στα 20 kV). Αποτελούν ένα θεαματικό φαινόμενο αλλά ακίνδυνο για το περιβάλλον, γιατί πρόκειται για φωτεινή ακτινοβολία και ήχο (που αποδίδονται κατά την εξαναγκασμένη συλλογή των ελεύθερων κυρίως ηλεκτρονίων από την άνοδο) και όχι για κάποια πυρακτωμένα σωματίδια μονωτήρων ή αγωγών [2, 7, 52, 61, 96].

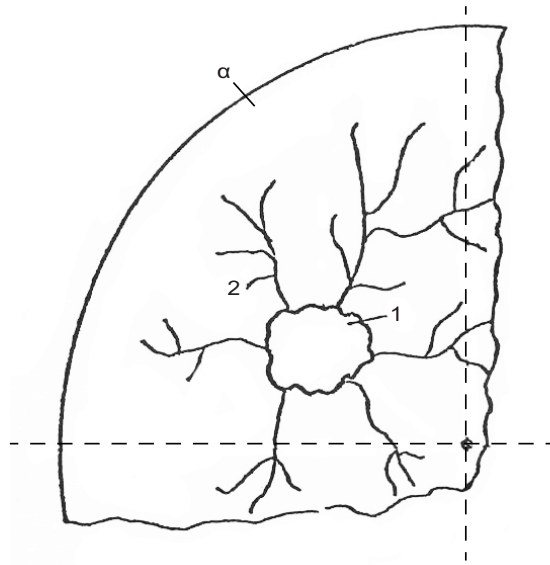
Οι σπινθηρισμοί παρουσιάζονται αρχικά επί των μονωτήρων λόγω ξένων επικαθίσεων. Οι μερικές αυτές εκκενώσεις εξελίσσονται ενίοτε (λόγω πάρα πολύ μεγάλου ποσοστού ρύπων και υγρασίας) και σε έρπουσες διαρροές επί των μονωτήρων, που μπορεί να προκαλέσουν επιφανειακή διάσπαση ή υπερπήδηση, με αποτέλεσμα τη διακοπή της τάσης από το μέσο προστασίας της γραμμής (από τις ασφάλειες ή από τον διακόπτη προστασίας της γραμμής) ή ακόμα και το "Black-Out" (διακοπή της τάσης σε πολλές γραμμές) [61, 96].

Οι σπινθηρισμοί και η εξέλιξή τους σε έρπουσες εκκενώσεις επί των μονωτήρων οφείλονται κατά κανόνα σε ταυτόχρονη επίδραση υγρασίας της ατμόσφαιρας (που επικαθεται στην επιφάνεια των μονωτήρων υπό μορφή δρόσου) και ρύπανσης στην επιφάνεια των μονωτήρων από καθαλατώσεις, σκόνη, καπναιθάλη, κ.λ.π.. Είναι απαραίτητο να συνυπάρχουν και οι δύο αυτές συνθήκες για να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις σπινθηρισμών μετά ερπουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή υπερπήδησης [61, 96].

Για το λόγο αυτό, τέτοια φαινόμενα παρουσιάζονται ενίοτε κατά τους φθινοπωρινούς μήνες (Οκτώβριο και Νοέμβριο), όταν υπάρχει παρατεταμένη ανομβρία (πριν η πρώτη βροχή πλύνει τους μονωτήρες) και έντονη υγρασία κατά τις πρώτες μεταμεσονύκτιες και πρωινές ώρες της ημέρας, σε γραμμές υψηλής και μέσης τάσης (όπως προαναφέρθηκε) και σε περιοχές όπου υπάρχουν επικαθίσεις ρύπων στις επιφάνειες των μονωτήρων. Αυτό συμβαίνει σε γραμμές παραθαλάσσιες, ή σε γραμμές που βρίσκονται πολύ κοντά σε ρυπογόνες βιομηχανίες, όπου στη μεν πρώτη περίπτωση είναι ενδεχόμενο να υπάρχουν καθαλατώσεις, στη δε δεύτερη έντονη βιομηχανική ρύπανση στους μονωτήρες [61, 96].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [96, 33], έχουν διαπιστωθεί σπινθηρισμοί καθώς και διακοπές ρεύματος σε δίκτυα μέχρι 500 kV, που προήλθαν από περιπτώματα πουλιών στους μονωτήρες, διότι έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε αλάτι.

Σε ένα απλοποιημένο μοντέλο για τους σπινθηρισμούς και τις έρπουσες εκκενώσεις, οι σπινθηρισμοί είναι φωτεινή ακτινοβολία και ήχος (κυρίως λόγω συλλογής ελεύθερων ηλεκτρονίων από την άνοδο) και οι έρπουσες εκκενώσεις η διαρροή επί του μονωτήρα λόγω της ωμικής αντίστασης που παρουσιάζει ο συνδυασμός "ρύπανση-υγρασία υπό μορφή δρόσου". Στην πρώτη περίπτωση αναφέρεται κανείς για στεγνές ζώνες επί του μονωτήρα και στη δεύτερη για υγρές ζώνες [61, 96].



Σχήμα 1.4: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών βιομηχανικών μονωτικών, όπου α: επιφάνεια στερεού μονωτικού, 1: κρατήρας, 2: σπήλαια [61, 85]

Η μορφή, την οποία παρουσιάζουν τα στερεά βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά κατά τη διαχρονική επιφανειακή καταπόνησή τους λόγω ξένων επικαθίσεων δίνεται απλοποιημένα στο παράδειγμα του σχήματος 1.4 [61, 85] και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής ακτινοβολίας (υπό μορφή δεινδρίτη). Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, που είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του στα ίχνη του επιφανειακού δεινδρίτη. Τα θραύσματα (αν υπάρχουν), δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση [61, 85].

Η πεδιακή ένταση για την έναρξη μερικών εκκενώσεων (δηλαδή σπινθηρισμών) στους αγωγούς μίας γραμμής υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από τη σχέση [16, 61, 96]:

$$E = m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{(\delta \cdot r)^{\frac{1}{2}}} \right) \text{ kV/cm} \quad (1.15)$$

όπου r η ακτίνα του αγωγού, $m_1=0,98-0,83$ (ανάλογα με την κατάσταση των αγωγών), $m_2=1$ για ξηρασία και ο συντελεστής δ περίπου 0,91.

Η πεδιακή ένταση E_1 για τάση U μεταξύ δύο αγωγών δίνεται από τη σχέση [7, 52]:

$$E_1 = \frac{U}{\eta \cdot d} \quad (1.16)$$

όπου το d είναι η απόσταση μεταξύ των αγωγών και το η είναι ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου και καθορίζεται από την τιμή της γεωμετρικής σταθερά p .

Για τη γεωμετρική σταθερά p του πεδίου μεταξύ δύο αγωγών ισχύει κατά τη βιβλιογραφία [7, 61] η σχέση:

$$p = \frac{(r + d)}{r} \quad (1.17)$$

Από τη σχέση 1.17 υπολογίζεται η τιμή p , οπότε για τιμή $p < 19,6$ από τη χαρακτηριστική $p = f(\eta)$ βρίσκεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης (η) [61]. Για τιμές $p > 19,6$ ισχύει η σχέση [7, 61]:

$$\eta = \frac{2 \cdot r \cdot \ln\left(2 + \frac{d}{r}\right)}{d} \quad (1.18)$$

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι για $E_1 > E$ δεν είναι δυνατόν να εκδηλωθούν σπινθηρισμοί.

Οι σπινθηρισμοί γύρω από τους αγωγούς οφείλονται όπως προαναφέρθηκε στη συνύπαρξη των δύο παραγόντων, που είναι η υγρασία και το ρυπογόνο περιβάλλον. Για την εκδήλωση σπινθηρισμών μεταξύ των αγωγών, πολύ δε περισσότερο για τη διάσπαση μεταξύ αυτών, απαιτείται δραστική μείωση της μονωτικής ικανότητας (ή διηλεκτρικής αντοχής) του αέρα από αγωγίμους ρύπους, όπως αυτό συμβαίνει μέσω της καπναιθάλης [85, 96]. Έτσι, η πεδιακή ένταση για την έναρξη μερικών εκκενώσεων στους αγωγούς μίας γραμμής π.χ. μέσης τάσης των $20kV$ υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από τη σχέση 1.15. Θεωρώντας ως r την ακτίνα του αγωγού σε mm (π.χ. για $r = 8,62 mm$ για αγωγό τύπου ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού $95mm^2$ [56, 85], $m_1 = 0,98$ έως $0,83$ (ανάλογα με την κατάσταση των αγωγών), $m_2=1$ για ξηρασία και $\delta=0,91$ ισχύει [96]:

$$\begin{aligned} E &= m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{(\delta \cdot r)^{\frac{1}{2}}}\right) = \\ &= 0,83 \cdot 1 \cdot 0,91 \cdot 30 \cdot \left(1 + \frac{0,3}{2,8}\right) = 25,08 \text{ kV/cm} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Για να συμβούν επομένως μερικές εκκενώσεις απαιτείται τουλάχιστον η προαναφερόμενη τιμή E .

Για τη γεωμετρική σταθερά (p) του πεδίου μεταξύ δύο αγωγών, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους κατά $d = 1000mm$, προκύπτει από τη σχέση 1.17: $p = 117,00 > 19,6$ [96]. Επομένως ο συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου (η) σύμφωνα με τη σχέση 1.18 υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{2 \cdot r \cdot \ln \left(2 + \frac{d}{r} \right)}{d} = \frac{2 \cdot 8,62 \cdot \ln \left(2 + \frac{1000}{8,62} \right)}{1000} = 0,08 \quad (1.20)$$

Επομένως η πεδιακή ένταση E_1 για τάση $U = 20kV$ είναι σύμφωνα με τη σχέση 1.16 [96]:

$$E_1 = \frac{U}{\eta \cdot d} = \frac{20}{0,08 \cdot 100} = 2,5kV/cm \quad (1.21)$$

Η τιμή E_1 είναι περίπου 10 φορές μικρότερη από την τιμή E που υπολογίστηκε παραπάνω στην σχέση 1.19 και συνεπώς αποκλείεται η εκδήλωση μεταξύ των αγωγών: θορύβου, σπινθηρισμών, ή άλλων μορφών μερικών εκκενώσεων, πολύ δε περισσότερο διάσπαση μεταξύ των αγωγών [85, 96]. Για να συμβούν σπινθηρισμοί απαιτείται να συνυπάρχουν υγρασία και ρυπασμένο περιβάλλον, ώστε να μειωθεί δραστικά η διηλεκτρική αντοχή του αέρα, όπως αυτό συμβαίνει π.χ. από την καπναιθάλη [96]. Η ειδική αγωγιμότητα του άνθρακα είναι $\rho_C = 0,083$ έως $33,3 \mu\Omega \cdot m$ και του ατμοσφαιρικού αέρα $\rho > 1000 T\Omega \cdot m$ [96]. Γι' αυτό, η καπναιθάλη δημιουργεί αγωγίμες διαδρομές στον αέρα, προκαλώντας έτσι την εκδήλωση σπινθηρισμών ή ακόμα και τη διάσπαση.

Γενικά, η αντίσταση μόνωσης (R) θεωρείται ως κατάλληλη όταν $R \geq 1000\Omega/V$ [85, 96]. Για παράδειγμα μία κυλινδρική στήλη ατμοσφαιρικού αέρα διατομής $1mm^2$ μεταξύ των αγωγών (που βρίσκονται σε απόσταση $l = 1m$) έχει αντίσταση μόνωσης:

$$R_1 = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{1000 \cdot 10^{12} \cdot 1}{10^{-6}} = 10 \cdot 10^{20}\Omega \quad (1.22)$$

Επειδή η ανωτέρω τιμή υπερπληρεί την προαναφερθείσα ανισότητα, η εν λόγω στήλη είναι καταλληλότερη ως μόνωση. Η τιμή του ρεύματος (I) κατά την εκδήλωση σπινθηρισμών είναι μερικά mA (π.χ. $I = 10mA$). Έτσι, αν θεωρηθεί ότι η προηγούμενη στήλη έγινε μείγμα αέρος και καπναιθάλης, τότε η τιμή R_2 της αντίστασης του μείγματος αυτού θα είναι [96]:

$$R_2 = \frac{U}{I} = \frac{20.000}{10 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^{-6}\Omega \quad (1.23)$$

Η τιμή όμως αυτή δεν παρέχει πλέον την απαιτούμενη μονωτική ικανότητα, γιατί σύμφωνα με την προαναφερθείσα ανισότητα θα έπρεπε να είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη (δηλαδή αφού η τάση της γραμμής είναι $20kV$, κι η κατάλληλη αντίσταση μόνωσης είναι $R \geq 1000\Omega/V$, η συνολική αντίσταση πρέπει να είναι $R \geq 2 \cdot 10^7\Omega$). Η ειδική αντίσταση ρ_2 του εν λόγω μείγματος αέρα καπναιθάλης είναι:

$$\rho_2 = \frac{R_2 \cdot A}{l} = 20\Omega \cdot m = 0,00002M\Omega \cdot m \quad (1.24)$$

Από την ανωτέρω τιμή R_2 (ή την ρ_2) συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει πλέον σωστή μόνωση, γιατί έχει δημιουργηθεί μία αγώγιμη διαδρομή μεταξύ των αγωγών με αποτέλεσμα την εκδήλωση σπινθηρισμών [61, 85, 96].

1.2.7 Η δημιουργία αλλοιώσεων επί των γυμνών αγωγών αλουμινίου μεταφοράς και διανομής

Ένας βασικός λόγος για την δημιουργία αλλοιώσεων στους αγωγούς αλουμινίου του δικτύου μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η θερμότητα, η οποία μπορεί να μεταδοθεί με τρεις τρόπους: την αγωγή, την ακτινοβολία και τη μεταφορά (ή συναγωγή). Και στις τρεις περιπτώσεις προϋπόθεση είναι η ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των συστημάτων που εξετάζονται [48, 54, 59, 71, 96].

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή μπορεί να γίνει σε στερεά, σε υγρά και σε αέρια. Στα υγρά και στα αέρια, η μετάδοση θερμότητας με αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και στη διάδοση των μορίων λόγω της τυχαίας κίνησής τους. Στα στερεά αποδίδεται στις ταλαντώσεις των μορίων μέσα στο πλέγμα τους και στην ενέργεια που μεταφέρεται από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια [48, 54, 59, 71, 85].

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία αφορά τη μεταφορά ενέργειας που εκπέμπεται από την ύλη με μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ή με φωτόνια λόγω των αλλαγών στις ηλεκτρονικές στοιβάδες των ατόμων ή μορίων. Σε αντίθεση με την αγωγή και συναγωγή, η ακτινοβολία δεν χρειάζεται την ύπαρξη κάποιου υλικού να μεσολαβήσει. Στην πραγματικότητα η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία είναι η ταχύτερη (μεταδίδεται με την ταχύτητα του φωτός) και συμβαίνει και στο κενό [48, 54, 59, 71, 85].

Η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά ή συναγωγή αφορά τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού και του αερίου ή υγρού που κινείται και συμπεριλαμβάνει συνδυασμό επιδράσεων αγωγής αλλά και κίνησης των ρευστών. Όσο πιο γρήγορα κινείται το ρευστό, τόσο μεγαλύτερη είναι η μετάδοση με συναγωγή. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κίνηση του ρευστού, τότε η μετάδοση γίνεται απλά με αγωγή [48, 54, 59, 71, 85].

Σε περίπτωση που η θερμότητα οφείλεται σε φωτιά τότε ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας είναι ένα μέγεθος που περιγράφει το μέγεθος της φωτιάς και τη δυναμική της να προκαλέσει καταστροφές. Για τον υπολογισμό του ρυθμού απελευθέρωσης θερμότητας (Heat Release Rate HRR), ισχύει η παρακάτω σχέση [35, 85]:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' \cdot A \cdot \Delta H_c \quad (kW) \quad (1.25)$$

όπου: \dot{m}'' η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου (για το ξύλο, $\dot{m}'' = 11 \text{ grm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), A η επιφάνεια σε m^2 (που συμμετέχει στην ατμοποίηση) και ΔH_c είναι η θερμότητα καύσης (για το ξύλο $\Delta H_c = 13 \div 15 \text{ kJ/gr}$).

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [4, 30, 31, 35, 63, 61, 70, 85, 96], υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού του ύψους (H) της φλόγας (Πίνακας 1.8), όπου γίνεται χρήση του συντελεστή \dot{Q}^* , ο οποίος δίνεται από την σχέση [35, 57, 85]:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g \cdot D} \cdot D^2} \quad (1.26)$$

όπου, ρ η πυκνότητα του αέρα ($1,2 \text{ kg/m}^3$), c_p η ειδική θερμότητα του αέρα ($1,0 \text{ kJkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) και T η θερμοκρασία του αέρα (293 K). Δηλαδή:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{1101 \cdot D^{\frac{5}{2}}} \quad (1.27)$$

όπου \dot{Q}^* : ένας συντελεστής, H : το ύψος της φλόγας (m), ρ : η πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα ($1,2 \text{ kg/m}^3$), g : η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9,81 \text{ m/s}^2$), D : η διάμετρος της φωτιάς, \dot{m}'' : ο ρυθμός απώλειας μάζας ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου ($\text{kgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), \dot{Q} : ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (kW).

Επίσης όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [22, 26, 42], η θερμότητα που λαμβάνει ένα σώμα σε απόσταση από μία θερμή πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Επομένως στην θερμότητα δια αγωγής κατά μήκος ενός αγωγού προστίθεται και η κατά περίπτωση θερμότητα δια ακτινοβολίας.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας αλλοίωσης των αγωγών αλουμινίου οφείλεται στην λεγόμενη "ηλεκτρική διάβρωση". Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [1, 8, 96] στους αγωγούς αλουμινίου εμφανίζονται συχνά αλλοιώσεις (διαβρώσεις) λόγω καθαλατώσεων, διότι σχηματίζονται χλωρίδια του αλουμινίου τα οποία εξατμίζονται. Αυτή η "ηλεκτρική διάβρωση" μεγαλώνει όσο αυξάνει η θερμοκρασία και η τιμή της τάσης, γιατί ευνοούνται οι κινήσεις των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων.

Έτσι για την ίδια θερμοκρασία περιβάλλοντος, η διάβρωση των εναέριων γραμμών υψηλών τάσεων (π.χ. 150 kV) είναι μεγαλύτερη από εκείνη στους αγωγούς μέσης τάσης (π.χ. 20 kV), ενώ οι αγωγοί στην περίπτωση της χαμηλής τάσης έχουν τη μικρότερη διάβρωση [96].

Πίνακας 1.8: Σχέσεις υπολογισμού ύψους φλόγας κατά τη βιβλιογραφία [4, 30, 31, 35, 63, 61, 70, 85, 96]

Σχέση κατά Zukoski	$\dot{Q}^* < 0,15$	$H = 40 \cdot \dot{Q}^{*2} \cdot D$
	$0,15 < \dot{Q}^* < 1$	$H = 3,3 \cdot \dot{Q}^{*\frac{2}{3}} \cdot D$
	$1 < \dot{Q}^* < 10$	$H = 3,3 \cdot \dot{Q}^{*\frac{2}{5}} \cdot D$
Σχέση κατά Cox and Chitty	$0,13 < \dot{Q}^* < 0,28$	$H = 15,1 \cdot \dot{Q}^{*2} \cdot D$
	$0,28 < \dot{Q}^* < 0,55$	$H = 3,2 \cdot \dot{Q}^* \cdot D$
Σχέση κατά Thomas	$0,75 < \dot{Q}^* < 8,8$	$H = 15,1 \cdot \dot{Q}^{*0,61} \cdot D$
		$H = 42 \cdot \left(\frac{\dot{m}''}{\rho \cdot \sqrt{g \cdot D}} \right)^{0,61} \cdot D$
Σχέση κατά Heskestad	$0,12 < \dot{Q}^* < 1,2 \cdot 10^4$	$H = 3,7 \cdot \dot{Q}^{*\frac{2}{5}} \cdot D - 1,02 \cdot D$
	Αντικαθιστώντας το \dot{Q}^* με το ίσο του	$H = 0,23\dot{Q}^{*\frac{2}{5}} - 1,02 \cdot D$
Σχέση κατά Steward	$1 < \dot{Q}^* < 10^4$	$H = 4,16\dot{Q}^{*\frac{2}{5}} \cdot D$

Την αύξηση της διάβρωσης όμως προκαλεί και η αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών, η οποία μπορεί να προκληθεί από επαναληπτικές προσπάθειες ηλεκτροδότησης. Αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση σφάλματος, όπως για παράδειγμα στη πτώση ενός κλαδιού δέντρου πάνω στους αγωγούς, όπου οι διακόπτες αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) επιχειρούν αυτόματα τρεις φορές την ηλεκτροδότηση της γραμμής. Η χρήση τέτοιων διακοπών έχει στόχο την αποφυγή της οριστικής διακοπής ρεύματος μιας περιοχής και της χρονοβόρας επέμβασης συνεργείου για την αποκατάσταση ενός παροδικού φαινομένου (αναλυτική περιγραφή του συστήματος ΔΑΕ ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο). Αυτή όμως η επαναλαμβανόμενη αυτόματη ηλεκτροδότηση, καθώς και οι εκούσιες ηλεκτροδοτήσεις για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος από το συνεργείο αποκατάστασης, οδηγούν σε πολλαπλάσια αύξηση της θερμοκρασίας σε σχέση με την δημιουργία ενός μοναδικού βραχυκυκλώματος, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της μηχανικής αντοχής των αγωγών, την χαλάρωση των κλώνων αλουμινίου λόγω διαστολής και εν τέλει την αύξηση της ηλεκτρικής διάβρωσης [96].

Τέλος σημαντικός παράγοντας αλλοίωσης των αγωγών αλουμινίου είναι και οι μηχανικές καταπονήσεις που υφίστανται κατά την εγκατάσταση, αλλά και λόγω της καταστροφής τους από σκάγια κυνηγετικών όπλων. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [96, 99] η ελάχιστη δύναμη για την αποκοπή ενός κλώνου αλουμινίου είναι περίπου 18 kg και η δύναμη πρόσκρουσης ενός κυνηγετικού σφαιριδίου (από φυσίγγι Νο 7 έως Νο 9) είναι περίπου 84 kg. Επομένως ο τραυματισμός του αγωγού είναι σε κάθε περίπτωση σίγουρος, ενώ πολύ συχνά προκαλείται ακόμα και αποκοπή σε αγωγούς αλουμινίου που δεν περιλαμβάνουν κλώνους χάλυβα.

1.2.8 Η Μηχανική συμπεριφορά εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής

Η μηχανική ικανότητα των γραμμών μεταφοράς και διανομής στην Ελλάδα, υπολογίζεται με την βοήθεια κατάλληλων πινάκων που έχει συντάξει η Δημόσια Εταιρεία Ηλεκτρισμού στα τεχνικά της εγχειρίδια. Στους εν λόγω πίνακες, έχει υπολογιστεί η επιφόρτιση των αγωγών, ανάλογα με την διατομή τους και για εγκάρσια πίεση αέρα η οποία ανέρχεται σε 20kg/m^2 και σε 60kg/m^2 .

Η πίεση που ασκείται από τον άνεμο μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση [66, 68, 96]:

$$w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \nu^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (1.28)$$

ή αντίστοιχα σε (kg/m^2):

$$w = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{g} \cdot \rho \cdot \nu^2 \quad (\text{kg/m}^2) \quad (1.29)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα ($\rho = 1,25\text{kg/m}^3$ [68]), ν η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s) ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην υπό εξέταση περιοχή και g η επιτάχυνση της βαρύτητας (περίπου $9,81\text{ m/s}^2$). Η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί από την ανεμομετρική κλίμακα Μποφόρ η οποία παρατίθεται στον πίνακα 1.9 [96].

Πίνακας 1.9: Ανεμομετρική κλίμακα Μποφόρ [96]

Μποφόρ	Ονομασία	Ταχύτητα (m/s)	Αποτέλεσμα
0	Νηνεμία	0 - 0,2	Άπνοια. Ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα
1	Υποπνέων	0,3 - 1,5	Ο καπνός υψώνεται σχεδόν κατακόρυφα
2	Ασθενής	1,6 - 3,3	Άνεμος αισθητός στο πρόσωπο
3	Λεπτός	3,4 - 5,4	Τα φύλλα και μερικά κλωνάρια κινούνται συνεχώς.
4	Μέτριος	5,5 - 7,9	Σηκώνει σκόνη και φύλλα χαρτιού. Κινούνται μικρά κλωνάρια.
5	Λαμπρός	8,0 - 10,7	Αρχίζουν να λυγίζουν μικρά δέντρα. Σχηματίζονται κυματάκια στη θάλασσα.
6	Ισχυρός	10,8 - 13,8	Κινεί μεγάλα κλαδιά. Η ομπρέλα χρησιμοποιείται δύσκολα.
7	Σφοδρός	13,9 - 17,1	Κινεί ολόκληρο το δέντρο. Το βάδισμα αντίθετα στον άνεμο γίνεται δύσκολα.
8	Ορμητικός (θυελλώδης)	17,2 - 20,7	Σπάζει κλαδιά δέντρων. Το βάδισμα γίνεται δύσκολο.
9	Θύελλα	20,8 - 24,4	Ελαφρές ζημιές σε σπίτια. Σηκώνει κεραμίδια από τις στέγες.
10	Ισχυρή θύελλα	24,5 - 28,4	Ξεριώνει δέντρα. Προκαλεί μεγάλες ζημιές στα σπίτια.
11	Σφοδρή θύελλα	28,5 - 32,6	Μεγάλες ζημιές σε μεγάλες εκτάσεις.
12	Τυφώνας	32,7 και άνω	Εξαιρετικά σοβαρές καταστροφές.

Πίνακας 1.10: Επιφόρτιση αγωγών χαλκού (για Χ.Τ. και Μ.Τ.) [96]

Διατομή αγωγού (mm ²)	Αριθμός κλώνων και διάμετρος του (mm)	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Φορτίο θραύσης (kg)	Βάρος αγωγού και πάγους (kg/m)	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 20 kg/m ² (kg/m)	Συνισταμένη (kg/m)	Ολική επιφόρτιση και σταθερά 0.3kg/m (kg/m)	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 60 kg/m ² (kg/m)
16	7/1,71	5,1	739	0,360	0,362	0,509	0,809	0,306
35	7/2,53	7,6	1565	0,577	0,412	0,709	1,009	0,456
50	19/1,83	9,2	2298	0,745	0,444	0,868	1,168	0,552
70	19/2,17	10,7	3162	0,954	0,474	1,066	1,366	0,642
95	19/2,52	12,4	4214	1,206	0,508	1,309	1,609	0,744

Πίνακας 1.11: Επιφόρτιση αγωγών αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (μόνο για Μ.Τ.) [96]

Διατομή αγωγού (mm ²)	Αριθμός κλώνων και διάμετρος του (mm)	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Φορτίο θραύσης (kg)	Βάρος αγωγού και πάγους (kg/m)	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 20 kg/m ² (kg/m)	Συνισταμένη (kg/m)	Ολική επιφόρτιση και σταθερά 0.3kg/m (kg/m)	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 60 kg/m ² (kg/m)
16	6/1/2,32	6,96	965	0,353	0,399	0,533	0,833	0,417
35	6/1/3,44	10,32	2005	0,538	0,466	0,712	1,012	0,619
50	6/1/4,11	12,33	2820	0,672	0,507	0,842	1,142	0,740
70	26/2,33 Al 7/1,81 St	10,7	3162	0,954	0,474	1,066	1,366	0,642
95	26/2,72 Al 7/2,12 St	17,24	5685	1,051	0,605	1,212	1,512	1,034

Πίνακας 1.12: Επιφόρτιση αγωγών αλουμινίου (μόνο για Χ.Τ.) [96]

Διατομή αγωγού (mm ²)	Αριθμός κλώνων και διάμετρος του (mm)	Εξωτερική διάμετρος (mm)	Φορτίο θραύσης (kg)	Βάρος αγωγού και πάγους (kg/m)	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 20 kg/m ² (kg/m)	Συνισταμένη (kg/m)	Ολική επιφόρτιση και σταθερά 0.3kg/m (kg/m)	Εγκάρσια επιφόρτιση ανέμου 60 kg/m ² (kg/m)
16	7/2,21	6,33	470	0,319	0,393	0,506	0,806	0,398
35	7/3,22	9,675	940	0,459	0,453	0,645	0,945	0,580
50	19/2,35	11,70	1442	0,568	0,494	0,753	1,053	0,702
70	19/2,78	14,00	2018	0,702	0,540	0,886	1,186	0,840

Για τον υπολογισμό του φορτίου που δρα σε έναν αγωγό, θεωρούμε ότι ασκείται πάνω του, το βάρος του αγωγού και η εγκάρσια επιφόρτιση του ανέμου. Ένας αγωγός όμως διαθέτει πολύ μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος του και γι' αυτό το λόγο δεν είναι σε θέση να πάρει καμπτικές φορτίσεις. Η διατομή του αγωγού μπορεί να πάρει μόνο εφελκυστικές δυνάμεις ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού [10]. Έτσι θα πρέπει η συνολική εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού $Z_{T,d}$ που επιδρά στον αγωγό να είναι μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής σχεδιασμού του $Z_{R,d}$, η οποία αναγράφεται στους τεχνικούς πίνακες της ΔΕΗ ως φορτίο θραύσης (Πίνακες 1.10, 1.11 και 1.12), δηλαδή:

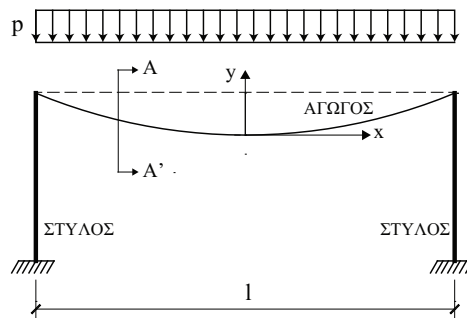
$$\frac{Z_{T,d}}{Z_{R,d}} \leq 1 \quad (1.30)$$

Από τις χαρακτηριστικές τιμές φόρτισης του βάρους p_k που δρα κατακόρυφα σε έναν αγωγό και του ανέμου w_k που δρα οριζόντια σε αυτόν, μπορεί να υπολογιστεί η συνισταμένη φόρτιση q_k όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο.

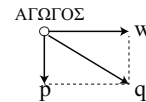
$$q_k = \sqrt{p_k^2 + w_k^2} \quad (1.31)$$

Έτσι μπορεί να υπολογιστεί και η συνολική εφελκυστική δύναμη $Z_{T,k}$ που δρα στη διεύθυνση του άξονα του αγωγού όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 1.5.

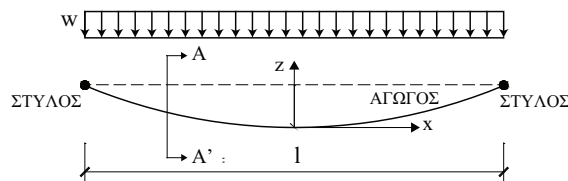
ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ xy: ΒΑΡΟΣ ΑΓΩΓΟΥ



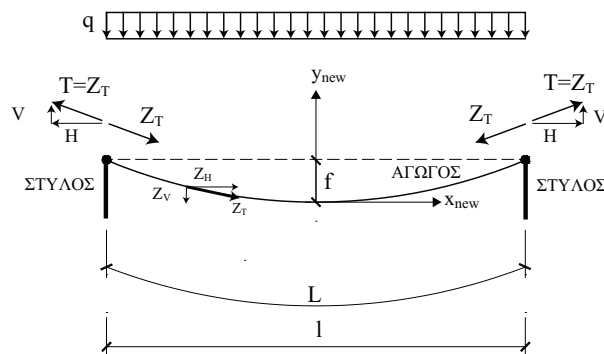
ΤΟΜΗ Α-Α' ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ yz



ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ xz: ΑΝΕΜΟΣ



ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ q: (ΒΑΡΟΣ & ΑΝΕΜΟΣ)



Σχήμα 1.5: Φόρτιση αγωγού λόγω βάρους και ανέμου

Από το σχήμα 1.5 φαίνεται ότι η παραμόρφωση του συστήματος μπορεί να περιγραφεί προσεγγιστικά με μια συνάρτηση παραβολής σύμφωνα με τη σχέση [46, 47]:

$$y_{new} = 4 \cdot \left(\frac{f}{l^2}\right) \cdot x_{new}^2 \quad (1.32)$$

όπου f είναι το βέλος κάμψης του αγωγού και l η απόσταση μεταξύ των στύλων.

Το μήκος του αγωγού L σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης f και την απόσταση μεταξύ των στύλων l δίνεται από τη σχέση [46, 47]:

$$L = l \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f}{l}\right)^2 \right] \quad (1.33)$$

και λύνοντας ως προς f :

$$f = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot l \cdot (L - l)} \quad (1.34)$$

Το βέλος κάμψης υπολογίζεται επίσης από τη σχέση [46, 47]:

$$f = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot H} \quad (1.35)$$

Από τις σχέσεις 1.33 και 1.35 προκύπτει:

$$L = l \cdot \left[1 + \frac{q^2 \cdot l^2}{24 \cdot H^2} \right] \quad (1.36)$$

Για την φόρτιση του αγωγού από το βάρος και τον άνεμο, η μέγιστη χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής δύναμης, δρα στο σημείο της στήριξης ($x = \frac{l}{2}$) και η ελάχιστη στη μέση του αγωγού ($x = 0$), σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις [46, 72]:

$$\max : Z_{T,k} \left(x = \frac{l}{2} \right) = q \cdot \frac{l}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{l}{f}\right)^2} \quad (1.37)$$

$$\min : Z_{T,k} (x = 0) = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f} = Z_{H,k} \quad (1.38)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο σύστημα που εξετάζεται με την προσέγγιση της παραβολής του σχήματος 1.5, στο σημείο $x = 0$ η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης, η οποία δίνει την κλίση, είναι ίση με το μηδέν. Επομένως η κατακόρυφη συνιστώσα Z_V μηδενίζεται και η εφελκυστική δύναμη Z_T στο σημείο αυτό είναι ίση με την οριζόντια συνιστώσα της Z_H και έχει την ίδια τιμή με την οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης H . Η εν λόγω οριζόντια συνιστώσα Z_H παραμένει μάλιστα σταθερή σε όλο το μήκος του αγωγού [46, 47].

Η εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού $Z_{T,d}$ προκύπτει από την αύξηση της χαρακτηριστικής τιμής $Z_{T,k}$ με ένα συντελεστή ασφάλειας 1,3 [96]:

$$Z_{T,d} = 1,3 \cdot Z_{T,k} \quad (1.39)$$

Μια ακόμα σημαντική μηχανική συμπεριφορά των αγωγών μεταφοράς και διανομής τύπου ACSR, δηλαδή αγωγών αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (βλ. Πίνακα 1.11), είναι και η επιμήκυνση που προκαλείται σε έναν αγωγό λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας που επικρατεί σε μια περιοχή ανάλογα με τις χρονικές περιόδους, τις καιρικές συνθήκες ή και σε περίπτωση πυρκαγιάς. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [6, 46, 66, 76, 91, 96] για την θερμική επιμήκυνση ε_t των στερεών ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L_t}{L} = \alpha_t \cdot \Delta T \quad (1.40)$$

ή αλλιώς:

$$\Delta L_t = \alpha_t \cdot \Delta T \cdot L \quad (1.41)$$

Όπου α_t ο γραμμικός συντελεστής διαστολής, L το αρχικό μήκος ενός αγωγού, ΔT η διαφορά θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στον αγωγό λόγω των εξωτερικών συνθηκών και ΔL_t η επιμήκυνση του αγωγού λόγω της εν λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

Ο γραμμικός συντελεστής διαστολής αυξάνει ελάχιστα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα ο χάλυβας *St-37* σε θερμοκρασία $20^\circ C$ έχει συντελεστή $\alpha_t = 0,0000111/grad$, σε $100^\circ C$ ο α_t παραμένει ίδιος, σε $300^\circ C$ $\alpha_t = 0,00001291/grad$ και σε $500^\circ C$ $\alpha_t = 0,00001391/grad$. Οι γραμμικοί συντελεστές διαστολής για διάφορους τύπους αγωγών σε θερμοκρασία $20^\circ C$ είναι οι κάτωθι [96, 101]:

- Για αγωγό τύπου ACSR $\alpha_t = 0,0000124$ 1/grad
- Για αγωγούς από Χαλκό $\alpha_t = 0,0000165$ 1/grad
- Για αγωγούς από Αλουμίνιο $\alpha_t = 0,000023$ 1/grad

Σύμφωνα με τον Νόμο του Hook [46], στους αγωγούς του δικτύου διανομής δημιουργείται μια παραμόρφωση ε_σ η οποία εξαρτάται από την υπάρχουσα αξονική τάση (σ) και το μέτρο ελαστικότητας (E) του υλικού σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_\sigma \quad (1.42)$$

ή αλλιώς:

$$\sigma_2 - \sigma_1 = E \cdot \varepsilon_\sigma \quad (1.43)$$

όπου σ_1 η αρχική τάση, σ_2 η τελική τάση και ε_σ το πηλίκο της επιμήκυνσης προς το αρχικό μήκος, δηλαδή:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{\Delta L_\sigma}{L} \quad (1.44)$$

λύνοντας ως προς ΔL_σ :

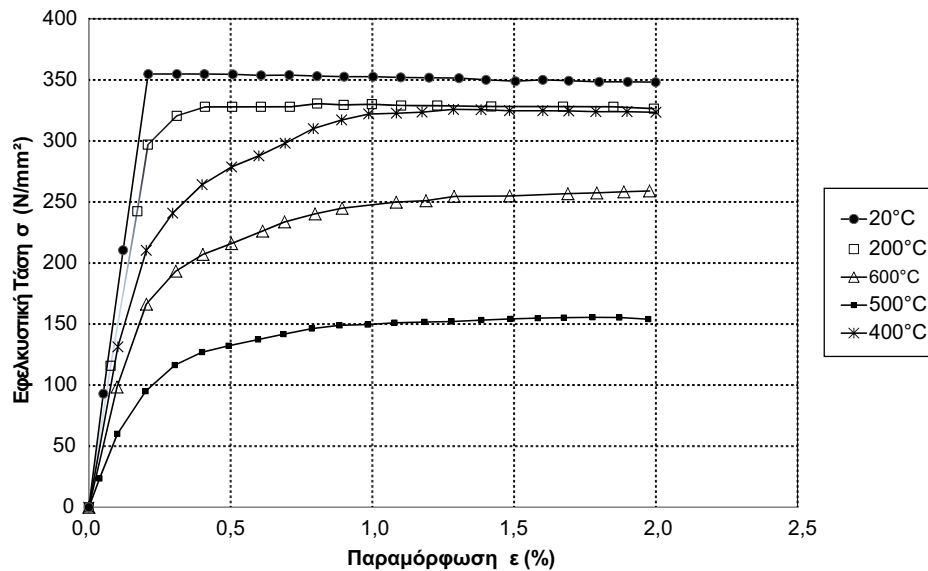
$$\Delta L_\sigma = \frac{\sigma \cdot L}{E} = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot L}{E} \quad (1.45)$$

Ο Νόμος του Hook περιγράφει την γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής $\sigma = f(\varepsilon)$, δηλαδή την ελαστική συμπεριφορά του υλικού, μέχρι το σημείο διαρροής όπου ξεκινάει η πλαστικοποίηση [93, 96]. Έτσι η επιμήκυνση του αγωγού σε συνάρτηση της αξονικής τάσης και της θερμοκρασίας δίνεται από την παρακάτω σχέση [46]:

$$\Delta L \approx \Delta L_\sigma + \Delta L_T \quad (1.46)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι από πειραματικές μελέτες για τον χάλυβα, προκύπτει ότι σε θερμοκρασία $500^\circ C$ το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται περίπου στο $1/3$ [5, 91, 96]. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα (σ - ε) για χάλυβα του σχήματος 1.6 [53], όπου για παράδειγμα στις ελαστικές περιοχές με $\varepsilon=0,15\%$ η αντίστοιχη Τάση σ στους $20^\circ C$ είναι $240 N/mm^2$ και γίνεται $90 N/mm^2$ στους $500^\circ C$ και $70 N/mm^2$ στους $600^\circ C$.

Η εταιρεία ηλεκτρισμού στην Ελλάδα για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης των αγωγών διανομής χρησιμοποιεί ειδικούς πίνακες, όπου αναγράφονται όλα τα βέλη κάμψης ανάλογα με την διατομή και το είδος του αγωγού. Το βέλος κάμψης δεν αποτελεί



Σχήμα 1.6: Επιρροή της θερμοκρασίας στο διάγραμμα (σ-ε) του χάλυβα [53]

χαλάρωση της γραμμής αλλά ένα μέγεθος που μεταβάλλεται με την θερμοκρασία δημιουργώντας συστολές και διαστολές χωρίς μείωση της μηχανικής και διηλεκτρικής αντοχής [96].

Ο εν λόγω υπολογισμός όμως σύμφωνα με τους ειδικούς πίνακες της ΔΕΗ, δεν περιλαμβάνει τις επιπλέον παραμορφώσεις που προκύπτουν στους αγωγούς σε περίπτωση πυρκαγιάς, σύμφωνα με την παραπάνω θεωρία που αναπτύχθηκε. Γι' αυτό το λόγο είναι πιθανό να προκύπτουν στο δίκτυο καταστάσεις που δεν έχουν προβλεφθεί όπως μείωση των αποστάσεων μόνωσης από κτίρια, δέντρα, σιδηροδρομικές γραμμές, εγκαταστάσεις κτλ. και να προκληθούν ατυχήματα.

Στην βιβλιογραφία δίνονται διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις που περιγράφουν την αλλαγή της κατάστασης του συστήματος των αγωγών μεταφοράς και διανομής, όταν προκύπτουν μεταβολές στις φορτίσεις ή και την θερμοκρασία. Μια πολύ διαδεδομένη σχέση είναι η παρακάτω και προκύπτει από τον συνδυασμό των εξισώσεων 1.36 και 1.46 [5, 46]:

$$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^3 + \left[\frac{E \cdot \gamma_1^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_1^3} + \frac{E}{\sigma_1} \cdot \alpha_t \cdot (t_2 - t_1) - 1\right] \cdot \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2 - \frac{E \cdot \gamma_2^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_1^3} = 0 \quad (1.47)$$

ή αλλιώς:

$$\sigma_2^3 + \sigma_2^2 \cdot \left[\frac{E \cdot \gamma_1^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_1^3} + E \cdot \alpha_t \cdot (t_2 - t_1) - \sigma_1\right] = \frac{E \cdot \gamma_2^2 \cdot l^2}{24} \quad (1.48)$$

όπου: $\gamma_1 = \frac{q_1}{A}$, $\gamma_2 = \frac{q_2}{A}$, q_1 η αρχική επιφόρτιση, q_2 η νέα επιφόρτιση, A η διατομή του αγωγού, $\sigma_1 = \frac{Z_{H,1}}{A}$ και $\sigma_2 = \frac{Z_{H,2}}{A}$ οι εφελκυστικές τάσεις στον αγωγό στο σημείο $x = 0$, $Z_{H,1,2}$ οι δυνάμεις στον αγωγό στο σημείο $x = 0$, E το μέτρο ελαστικότητας και α_t ο γραμμικός συντελεστής διαστολής.

Το βέλος κάμψης f του σχήματος 1.5, στην αρχική και στην νέα κατάσταση δίνεται αντίστοιχα από τους παρακάτω τύπους [5, 46, 47]:

$$f_1 = \frac{l^2 \cdot \gamma_1}{8 \cdot \sigma_1} = \frac{l^2 \cdot q_1}{8 \cdot H_{q,1}} \quad (1.49)$$

και

$$f_2 = \frac{l^2 \cdot \gamma_2}{8 \cdot \sigma_2} = \frac{l^2 \cdot q_2}{8 \cdot H_{q,2}} \quad (1.50)$$

Έτσι από την παραπάνω σχέση, μπορεί κανείς να υπολογίσει το βέλος κάμψης f_2 και στην συνέχεια με την βοήθεια της σχέσης 1.33 να υπολογίσει το νέο μήκος του αγωγού L_2 , με την παραδοχή όμως ότι το μέτρο ελαστικότητας E του αγωγού παραμένει σταθερό. Σε περιπτώσεις που η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι μικρή (ΔT μέχρι 40°), τότε η σχέση 1.48, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αφού το μέτρο ελαστικότητας δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Σε περίπτωση πυρκαγιάς όμως, όπου αλλάζει σημαντικά το μέτρο ελαστικότητας E , θα πρέπει η σχέση 1.46 να τροποποιηθεί ως εξής:

$$\Delta L = \left[\frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1} + \alpha_t \cdot (t_2 - t_1) \right] \cdot L \quad (1.51)$$

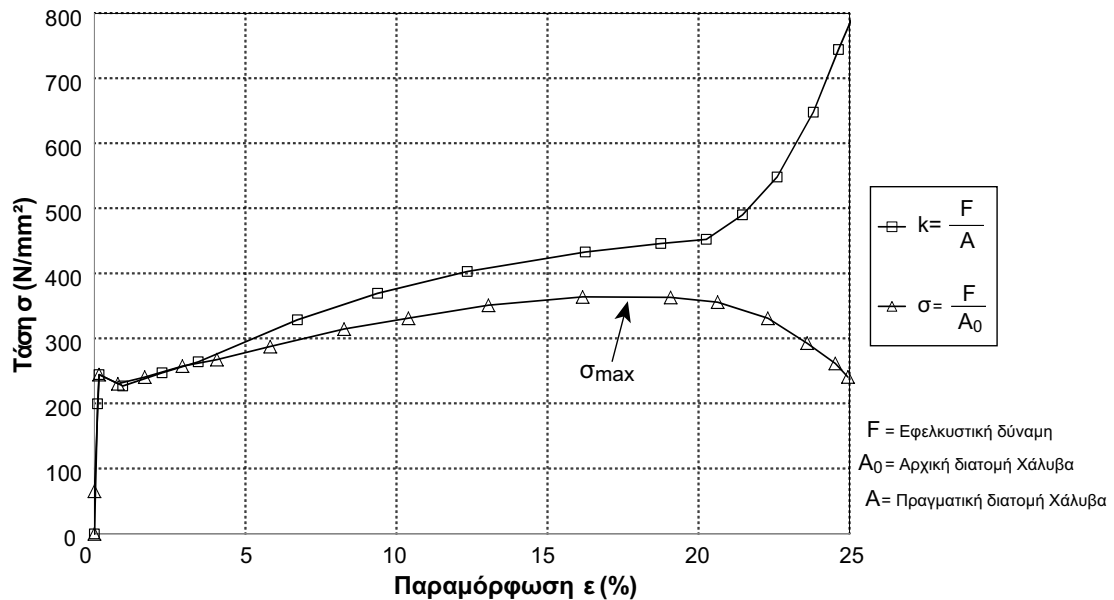
Έτσι αλλάζει αντίστοιχα και η σχέση 1.48:

$$\frac{\sigma_2^3}{E_2} + \sigma_2^2 \cdot \left[\frac{\gamma_1^2 \cdot l^2}{24 \cdot \sigma_1^2} + \alpha_t \cdot (t_2 - t_1) - \frac{\sigma_1}{E_1} \right] = \frac{\gamma_2^2 \cdot l^2}{24} \quad (1.52)$$

Από το αριθμητικό παράδειγμα που ακολουθεί στη παράγραφο 2.4, φαίνεται ότι το βέλος κάμψης σε έναν αγωγό, εξαρτάται κυρίως από την μεγάλη διαφορά θερμοκρασίας ($\Delta T \approx 600^\circ C$) που αναπτύσσεται (π.χ. σε περίπτωση πυρκαγιάς) και σε πολύ μικρότερο βαθμό από την αλλαγή της επιφόρτισης και την μείωση του μέτρου ελαστικότητας στο $1/3$.

Στην περίπτωση πυρκαγιάς, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι ο αγωγός βρίσκεται στην

ελαστική περιοχή που περιγράφει ο Νόμος του Hook, ούτε ότι η διατομή παραμένει σταθερή. Για παράδειγμα, η παραμόρφωση ενός αγωγού από χάλυβα S235 παραμένει ελαστική περίπου μέχρι την τιμή $\epsilon=0,1\%$ [73] (σχήμα 1.7), ενώ σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες ($600^{\circ}C$) η παραμόρφωση ϵ ανέρχεται σε αρκετά μεγαλύτερες τιμές. Επομένως οι σχέσεις 1.48 και 1.50 δεν θα μπορούσαν να παρέχουν ακρίβεια σε υψηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα (σ - ϵ) του χάλυβα S235 [73]

Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη ότι στην περίπτωση πυρκαγιάς η θερμοκρασία κοντά στους αγωγούς τύπου ACSR μπορεί να φτάσει τους $660^{\circ}C$, οπότε και θα λιώσουν οι εξωτερικοί κλώνοι αλουμινίου. Σε αυτή την περίπτωση, παρόλο που η χαλύβδινη ψυχή δεν θα λιώσει (θερμοκρασία τήξης χάλυβα: $1536^{\circ}C$), ο αγωγός θα αποκοπεί αφού θα λάβει ξαφνικά όλη την εφελκυστική δύναμη.

Στην περίπτωση που ένας αγωγός αποτελείται από διαφορετικά υλικά, όπως για παράδειγμα ο αγωγός ACSR (κλώνοι αλουμινίου με ψυχή από χάλυβα), μπορούμε να υπολογιστεί ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{av} και μια μέση διατομή A_{av} , τα οποία εξαρτώνται από τις διατομές των δύο υλικών και το ποσοστό της εφελκυστικής δύναμης που αντιστοιχεί στο κάθε υλικό. Έτσι αν Z η συνολική εφελκυστική δύναμη που επιδρά σε έναν αγωγό, A_1 η διατομή της χαλύβδινης ψυχής, A_2 η συνολική διατομή των κλώνων αλουμινίου, L το μήκος του αγωγού και ΔL η επιμήκυνση από την εν λόγω εφελκυστική δύναμη, τότε ισχύει [17]:

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (1.53)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{Z_1}{A_1 \cdot E_1} = \frac{Z_2}{A_2 \cdot E_2} \quad (1.54)$$

$$Z_2 = \frac{Z \cdot A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1 + A_2 \cdot E_2} \quad (1.55)$$

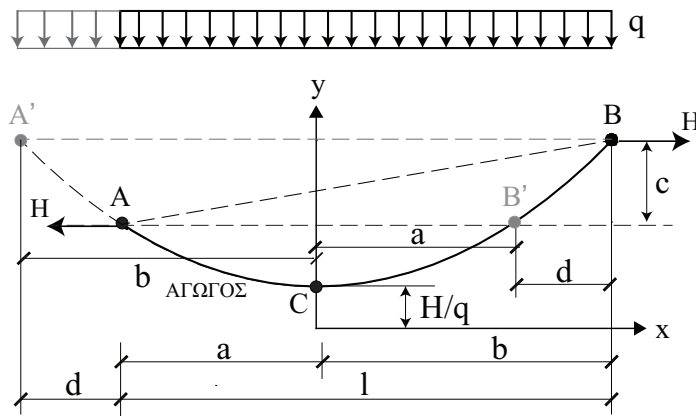
$$Z_1 = Z \cdot \left(1 - \frac{A_2 \cdot E_2}{A_1 \cdot E_1 + A_2 \cdot E_2}\right) \quad (1.56)$$

$$\frac{Z_1}{A_1} + \frac{Z_2}{A_2} = \varepsilon \cdot E_{av} \quad (1.57)$$

$$\frac{Z_1}{A_1} + \frac{Z_2}{A_2} = \frac{Z}{A_{av}} \quad (1.58)$$

Σε περίπτωση που η διαφορά ύψους των δύο άκρων του αγωγού είναι αρκετά μεγάλη, τότε το σύστημα μπορεί να περιγραφεί προσεγγιστικά με την βοήθεια μιας συνάρτησης υπερβολής και ένα σύστημα συντεταγμένων σε σχέση με το κατώτερο σημείο C του αγωγού, (Σχήμα 1.8) [46]:

$$y = \frac{H}{q} \cosh \frac{x}{H/q} \quad (1.59)$$



Σχήμα 1.8: Περιγραφή συστήματος αγωγού με την βοήθεια συνάρτησης υπερβολής [46], όπου a, b, c, d, l οι αποστάσεις όπως αυτές αποτυπώνονται, H η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης και q η επιφόρτιση

Τα άκρα του αγωγού A και B βρίσκονται, σε σχέση με το σημείο C , σε απόσταση a και b αντίστοιχα. Η διαφορά ύψους των άκρων A και B είναι c , ενώ η διαφορά $b - a$ για λόγους συντομίας αντικαθίσταται με d . Έτσι ισχύει:

$$c = \frac{H}{q} \left(\cosh \frac{b}{H/q} - \cosh \frac{a}{H/q} \right) \quad (1.60)$$

Επίσης:

$$l = 2a + d \rightarrow a = (l - d)/2; \quad l = 2b - d \rightarrow b = (l + d)/2 \quad (1.61)$$

Αντικαθιστώντας a και b στη σχέση 1.60, προκύπτει:

$$c = \frac{2H}{q} \cdot \sinh \frac{l}{2 \cdot H/q} \rightarrow \sinh \frac{d}{2H/q} = \frac{c}{\frac{2H}{q} \sinh \frac{l}{2H/q}} \quad (1.62)$$

Από την παραπάνω σχέση υπολογίζεται το d και επομένως όλες οι άλλες αποστάσεις, δηλαδή a και b . Έτσι η σχέση 1.62 γράφεται:

$$\frac{d}{2H/q} = \operatorname{arcsinh} \frac{c}{\frac{2H}{q} \sinh \frac{l}{2H/q}} \rightarrow d = \frac{2H}{q} \operatorname{arcsinh} \frac{c}{\frac{2H}{q} \sinh \frac{l}{2H/q}} \quad (1.63)$$

Γνωρίζοντας τα a και b μπορεί επίσης να υπολογιστεί το μήκος του αγωγού:

$$L = L_{AC} + L_{CB}$$

$$L = \frac{H}{q} \left(\sinh \frac{a}{H/q} + \sinh \frac{b}{H/q} \right) = \sqrt{c^2 + \left(2 \frac{H}{q} \sinh \frac{l}{2H/q} \right)^2} \quad (1.64)$$

Για την εφελκυστική δύναμη του αγωγού ισχύει:

$$Z = q \cdot y \quad (1.65)$$

Το σύστημα συντεταγμένων για τον υπολογισμό μπορεί να τοποθετηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 1.9 με την αρχή του στο αριστερό σημείο κρέμασης. Δηλαδή το σύστημα συντεταγμένων του σχήματος 1.8 μετακινείται αριστερά κατά a και προς τα πάνω κατά:

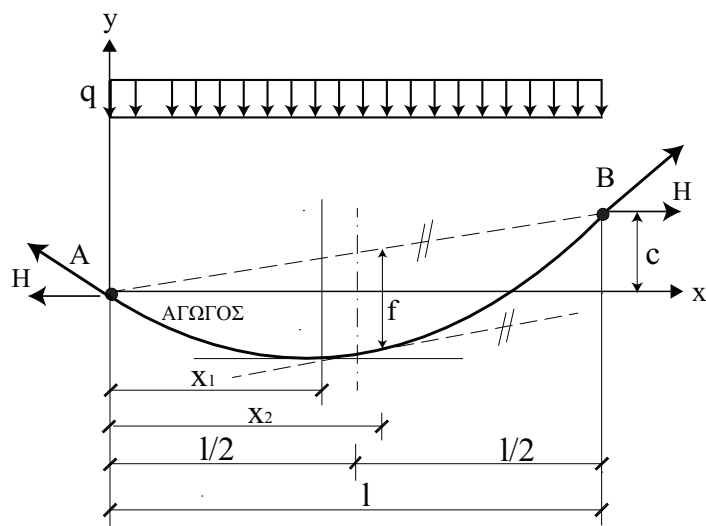
$$\frac{H}{q} \cosh \frac{a}{H/q}$$

Έτσι το σύστημα που εξετάζουμε με την προσέγγιση της συνάρτησης υπερβολής μπορεί να περιγραφεί με την παρακάτω σχέση:

$$y = \frac{H}{q} \left(\cosh \frac{x-a}{H/q} - \cosh \frac{a}{H/q} \right) \quad (1.66)$$

Το a υπολογίζεται ως εξής:

$$a = \frac{l}{2} - \frac{H}{q} \left(\operatorname{arc} \sinh \frac{c}{\frac{2H}{q} \sinh \frac{l}{2H/q}} \right) = \frac{1}{2} \cdot (l - d) \quad (1.67)$$



Σχήμα 1.9: Περιγραφή συστήματος αγωγού με την βοήθεια συνάρτησης υπερβολής με νέο σύστημα συντεταγμένων [46] όπου: x_1 , x_2 , l , $l/2$, c οι αποστάσεις όπως αυτές αποτυπώνονται, f το βέλος κάμψης, H η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης και q η επιφόρτιση.

Το μήκος του αγωγού υπολογίζεται με την προαναφερόμενη σχέση 1.64, ενώ η εφελκυστική δύναμη του αγωγού υπολογίζεται πλέον ως εξής [46]:

$$Z = H \cosh \frac{x-a}{H/q} = q \cdot y + H \cosh \frac{a}{H/q} \quad (1.68)$$

Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη Z δρα στο σημείο B . Οι κατακόρυφες συνιστώσες αντίδρασης V_A και V_B υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$V_A = H \sinh \frac{a}{H/q} \quad V_B = H \sinh \frac{l-a}{H/q} \quad (1.69)$$

Το κατώτερο σημείο του αγωγού βρίσκεται στο σημείο $x = a$ αφού:

$$y' = \sinh \frac{x_1 - a}{H/q} = 0 \rightarrow a = x_1$$

Το μέγιστο βέλος κάμψης f ορίζεται σε σχέση με την χορδή AB και βρίσκεται σε απόσταση x_2 από τον άξονα y [46]. Δηλαδή:

$$y' = \sinh \frac{x_2 - a}{H/q} = \frac{c}{l} \rightarrow x_2 = \frac{H}{q} \operatorname{arcsinh} \frac{c}{l} + a \quad (1.70)$$

Γνωρίζοντας το x_2 υπολογίζεται το μέγιστο βέλος κάμψης f ως εξής:

$$f = \frac{c}{l} \cdot x_2 - \frac{H}{q} \left(\cosh \frac{x_2 - a}{H/q} - \cosh \frac{a}{H/q} \right) \quad (1.71)$$

Ο γενικός τύπος υπολογισμού του βέλους κάμψης σε σχέση με την απόσταση x είναι ο κάτωθι:

$$f = \frac{c}{l} \cdot x - y = \frac{c}{l} \cdot x - \frac{H}{q} \left(\cosh \frac{x - a}{H/q} - \cosh \frac{a}{H/q} \right) \quad (1.72)$$

1.3 Μέθοδοι ανάλυσης εργατικών ατυχημάτων

Η ανάλυση των εργατικών ατυχημάτων είναι μια από τις σημαντικότερες διαδικασίες στην επιστήμη της ασφάλειας και έχει ως απώτερο σκοπό την κατά το δυνατόν μείωση των ατυχημάτων στο μέλλον. Για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης έρευνας, ο Τεχνικός Ασφαλείας έχει στη διάθεσή του διάφορες μεθόδους ανάλυσης, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί από εξειδικευμένους αναλυτές ασφάλειας, από εταιρείες για την εφαρμογή αυτών στις γραμμές παραγωγής τους, από Δημόσιες Υπηρεσίες Ασφάλειας και από επιστήμονες που εργάζονται σε αυτόν το τομέα [12, 28, 88].

Ακολούθως γίνεται μια προσπάθεια να παρουσιαστούν οι κυριότερες μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται ευρέως από επιστήμονες σε όλο τον κόσμο. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την ανάλυση ενός ατυχήματος εξαρτάται από το είδος του ατυχήματος, από τον προσανατολισμό της διερεύνησης και την προσωπική κρίση του αναλυτή. Η ταξινόμηση των μεθόδων ανάλυσης μπορεί να γίνει βάσει διαφόρων χαρακτηριστικών τους όπως:

- της χρονικής στιγμής που εξελίσσονται τα γεγονότα
- λήψη αποφάσεων της διοίκησης ως παράμετρος του ατυχήματος
- εφαρμογή ποιοτικής ανάλυσης
- εφαρμογή ποσοτικής ανάλυσης
- κλπ.

Στην επιστημονική κοινότητα η κυριότερη μέθοδος που εφαρμόζεται στο μεγαλύτερο ποσοστό είναι η ποσοτική ανάλυση [79], όπου αριθμητικά δεδομένα συγκεντρώνονται με τη βοήθεια ερωτηματολογίων, συνεντεύξεων ή συστηματικής παρακολούθησης των υπό εξέταση φαινομένων και στην συνέχεια από το δείγμα που έχει εξεταστεί εξάγεται ένα γενικευμένο συμπέρασμα για το γενικό σύνολο. Έτσι τόσο στην διαδικασία πρόληψης εργατικών ατυχημάτων όσο και στην ανάλυση ενός ατυχήματος δίνεται έμφαση στις πιθανότητες που υπάρχουν για την εμφάνιση μιας επικίνδυνης κατάστασης ή αντίστοιχα μιας συμπεριφοράς που θα μπορούσε να έχει οδηγήσει στο ατύχημα. Η εν λόγω μέθοδος έχει δεχτεί έντονη κριτική [39], καθώς μια ποσοτική μέθοδος δεν λαμβάνει υπόψη χαρακτηριστικές διαφορές μεταξύ των ανθρώπων από τους οποίους συλλέγονται οι πληροφορίες (μόρφωση, αντίληψη, κοινωνική θέση, οικονομική κατάσταση, φυλετικές διαφορές, θρησκεία κλπ.) αλλά και τον τρόπο τον οποίο εκείνοι αντιλαμβάνονται τον κόσμο και αντιδρούν σε διάφορες καταστάσεις. Επίσης ο κύριος σκοπός μιας ανάλυσης είναι η εξάλειψη των κινδύνων που εγχυμονούν στο σύστημα που εξετάζεται, ασχέτως της πιθανότητας εμφάνισής τους ιδιαίτερα αν οι υφιστάμενοι κίνδυνοι μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια ζωής.

Η ποιοτική ανάλυση ενός συστήματος από την άλλη μεριά, είναι μια μη μαθηματικοποιημένη επισκόπηση όλων των παραγόντων που θα μπορούσαν να έχουν επιδράσει στο τελικό αποτέλεσμα. Έτσι στην ποιοτική ανάλυση ενός ατυχήματος μελετώνται όλες οι πιθανές συνθήκες, όλα τα πιθανά σενάρια και όλες οι πιθανές συμπεριφορές που θα μπορούσαν να έχουν οδηγήσει στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Κριτική βέβαια έχει δεχθεί και αυτή η μέθοδος κυρίως επειδή από μια τέτοια ανάλυση δεν μπορούν να βγουν γενικευμένα συμπεράσματα για παρόμοια περιστατικά, αλλά και λόγω της υποκειμενικότητας που υπάρχει κάθε φορά στην ανάλυση [39].

Είναι λοιπόν επόμενο ότι δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη μέθοδος η οποία θα πρέπει να εφαρμόζεται σε κάθε ατύχημα, καθώς όλες οι μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε κάθε περίπτωση πάντως πρέπει να καταστεί σαφές, ότι μια μέθοδος ανάλυσης αποτελεί ένα εργαλείο στα χέρια ενός Τεχνικού Ασφαλείας και δεν μπορεί να υποκαταστήσει την αναλυτική σκέψη και την εμπειρία ενός Μηχανικού. Οι κυριότερες μέθοδοι ανάλυσης όπως αυτές απαντώνται στην βιβλιογραφία είναι οι παρακάτω [37, 39, 88]:

- Χαρτογράφηση γεγονότων και αιτιωδών παραγόντων ("Events and causal factors charting and analysis")

- Ανάλυση μέσων αποφυγής ατυχημάτων ("Barrier Analysis")
- Ανάλυση ενέργειας ("Energy analysis")
- Ανάλυση των αλλαγών ("Change analysis")
- Διαβάθμιση διοικητικής αβλεψίας και επικινδυνότητας, (που στη πράξη αποκαλείται δέντρο διοικητικής αβλεψίας - "Management oversight and risk tree - MORT")
- Ανάλυση συμπτωματικών παραγόντων ("Incidental factor analysis")

1.3.1 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω χαρτογράφησης των γεγονότων και των αιτιωδών παραγόντων

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια γραφική αναπαράσταση του ατυχήματος όπου λαμβάνει υπόψη την χρονική σειρά με την οποία εμφανίστηκαν τα γεγονότα που οδήγησαν στο ατύχημα. Η αναπαράσταση περιλαμβάνει τα γεγονότα πρωτεύουσας σημασίας, τα γεγονότα δευτερεύουσας σημασίας καθώς και τις καταστάσεις οι οποίες επηρέασαν τα γεγονότα. Τα πρωτεύοντα γεγονότα απεικονίζονται χρονικά στο διάγραμμα σε οριζόντια γραμμή από αριστερά προς τα δεξιά. Τα δευτερεύοντα γεγονότα προστίθενται στο διάγραμμα με γραμμικούς συνδέσμους πάνω από την σειρά των πρωτευόντων γεγονότων, ενώ οι καταστάσεις είναι "παθητικές" λεκτικές εκφράσεις που περιγράφουν τις συνθήκες που επικρατούσαν την συγκεκριμένη χρονική στιγμή [88]. Έτσι με την χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μπορεί να περιγραφεί ένα ατύχημα με την βοήθεια ανεξάρτητων γεγονότων και με όλες τις σημαντικές πληροφορίες που έχουν συγκεντρωθεί.

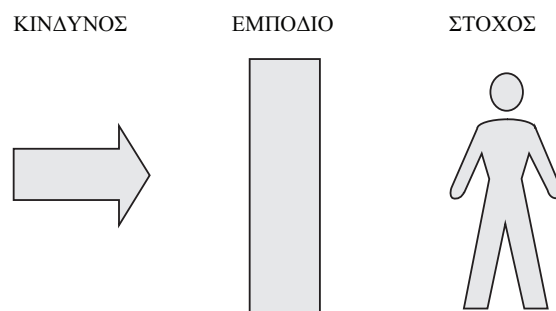
Για την δημιουργία ενός τέτοιου διαγράμματος ροής απαιτείται φυσικά εμπειρία στο συγκεκριμένο αντικείμενο και αναλυτική σκέψη. Για την διευκόλυνση όμως του εμπειρογνώμονα υπάρχουν καθορισμένα κριτήρια όσον αφορά στην περιγραφή των ανεξάρτητων γεγονότων τα οποία κυρίως είναι [39, 88]:

1. Κάθε γεγονός είναι ένα πραγματικό συμβάν (δεν είναι υποθετική κατάσταση)
2. Κάθε γεγονός είναι ένα και μοναδικό συμβάν
3. Κάθε γεγονός πρέπει να προκύπτει από το προηγούμενο (ακολουθία γεγονότων)

Συνοπτικά θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος βοηθάει στην οπτική απεικόνιση μιας χρονικής ακολουθίας γεγονότων και αποτελεί ένα βοηθητικό εργαλείο για την ερμηνεία και σύνοψη του ατυχήματος.

1.3.2 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω εξέτασης των προβλεπόμενων μέσων και μέτρων ασφάλειας

Η εν λόγω μέθοδος ανάλυσης ατυχημάτων είναι γνωστή ως "Barrier Analysis" (Σχήμα 1.10). Με τον όρο "εμπόδιο" νοούνται όλα τα μέτρα που έχουν ληφθεί προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε καταστροφή ή επικίνδυνη κατάσταση για την ζωή, την ασφάλεια ή την περιουσία. Έτσι με την χρήση αυτής της τεχνικής καθορίζονται οι "μπάρες", δηλαδή οι αμυντικοί μηχανισμοί, που θα πρέπει να υπάρχουν για την αποφυγή ενός ατυχήματος ή την βελτίωση της ασφάλειας ενός συστήματος [37].



Σχήμα 1.10: Μπάρα για την προστασία του προσωπικού από πιθανούς κινδύνους [37]

Στην περίπτωση που γίνεται η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου για την ανάλυση ενός ατυχήματος πρέπει να καθορίζονται τα εξής [37]:

- Ποιά μέσα είχαν εγκατασταθεί και πώς αυτά λειτούργησαν
- Ποιά μέσα υπήρχαν αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν
- Ποιά μέσα χρειάστηκαν αλλά δεν υπήρχαν ή δεν λειτούργησαν σωστά
- Ποιά μέσα θα μπορούσαν να εγκατασταθούν επιπλέον, ώστε να αποφευχθούν τέτοια ατυχήματα στο μέλλον.

Τα μέσα (εμπόδια και μπάρες όπως αυτά αποκαλούνται στη πράξη) για την προστασία των εργαζομένων θα μπορούσαν να χωριστούν σε φυσικά και σε διοικητικά [37]. Ως φυσικά μέσα μπορούν ενδεικτικά να αναφερθούν τα κάτωθι:

- Ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται από τους εργαζομένους
- Ο τεχνικός σχεδιασμός και η εργονομία των μηχανημάτων
- Τα προστατευτικά τοιχία
- Ο προστατευτικός εξοπλισμός των εργαζομένων (στολή, γάντια, κράνος κλπ.)
- Συσκευές προστασίας
- Συσκευές ειδοποίησης κινδύνου

- Προειδοποιητική σήμανση (επιγραφές, σήματα, φωτεινοί σηματοδότες κλπ.
- Μονώσεις

Κατά την ανάλυση ενός ατυχήματος, ο καθορισμός των διοικητικών μέσων είναι αρκετά πιο δύσκολος. Ως ενδεικτικά διοικητικά μέσα μπορούν όμως να αναφερθούν τα κάτωθι:

- Εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου στην κάθε θέση εργασίας
- Ικανότητες και γνώσεις του προσωπικού
- Μέθοδος επίβλεψης της εργασίας
- Εκπαίδευση προσωπικού
- Παραγωγικές διαδικασίες
- Σχεδιασμός παραγωγής

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση ενός ατυχήματος μετά την συμπλήρωση του φύλλου εργασίας, μπορούν να συνοψιστούν σε μια αναπαράσταση γραμμικής μορφής όπου θα απεικονίζονται όλες οι μπάρες που είτε έλειπαν, είτε απέτυχαν να αποτρέψουν το ατύχημα. Η συνοπτική αυτή μορφή παρουσίασης βοηθάει και στην δημιουργία της τελικής έκθεσης πραγματογνωμοσύνης και φυσικά στην λήψη των απαραίτητων μέτρων για την αποφυγή παρόμοιων ατυχημάτων στο μέλλον.

1.3.3 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω της ροής της ενέργειας

Η εν λόγω μέθοδος γνωστή ως "Energy Analysis" στηρίζεται στην άποψη ότι η ροή ενέργειας είναι η βασική αιτία των ατυχημάτων, η μεταφορά της οποίας γίνεται με ανεξέλεγκτους ή ανεπιθύμητους τρόπους. Γι' αυτό η ασφάλεια ενός συστήματος μπορεί να αξιολογηθεί και να βελτιωθεί μέσω ανάλυσης [11, 39]:

- Των πηγών ενέργειας που υπάρχουν στο σύστημα που αφορά στο συμβάν
- Των μεθόδων διατήρησης του επιπέδου ενέργειας στο χαμηλότερο δυνατό επίπεδο
- Των μέσων ελέγχου ροής της ενέργειας
- Των μεθόδων απορρόφησης της απελευθερούμενης ενέργειας

Η μέθοδος της ενεργειακής ανάλυσης μπορεί να εφαρμοστεί για την εκτίμηση του κινδύνου σε ένα σύστημα και για τη λήψη των απαραίτητων μέτρων για τον περιορισμό αυτών ή ακόμα και να συνδυαστεί και με την προηγούμενη μέθοδο "Barrier Analysis".

1.3.4 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω εξέτασης των μεταβολών στη λειτουργία του συστήματος

Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι γνωστή ως "Change Analysis". Με τον όρο "αλλαγή" νοείται οτιδήποτε θα μπορούσε να διαταράξει την ισορροπία ενός συστήματος που έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Οι αλλαγές σε ένα σύστημα μπορεί να είναι επιθυμητές, όπως για παράδειγμα η εγκατάσταση εξοπλισμού που θα βελτιώσει την ασφάλεια στην εργασία, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις οι αλλαγές μπορεί να είναι ο λόγος πρόκλησης ατυχήματος όπως για παράδειγμα η φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού. Έτσι η εν λόγω μέθοδος εξετάζει τις προγραμματισμένες ή μη αλλαγές, που οδήγησαν σε μη επιθυμητά αποτελέσματα [37].

Ο τεχνικός που διεξάγει την ανάλυση ενός ατυχήματος με την βοήθεια αυτής της μεθόδου πρέπει να εντοπίσει τις αλλαγές που παρουσιάστηκαν στο σύστημα και να αξιολογήσει αν αυτές επηρέασαν ή προκάλεσαν το ατύχημα. Η εφαρμογή της μεθόδου είναι αρκετά απλή και αποτελείται από έξι βήματα [37]:

- Περιγραφή της κατάστασης του ατυχήματος
- Περιγραφή της προηγούμενης φυσιολογικής κατάστασης (χωρίς την ύπαρξη ατυχήματος)
- Σύγκριση των δύο καταστάσεων
- Καταγραφή των διαφορών που παρατηρούνται από την σύγκριση των δύο καταστάσεων
- Ανάλυση των διαφορών που παρατηρήθηκαν και αξιολόγηση της συνεισφοράς τους στο ατύχημα
- Χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης είτε για την διεξαγωγή συμπερασμάτων και λήψη αποφάσεων, είτε για την εισαγωγή τους σε συμπληρωματικές τεχνικές ανάλυσης (π.χ. διαγράμματα χρονικής αναπαράστασης, χαρτογράφηση γεγονότων και παραγόντων κλπ.)

Για την εφαρμογή της εν λόγω μεθόδου είναι απαραίτητη η λήψη των απαιτούμενων στοιχείων από τους άμεσα ή έμμεσα εμπλεκόμενους στο ατύχημα (διοίκηση, προσωπικό, φορείς, υπηρεσίες, εξωτερικούς συνεργάτες κλπ.). Έτσι ο αναλυτής θα πρέπει να προσπαθήσει να απαντήσει στις κάτωθι βασικές ερωτήσεις [37]:

- Τι γεγονότα, καταστάσεις, ενέργειες, προσωπικό ή εξοπλισμός άλλαξε κατά την ημέρα που έγινε το ατύχημα, σε σχέση με τις προηγούμενες ημέρες όπου δεν υπήρξαν δυσάρεστα περιστατικά;

- **Πότε** μια κατάσταση ή ένα γεγονός έλαβε χώρα στην περίπτωση του ατυχήματος σε σχέση με κάθε άλλη συνηθισμένη περίπτωση;
- **Πού** μια κατάσταση ή ένα γεγονός έλαβε χώρα στην περίπτωση του ατυχήματος σε σχέση με τις καταστάσεις ή τα γεγονότα μιας συνηθισμένης καθημερινής περίπτωσης;
- **Ποιός** εμπλέκεται στον σχεδιασμό, στην βελτίωση, στην έγκριση, στην εφαρμογή και στην επίβλεψη της εργασίας κατά την στιγμή του ατυχήματος σε σχέση με κάθε άλλη τυπική περίπτωση;
- **Πώς** διενεργήθηκε η διαχείριση και ο έλεγχος της εργασίας κατά την στιγμή του ατυχήματος σε σχέση με κάθε άλλη τυπική περίπτωση;

Οι απαντήσεις στα εν λόγω ερωτήματα μαζί με τα βασικά βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω μπορούν να συγκεντρωθούν σε ένα φύλλο εργασίας με την μορφή πίνακα, κάτι που βοηθάει και στην συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

1.3.5 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω ιεράρχησης της διοικητικής αβλεψίας και της επικινδυνότητας

Η μέθοδος "Management oversight and risk tree - MORT" είναι μια περιεκτική αναλυτική τεχνική μορφής δέντρου που αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ ("Department of Energy - DOE") και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην ανάλυση ατυχημάτων όσο και στην εκτίμηση επαγγελματικού κινδύνου. Είναι βασικά μια γραφική λίστα ελέγχου που περιέχει γενικές ερωτήσεις τις οποίες ο αναλυτής καλείται να απαντήσει σύμφωνα με τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι ότι υπάρχουν τριών ειδών παράγοντες που προκαλούν ένα ατύχημα λόγω αβλεψιών και επικινδυνότητας [39].

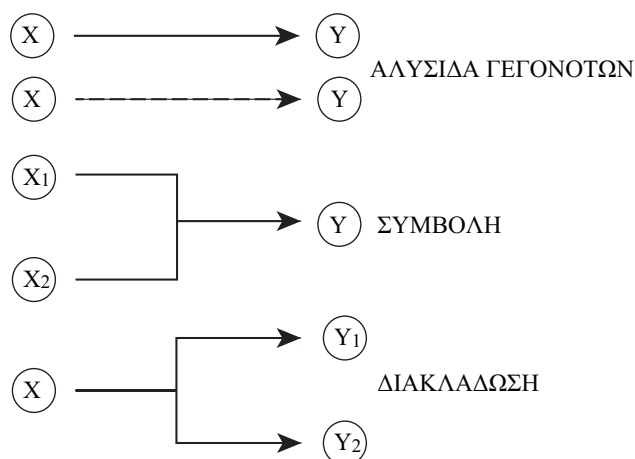
- Παράγοντες "S" (specific): όλες οι ελλείψεις και αβλεψίες που οδήγησαν στο ατύχημα.
- Παράγοντες "R" (risk): οι πιθανοί κίνδυνοι, οι οποίοι είναι γνωστοί αλλά συνεχίζουν να υφίστανται. Αυτό μπορεί να συμβεί επειδή αξιολογήθηκαν ως πολύ σπάνιοι, επειδή δεν υπάρχει γνωστή αντιμετώπιση ή επειδή το κόστος αντιμετώπισης τους είναι απαγορευτικό.
- Παράγοντες "M" (management): Όλα τα χαρακτηριστικά του συστήματος διοίκησης που ελέγχουν την εργασία και συνεισφέρουν στην εξέλιξη του ατυχήματος που εξετάζεται.

1.3.6 Ανάλυση ατυχημάτων και επαγγελματικού κινδύνου μέσω εξέτασης της ακολουθίας των γεγονότων

Η εν λόγω μέθοδος, γνωστή ως μέθοδος ανάλυσης συμπτωματικών παραγόντων ("incidental factor analysis"), βασίζεται στην παραδοχή ότι ένα ατύχημα είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς γεγονότων. Με τη μέθοδο αυτή προτείνεται η απομόνωση των ιδιαίτερων και ασυνήθιστων γεγονότων (τα οποία και ονομάζονται "συμπτωματικοί παράγοντες"), προκειμένου να ταξινομηθούν και να αντιμετωπιστούν [12]. Η ταξινόμηση περιλαμβάνει 4 κατηγορίες:

- Ατομικά, χαρακτηριστικά ("individual")
- Εργασία ("task")
- Εξοπλισμός ("equipment")
- Περιβάλλον ("environment")

Η ταξινόμηση των γεγονότων που είναι συμπτωματικά και εμπλέκονται στο ατύχημα, γίνεται με μια γραφική αναπαράσταση ακολουθίας τους χρησιμοποιώντας τα σύμβολα των λογικών επακλόουθων που φαίνονται στο σχήμα (1.11) [12].



Σχήμα 1.11: Σύμβολα λογικών σχέσεων [12]

Η σχέση της αλυσίδας γεγονότων του σχήματος (1.11), υποδηλώνει ότι "το γεγονός Y δεν θα συμβεί αν απουσιάζει το γεγονός X" ή αν χρησιμοποιείται διακεκομμένη γραμμή σύνδεσης τότε η σχέση διαφοροποιείται ως εξής: "αν το γεγονός X δεν είχε εμφανιστεί τότε το γεγονός Y θα είχε μικρότερες πιθανότητες να συμβεί" [12]. Η σχέση της συμβολής υποδηλώνει ότι με την απουσία δύο ανεξάρτητων γεγονότων X₁ και X₂, το γεγονός Y δεν θα συμβεί. Αντίστοιχα η σχέση διακλάδωσης υποδηλώνει ότι χωρίς το γεγονός X ούτε το Y₁ ούτε το Y₂ μπορεί να συμβεί. Με την βοήθεια των

λογικών αυτών επακόλουθων μπορεί να δημιουργηθεί ένα διάγραμμα με όλους τους εμπλεκόμενους παράγοντες, η ανάλυση των οποίων μπορεί να οδηγήσει στην εξεύρεση των πραγματικών συνθηκών που οδήγησαν στο ατύχημα.

Έτσι ο αναλυτής δημιουργεί με τα λογικά επακόλουθα ένα μοντέλο που περιγράφει αφενός τα γεγονότα που έλαβαν χώρα, αφετέρου την ροή των εργασιών, δηλαδή το ίδιο το σύστημα μέσα στο οποίο συνέβη το ατύχημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την καλύτερη αξιολόγηση του ατυχήματος αφού πολλές φορές το λάθος που οδηγεί στο ατύχημα δεν βρίσκεται ούτε στον ανθρώπινο παράγοντα, ούτε στον εξοπλισμό αλλά στο σύστημα που έχει εφαρμοστεί [12]. Στην παράγραφο 2.2.4 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου.

2 Χαρακτηριστικά παραδείγματα ηλεκτρικών ατυχημάτων

2.1 Επαφή βαρέων οχημάτων με ηλεκτροφόρους αγωγούς διανομής

Η επαφή με ηλεκτροφόρα καλώδια διανομής είναι μια από τις σημαντικότερες αιτίες θανατηφόρων εργασιακών ατυχημάτων στο κόσμο. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται ανάλυση ενός πραγματικού θανατηφόρου ατυχήματος που συνέβη στην Ελλάδα κατά την επαφή ενός βαρέου τύπου οχήματος (Μπετονιέρα) με τα ηλεκτροφόρα καλώδια διανομής μέσης τάσης. Για την κατανόηση του συμβάντος γίνεται περιγραφή των μέσων προστασίας του δικτύου διανομής και του τρόπου λειτουργίας τους και δίνεται βαρύτητα στις δυνατότητες αποφυγής τέτοιου είδους ατυχημάτων στο μέλλον.

2.1.1 Εισαγωγή

Μία από τις σημαντικότερες αιτίες θανατηφόρων εργασιακών ατυχημάτων στον κόσμο είναι η επαφή με ηλεκτροφόρα καλώδια διανομής [55, 80, 87, 25]. Συγκεκριμένα στις Ηνωμένες Πολιτίες, στη δεκαετία 1992-2002, το ποσοστό των θανατηφόρων ατυχημάτων από ηλεκτροφόρα καλώδια ανέρχεται στο 42% όλων των "on the job" ηλεκτρικών ατυχημάτων [80]. Μεταξύ 2003 και 2006, αναφέρεται ότι στον κατασκευαστικό τομέα, το ποσοστό των θανατηφόρων ατυχημάτων από την ίδια αιτία φτάνει το 47,2% και στους υπόλοιπους παραγωγικούς τομείς (Αγροτική Βιομηχανία, Μεταφορές κλπ.) το 45% [82]. Παρά τις προσπάθειες που γίνονται για την αποφυγή τέτοιου είδους ατυχημάτων τα ποσοστά παραμένουν υψηλά και την τελευταία δεκαετία καταγράφονται περίπου 130 θάνατοι το χρόνο. Το ίδιο μεγάλο ποσοστό υφίσταται και στον Καναδά αλλά και στην Ευρώπη [25].

Η επαφή με τα ηλεκτροφόρα καλώδια μπορεί να προκύψει κατά την διάρκεια εργασιών στο δίκτυο διανομής, κατά την συντήρηση του δικτύου, από την μεταφορά κατασκευαστικών ή άλλων αντικειμένων ή από το κλάδεμα των δέντρων. Η επαφή μπορεί να είναι άμεση (επαφή των εργαζομένων με τα καλώδια) ή έμμεση (επαφή με οχήματα, κινητά μέρη αυτών ή με άλλα αντικείμενα, π.χ. σκάλες, σωλήνες κλπ.).

Ειδικά στον κατασκευαστικό τομέα, στα ατυχήματα όπου εμπλέκονται μηχανοκίνητα οχήματα, η επαφή με ηλεκτροφόρα καλώδια αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό [25]. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των ατυχημάτων σε σχέση με το είδος του οχήματος και σε σχέση με τα επίπεδα τάσης.

Έτσι σε μεγαλύτερο ποσοστό εμπλέκονται οι γερανοί εξαιτίας της κατασκευής τους, όπου το μεγάλο μήκος των μηχανοκίνητων άκρων τους προκαλεί συχνά δυσκολίες χειρισμού, ενώ σε σχέση με τα επίπεδα τάσης, η συντριπτική πλειονότητα των θανατηφόρων ατυχημάτων αφορά σε αγωγούς μέσης τάσης [25]. Αυτό μπορεί να ίσως να εξηγηθεί, διότι στη χαμηλή τάση οι αγωγοί έχουν κάθετη διάταξη και στην περίπτωση επαφής το άκρο του γερανού ακουμπάει δύο αγωγούς με αποτέλεσμα να προκαλείται βραχυκύκλωμα και να τήκεται ακαριαία η ασφάλεια. Αντίθετα οι αγωγοί μέσης τάσης έχουν οριζόντια διάταξη και σε περίπτωση επαφής, το άκρο του γερανού ακουμπάει συνήθως μόνο έναν αγωγό, με αποτέλεσμα ο γερανός να παραμένει ακόμη και υπό τάση χωρίς να ενεργοποιούνται τα μέσα προστασίας. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η αντίσταση διάβασης προς γη είναι πολύ μεγάλη, οπότε η επαφή του γερανού με τον αγωγό αποτελεί πλέον ένα φορτίο για τη γραμμή και όχι βραχυκύκλωμα.

Στην εργασία αυτή εξετάζεται ένα πραγματικό θανατηφόρο ατύχημα που συνέβη πρόσφατα στην Ελλάδα, όπου μια αντλία μπετού ήρθε σε επαφή με ηλεκτροφόρα καλώδια διανομής μέσης τάσης. Γίνεται μια προσπάθεια να αιτιολογηθεί το συμβάν και να γίνουν προτάσεις τόσο για την εξαρχής αποφυγή του ατυχήματος, όσο και για την αποφυγή της θανατηφόρας κατάληξής του.

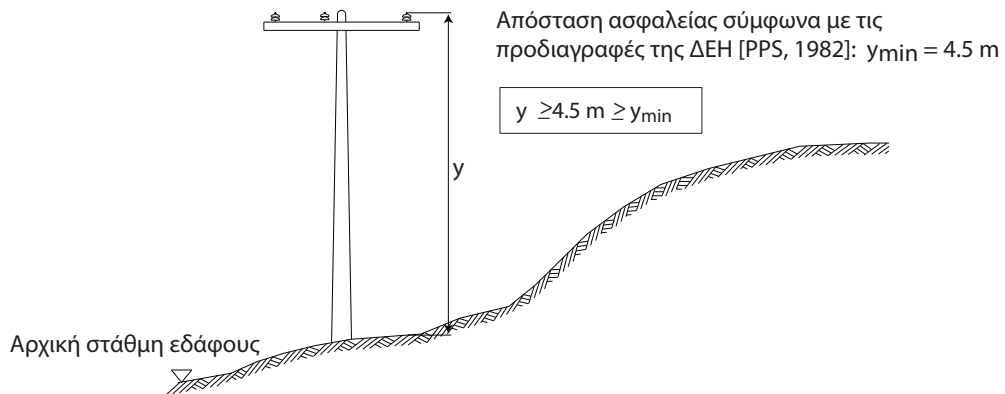
2.1.2 Περιγραφή του ατυχήματος που συνέβη

Στο περιστατικό του ατυχήματος μία αντλία μπετού οδηγήθηκε σε επικλινές σημείο ενός οικοπέδου με σκοπό να καθαριστεί και να αδειάσει τα υπολείμματα μπετού. Καθώς όμως πλησίαζε το συγκεκριμένο σημείο, το πίσω μέρος του οχήματος ήρθε σε επαφή με ηλεκτροφόρο καλώδιο μέσης τάσης. Σύμφωνα με μαρτυρίες από αυτόπτες μάρτυρες το όχημα τυλίχθηκε σε καπνό και ακούστηκαν χαρακτηριστικοί θόρυβοι εκρήξεων από τα λάστιχα. Ο οδηγός στην προσπάθειά του να βγει από την καμπίνα, ακούμπησε τα μεταλλικά μέρη του οχήματος και μόλις πάτησε στο έδαφος υπέστη ηλεκτρικό σοκ. Ο ένας αυτόπτης μάρτυρας ο οποίος δεν αντιλήφθηκε τον λόγο που έχασε τις αισθήσεις του ο οδηγός, έτρεξε προς το μέρος του για να τον βοηθήσει, αλλά μόλις τον πλησίασε έπεσε αναίσθητος. Σύμφωνα με δεύτερη μαρτυρία και οι δύο προηγούμενοι ήταν πεσμένοι στο έδαφος και ο οδηγός είχε βαριά εγκαύματα.

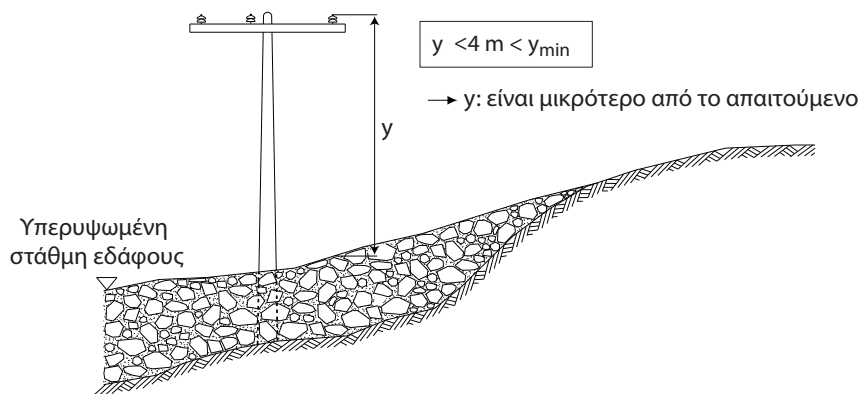
Το σημείο του οικοπέδου όπου έγινε το ατύχημα, είναι χώρος χαρακτηρισμένος ως μη προσβάσιμος σε οχήματα και σε τέτοιους χώρους η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας των καλωδίων από το έδαφος έχει οριστεί σε 4,5 m [15].

Σύμφωνα με την ετήσια αυτοψία που διενεργήθηκε ένα έτος πριν το ατύχημα, από αρμόδιο συνεργείο της εταιρίας ηλεκτρισμού στο εν λόγω σημείο, οι αποστάσεις ασφαλείας τηρούνταν. Την ημέρα όμως του ατυχήματος τα καλώδια μέσης τάσης βρίσκονταν, σε σχέση με το έδαφος, σε μικρότερη απόσταση από 4 m. Αυτό συνέβη διότι στο συγκεκριμένο σημείο πραγματοποιούνταν, κατά τη διάρκεια του τελευταίου έτους, αυθαίρετες ρίψεις μπαζών, με αποτέλεσμα να εξομαλυνθεί η κλίση του εδάφους και να ανεβεί η στάθμη του (Σχήμα 2.1).

Ένα χρόνο πριν το ατύχημα:



Την ημέρα του ατυχήματος:

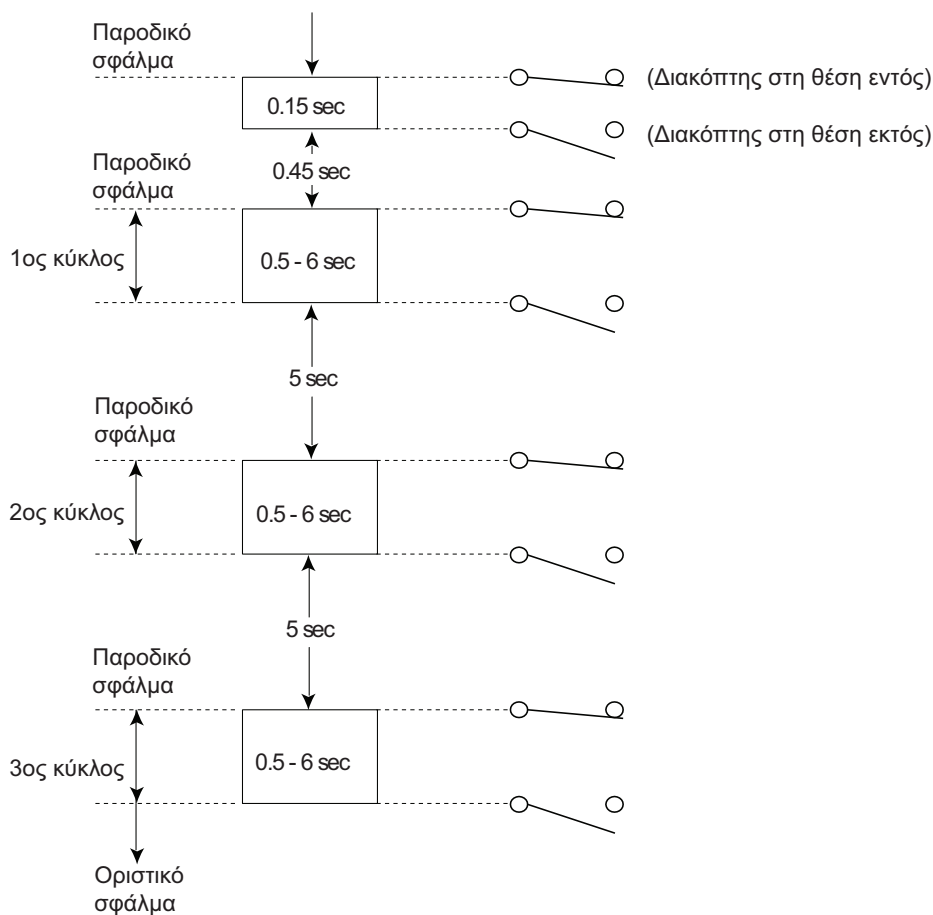


Σχήμα 2.1: Απόσταση καλωδίων από το έδαφος πριν και μετά την επίχωση

Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση που συντάχθηκε από την εταιρία ηλεκτρισμού για τη διερεύνηση του ατυχήματος, φάνηκε ότι την χρονική περίπου στιγμή του ατυχήματος είχε καταγραφεί διακοπή της γραμμής της περιοχής από το μέσο προστασίας και αυτόματη επαναφορά του από τον Αυτόματο Διακόπτη του κέντρου διανομής. Στην συνέχεια ακολούθησε επανηλημένη διακοπή και επαναφορά της ηλεκτροδότησης με χρονική απόσταση ενός λεπτού κάθε φορά, μέχρι την οριστική διακοπή της ηλεκτροδότησης της γραμμής. Από τα παραπάνω στοιχεία θα μπορούσε ίσως κάποιος να θεωρήσει ότι το σύστημα προστασίας της εταιρίας ηλεκτρισμού δεν λειτούργησε σωστά, αφού δεν σταμάτησε αμέσως η ηλεκτροδότηση της γραμμής, κάτι όμως που δεν ευσταθεί όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.

2.1.3 Περιγραφή λειτουργίας του Αυτόματου Διακόπτη στο κέντρο διανομής από όπου ηλεκτροδοτείται η γραμμή μέσης τάσης

Τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης προστατεύονται στο κέντρο διανομής μέσω αυτόματου διακόπτη [41, 61]. Έτσι όταν το σύστημα αντιληφθεί σφάλμα, ο αυτόματος διακόπτης ανοίγει και διακόπτει την ηλεκτροδότηση της γραμμής σε χρόνο π.χ. 0,15 sec (ταχεία διακοπή σφάλματος). Στην συνέχεια, μετά την πάροδο π.χ. 0,45 sec κλείνει και επαναφέρει την τροφοδότηση της γραμμής. Αν το σφάλμα συνεχίζει να υφίσταται, ο αυτόματος διακόπτης διακόπτει την τροφοδότηση της γραμμής σε χρόνο π.χ. 0,5 έως 6 sec (1ος κύκλος λειτουργίας). Η επόμενη προσπάθεια για επανατροφοδότηση της γραμμής συμβαίνει π.χ. 5 sec αργότερα. Η διαδικασία αυτή του αυτόματου διακόπτη στη θέση εντός διατηρείται για 0,5 - 6 sec και ακολούθως συμβαίνει διακοπή της ηλεκτροδότησης (διακόπτης στη θέση εκτός) για χρόνο 5 sec. Αυτό επαναλαμβάνεται άλλες δύο φορές και σε περίπτωση που το σφάλμα εξακολουθεί να υπάρχει, συμβαίνει οριστική διακοπή της τροφοδότησης από τον εν λόγω Αυτόματο Διακόπτη [41, 61]. Η συνολική λειτουργία του αυτόματου διακόπτη δίνεται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Λειτουργία του αυτόματου διακόπτη

Σημειώνεται ότι οι αυτόματοι διακόπτες στα κέντρα διανομής είναι ρυθμισμένοι να λειτουργούν με τον προαναφερόμενο τρόπο ώστε να μην χρειάζεται να διακοπεί η ηλεκτροδότηση μιας περιοχής στην περίπτωση που εμφανιστεί ένα παροδικό σφάλμα, όπως για παράδειγμα η επαφή ενός κλαδιού δέντρου με έναν αγωγό λόγω του αέρα που φύσηξε.

2.1.4 Αιτιολόγηση του συγκεκριμένου ατυχήματος

Το λάστιχο ως υλικό είναι τέλειος μονωτής υπό μέση τάση (15 kV ή 20 kV), γιατί η διηλεκτρική του αντοχή είναι της τάξης των 400 kV/mm [61]. Τα λάστιχα όμως που χρησιμοποιούνται στα οχήματα, περιέχουν στην δομή τους λεπτά μεταλλικά πλέγματα προς ενίσχυση της μηχανικής τους αντοχής, που τελικά τα καθιστά αντιστατικά υλικά, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο στατικός ηλεκτρισμός. Η αντίστασή τους, η οποία μετρήθηκε στο εργαστήριο, βρέθηκε ότι είναι της τάξεως των 2 MΩ.

Όταν το όχημα ήρθε σε επαφή με γυμνό αγωγό της γραμμής μέσης τάσης, τότε βρέθηκε υπό μέση τάση και στα λάστιχα δημιουργήθηκαν μερικές εκκενώσεις που κάποια στιγμή προκάλεσαν διάσπαση στην επικρατέστερη θέση εκδήλωσής τους. Έτσι συνέβη λόγω της διάσπασης ισχυρή διαρροή προς γη (παροδικό σφάλμα) που έθεσε τον αυτόματο διακόπτη στη θέση "εκτός". Όταν ο διακόπτης έκλεισε εκ νέου για να πραγματοποιήσει τους 3 κύκλους λειτουργίας του (όπως ήταν προγραμματισμένος κατά τα προαναφερόμενα) δεν συνέβη αυτό, γιατί τα λάστιχα συμπεριφέρθηκαν ως μονωτές με ανεπαρκή διηλεκτρική αντοχή υπό μέση τάση, και ως εκ τούτου εκδηλώθηκαν εκ νέου μερικές εκκενώσεις σε κάποιες άλλες θέσεις στα λάστιχα (λόγω της στατιστικότητας του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων σε ανομοιογενή μονωτικά υλικά [62], όπως τα λάστιχα), που κάποια στιγμή προκάλεσαν πάλι διάσπαση στην επικρατέστερη θέση εκδήλωσής τους. Έτσι συνέβη εκ νέου ισχυρή διαρροή ρεύματος προς γη (νέο παροδικό σφάλμα) που έθεσε τον αυτόματο διακόπτη πάλι στη θέση "εκτός". Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε ανά λεπτό μερικές φορές και πιθανόν να επαναλαμβανόταν πολλές φορές ακόμη, μέχρι αντί της ισχυρής διαρροής να συμβεί τελικά βραχυκύκλωμα, αν ο οδηγός δεν εγκατέλειπε το όχημα ακουμπώντας στα μεταλλικά του μέρη και ταυτόχρονα στο έδαφος, γεγονός που προκάλεσε βραχυκύκλωμα προς γη μέσω του σώματός του και ως εκ τούτου οριστική διακοπή ρεύματος μέσω του αυτόματου διακόπτη.

2.1.5 Σχόλια και Προτάσεις

Όπως είναι φανερό από τα παραπάνω, το ατύχημα δεν θα είχε συμβεί αν δεν είχε υπερυψωθεί η στάθμη του εδάφους ώστε να μικρύνει η απόσταση ασφαλείας από τους γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι οι ρίψεις μπαζών που προκάλεσαν την επίγωση, έγιναν αυθαίρετα χωρίς την ενημέρωση κάποιου αρμόδιου κρατικού Φορέα. Έτσι παρ' όλο που η εταιρεία ηλεκτρισμού εκτέλεσε κανονικά την

υποχρεωτική ετήσια επιθεώρηση της γραμμής, δεν γνώριζε την μείωση της απόστασης των αγωγών από το έδαφος, που προκλήθηκε μετά την επιθεώρηση κατά το ίδιο έτος.

Για την αποφυγή τέτοιων δυσάρεστων περιστατικών θα πρέπει να ολοκληρωθεί μια σειρά διαρθρωτικών αλλαγών, τόσο σε οργανωτικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο τεχνικής εφαρμογής. Σκοπός των μέτρων που προτείνονται παρακάτω είναι η γενικότερη υιοθέτηση ενός νέου εργασιακού τρόπου σκέψης, η εξάπλωση μιας "νοοτροπίας ασφαλούς εργασίας" και η ευαισθητοποίηση της κοινωνίας.

Επειδή σε τέτοιου είδους ατυχήματα, εμπλέκονται όχι μόνο εργαζόμενοι αλλά και απλοί πολίτες, οι αλλαγές αφορούν τόσο στην υφιστάμενη Νομοθεσία όσο και στις ενέργειες του Κρατικού Φορέα. Έτσι όλοι οι αρμόδιοι κρατικοί Φορείς (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Χωροταξίας, Υπουργείο Εργασίας, Περιφέρεια, Νομαρχία, Δήμος, Αστυνομία, Πολεοδομία) θα πρέπει να διενεργούν ελέγχους σε περιοχές που είναι γνωστό ότι πραγματοποιούνται αυθαίρετες ρίψεις μπαζών.

Έλεγχο στην εν λόγω θέση του ατυχήματος θα έπρεπε να έχει διενεργήσει και ο Τεχνικός Ασφαλείας που εργαζόταν στην επιχείρηση που άνηκε η αντλία μετουί και ο Τεχνικός Ασφαλείας της κατασκευαστικής εταιρείας που είχε αναλάβει το έργο και έκανε χρήση του οχήματος, αλλά και ο ιδιοκτήτης του οικοπέδου, στο οποίο γινόταν η παράνομη επίχωση. Αν είχαν τηρηθεί αυτοί οι απλοί κανόνες ασφαλείας και εφαρμόζονταν οι απαιτήσεις της Νομοθεσίας, θα είχε επισημανθεί ο υφιστάμενος κίνδυνος και θα είχαν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα για την αποφυγή του θανατηφόρου συμβάντος.

Επίσης από την ανάλυση που ατυχήματος που περιγράφηκε παραπάνω προκύπτει ότι το ατύχημα θα είχε αποφευχθεί, αν ο χειριστής του οχήματος είχε τις απαιτούμενες γνώσεις για το πώς θα έπρεπε να αντιδράσει. Θα έπρεπε να γνωρίζει αρμοδίως, ότι δεν έπρεπε να δημιουργήσει ηλεκτρικό κύκλωμα μέσω του σώματός του μεταξύ μετοπιέρας και γης, αλλά να προσπαθήσει να πηδήξει, με μαζεμένα τα άκρα, όσο πιο μακριά μπορούσε αποφεύγοντας έτσι τις συνέπειες της βηματικής τάσης η οποία εκτείνεται σε μικρή απόσταση γύρω από το όχημα σύμφωνα με την σχέση 2.1 [77].

$$V_P = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (2.1)$$

Όπου V_P είναι η βηματική τάση (σε V), σε μια απόσταση r (σε m), ενώ ρ είναι η αντίσταση του εδάφους (σε $\Omega \cdot m$) και I το ρεύμα σφάλματος (σε A). Εκ των ανωτέρω είναι φανερό ότι η βασική εκπαίδευση των εργαζομένων που εμπλέκονται σε τέτοιου είδους ατυχήματα, συχνά είναι ανεπαρκής. Όπως προκύπτει από την ανάλυση τέτοιων ατυχημάτων, στις περισσότερες περιπτώσεις τα ατυχήματα θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί αν είχαν ληφθεί τα απαραίτητα μέτρα και υπήρχε η απαιτούμενη εμπειρία [51, 87].

Τέλος, τις συνέπειες από τη βηματική τάση φαίνεται ότι υπέστη και ο πρώτος μάρτυρας του ατυχήματος, ο οποίος σπεύδοντας να βοηθήσει τον οδηγό βρέθηκε πλησίον της μπετονιέρας κατά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος.

Προτάσεις Οργάνωσης:

Ορισμένες οργανωτικές προτάσεις που μπορεί να συμβάλλουν στην αποφυγή παρόμοιων ατυχημάτων είναι οι ακόλουθες:

- Θέσπιση Νομοθεσίας για την υποχρεωτική εκπόνηση μελέτης εκτίμησης κινδύνου και αποφυγής ατυχημάτων από γυμνούς αγωγούς και γενικά από ηλεκτροφόρα καλώδια κατά την διαδικασία έκδοσης κάθε οικοδομικής άδειας από την Πολεοδομία.
- Η αρμόδια Αρχή της Νομαρχίας που είναι υπεύθυνη για την έκδοση Άδειας Χειριστή βαρέως τύπου οχήματος (Γερανοί, Φορτηγά, Μηχανήματα Εκσκαφής κλπ) θα πρέπει να διεξάγει εκπαιδευτικά σεμινάρια υποχρεωτικής παρακολούθησης, για την ενημέρωση των υποψήφιων χειριστών για τους κινδύνους από τους γυμνούς αγωγούς του δικτύου και γενικά από τα ηλεκτροφόρα καλώδια. Η διδακτέα ύλη του σεμιναρίου θα πρέπει να ενσωματωθεί και στις εξετάσεις που θα δίνει ο ενδιαφερόμενος για την απόκτηση της άδειας χειριστή
- Το Σωματείο των χειριστών γερανών και βαρέως τύπου οχημάτων θα πρέπει να διεξάγουν σε τακτά χρονικά διαστήματα ενημερωτικά σεμινάρια για την ασφαλή λειτουργία των μηχανημάτων και τους κινδύνους από τους γυμνούς αγωγούς του δικτύου και γενικά από τα ηλεκτροφόρα καλώδια. Στο τέλος κάθε σεμιναρίου θα δίνεται 'Βεβαίωση' σε κάθε χειριστή που το παρακολούθησε, η οποία θα χρησιμοποιείται και σαν πιστοποιητικό εμπειρίας
- Το Τεχνικό Επιμελητήριο (ΤΕΕ) θα πρέπει επίσης, με την βοήθεια των Πολυτεχνείων της χώρας, να διεξάγει σε τακτά χρονικά διαστήματα σεμινάρια για μηχανικούς, αρχιτέκτονες, κατασκευαστικές εταιρείες αλλά και εργαζόμενους σε άλλους παραγωγικούς κλάδους (αγροτική βιομηχανία, κτηνοτροφία, μεταφορές κλπ.) ώστε να ενημερώνονται για τους προαναφερόμενους κινδύνους
- Κάθε αρμόδιος Φορέας της Πολιτείας (Υπουργεία, Περιφέρεια, Νομαρχία, Δήμος, Αστυνομία, Πολεοδομία κλπ.) θα πρέπει να διεξάγει σε τακτά χρονικά διαστήματα Ομιλίες Ενημέρωσης εργαζομένων και πολιτών για τους προαναφερόμενους κινδύνους διότι ένα μεγάλο μέρος των ατυχημάτων με ηλεκτροφόρα καλώδια αφορά στην επαφή με μακρυά αντικείμενα (π.χ. μπετόβεργες, σκάλες, σωλήνες κλπ) και συμβαίνουν όχι μόνο σε εργοτάξια αλλά και σε ταράτσες ή μπαλκόνια σπιτιών [80].
- Θα πρέπει να γίνει μια προσπάθεια ενημέρωσης των πολιτών με την οικονομική βοήθεια χορηγών (Κατασκευαστικές εταιρείες, Επιχειρήσεις κατασκευής γεραμών και οικοδομικών οχημάτων κλπ.) και με συνχρηματοδότηση του κράτους,

ώστε να προβάλλονται συχνά διαφημιστικά σποτ στην τηλεόραση και το ραδιόφωνο και να γίνονται καταχωρήσεις στον έντυπο Τύπο.

- Θα πρέπει να γίνονται ετήσια εκπαιδευτικά προγράμματα σε σχολεία από το Υπουργείο Παιδείας, με σκοπό την ενημέρωση των μαθητών για την αναγκαιότητα του ηλεκτρικού ρεύματος αλλά και για τους υφιστάμενους κινδύνους από αυτό. Έτσι θα δημιουργηθεί από μικρή ηλικία μια σωστή νοοτροπία αντιμετώπισης του ηλεκτρικού ρεύματος και των εργασιακών κινδύνων γενικότερα.
- Θα πρέπει να δημιουργηθούν από τους αρμόδιους κρατικούς Φορείς κλιμάκια ελέγχου για την ασφάλεια των εργαζομένων στα εργοτάξια.
- Θα πρέπει να γίνει μια οργανωμένη προσπάθεια ώστε όλες οι νέες γραμμές επέκτασης του δικτύου μέσης τάσης σε αστικές περιοχές, να γίνονται υπογείως. Το επιπλέον κόστος κατασκευής εξισορροπείται από την αποφυγή ατυχημάτων που θα είχαν δυσάρεστες συνέπειες σε ανθρώπινη ζωή και περιουσία.

Προτάσεις τεχνικής φύσεως:

Ορισμένες προτάσεις τεχνικής φύσεως που μπορεί να συμβάλλουν στην αποφυγή παρόμοιων ατυχημάτων είναι οι ακόλουθες:

- Σε κάθε όχημα (βαρέως τύπου) που μπορεί να εμπλακεί σε ατύχημα με ηλεκτροφόρα καλώδια θα πρέπει να εγκατασταθεί προειδοποιητικός μηχανισμός, ο οποίος θα ανιχνεύει την ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου και θα ειδοποιεί τον χειριστή. Από έρευνα που έγινε στα υφιστάμενα συστήματα προειδοποίησης ηλεκτρικού πεδίου διαπιστώθηκε ότι τα εν λόγω συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν και σαν εξωτερική βοήθεια ώστε να προειδοποιούν τον χειριστή όταν αυτός έχει ξεπεράσει τα όρια που έχουν οριστεί [44, 95, 38].
- Να μελετηθεί η δυνατότητα τοποθέτησης ισχυρού μονωτικού υλικού σε σημεία των οχημάτων που, όπως έχει βρεθεί από την έρευνα [25], έρχονται συχνότερα σε επαφή με ηλεκτροφόρα καλώδια.
- Να χρησιμοποιείται ασύρματη κονσόλα χειρισμού (control box) στα οχήματα που διαθέτουν δυνατότητα απομακρυσμένης λειτουργίας τους, όπως οι αντλίες μετού ή οι γερανοί. Έτσι σε περίπτωση επαφής με γυμνούς αγωγούς και γενικά με καλώδια δεν θα υπάρχουν τουλάχιστον ανθρώπινα θύματα.
- Κάθε όχημα βαρέως τύπου θα πρέπει να έχει μέσα στην καμπίνα του οδηγού ένα ηλεκτρομονωτικό στρώμα με ικανοποιητική διηλεκτρική αντοχή στη μέση τάση, ώστε σε περίπτωση επαφής του οχήματος με ηλεκτροφόρους γυμνούς αγωγούς και γενικά με καλώδια, ο οδηγός να μπορεί να το χρησιμοποιήσει για να κατέβει από την καμπίνα αποφεύγοντας την βηματική τάση γύρω από το όχημα. Οι ιδιότητες του εν λόγω υλικού θα πρέπει να μελετηθούν, να εξεταστούν πειραματικά και να υλοποιηθούν με την προώθηση ενός προϊόντος στην αγορά.

- Στις περιοχές που είναι γνωστό ότι θα γίνουν εργασίες κάτω από ηλεκτροφόρα καλώδια θα πρέπει να τοποθετούνται επιπλέον προειδοποιητικές πινακίδες προς ενημέρωση των εργαζομένων.
- Πριν από κάθε έργο να ορίζονται από τον αρμόδιο Τεχνικό Ασφαλείας οι περιοχές κινδύνου κοντά στην θέση όπου βρίσκονται ηλεκτροφόροι γυμνοί αγωγοί και γενικά καλώδια και να γνωστοποιούνται στους χειριστές οχημάτων και λοιπούς εργαζομένους οι αποστάσεις ασφαλείας όπως αυτές έχουν οριστεί από την Νομοθεσία.
- Σε περίπτωση που θα υπάρξει στο στάδιο εφαρμογής κάποια αλλαγή από το προγραμματισμένο σχέδιο, θα πρέπει να ενημερώνονται ο Υπεύθυνος Έργου και ο Τεχνικός Ασφαλείας.
- Κατά τον χειρισμό των οχημάτων βαρέως τύπου (Γερανοί, Αντλίες μπετού, Οχήματα Φορτοεκφόρτωσης κλπ.) θα πρέπει να ορίζεται κάθε φορά αρμόδιος εργαζόμενος με μοναδική ευθύνη να παρακολουθεί την κίνηση των οχημάτων, να βοηθάει στο χειρισμό τους και να προειδοποιεί σε περίπτωση κινδύνου.

Το σύστημα προστασίας των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης, που έχει εγκατασταθεί από την εταιρεία ηλεκτρισμού στην Ελλάδα, είναι ανθρωποκεντρικό και οι μονώσεις ασφαλείας έχουν οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη ασφάλεια. Επειδή όμως συχνά συμβαίνουν θανατηφόρα ηλεκτρικά ατυχήματα, κρίνεται σκόπιμο να θεσπιστούν κανονισμοί που να περιλαμβάνουν τόσο τις προαναφερόμενες, αλλά και άλλες ακόμα προτάσεις που έχουν γίνει στο παρελθόν σε παρόμοιες εργασίες και έρευνες [87, 25, 82, 51, 44, 38].

Επίσης από τους κρατικούς Φορείς θα πρέπει να στηρίζονται, τόσο οργανωμένες προσπάθειες ενημέρωσης του κοινού, όσο και η μελέτη των θεμάτων προστασίας από το ηλεκτρικό ρεύμα από κατάλληλες ομάδες εργασίας. Τα ατυχήματα από ηλεκτροφόρους αγωγούς έχουν ευαस्थητοποιήσει πάντως, ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής Κοινότητας της Ελλάδος και το αντικείμενο αυτό, έχει συμπεριληφθεί ήδη στην διδακτέα ύλη του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, στο μάθημα των Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων, που διδάσκεται στη Σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, η μελέτη και των υπόλοιπων οχημάτων για την αποφυγή επαφής τους με ηλεκτροφόρους αγωγούς και καλώδια, όπως καλαθοφόρα οχήματα, οχήματα ραδιοφωνικών και τηλεοπτικών σταθμών με τηλεσκοπικές κεραίες και γεραμών που δεν ακουμπούν οι ίδιοι με τους ηλεκτροφόρους αγωγούς αλλά η επαφή με τους εν λόγω αγωγούς γίνεται μέσω του αντικείμενου που μεταφέρουν ή με τα συρματόσχοινα που το κρατούν σταθερό.

Το ενθαρρυντικό γεγονός πάντως, είναι ότι κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας και από προσωπικές συζητήσεις με αρμόδιους κρατικούς Φορείς, Κατασκευαστές, Ιδιοκτήτες εργοστασίων, Μηχανικούς και Χειριστές αλλά και με Εκδότες εφημερίδων και περιοδικών, διαπιστώθηκε ότι ακόμα και αυτή η απλή συλλογή πληροφοριών για την εκπόνηση της εργασίας, τους ευαισθητοποίησε σε μεγάλο βαθμό και οι περισσότεροι θα ήθελαν να βοηθήσουν, με κάθε δυνατό τρόπο, στην αποφυγή τέτοιων ατυχημάτων.

2.1.6 Συμπεράσματα

Με αφορμή ένα πραγματικό θανατηφόρο ατύχημα που συνέβη στην Ελλάδα κατά την επαφή ενός βαρέως τύπου οχήματος (Μπετονιέρα) με τους ηλεκτροφόρους αγωγούς διανομής μέσης τάσης, έγινε μια προσπάθεια περιγραφής των μέσων προστασίας του δικτύου για την καλύτερη κατανόηση του ατυχήματος και διαπιστώθηκε ότι το σύστημα προστασίας των γραμμών μέσης και χαμηλής τάσης που έχει εγκατασταθεί από την εταιρεία ηλεκτρισμού στην Ελλάδα, είναι ανθρωποκεντρικό και οι αποστάσεις ασφαλείας έχουν οριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ασφάλεια. Επειδή όμως η επαφή οχημάτων βαρέως τύπου με τους ηλεκτροφόρους αγωγούς, είναι αρκετά συχνό φαινόμενο και συμβαίνει σε διάφορους παραγωγικούς τομείς, απαιτείται μια σειρά προτάσεων (όπως π.χ. οι προτάσεις της παραγράφου 2.1.5) με σκοπό την επίτευξη διαθρωτικών αλλαγών, τόσο σε επίπεδο οργάνωσης όσο και σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής, προκειμένου να υιοθετηθεί μια "νοοτροπία ασφαλούς εργασίας" και να ευαισθητοποιηθεί η κοινωνία γενικότερα.

Η επαφή με ηλεκτροφόρους αγωγούς είναι μια από τις σημαντικότερες αιτίες θανατηφόρων εργασιακών ατυχημάτων στον κόσμο και γι' αυτό οι αρμόδιοι Φορείς θα πρέπει να στηρίζουν μια οργανωμένη προσπάθεια ενημέρωσης και πρόληψης.

2.2 Εσφαλμένος χειρισμός ασφαλειοαποζεύκτη σε υπαίθριο υποσταθμό διανομής μέσης τάσης

Ακολούθως γίνεται ανάλυση ενός πραγματικού θανατηφόρου ατυχήματος που συνέβη στην Ελλάδα κατά την προσπάθεια αποκατάστασης τεχνικής βλάβης σε υπαίθριο υποσταθμό μέσης τάσης της εταιρείας ηλεκτρισμού. Στην προσπάθεια να αντικατασταθεί η ασφάλεια μέσης τάσης και να αποκατασταθεί η ηλεκτροδότηση, έσπασε ο μονωτήρας ενός μονοπολικού ασφαλειοαποζεύκτη που συγκρατούσε τον αγωγό μέσης τάσης, με επακόλουθο να ακουμπήσει το ρευματοφόρο κομμένο τμήμα του μονωτήρα τον εργαζόμενο που είχε αναριχηθεί στην κολώνα του υποσταθμού και να προκαλέσει τον θάνατό του. Για την κατανόηση του συμβάντος γίνεται περιγραφή του συγκεκριμένου δικτύου διανομής και των μέσων προστασίας αυτού και δίνεται βαρύτητα στις δυνατότητες αποφυγής τέτοιων ατυχημάτων στο μέλλον.

2.2.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και διεθνείς τεχνικές δημοσιεύσεις, η επαφή με ηλεκτροφόρους γυμνούς αγωγούς και γενικά με καλώδια διανομής, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες αιτίες θανατηφόρων εργασιακών ατυχημάτων [25, 55, 80, 87]. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, στη δεκαετία 1992-2002, το ποσοστό των θανατηφόρων ατυχημάτων από ηλεκτροφόρα αγωγούς ανέρχεται στο 42% όλων των "on the job" ηλεκτρικών ατυχημάτων [80]. Συγκεκριμένα μεταξύ 1992 και 1998 καταγράφονται 2287 θανατηφόρα ηλεκτρικά ατυχήματα, από τα οποία τα 253 δηλαδή το 11% συνέβησαν κατά τις εργασίες συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών σε ηλεκτροφόρους αγωγούς μεταφοράς και διανομής [55].

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία για ατυχήματα σε σχέση με το ηλεκτρικό ρεύμα, μεταξύ των ετών 1992 - 1996 συνέβησαν 112 επαγγελματικές ηλεκτροπληξίες, από τις οποίες 7 ήταν θανατηφόρες. Ο μέσος αριθμός ηλεκτροπληξιών ανέρχεται 22,4 κατ' έτος και των θανατηφόρων σε 1,4 κατ' έτος [39]. Αντίστοιχοι αριθμοί ατυχημάτων συναντώνται σε παγκόσμιο επίπεδο και παρά τις προσπάθειες που γίνονται για την αποφυγή τέτοιου είδους ατυχημάτων τα ποσοστά παραμένουν υψηλά και την τελευταία δεκαετία καταγράφονται περίπου 130 θάνατοι το χρόνο. Το ίδιο μεγάλο ποσοστό υφίσταται και στον Καναδά αλλά και στην Ευρώπη [25].

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάλυση των ατυχημάτων όσον αφορά στην εκπαίδευση και στην εμπειρία των εργαζομένων, από όπου προκύπτει ότι τα περισσότερα θανατηφόρα εργατικά ατυχήματα σχετίζονται με επαγγέλματα που έχουν άμεση σχέση με το ηλεκτρικό ρεύμα, αφού οι εργαζόμενοι εκτίθενται περισσότερο σε τέτοιους κινδύνους [82]. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα εν λόγω ατυχήματα αφορούν σε εργαζομένους μεγαλύτερης ηλικίας που έχουν εμπειρία στην εργασία με το ηλεκτρικό ρεύμα και οι οποίοι φαίνεται ότι είτε υπερεκτιμούν την εμπειρία τους, είτε δεν ακολουθούν τις ασφαλείς ρουτίνες εργασίας με την χρήση όλων των μέσων ατομικής προστασίας.

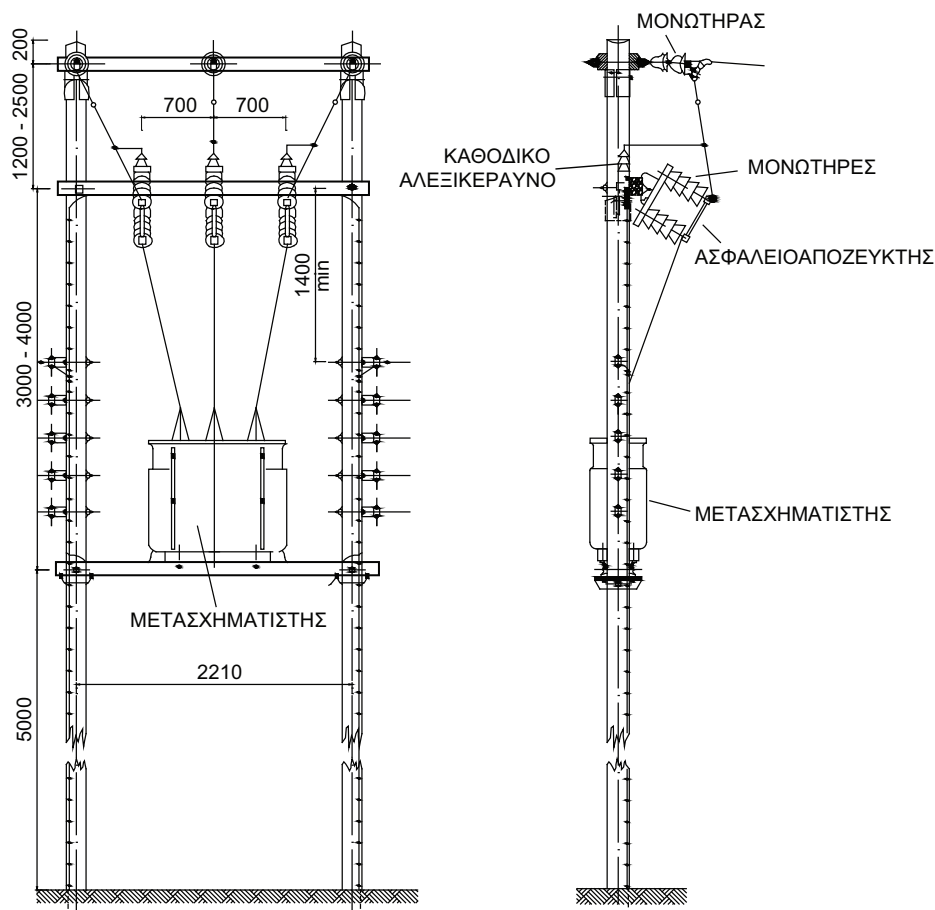
Ακολουθώς εξετάζεται ένα πραγματικό θανατηφόρο ατύχημα που συνέβη κατά τις εργασίες αποκατάστασης της ηλεκτροδότησης σε ένα υπαίθριο υποσταθμό της ΔΕΗ, όταν έσπασε ο μονωτήρας που συγκρατούσε τον αγωγό της μέσης τάσης, με αποτέλεσμα αυτό να ακουμπήσει το κάτω άκρο του εργαζομένου και να προκαλέσει τον θάνατό του. Για την καλύτερη κατανόηση του ατυχήματος ακολουθεί αναλυτική περιγραφή.

2.2.2 Περιγραφή του ατυχήματος που συνέβη

Πριν μερικά χρόνια, σε περιοχή της κεντρικής Ελλάδος και σε απογευματινή ώρα, παρουσιάστηκε διακοπή της ηλεκτροδότησης. Ο αρχιτεχνίτης της εταιρείας ηλεκτρισμού που εργαζόταν σε εκείνη τη βάρδια, έδωσε τηλεφωνική εντολή σε συνεργείο αποτελούμενο από δύο τεχνικούς να μεταβεί στην περιοχή για να ελέγξει την αιτία της διακοπής και να αποκαταστήσει την ηλεκτροδότηση.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τεχνικοί του συνεργείου συντήρησης ήταν εξειδικευμένοι εναερίτες ηλεκτρολόγοι, εκπαιδευμένοι στην αντιμετώπιση και επίλυση τεχνικών προβλημάτων του δικτύου. Επίσης γνώριζαν πολύ καλά την διαδικασία που πρέπει να ακολουθείται σε κάθε τεχνικό πρόβλημα ώστε η αποκατάσταση του προβλήματος να είναι σύντομη και ασφαλής.

Το εν λόγω συνεργείο μόλις έφτασε στο σημείο της βλάβης διαπίστωσε ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης οφειλόταν σε τήξη των ασφαλειών των δύο εκ των τριών ασφαλειοαποσκευτών μέσης τάσης σε υπαίθριο υποσταθμό διανομής (50 kVA 20 kV/400V), που ήταν εγκατεστημένος σε δίστυλο. Το συνεργείο έκανε τον τυπικό οπτικό έλεγχο της εγκατάστασης και δεν διαπίστωσε κάτι ασυνήθιστο. Στο σχήμα 2.3 δίνεται το τεχνικό σχέδιο τυπικού υπαίθριου υποσταθμού επί δίστυλου.



Σχήμα 2.3: Τυπικό παράδειγμα υπαίθριου υποσταθμού διανομής επί δίστυλου

Προκειμένου να αποκατασταθεί η βλάβη έπρεπε να αντικατασταθούν τα τηκτά των ασφαλειών των φάσεων L_1 και L_2 και γι' αυτό ο ένας τεχνικός αναρριχήθηκε σε ύψος περίπου 2,50 m στην δεξιά κολώνα του υποσταθμού, αφού από αυτή την πλευρά ήταν

οι καμένες ασφάλειες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο τεχνικός δεν χρησιμοποίησε τα ατομικά μέσα προστασίας που διέθετε, τα οποία περιλαμβάνουν παπούτσια εργασίας με υψηλή μόνωση, ενισχυμένη φόρμα εργασίας, μονωτικά προστατευτικά γάντια και κράνος. Ο τεχνικός στο έδαφος έδωσε τότε στο συναδέλφό του στη κολώνα το αποζευκτικό ακόντιο και εκείνος με τη σειρά του κατέβασε το τηκτό της ασφάλειας της φάσης L_1 δίνοντας το στο τεχνικό στο έδαφος για να το αντικαταστήσει.

Στην συνέχεια έκανε το ίδιο για την δεύτερη ασφάλεια στη φάση L_2 και την έδωσε επίσης στον τεχνικό στο έδαφος για αντικατάσταση. Μόλις τα τηκτά αντικαταστάθηκαν ο τεχνικός στην κολώνα τα τοποθέτησε πίσω στις θέσεις τους το ένα μετά το άλλο. Στην συνέχεια προσπάθησε να κλείσει τον ασφαλειοαποζεύκτη της φάσης L_1 με το αποζευκτικό ακόντιο. Ο χειρισμός του διακόπτη (άνοιγμα & κλείσιμο) σύμφωνα με την προβλεπόμενη διαδικασία, γίνεται με την βοήθεια του αποζευκτικού ακοντίου, το οποίο τοποθετείται στον ειδικό δακτύλιο που βρίσκεται πάνω στον ασφαλειοαποζεύκτη και στη συνέχεια σηκώνεται χειροκίνητα προς τα πάνω μέχρι να κουμπώσει. Ο τεχνικός πάνω στον στύλο, αν και γνώριζε την σωστή διαδικασία, αποφάσισε να κλείσει τον ασφαλειοαποζεύκτη χτυπώντας τον στο κάτω μέρος του με το ακόντιο.

Αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας του ήταν να σπάσει στα δύο ο μονωτήρας του εν λόγω διακόπτη και να πέσει στο αριστερό κάτω άκρο του τεχνικού, το κομμάτι του μονωτήρα που συγκρατούσε το ρευματοφόρο αγωγό μέσης τάσης. Ο τεχνικός υπέστη ηλεκτροπληξία και έπεσε από τη κολώνα. Στο σχήμα 2.4 δίνεται μια φωτογραφία αντίστοιχου υποσταθμού. Μόλις ο τεχνικός στο έδαφος είδε τον τραυματισμό του συναδέλφου του, του πρόσφερε αμέσως τις πρώτες βοήθειες με μαλάξεις και τεχνητή αναπνοή. Ο τραυματίας μεταφέρθηκε με ασθενοφόρο στο κοντινότερο Νοσοκομείο όπου δυστυχώς διαπιστώθηκε ο θάνατός του.

Στην συνέχεια επιτροπή της εταιρείας ηλεκτρισμού διερεύνησε το ατύχημα με αρμόδιους τεχνικούς οι οποίοι αξιολόγησαν τα δεδομένα του ατυχήματος και κατέγραψαν όλες τις μαρτυρίες. Έρευνα διενεργήθηκε και από τον αρμόδιο κρατικό φορέα, όπου σύμφωνα με την Έκθεση Αυτοψίας Εργατικού Ατυχήματος που εκπονήθηκε, η θραύση του μονωτήρα σε δύο περίπου ισομεγέθη τμήματα οφειλόταν σε ριγμάτωση του μονωτήρα λόγω πιθανής αστοχίας του υλικού ή λόγω υπερβολικής άσκησης της προς μανδάλωση πίεσης. Επίσης στο έγγραφο αναφοράς που εκπονήθηκε, σημειώνεται ότι η ομάδα του συνεργείου ακολούθησε πιστά την διαδικασία αποκατάστασης βλαβών όπως αυτή περιγράφεται στους τεχνικούς κανονισμούς. Συγκεκριμένα το συνεργείο έκανε αρχικά οπτικό έλεγχο, ερεύνησε για οτιδήποτε ασυνήθιστο στην λειτουργία του μετασχηματιστή και στην συνέχεια προχώρησε στην διαδικασία αποκατάστασης.

2.2.3 Περιγραφή του συγκεκριμένου δικτύου διανομής

Το δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση, οικονομία και



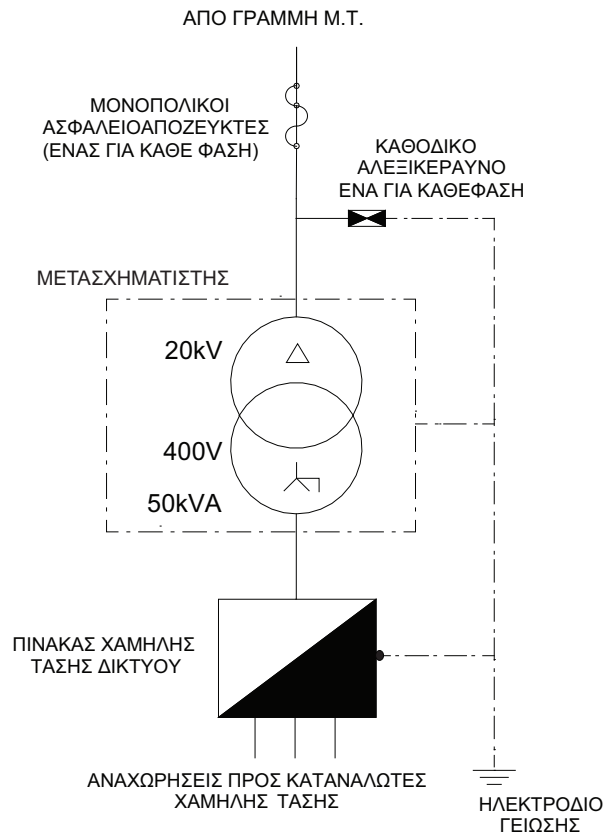
Σχήμα 2.4: Φωτογραφία τυπικού υποσταθμού σε δίστηλο

ασφάλεια. Έτσι η μεταφορά της ενέργειας γίνεται σε υψηλές τάσεις ώστε να επιτευχθεί μείωση των απωλειών, ενώ η διανομή χαμηλής τάσης (400V, 230V) γίνεται μέσω υποσταθμών (συνήθως 20kV/400V ή 15kV/400V). Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται είτε μέσω εναέριων αγωγών είτε μέσω υπογείων αγωγών.

Οι υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης διακρίνονται σε εναέριους, υπόγειους και τύπου κλωβού. Οι εναέριοι υποσταθμοί, ανάλογα με το βάρος τους, είναι αναρτημένοι σε ένα ή δύο στύλους από ξύλο ή μπετόν. Η προστασία του μετασχηματιστή του υποσταθμού μέσης τάσης από σφάλματα, επιτυγχάνεται με την βοήθεια μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών, ενώ σε περίπτωση αστοχίας τους (και προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου), επενεργεί το επόμενο μέσο προστασίας κ.ο.κ.. Στο σχήμα 2.5 δίνεται ένα απλοποιημένο μονογραμμικό σχέδιο ενός τυπικού υποσταθμού εξωτερικού χώρου.

Οι ασφαλειοαποζεύκτες αυτοί, είναι αναρτημένοι σε ένα μονωτήρα από πορσελάνη.

Όταν σε περίπτωση σφάλματος συμβαίνει τήξη του τηκτού της ασφάλειας, ανοίγει ο μηχανισμός μανδάλωσης και έτσι ταυτόχρονα με την διακοπή ρεύματος υπάρχει και οπτική ένδειξη για την ύπαρξη σφάλματος. Θα πρέπει να σημειωθεί όμως ότι μετά την εξάλειψη του σφάλματος, το κλείσιμο του διακόπτη στην θέση μανδάλωσης, γίνεται μόνο χειροκίνητα με την βοήθεια αποζευκτικού ακοντίου.



Σχήμα 2.5: Μονογραμμικό υποσταθμού

Όσον αφορά στην προστασία του υποσταθμού από κεραυνικές υπερτάσεις, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση των μονώσεων και βλάβες στον μετασχηματιστή, αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια καθοδικών αλεξικέραυνων. Τα εν λόγω αλεξικέραυνα δεν είναι τύπου Franklin με μηχανισμό έλξης, αλλά προστατεύουν από οδεύοντα κύματα επί της γραμμής.

2.2.4 Ανάλυση του συγκεκριμένου ατυχήματος

Η ανάλυση των εργατικών ατυχημάτων είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία στην επιστήμη της ασφάλειας με απώτερο σκοπό την κατά το δυνατό ελαχιστοποίηση των εργατικών ατυχημάτων στο μέλλον. Ο εμπειρογνώμονας Τεχνικός Ασφαλείας έχει στη διάθεσή του διάφορες μεθόδους ανάλυσης, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί από εξειδικευμένους αναλυτές ασφαλείας, από εταιρείες για την εφαρμογή αυτών στις γραμμές

παραγωγής τους, από Δημόσιες Υπηρεσίες Ασφάλειας και από επιστήμονες που εργάζονται στον συγκεκριμένο τομέα [12, 28, 88]. Ακολούθως γίνεται μια προσπάθεια ανάλυσης του ατυχήματος που περιγράφηκε, με την βοήθεια της μεθόδου ανάλυσης συμπτωματικών παραγόντων ("Incidental factor analysis") και την δημιουργία ενός απλοποιημένου διαγράμματος περιγραφής του ατυχήματος (βλ. παρ. 1.3.6) [12].

Το συνεργείο που ανέλαβε να διαγνώσει και να αποκαταστήσει την βλάβη, αναγνώρισε την αιτία που προκάλεσε την βλάβη, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση την τήξη των δύο ασφαλειών. Επίσης διενεργήθηκε έρευνα για άλλες αιτίες που τυχόν προκάλεσαν βλάβη στον υποσταθμό χωρίς να διαπιστωθεί οτιδήποτε ασυνήθιστο. Από την μαρτυρία του δεύτερου τεχνικού φαίνεται ότι οι καιρικές συνθήκες ήταν κανονικές και δεν υπήρχε κάποιος άλλος παράγοντας που δυσχέραινε την αντικατάσταση των ασφαλειών.

Σύμφωνα με την προβλεπόμενη διαδικασία της εταιρείας ηλεκτρισμού, η αντικατάσταση των ασφαλειών ενός ασφαλειοποζεύκτη γίνεται από τους τεχνικούς του δικτύου συνήθως υπό τάση, προκειμένου να μην διακόπτεται η ηλεκτροδότηση μιας ολόκληρης περιοχής. Οι τεχνικοί χρησιμοποιούν για τον χειρισμό του ασφαλειοποζεύκτη ένα ακόντιο "hot stick" από ισχυρό μονωτικό υλικό το οποίο καταλήγει σε έναν γάντζο, ο οποίος εφαρμόζεται στον δακτύλιο του διακόπτη. Για την εργασία υπό τάση οι τεχνικοί είναι εφοδιασμένοι με τα απαραίτητα ατομικά μέσα προστασίας που περιλαμβάνουν αποζευκτικό ακόντιο, παπούτσια εργασίας με υψηλή μόνωση, ενισχυμένη φόρμα εργασίας, μονωτικά προστατευτικά γάντια και κράνος εργασίας.

Οι λόγοι για τους οποίους ο τεχνικός δεν ακολούθησε τους κανόνες ασφαλείας και δεν χρησιμοποίησε τα ατομικά του μέσα προστασίας μπορούν να συνοψιστούν στους αμέσως παρακάτω:

- Η πεποίθηση ότι δεν θα προκληθεί επαφή με κάποια υπό τάση επιφάνεια
- Η μείωση της άνεσης στην εργασία, η μείωση της κινητικότητας και της ευελιξίας
- Ο χρόνος και η εργασία που απαιτείται για την ένδυση με τα ατομικά μέσα προστασίας

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [24] το απαιτούμενο κόστος (σε χρόνο, προσπάθεια, μειωμένη άνεση και χρήμα) είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο ένας εργαζόμενος δεν χρησιμοποιεί τα ατομικά του μέσα προστασίας.

Η πεποίθηση του τεχνικού ότι δεν θα προκληθεί κάποια επαφή με επιφάνειες υπό τάση, μπορεί να εξηγηθεί με τους παρακάτω λόγους:

- Από την μορφολογία του δικτύου φαίνεται ότι οι φάσεις του υποσταθμού (από τον ασφαλειοποζεύκτη με τις λειωμένες ασφάλειες και κάτω), δεν ήταν υπό τάση. Έτσι η βία των ασφαλειών κατά τη αντικατάστασή τους δεν ήταν υπό τάση.

- Επίσης ο χειρισμός του ασφαλειοαποζεύκτη θα γινόταν με την βοήθεια του αποζευκτικού ακοντίου, αποκλείοντας οποιαδήποτε επαφή με "ενεργές επιφάνειες".

Τα παραπάνω επιχειρήματα αναφέρθηκαν και στην μαρτυρία του δεύτερου τεχνικού όπως καταγράφηκαν στην αναφορά που συντάχθηκε. Ο εν λόγω συλλογισμός όμως δεν είναι σωστός, αφού δεν λαμβάνει υπόψιν τυχόν επαγωγικές τάσεις που είναι δυνατόν να εμφανιστούν. Επίσης σύμφωνα με καταθέσεις που έδωσαν εργαζόμενοι της εταιρείας ηλεκτρισμού, η συγκεκριμένη περίπτωση βλάβης είναι πολύ συνηθισμένη και τα συνεργεία καλούνται συχνά να την αντιμετωπίσουν, με αποτέλεσμα να θεωρούν την εν λόγω εργασία, διαδικασία ρουτίνας.

Θα πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι πολύ συχνά οι εργαζόμενοι δεν θεωρούν τα ατομικά μέσα προστασίας ως ένα βοηθητικό εργαλείο για την δική τους προστασία, αλλά τα αντιμετωπίζουν σαν μια απαίτηση της διοίκησης [81]. Έτσι η προηγούμενη εμπειρία με αντίστοιχες βλάβες και η εξοικείωση με τη συγκεκριμένη διαδικασία ενίσχυσε την πεποίθηση ότι τα ατομικά μέσα προστασίας δεν ήταν απαραίτητα, αφού άλλωστε δεν είχε συμβεί ποτέ κάποια επαφή με επιφάνειες υπό τάση μέχρι εκείνη τη στιγμή. Η αντίληψη των εργαζομένων ότι τα ατομικά μέσα προστασίας δεν είναι απαραίτητα ή επαρκή για την προστασία τους ενισχύει την άρνησή τους να τα χρησιμοποιήσουν, ιδιαίτερα όταν δυσχεραίνουν την εκτέλεση της εργασίας τους ή θεωρούνται άβολα [27].

Τελικά μπορεί να θεωρηθεί ότι ο εργαζόμενος που υπέστη το ατύχημα, δεν ήταν διατεθειμένος να εφαρμόσει τους κανόνες ασφαλείας και να καταβάλλει την προσπάθεια για να φορέσει τον εξοπλισμό προστασίας, αφού θεώρησε ότι δεν υπήρχε κίνδυνος στην εργασία αποκατάστασης της βλάβης. Αυτού του είδους οι ενέργειες, θεωρούνται ότι είναι εσκεμμένη παραβίαση των προβλεπόμενων διαδικασιών και μπορεί να έχουν δυσάρεστο αποτέλεσμα [21].

Το συνεργείο αφού διαπίστωσε ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης οφειλόταν στη τήξη των ασφαλειών σε δύο ασφαλειοαποζεύκτες, ξεκίνησε τη διαδικασία της αντικατάστασης αυτών. Ο τεχνικός προκειμένου να αντικαταστήσει τις ασφάλειες αναρριχήθηκε στη δεξιά κολώνα του υποσταθμού. Αυτό ήταν σωστό διότι αφενός οι ασφάλειες που έπρεπε να αντικατασταθούν βρίσκονταν πιο κοντά στη δεξιά κολώνα και αφετέρου στην αριστερή είχε τοποθετηθεί ο πίνακας χαμηλής τάσης και εμπόδιζε την αναρρίχηση.

Όπως διαπιστώθηκε από την κατάθεση του εργαζόμενου που παρέμεινε στο έδαφος, αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία αντικατάστασης των τηκτών των ασφαλειών, ο τεχνικός που είχε αναρριχηθεί στην κολώνα, στην προσπάθειά του να ασφαλίσει το σύστημα μανδάλωσης, το χτύπησε με το ακόντιο με δύναμη στο κάτω μέρος του. Από τις αναφορές που συγκεντρώθηκαν διαπιστώθηκε ότι πολλοί εργαζόμενοι τεχνικοί έχουν την συνήθεια να χτυπούν με δύναμη το σύστημα μανδάλωσης από κάτω προκειμένου να ασφαλίσει, αντί να τοποθετούν το ακόντιο χειρισμού στον ειδικό γάντζο. Επανελημένοι χειρισμοί απασφάλισης και μανδάλωσης με αυτό τον τρόπο φαίνεται ότι προκαλούν μείωση της μηχανικής αντοχής των μονωτήρων. Αυτή η ενέργεια όπως και

η μη χρήση των ατομικών μέσων προστασίας, είναι εσκεμμένη παραβίαση των προβλεπόμενων διαδικασιών, που σύμφωνα με την βιβλιογραφία αναφέρεται ως "καθιερωμένη αλλά εσφαλμένη ενέργεια" [34].

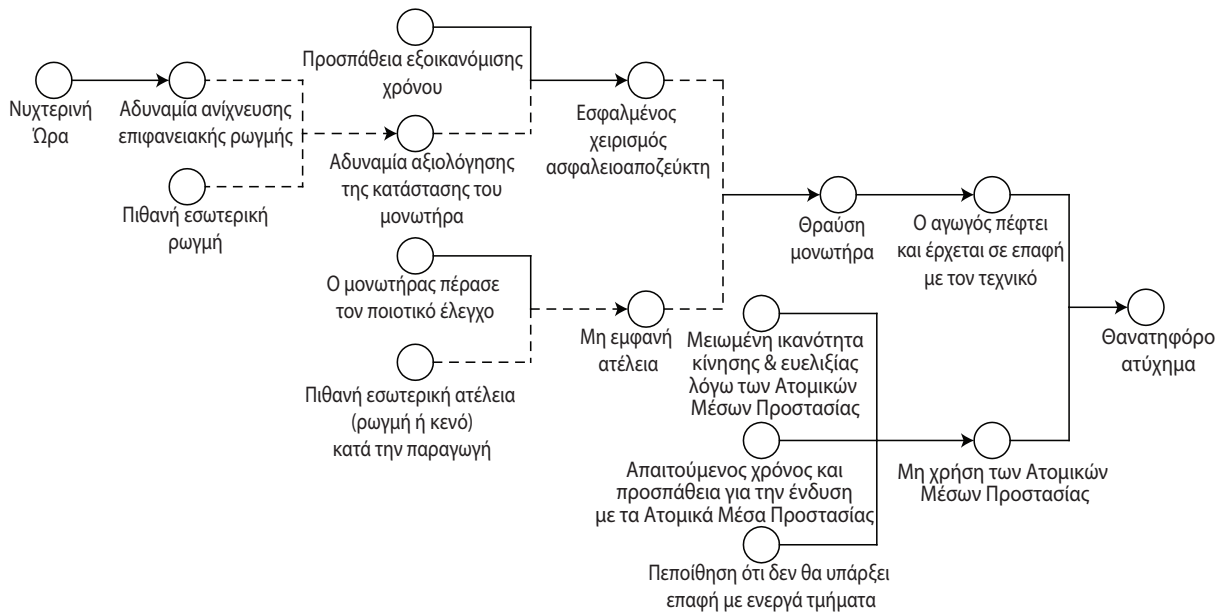
Το χτύπημα στο κάτω μέρος του συστήματος μανδάλωσης προκάλεσε το σπάσιμο του μονωτήρα σε δύο μέρη με αποτέλεσμα να απελευθερωθεί ο αγωγός μέσης τάσης και να πέσει προς τα κάτω. Καθώς ο εργαζόμενος δεν φορούσε την στολή εργασίας, η επαφή του αγωγού με το κάτω άκρο του τεχνικού, αποδείχτηκε μοιραία.

Η καταστροφή του μονωτήρα λόγω της μηχανικής καταπόνησης του που δημιουργείται από τον σωστό και προβλεπόμενο χειρισμό (με την χρήση ακοντίου) δεν μπορεί να θεωρηθεί πολύ πιθανή, καθώς τόσο οι μονωτήρες των ασφαλειοαποζευκτών, όσο και ολόκληρο το σύστημα στήριξης και μανδάλωσης, ελέγχονται με την δοκιμή μηχανικής αντοχής, στο σύνολο μιας παραγγελίας αλλά και στην τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.1. Το ίδιο ισχύει για όλους τους διακόπτες, που χρησιμοποιούνται γενικά στο δίκτυο μεταφοράς και διανομής [7, 19, 52, 61].

Η καταστροφή του μονωτήρα θα μπορούσε βέβαια να οφείλεται και σε κάποια εσωτερική ρωγμή ή σε κάποιο εσωτερικό κενό της πορσελάνης. Η ύπαρξη μιας τέτοιας εσωτερικής ατέλειας θα μπορούσε να μειώσει αισθητά την μηχανική αντοχή του μονωτήρα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε ότι αφορά στην μηχανική αντοχή της πορσελάνης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [18], οι εσωτερικές ατέλειες είναι πολύ πιο σημαντικές από τις επιφανειακές. Κάτι τέτοιο πάντως δεν διαπιστώθηκε στις δοκιμές τύπου και σειράς είχε υποστεί ο ασφαλειοαποζευκτήρας και ο μονωτήρας του, γιατί διαφορετικά θα είχε αποσυρθεί. Σε κάθε περίπτωση το συνεργείο δεν ήταν σε θέση να γνωρίζει την πραγματική κατάσταση του μονωτήρα τόσο εσωτερικά όσο και εξωτερικά.

Στο σχήμα 2.6 φαίνεται το απλοποιημένο διάγραμμα σύμφωνα με την μέθοδο ανάλυσης συμπτωματικών παραγόντων ("Incidental factor analysis") [12] όπως περιγράφεται στη παράγραφο 1.3.6. Οι διακεκομμένες γραμμές χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν τις σχέσεις που είναι πιθανές να έχουν συμβεί. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θραύση του μονωτήρα δεν θα μπορούσε να προβλεφθεί από το συνεργείο στα πλαίσια της διαδικασίας αποκατάστασης της βλάβης. Η θραύση όμως θα μπορούσε ίσως να έχει αποφευχθεί με την εφαρμογή της προβλεπόμενης τεχνικής μανδάλωσης του ασφαλειοαποζευκτή, όπως αυτή περιγράφηκε παραπάνω. Η χρήση πάντως των ατομικών μέσων προστασίας θα μπορούσε πιθανότατα να έχει αποτρέψει την δυσάρεστη κατάληξη του ατυχήματος και σε κάθε περίπτωση να έχει προστατέψει τον τεχνικό.

Όπως προκύπτει από έρευνες πάνω στο θέμα της σωστής εφαρμογής ατομικών μέσων προστασίας και ασφαλών εργασιακών πρακτικών, πολλά θανατηφόρα ατυχήματα θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί αν οι εργαζόμενοι είχαν εφαρμόσει τα προβλεπόμενα μέσα προστασίας. Συγκεκριμένα σε μια έρευνα 255 θανατηφόρων ατυχημάτων από ηλεκτροπληξία, προέκυψε ότι από τα 41 ατυχήματα που οφείλονταν σε επαφή με



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ατυχήματος

ηλεκτροφόρους αγωγούς διανομής, τα 25 θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί ή έστω μετριαστεί αν τα θύματα είχαν κάνει χρήση των ατομικών μέσων προστασίας τους και τουλάχιστον 8 ακόμα ατυχήματα θα είχαν αποφευχθεί αν είχαν εφαρμοστεί ασφαλείς και προβλεπόμενες εργασιακές τεχνικές [86].

Επίσης από την έρευνα των Williamson και Feyer για εργασιακά θανατηφόρα ατυχήματα λόγω ηλεκτρικού ρεύματος, που συνέβησαν στην Αυστραλία στην περίοδο 1982 με 1994, προκύπτει ότι η εφαρμογή μη ασφαλών τεχνικών ήταν ο πιο συχνός παράγοντας πρόκλησης αυτών [36]. Αντίστοιχα, σύμφωνα με τους Garavan και O'Brien η πλειοψηφία των εργατικών ατυχημάτων οφείλεται σε μη ασφαλείς εργασιακές τεχνικές που εφαρμόζονται, παρά στις μη ασφαλείς συνθήκες εργασίας [43]. Στην υπό εξέταση π.χ. περίπτωση, οι συνθήκες εργασίας θα ήταν περισσότερο ασφαλείς αν είχε προηγηθεί της αποκατάστασης της βλάβης διακοπή ρεύματος από το προτεταγμένο μέσο προστασίας του ασφαλειοαποζεύκτη του εν λόγω υποσταθμού, κάτι όμως που δυστυχώς σπανίως εφαρμόζεται στην πράξη προς αποφυγή διακοπών ρεύματος σε ευρύτερες περιοχές του δικτύου από εκείνη του ατυχήματος.

2.2.5 Θερμική συμπεριφορά του ασφαλειοαποζεύκτη υπό κανονικές συνθήκες χειρισμού

Όταν η μανδάλωση του ασφαλειοαποζεύκτη γίνεται με τον προβλεπόμενο τρόπο, τότε η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται στις επαφές του είναι ελάχιστη, όπως εξηγείται αμέσως παρακάτω. Η ονομαστική θερμική ισχύς P_N και η θερμική ισχύς P_L υπό το μέγιστο ρεύμα I_L της γραμμής που παράγεται στα άκρα της αντίστασης διάβασης

των επαφών του ασφαλειοαποζεύκτη, δίνονται από τις σχέσεις 2.2 και 2.3 αντίστοιχα.

$$P_N = I_N^2 \cdot R = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_N \quad (2.2)$$

$$P_L = I_L^2 \cdot R = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_L \quad (2.3)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμοπερατότητας (σε $W/m^2\text{ }^\circ C$), A η επιφάνεια της ηλεκτρικής επαφής του ασφαλειοαποζεύκτη (σε m^2), $\Delta\vartheta_N$ η ονομαστική διαφορά θερμοκρασίας (σε $^\circ C$) και $\Delta\vartheta_L$ η διαφορά θερμοκρασίας ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος υπό το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας I_L που προκαλείται στις εν λόγω επαφές (σε $^\circ C$). Από τις σχέσεις 2.2 και 2.3 ισχύει:

$$\frac{I_N^2}{I_L^2} = \frac{\Delta\vartheta_N}{\Delta\vartheta_L} \quad (2.4)$$

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υποσταθμού που εξετάζεται στην προκειμένη περίπτωση είναι πολύ συνηθισμένα στην Ελλάδα (50 kVA 20kV/400V) και ο υπολογισμός του μέγιστου ρεύματος λειτουργίας I_L δίνεται από την σχέση 2.5.

$$I_L = \frac{P_L}{U \cdot \sqrt{3}} = \frac{50 \cdot V \cdot A}{20 \cdot k \cdot V \cdot 1,732} = 1,44 \cdot A \quad (2.5)$$

Λαμβάνοντας την ονομαστική διαφορά θερμοκρασίας ίση με την συνήθη τιμή [61] των $55^\circ C$ περίπου και το ονομαστικό ρεύμα του ασφαλειοαποζεύκτη ίσο με την μέγιστη τιμή των 100 A, τότε από τις σχέσεις 2.4 και 2.5 ισχύει:

$$\Delta\vartheta_L = \frac{I_L^2 \cdot \Delta\vartheta_N}{I_N^2} = \frac{1,44^2 \cdot A^2 \cdot 55^\circ C}{100^2 \cdot A^2} = 0,01^\circ C \quad (2.6)$$

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι στην περίπτωση που ένας ασφαλειοαποζεύκτης τηρεί τις απαιτήσεις των δοκιμών ποιοτικού ελέγχου, τότε η διαφορά θερμοκρασίας ($\Delta\vartheta_L$) που αναπτύσσεται είναι πολύ μικρή και επομένως όταν γίνεται σωστός χειρισμός μανδάλωσης, δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να προκληθούν τήγματα με κίνδυνο δημιουργίας πυρκαγιάς.

Στην περίπτωση όμως λανθασμένου χειρισμού ασφάλισης με χτύπημα του ασφαλειοαποζεύκτη στο κάτω μέρος, τότε είναι πιθανόν η μανδάλωση να μην επιτευχθεί πλήρως και η επαφή να είναι χαλαρή. Έτσι όμως το αποτέλεσμα θα ήταν να αυξηθεί σημαντικά η αντίσταση διάβασης και επομένως και η διαφορά θερμοκρασίας, με κίνδυνο να δημιουργηθούν τήγματα μετάλλου με επακόλουθο να συντρέχει κίνδυνος πυρκαγιάς αν το περιβάλλον αποτελείται από εύφλεκτα υλικά [65, 102].

2.2.6 Σχόλια και Προτάσεις

Ο εναέριος υποσταθμός στον οποίο έγινε το ατύχημα είναι ένας συνήθης τυποποιημένος υποσταθμός υποβιβασμού τάσης που συναντάται σε πολλά μέρη σε όλη την Ελλάδα. Από την χρονική εξέλιξη των γεγονότων προκύπτει ότι ο εν λόγω υποσταθμός λειτουργούσε επί σειρά ετών χωρίς προβλήματα.

Η διάταξη του υποσταθμού τηρούσε όλες τις προδιαγραφές όπως αυτές προβλέπονται στις τεχνικές οδηγίες της εταιρείας ηλεκτρισμού και συγκεκριμένα τηρούνταν όλες οι αποστάσεις ασφαλείας όπως αυτές περιγράφονται στην τυποποίηση C-2 [14], σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη απόσταση της βάσης του μετασχηματιστή από το πεζοδρόμιο πρέπει να είναι 3,60 μ και από το δρόμο 4,60 μ. Έτσι στην συγκεκριμένη περίπτωση οι εν λόγω αποστάσεις ήταν αρκετά μεγαλύτερες, αν και δεν έπαιξαν κάποιο ρόλο στην εξέλιξη των εργασιών και στην πρόκληση του θανατηφόρου ατυχήματος.

Η βλάβη που προέκυψε λόγω των καμένων ασφαλειών μέσης τάσης, είναι ένα επίσης συνηθισμένο περιστατικό που καλείται να αντιμετωπίσει πολλές φορές κάθε συνεργείο δημόσιας ή ιδιωτικής εταιρείας ηλεκτρισμού. Όπως διαπιστώθηκε στην περιοχή του υποσταθμού δεν υπήρχαν αντίξοες συνθήκες ούτε παρουσιάστηκε κάτι ασυνήθιστο που θα μπορούσε να δυσκολέψει την εργασία των τεχνικών.

Οι τεχνικοί που απαρτίζουν ένα συνεργείο εταιρείας ηλεκτρισμού είναι εργαζόμενοι που έχουν λάβει την απαραίτητη εκπαίδευση και διαθέτουν την απαιτούμενη εμπειρία ώστε να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που παρουσιάζονται στο δίκτυο. Επίσης για την αντιμετώπιση κάθε τεχνικού προβλήματος υφίσταται συγκεκριμένη ακολουθία ενεργειών, σύμφωνα με τις οδηγίες της εταιρείας ηλεκτρισμού, ώστε να επιτυγχάνεται η γρηγορότερη και ασφαλέστερη ροή εργασίας.

Η αντικατάσταση των τηκτών σε ασφαλειοαποζεύκτες γίνεται με την εγκατάσταση υπό τάση όπου οι τεχνικοί διαθέτουν όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό για τους χειρισμούς και την προστασία τους (κατάλληλα γάντια, ακόντιο χειρισμού των ασφαλειοαποζευκτών, φόρμες εργασίας και κατάλληλα υποδήματα εργασίας κλπ). Είναι ευνόητο ότι τέτοιου είδους εργασίες γίνονται υπό τάση, ώστε να μην σταματάει η ηλεκτροδότηση μιας περιοχής λόγω απλών εργασιών συντήρησης.

Ο τεχνικός αναρριχήθηκε από την σωστή πλευρά (δεξιά κολώνα) αφού αφενός από αυτή την πλευρά ήταν πιο κοντά στις φάσεις του μετασχηματιστή που είχαν λείψει τα τηκτά των ασφαλειών, αφετέρου από την αριστερή πλευρά ήταν αναρτημένο το ασφαλειοκιβώτιο.

Από όλα τα παραπάνω είναι φανερό ότι ακριβώς επειδή η βλάβη που διαπιστώθηκε στο δίκτυο ήταν μια συνηθισμένη περίπτωση (και το συνεργείο την είχε αντιμετωπίσει πολλές φορές στο παρελθόν), δεν έδωσε ο παθών την απαραίτητη προσοχή στην

τήρηση της προγραμματισμένης διαδικασίας, δεν χρησιμοποίησε όλα τα μέσα ατομικής προστασίας που διέθετε και υποεκτίμησε την σοβαρότητα του κινδύνου που διέπει κάθε εργασία η οποία γίνεται υπό τάση. Έτσι μια εργασία ρουτίνας αποδείχτηκε μοιραία.

Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοια ατυχήματα στο μέλλον, θα πρέπει να τηρούνται ορισμένοι βασικοί κανόνες εργασίας όπως:

- να γίνεται χρήση των ατομικών μέσων προστασίας (κατάλληλα παπούτσια εργασίας, φόρμες κλπ.)
- να ακολουθούνται αυστηρά οι ρουτίνες εργασίας όπως αυτές προδιαγράφονται από τους κανονισμούς της εταιρείας ηλεκτρισμού

Για να διασφαλιστεί η πιστή εφαρμογή των παραπάνω κανόνων θα πρέπει:

- να γίνονται τυχαίοι έλεγχοι σε συνεργεία σε διάφορες ώρες της ημέρας για την σωστή εφαρμογή των ρουτίνων εργασίας
- σε περίπτωση παραλήψεων να γίνεται υποχρεωτική παρακολούθηση επαναληπτικής εκπαίδευσης και να υπάρχουν κυρώσεις προς συμμόρφωση
- να επαλαμβάνονται σεμινάρια εκπαίδευσης στους τεχνικούς που εργάζονται στο δίκτυο, όπου θα μελετώνται πραγματικά ατυχήματα και θα αναλύονται οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτά (το 82,2% των θυμάτων των θανατηφόρων εργασιακών ατυχημάτων, δεν είχαν λάβει εκπαίδευση στην Ασφάλεια και Υγιεινή στην εργασία [86])

Ακόμα προκειμένου να αποφευχθούν αντίστοιχα ατυχήματα στο μέλλον θα πρέπει:

- όλες οι δημόσιες και ιδιωτικές επιχειρήσεις ηλεκτροδότησης να προβούν σε σταδιακή αντικατάσταση των μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών με αυτόματους διακόπτες με φλογοκρύπτη, όπου ο χειρισμός τους θα είναι δυνατός και από το έδαφος μέσω μηχανισμού ασφάλισης.
- να λαμβάνεται σοβαρά η σωματική και ψυχική κατάσταση του τεχνικού που εργάζεται κυρίως σε απογευματινή και βραδυνή βάρδια, ώστε να μην του αναθέτεται επικίνδυνη εργασία σε περιβάλλον υπό τάση, όταν η κατάστασή του δεν του το επιτρέπει. Όπως έχει διαπιστωθεί, όταν οι εργαζόμενοι είναι κουρασμένοι και με λίγο ύπνο, δεν ακολουθούν τις προβλεπόμενες διαδικασίες ασφάλειας [81].
- θα έπρεπε ίσως να επανεξεταστούν οι εργασιακές συνθήκες των τεχνικών που εκτελούν επικίνδυνες εργασίες (διάρκεια βάρδιας, συχνότητα κλπ.).
- να γίνεται συνεχής ενημέρωση των εργαζομένων από τον Τεχνικό Ασφαλείας για τους κινδύνους στην εργασία και ειδικά στους τεχνικούς που εργάζονται σε δίχτυα διανομής και μεταφοράς. Έχει διαπιστωθεί ότι οι εργαζόμενοι νιώθουν πιο

άνετα με προϊσταμένους που ενδιαφέρονται για την ασφάλειά τους [81]. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί επίσης στους πεπειραμένους, μεγαλύτερους σε ηλικία εργαζομένους, οι οποίοι είναι πιθανό να υποτιμούν τους εργασιακούς κινδύνους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι έχουν εκτελέσει την ίδια εργασία πολλές φορές χωρίς να έχει συμβεί κάποιο ατύχημα, με αποτέλεσμα να γίνονται λιγότερο ευαισθητοποιημένοι στον κίνδυνο. Η πείρα μπορεί να οδηγήσει σε απόρριψη των αυστηρών εργασιακών διαδικασιών [81], και μπορεί να οδηγήσει σε απροσεξίες, ενώ παράλληλα αυξάνει την πεποίθηση των εργαζομένων ότι μπορούν να αντιμετωπίσουν οποιαδήποτε κατάσταση [50].

- Θα μπορούσε επίσης να διεξαχθεί μια έρευνα που θα αφορούσε τα ατομικά μέσα προστασίας, όπου οι εργαζόμενοι θα έπαιρναν ενεργά μέρος, συνεισφέροντας με την εμπειρία τους στην επιλογή και δοκιμή των μέσων αυτών. Αυτό θα μπορούσε να ευαισθητοποιήσει τους εργαζόμενους για την σημασία των ατομικών μέσων προστασίας και να τους παροτρύνει να τα χρησιμοποιούν, μειώνοντας την δυσφορία τους για το κόστος που έχουν στην άνεση [27].

Αν και η ολοκληρωτική εξάλειψη των εργασιακών ατυχημάτων ίσως να μην είναι εφικτή λόγω του αστάθμητου ανθρώπινου παράγοντα, η τήρηση των παραπάνω βασικών αρχών είναι δυνατό να επιφέρει αισθητή μείωση των θανατηφόρων ατυχημάτων με άμεσα οφέλη στην ζωή, την εργασία και την οικονομία.

2.3 Μέτρα προστασίας από κινδύνους σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών

Η προστασία της ηλεκτρικής εγκατάστασης μιας ιδιωτικής περιουσίας αφορά αποκλειστικά τον ίδιο τον καταναλωτή, ο οποίος πρέπει να λάβει όλα τα απαραίτητα μέτρα για να εξασφαλίσει την σωστή και ασφαλή λειτουργία της. Εγκαταστάσεις όμως με ελλιπή προστασία σε συνδυασμό με ατυχή γεγονότα όπως η αποκοπή αγωγού φάσεως ή ουδετέρου έχουν οδηγήσει σε θανατηφόρα ατυχήματα και σε καταστροφή περιουσίας. Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται έμφαση σε τέτοια γεγονότα και γίνεται μια προσπάθεια να δοθούν λύσεις για την κατά το δυνατό αποφυγή παρόμοιων ατυχημάτων.

2.3.1 Εισαγωγή

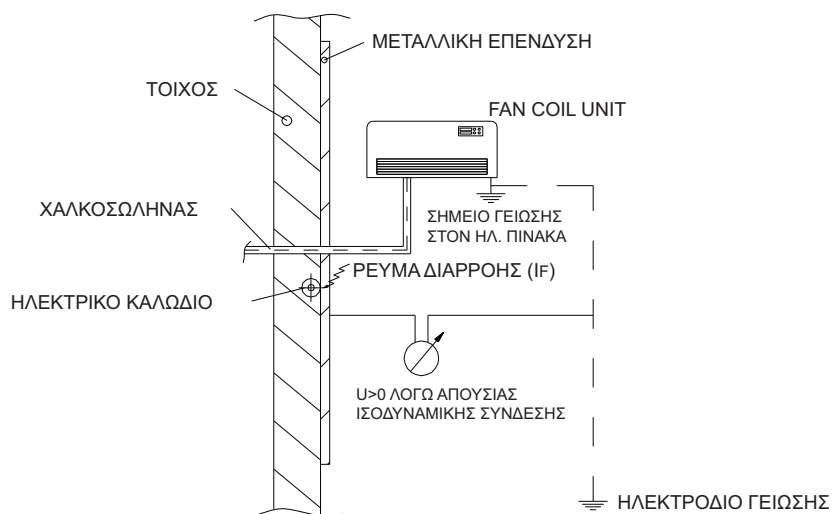
Σύμφωνα με την Ελληνική Νομοθεσία, κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση πρέπει να συνοδεύεται από υπεύθυνη δήλωση εγκαταστάτη ηλεκτρολόγου με την οποία πιστοποιείται η σωστή εγκατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου και η τοποθέτηση όλων των απαιτούμενων μέσων προστασίας. Από το έτος 2006 μάλιστα έγινε υποχρεωτική σε κάθε νέα εγκατάσταση, η τοποθέτηση ηλεκτρονόμου διαφυγής έντασης και η θεμελιωτική γείωση, που βελτιώνει σημαντικά την ασφάλεια ενός ηλεκτρολογικού δικτύου.

Επειδή όμως ο καταναλωτής συνήθως δεν διαθέτει τις απαραίτητες τεχνικές γνώσεις (ώστε να ελέγξει ο ίδιος την ηλεκτρική του εγκατάσταση) και επειδή παλαιότερα δεν ήταν υποχρεωτική η τοποθέτηση των προαναφερόμενων μέσων, υπάρχουν πολλές κτιριακές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις με ελλιπή ηλεκτρολογική προστασία. Έτσι έχει παρατηρηθεί σε αρκετές περιπτώσεις ατυχημάτων, να αποδίδεται ευθύνη στο δίκτυο διανομής και να αγνοείται το γεγονός της ελλειπούς προστασίας της ιδιωτικής ηλεκτρικής εγκατάστασης.

Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί η περίπτωση πρόκλησης πυρκαγιάς σε μονοκατοικία, η οποία προκλήθηκε λόγω διαρροής ρεύματος σε κλιματιστικό διαιρούμενου τύπου, καθώς και η θανατηφόρος ηλεκτροπληξία σε μάνιο γιατί κόπηκε ο ουδέτερος του δικτύου [96]. Τέτοιου είδους ατυχήματα θα μπορούσαν να έχουν αποφευχθεί αν στην εγκατάσταση είχαν προβλεφθεί τα απαιτούμενα μέσα προστασίας όπως αναλύεται παρακάτω.

2.3.2 Πρόκληση πυρκαγιάς σε κλιματιστικό λόγω διαρροής ρεύματος σε συνδυασμό με την ανυπαρξία ισοδυναμικών συνδέσεων

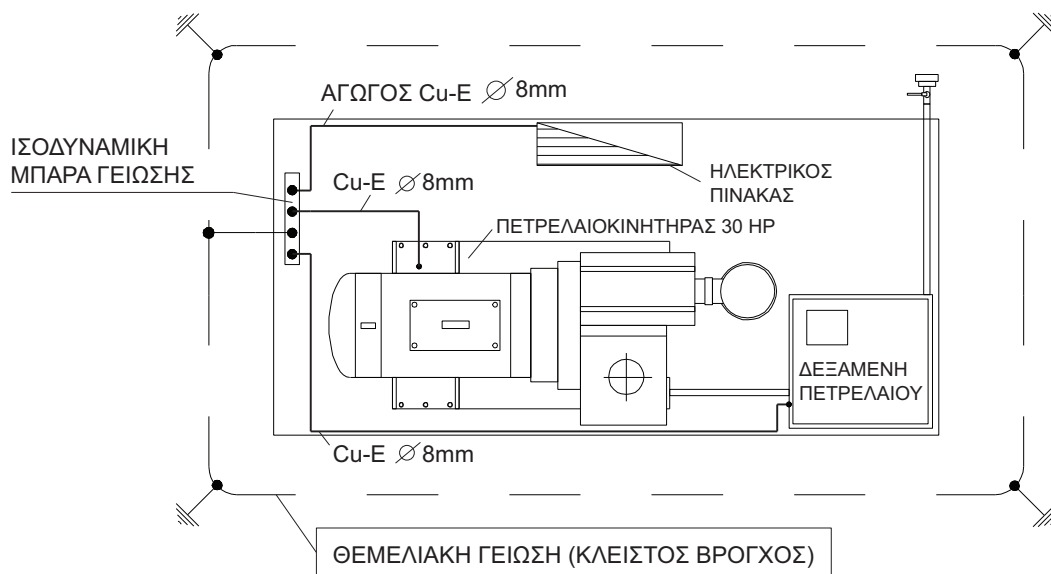
Στην περίπτωση της πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε σε μονοκατοικία διαπιστώθηκε από την έρευνα που έγινε στο χώρο [96], ότι αυτή οφειλόταν σε διαρροή ρεύματος η οποία προκλήθηκε σε κλιματιστικό διαιρούμενου τύπου και στο γεγονός ότι δεν υπήρχαν ισοδυναμικές συνδέσεις στο κύκλωμα γείωσης. Σύμφωνα και με το απλοποιημένο σχήμα 2.7, η διαρροή ρεύματος έγινε σε χαλκοσωλήνα διέλευσης καλωδίου ο οποίος ήταν σε επαφή με την επένδυση τοίχου από γαλβανιζέ λαμαρίνα, η οποία με την σειρά της ήταν σε επαφή με τον χαλκοσωλήνα ενός διαιρούμενου κλιματιστικού.



Σχήμα 2.7: Απλοποιημένο διάγραμμα διαρροής ρεύματος χωρίς ισοδυναμικές συνδέσεις

Επειδή δεν υπήρχαν ισοδυναμικές συνδέσεις η διαρροή ρεύματος προκάλεσε διαφορά δυναμικού στα εμπλεκόμενα μεταλλικά μέρη με αποτέλεσμα να πάρει φωτιά μια πλακέτα του κλιματιστικού, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 2.7.

Οι ισοδυναμικές συνδέσεις είναι απαραίτητες σε κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση διότι προστατεύουν από διαρροές ρεύματος προς τις διάφορες μεταλλικές επιφάνειες όπως το μεταλλικό περίβλημα συσκευών, το δίκτυο νερού, το δίκτυο θέρμανσης, οι μεταλλικές επενδύσεις κλπ. [61]. Για τον λόγο αυτό όλα τα μεταλλικά μέρη ενός κτιρίου, καθώς και τα μεταλλικά μέρη του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού συνδέονται με το ηλεκτρόδιο γείωσης ή την θεμελειακή γείωση. Με αυτό τον τρόπο δεν δημιουργούνται στην περίπτωση διαρροής ρεύματος διαφορές δυναμικού στα μεταλλικά μέρη μιας εγκατάστασης. Ένα τυπικό παράδειγμα ισοδυναμικών συνδέσεων δίνεται στο σχήμα 2.8, όπου όλα τα μεταλλικά μέρη στο χώρο μιας γεννήτριας με πετρελαιοκινητήρα είναι ισοδυναμικά συνδεδεμένα.



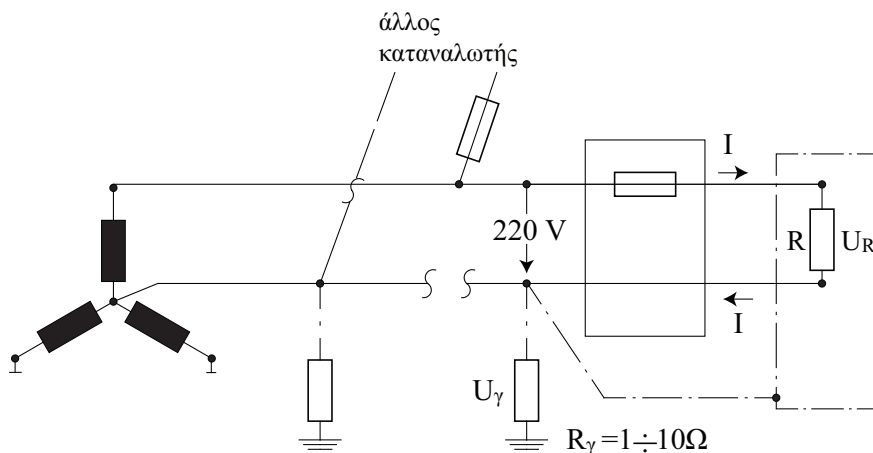
Σχήμα 2.8: Παράδειγμα ισοδυναμικών συνδέσεων στο χώρο μιας γεννήτριας με πετρελαιοκινητήρα

2.3.3 Θανατηφόρος ηλεκτροπληξία σε μπάνιο λόγω αποκοπής του αγωγού του ουδετέρου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης

Στην περίπτωση που αναλύεται ακολούθως, υπήρξε διαρροή ρεύματος προς το υδροδοτικό δίκτυο του κτιρίου γιατί είχε συμβεί αποκοπή του ουδετέρου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης ο οποίος ήταν γειωμένος στον μετρητή της εγκατάστασης. Αποτέλεσμα της εν λόγω διαρροής ήταν η θανατηφόρος ηλεκτροπληξία ενός ατόμου κατά την διάρκεια που έκανε μπάνιο.

Για να γίνει κατανοητή η αιτία του ατυχήματος εξετάζονται στη συνέχεια οι συνέπειες από την αποκοπή του ουδετέρου. Διακρίνει κανείς γενικά τις παρακάτω περιπτώσεις αποκοπής του ουδετέρου.

α) Αποκοπή του ουδετέρου της ΔΕΗ που γειώνεται προ του μετρητή



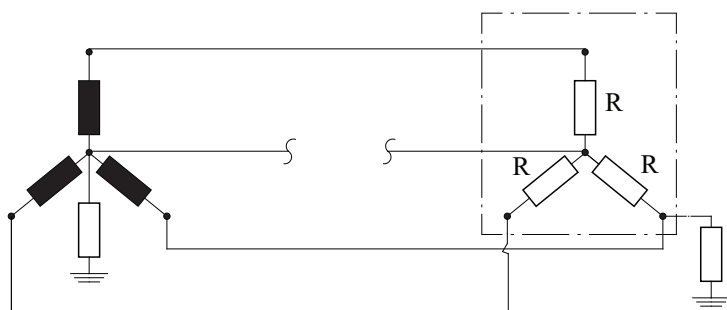
Σχήμα 2.9: Αποκοπή ουδετέρου που γειώνεται προ του μετρητή

Στην συγκεκριμένη περίπτωση συμβαίνει καταμερισμός της τάσης μεταξύ της αντίστασης του φορτίου R και της αντίστασης γείωσης R_γ και τα μεταλλικά μέρη των ηλεκτρικών συσκευών είναι υπό επικίνδυνη τάση. Εν προκειμένω ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$I = \frac{230}{R + R_\gamma} \tag{2.7}$$

$$U_R = I \cdot R \quad \text{και} \quad U_\gamma = I \cdot R_\gamma \tag{2.8}$$

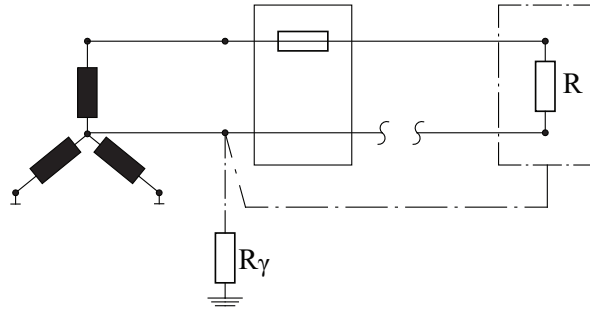
β) Αποκοπή του ουδετέρου της ΔΕΗ που γειώνεται στο μετασχηματιστή



Σχήμα 2.10: Αποκοπή ουδετέρου που γειώνεται στο μετασχηματιστή

Στη περίπτωση αυτή συνδέονται σε σειρά φορτία με επικίνδυνες συνέπειες λόγω υπερθερμάνσεων.

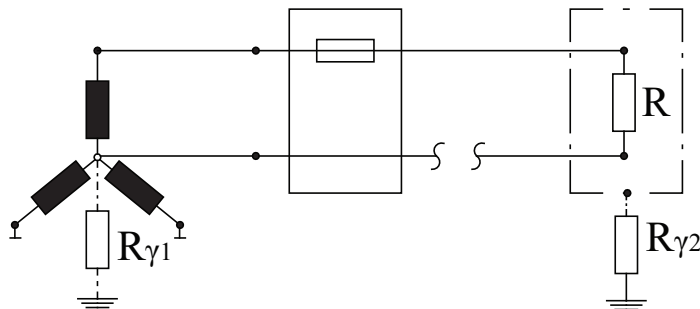
γ) Αποκοπή του ουδετέρου στην εγκατάσταση του καταναλωτή όταν γειώνεται ο ουδέτερος προ του μετρητή



Σχήμα 2.11: Αποκοπή ουδετέρου στην εγκατάσταση του καταναλωτή όταν γειώνεται ο ουδέτερος προ του μετρητή

Στην εν λόγω περίπτωση δε θα υπάρχει τάση στο φορτίο και συνεπώς δεν υφίσταται κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

δ) Αποκοπή του ουδετέρου στην εγκατάσταση του καταναλωτή όταν γειώνεται ο ουδέτερος στον μετασχηματιστή



Σχήμα 2.12: Αποκοπή του ουδετέρου στην εγκατάσταση του καταναλωτή όταν γειώνεται ο ουδέτερος στον μετασχηματιστή

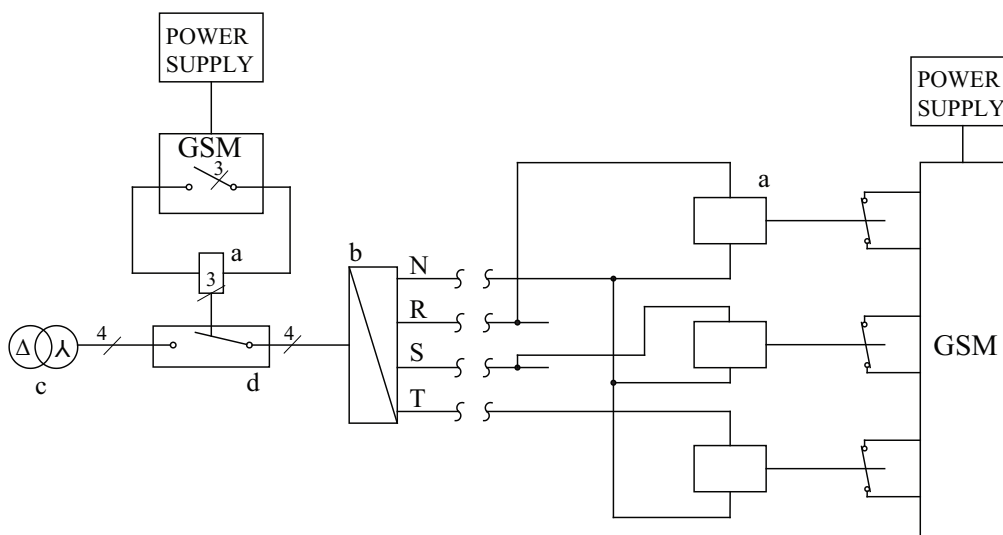
Σε αυτή την περίπτωση δεν θα υπάρχει τάση στο φορτίο και συνεπώς δεν υφίσταται κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω το υπό εξέταση συμβάν εντάσσεται στην (α) περίπτωση. Επομένως το ατύχημα έγινε επειδή συνέβη καταμερισμός της τάσης και τα μεταλλικά μέρη του μπάνιου (σωλήνες νερού, και θερμοσίφωνας) βρέθηκαν υπό επικίνδυνη για τον παθόντα τάση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην βιβλιογραφία δίνονται μέσα προστασίας για τον άνθρωπο και το περιβάλλον λόγω αποκοπής του αγωγού του ουδετέρου ή αγωγού φάσεως [92, 96, 97]. Πράγματι όταν πρόκειται για γραμμή διανομής χαμηλής τάσης, η προστασία βασίζεται σε ένα ηλεκτρονόμο 230 V ανά φάση, που διαθέτει μια κλειστή επαφή (Σχήμα 2.13) [92, 96]. Όπως φαίνεται στο σχήμα οι ηλεκτρονόμοι συνδέονται σε διαφορετική φάση ο καθένας και στον ουδέτερο. Οι συνδέσεις αυτές πρέπει

να γίνουν στο τελευταίο στήλο της γραμμής.

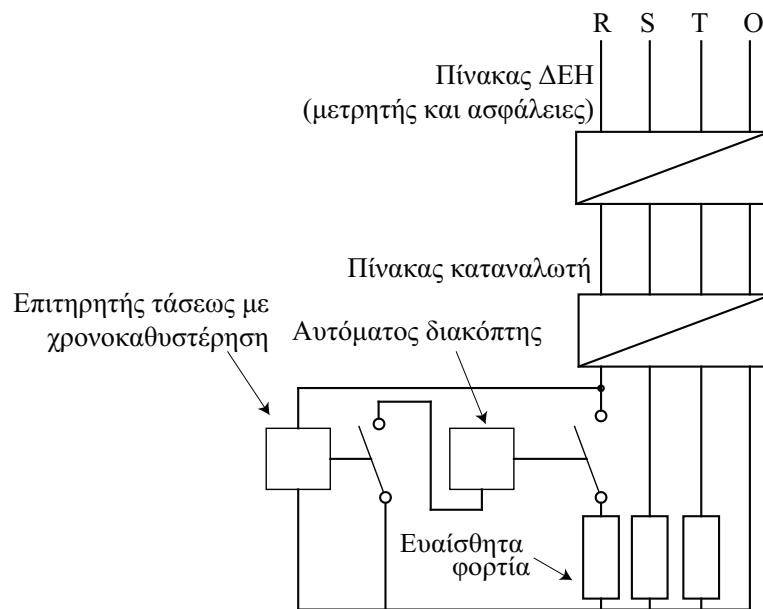
Έτσι, σε περίπτωση αποκοπής ενός αγωγού (σε οποιοδήποτε σημείο του) ο αντίστοιχος ηλεκτρονόμος δεν θα έχει τάση και γι' αυτό θα κλείσει η επαφή του, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση ενός συστήματος GSM, που θέτει εκτός λειτουργίας έναν αυτόματο γενικό διακόπτη παροχής τάσης προς τον πίνακα χαμηλής τάσης και ειδοποιεί τους τεχνικούς υπηρεσίας μέσω άμεσης κλήσης στο κέντρο ελέγχου. Η τοποθεσία του σφάλματος μπορεί να καθορισθεί μέσω του αριθμού της κάρτας SIM που αντιστοιχεί σε κάθε σύστημα. Το σύστημα GSM τροφοδοτείται από μπαταρία επαναφορτιζόμενη από το δίκτυο. Συνεπώς, απαιτείται περιοδική συντήρηση και αντικατάσταση της μπαταρίας.

Ο προαναφερόμενος διακόπτης μπορεί να εγκατασταθεί σε μεταλλικό κιβώτιο συναρμολογημένο πάνω στην οροφή του πίνακα ή στο στήλο. Σημειώνεται ότι συστήματα GSM είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, τα οποία βρίσκουν ήδη εφαρμογές σε άλλες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Εννοείται ότι το σύστημα GSM, που θα χρησιμοποιηθεί, πρέπει να παρέχει δυνατότητα απενεργοποίησής του σε εργασίες συντήρησης, σε αποκαταστάσεις βλαβών και εργασίες σύνδεσης νέων παροχών.



Σχήμα 2.13: Ενεργοποίηση συστήματος GSM σε περίπτωση αποκοπής αγωγού a: Ηλεκτρονόμος, b: Πίνακας διανομής χαμηλής τάσης c: Μετασχηματιστής 20kV/400V, d: Αυτόματος διακόπτης

Τα προαναφερόμενα αφορούν στην προστασία που μπορεί να γίνει σε περίπτωση αποκοπής αγωγού του δικτύου. Η προστασία όμως στην εγκατάσταση του καταναλωτή από αποκοπή του αγωγού του ουδετέρου ή αποκοπή αγωγού (ή αγωγών) φάσεως στη γραμμή διανομής χαμηλής τάσης, μπορεί και πρέπει να γίνεται και με δικά του μέσα, όπως εξ άλλου προβλέπεται από το Νόμο (βλ. ΦΕΚ 470/β/5-3-2004 που επικυρώνει το πρότυπο ΕΛΟΤ HD 384/2002). Ακολούθως εξετάζεται το θέμα αυτό.



Σχήμα 2.14: Κύκλωμα ηλεκτρονόμου επιτήρησης τάσης με χρονοκαθυστέρηση για προστασία των ευαίσθητων μηχανημάτων του καταναλωτή από την αποκοπή του αγωγού του ουδετέρου της γραμμής της ΔΕΗ ή από την αποκοπή αγωγού (ή αγωγών) φάσεως

Στο σχήμα 2.14 δίνεται ένα παράδειγμα κυκλώματος που προστατεύει τα ευαίσθητα φορτία του καταναλωτή (όπως κλιματιστικά, ηλεκτρονικές συσκευές κλπ.) τόσο από την αποκοπή του ουδετέρου της γραμμής της ΔΕΗ, όσο και από την αποκοπή αγωγού (ή αγωγών) φάσεως. Αυτό επιτυγχάνεται με έναν ηλεκτρονόμο επιτήρησης τάσης, ο οποίος διαθέτει χρονική καθυστέρηση. Ο εν λόγω εξοπλισμός πρέπει να εγκαθίσταται (ή να συνδέεται) στον πίνακα του καταναλωτή μετά την ασφάλεια της γραμμής προς τον ευαίσθητο εξοπλισμό.



Σχήμα 2.15: Διάταξη προστασίας μέσω επιτηρητή τάσης

Στο σχήμα 2.15 φαίνεται μια πειραματική διάταξη προστασίας μέσω επιτηρητή τάσης που έχει γίνει στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια των παραδόσεων του μαθήματος των κτιριακών και βιομηχανικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, η οποία ανταποκρίνεται στην προστασία της εγκατάστασης του καταναλωτή από αποκοπή αγωγού και από διακυμάνσεις τάσης [96, 97].

2.3.4 Μέτρα πρόληψης και προστασίας

Όπως φαίνεται από την ανάλυση των παραπάνω ατυχημάτων η ύπαρξη ισοδυναμικών συνδέσεων σε κάθε ηλεκτρολογική εγκατάσταση είναι άκρως απαραίτητη όπως άλλωστε προβλέπεται στον κανονισμό περί ηλεκτρικών εγκαταστάσεων που είναι Νόμος του κράτους. Στην περίπτωση που διαπιστώνονται ελλείψεις στις ισοδυναμικές συνδέσεις τότε θα πρέπει να εφαρμόζονται συμπληρωματικές. Η συμπληρωματική ισοδυναμική σύνδεση γίνεται με ηλεκτρική σύνδεση όλων των μεταλλικών μερών (συνήθως με αγωγούς 4 mm²) που μπορούν να έλθουν σε επαφή με το ανθρώπινο σώμα. Φυσικά σε κάθε ισοδυναμική σύνδεση θα πρέπει η αντίσταση της σύνδεσης να είναι αρκετά μικρή (μερικά έστω mΩ) ώστε η πτώση τάσης σε αυτή να είναι άνευ σημασίας.

Εκτός από την τοποθέτηση ισοδυναμικών συνδέσεων θα πρέπει σε κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση να γίνεται χρήση ηλεκτρονόμου διαφυγής έντασης. Ο ηλεκτρονόμος διαφυγής έντασης παρακολουθεί το ρεύμα διαρροής ως προς τη γη. Στην περίπτωση που αυτό υπερβεί μια τιμή τότε ανοίγει το κύκλωμα στις φάσεις και στον ουδέτερο σε 0,2 sec περίπου [61]. Αν και η τοποθέτηση του ηλεκτρονόμου διαφυγής έντασης είναι υποχρεωτική πλέον από το 2006 στις νέες εγκαταστάσεις, θα πρέπει να τοποθετηθεί και στις ήδη υπάρχουσες.

Επίσης προϋπόθεση για την σωστή και ασφαλή λειτουργία μιας ηλεκτρολογικής εγκατάστασης είναι η τοποθέτηση αξιόπιστων ηλεκτρολογικών υλικών και συσκευών, οι οποίες έχουν υποστεί τις απαιτούμενες δοκιμές τύπου και σειράς, όπως έχει αναλυτικά περιγραφεί στη παράγραφο 1.1.

Όσον αφορά στους κινδύνους από την αποκοπή του ουδετέρου αγωγού του δικτύου διανομής, θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν είναι ιδιαίτερα συχνό φαινόμενο, λόγω της ενισχυμένης κατασκευής που εφαρμόζεται στο δίκτυο ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες της περιοχής. Έχουν παρατηρηθεί όμως περιπτώσεις, όπου προκλήθηκε αποκοπή αγωγών φάσεων ή του ουδετέρου λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων ή λόγω φθορών που προέκυψαν από κνηγετικά σκάγια [92]. Το αποτέλεσμα τέτοιων περιπτώσεων, σε συνδυασμό με την έλλειψη των απαραίτητων μέτρων προστασίας στις εσωτερικές εγκαταστάσεις των καταναλωτών, αλλά και στο δίκτυο, είναι η πρόκληση σοβαρών ατυχημάτων.

2.3.5 Συμπέρασμα

Σε κάθε κτιριακή ηλεκτρική εγκατάσταση θα πρέπει ο ίδιος ο καταναλωτής να παίρνει τα απαιτούμενα μέτρα προκειμένου να διασφαλίζεται η ανθρώπινη ζωή και η ιδιωτική περιουσία. Όμως επειδή ο καταναλωτής δεν έχει τις απαιτούμενες ηλεκτρολογικές γνώσεις, είναι ευθύνη του ηλεκτρολόγου εγκαταστάτη να προβλέπει ότι απαιτείται για την προστασία της ανθρώπινης ζωής και περιουσίας. Σε πολλές περιπτώσεις όμως η προστασία των ηλεκτρολογικών δικτύων έχει σοβαρές ελλείψεις με αποτέλεσμα να συμβαίνουν σοβαρά ατυχήματα που θα μπορούσαν ίσως να έχουν αποφευχθεί. Η τοποθέτηση ισοδυναμικών συνδέσεων είναι άκρως απαραίτητη και υποχρεωτική από το Νόμο. Με τις ισοδυναμικές συνδέσεις αποφεύγεται η εμφάνιση επικίνδυνων τάσεων στα μεταλλικά μέρη (περιβλήματα ηλεκτρικών συσκευών, μεταλλικές σωλήνες ύδρευσης και θέρμανσης, μεταλλικές επενδύσεις τοίχων κλπ.) οι οποίες θα μπορούσαν να εκδηλωθούν λόγω διαρροών ρεύματος.

Ένα επίσης πολύ σημαντικό μέτρο προστασίας του ηλεκτρολογικού δικτύου σε ένα κτίριο είναι η ύπαρξη ηλεκτρονόμου διαφυγής, η τοποθέτηση του οποίου είναι ήδη υποχρεωτική από το 2006 σε κάθε νέα εγκατάσταση. Η τοποθέτησή όμως του εν λόγω εξοπλισμού θα πρέπει να επεκταθεί και στα ήδη υφιστάμενα παλαιότερα δίκτυα.

Ο καταναλωτής θα πρέπει επίσης να ενημερώνεται για τους κινδύνους που εγκυμονούν στην εγκατάστασή του, ώστε να αποφεύγει την χρήση αναξιόπιστων συσκευών άγνωστης προέλευσης, οι οποίες δεν είναι βέβαιο ότι έχουν υποστεί τις απαιτούμενες δοκιμές ποιοτικού ελέγχου (βλ. παρ. 1.1).

Τέλος θα πρέπει να εφαρμόζονται μέσα προστασίας έναντι αποκοπής αγωγών τόσο από την εταιρεία ηλεκτρισμού στο δίκτυο [92], όσο και από τον ηλεκτρολόγο εγκαταστάτη στην ηλεκτρική εγκατάσταση του καταναλωτή [97].

2.4 Παράδειγμα μηχανικής συμπεριφοράς εναέριων γραμμών μεταφοράς και διανομής

Στο παράδειγμα που ακολουθεί εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά ενός εναέριου αγωγού του δικτύου μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, σύμφωνα με τα αναφερόμενα στην παράγραφο 1.2.8.

2.4.1 Εισαγωγή

Στην περίπτωση που εξετάζεται παρακάτω, ο αγωγός του δικτύου είναι τύπου ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού 95mm^2 , ο οποίος αποτελείται από επτά κλώνους χάλυβα

διαμέτρου $d_{St} = 2,72mm^2$ συνολικής διατομής $A_{St} = 24,7mm^2$ και από εικοσιέξι κλώνους αλουμινίου διαμέτρου $d_{Al} = 2,12mm^2$ συνολικής διατομής $A_{Al} = 151,0mm^2$. Το μέτρο ελαστικότητας για τον χάλυβα είναι $E_{St} = 210000N/mm^2$ ενώ για το αλουμίνιο είναι $E_{Al} = 70000N/mm^2$. Σύμφωνα με τον πίνακα $CS - 30$ των τυποποιημένων κατασκευών της ΔΕΗ, σε κανονική επιφόρτιση και για βασικό άνοιγμα $75m$ σε θερμοκρασία $10^\circ C$, η δύναμη τάνησης που εφαρμόζεται στον αγωγό είναι $Z=1284kg = 12840N$ και το βέλος κάμψης είναι $f = 0,33m$. Επίσης το φορτίο θραύσης, για τον εν λόγω αγωγό είναι $5685kg$ σύμφωνα με τον πίνακα 1.11.

Τα φορτία που επιδρούν στους αγωγούς της γραμμής είναι το βάρος του αγωγού, η επιστροφή πάγου επί αυτού και η ανεμοπίεση.

2.4.2 Επιφόρτιση αγωγού από το βάρος του, την επιστροφή πάγου και την ανεμοπίεση

Υπολογίζονται διάφοροι συνδυασμοί επιφορτίσεων με τα ακόλουθα δεδομένα:

Βάρος του αγωγού:	$p_1 = 0,602kg/m$
Βάρος του αγωγού με επιστροφή πάγου επί αυτού:	$p_2 = 1,051kg/m$
Επιφόρτιση λόγω ανεμοπίεσης:	$w = 1,034kg/m$
Απόσταση μεταξύ στύλων (οριζόντια)	$l = 75m$
Βέλος κάμψης του αγωγού:	$f = 0,33m$
Εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού:	$Z_{R,d} = 5685kg$

Επιφόρτιση λόγω ιδίου βάρους του αγωγού

$$q_k = \sqrt{p_k^2 + w_k^2} = p_1 = 0,602kg/m \quad (2.9)$$

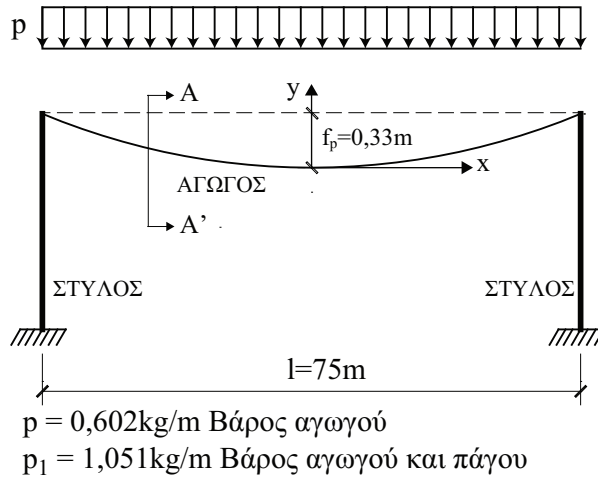
$$\begin{aligned} \max : Z_{T,k} \left(x = \frac{l}{2} \right) &= q \cdot \frac{l}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{l}{f} \right)^2} = \\ &= 0,602 \cdot \frac{75}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{75}{0,33} \right)^2} = 1283,14kg \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\min : Z_{T,k} (x = 0) = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f} = Z_{H,k} = \frac{0,602 \cdot 75^2}{8 \cdot 0,33} = 1282,94kg \quad (2.11)$$

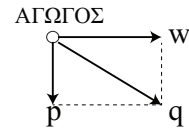
$$Z_{T,d} = 1.3 \cdot \max Z_{T,k} = 1.3 \cdot 1283,14 = 1668,08kg \quad (2.12)$$

$$\frac{Z_{T,d}}{Z_{R,d}} = \frac{1668,08}{5685} = 0,293 \leq 1 \quad \text{Η μηχανική αντοχή επαρκεί} \quad (2.13)$$

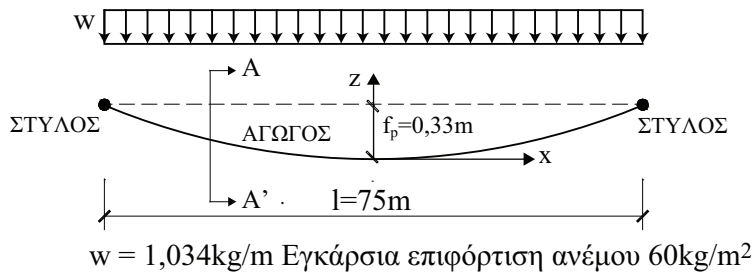
ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ xy: ΒΑΡΟΣ ΑΓΩΓΟΥ



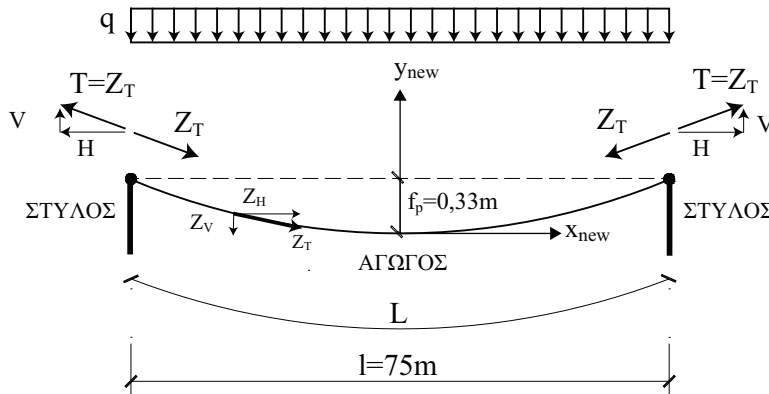
ΤΟΜΗ Α-Α' ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ yz



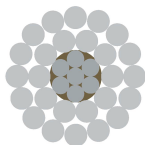
ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ xz: ΑΝΕΜΟΣ



ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ q: (ΒΑΡΟΣ & ΑΝΕΜΟΣ)



ΑΓΩΓΟΣ ACSR 95: 26 ΚΛΩΝΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΜΕ 7 ΚΛΩΝΟΙ ΨΥΧΗ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ



ACSR 95: $\alpha_1 = 0,0000124 \text{ } 1/^\circ\text{C}$

ΚΛΩΝΟΙ ΧΑΛΥΒΑ:

$d_{st} = 2,12 \text{ mm}$, $A_{st} = 3,53 \text{ mm}^2$, $A_{st,ges} = 7 \cdot 3,53 = 24,71 \text{ mm}^2$, $E_{st} = 210000 \text{ N/mm}^2$

ΚΛΩΝΟΙ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ:

$d_{Al} = 2,72 \text{ mm}$, $A_{Al} = 5,81 \text{ mm}^2$, $A_{Al,ges} = 26 \cdot 5,81 = 151,08 \text{ mm}^2$, $E_{Al} = 70000 \text{ N/mm}^2$

Σχήμα 2.16: Παράδειγμα επιφόρτισης αγωγού λόγω βάρους και ανέμου

Επιφόρτιση λόγω ιδίου βάρους του αγωγού με επιστροφή πάγου επί αυτού

$$q_k = \sqrt{p_k^2 + w_k^2} = p_2 = 1,051 \text{ kg/m} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \max : Z_{T,k} \left(x = \frac{l}{2} \right) &= q \cdot \frac{l}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{l}{f} \right)^2} = \\ &= 1,051 \cdot \frac{75}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{75}{0,33} \right)^2} = 2239,69 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\min : Z_{T,k} (x = 0) = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f} = Z_{H,k} = \frac{1,051 \cdot 75^2}{8 \cdot 0,33} = 2239,35 \text{ kg} \quad (2.16)$$

$$Z_{T,d} = 1.3 \cdot \max Z_{T,k} = 1.3 \cdot 2239,69 = 2911,60 \text{ kg} \quad (2.17)$$

$$\frac{Z_{T,d}}{Z_{R,d}} = \frac{2911,60}{5685} = 0,512 \leq 1 \quad \text{Η μηχανική αντοχή επαρκεί} \quad (2.18)$$

Επιφόρτιση λόγω ιδίου βάρους του αγωγού και λόγω ανεμοπίεσης

$$q_k = \sqrt{p_k^2 + w_k^2} = \sqrt{0,602^2 + 1,034^2} = 1,197 \text{ kg/m} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \max : Z_{T,k} \left(x = \frac{l}{2} \right) &= q \cdot \frac{l}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{l}{f} \right)^2} = \\ &= 1,197 \cdot \frac{75}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{75}{0,33} \right)^2} = 2549,84 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\min : Z_{T,k} (x = 0) = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f} = Z_{H,k} = \frac{1,197 \cdot 75^2}{8 \cdot 0,33} = 2549,45 \text{ kg} \quad (2.21)$$

$$Z_{T,d} = 1.3 \cdot \max Z_{T,k} = 1.3 \cdot 2549,84 = 3314,80 \text{ kg} \quad (2.22)$$

$$\frac{Z_{T,d}}{Z_{R,d}} = \frac{3314,80}{5685} = 0,583 \leq 1 \quad \text{Η μηχανική αντοχή επαρκεί} \quad (2.23)$$

2.4.3 Μηχανική καταπόνηση του αγωγού σε περιβάλλον πυρκαγιάς

Στην περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον της γραμμής λαμβάνεται στους υπολογισμούς διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας για την αρχική και την τελική κατάσταση του αγωγού, δηλαδή πριν και κατά την διάρκεια της φωτιάς (Σχέση 1.52). Στην αρχική κατάσταση (πριν την πυρκαγιά) θεωρείται ότι ισχύουν τα ακόλουθα δεδομένα:

Απόσταση μεταξύ στύλων (άνοιγμα) :	$l = 75m$
Γραμμικός συντελεστής διαστολής για αγωγό τύπου ACSR :	$\alpha_t = 0,00001241/grad$
Μέτρο ελαστικότητας χάλυβα :	$E_{St} = 210000N/mm^2$
Μέτρο ελαστικότητας αλουμινίου :	$E_{Al} = 70000N/mm^2$
Θερμοκρασία :	$t_1 = 10^\circ C$
Φόρτιση αγωγού: Ίδιο βάρος :	$p_1 = q_1 = 0,602kg/m$
Εφελκυστική δύναμη αγωγού στο σημείο $x = 0$ (Τάνηση) :	$Z_{T,k} = H = 1282,94kg = 12829,37N$

Για τους υπολογισμούς της παραγράφου 1.2.8 λαμβάνεται για τον αγωγό, ο οποίος αποτελείται από κλώνους αλουμινίου με ψυχή από χάλυβα, ένα μέσο μέτρο ελαστικότητας $E_{av,1}$ και μια μέση διατομής A_{av} σύμφωνα με τις σχέσεις 1.53 έως 1.58.

$$Z = Z_{St} + Z_{Al} = 12829,37N \quad (2.24)$$

$$Z_{Al} = \frac{Z \cdot A_{Al} \cdot E_{Al}}{A_{St} \cdot E_{St} + A_{Al} \cdot E_{Al}}$$

ή με αριθμητική αντικατάσταση:

$$Z_{Al} = \frac{12829,37 \cdot 151,08 \cdot 70000}{24,7 \cdot 210000 + 151,08 \cdot 70000} = 8606,51N \quad (2.25)$$

$$Z_{St} = Z \cdot \left(1 - \frac{A_{Al} \cdot E_{Al}}{A_{St} \cdot E_{St} + A_{Al} \cdot E_{Al}} \right)$$

ή με αριθμητική αντικατάσταση:

$$Z_{St} = 12829,37 \cdot \left(1 - \frac{151,08 \cdot 70000}{24,7 \cdot 210000 + 151,08 \cdot 70000} \right) = 4222,86N \quad (2.26)$$

$$\varepsilon = \frac{Z_{St}}{A_{St} \cdot E_{St}} = \frac{4222,86}{24,7 \cdot 210000} = 0,000813 \quad (2.27)$$

$$E_{av,1} = \frac{\left(\frac{Z_{St}}{A_{St}} + \frac{Z_{Al}}{A_{Al}}\right)}{\varepsilon} = \frac{\left(\frac{4222,86}{24,7} + \frac{8606,51}{151,08}\right)}{0,000813} = 280000 N/mm^2 \quad (2.28)$$

ή

$$E_{av,1} = 28.000.000.000,00 kg/m^2$$

$$A_{av} = \frac{Z}{\left(\frac{Z_{St}}{A_{St}} + \frac{Z_{Al}}{A_{Al}}\right)} = \frac{12829,37}{\left(\frac{4222,86}{24,7} + \frac{8606,51}{151,08}\right)} = 56,30 mm^2 \quad (2.29)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει:

Αρχική εφελκυστική τάση στον αγωγό στο σημείο $x = 0$:

$$\sigma_1 = Z / A_{av} = \frac{12829,37}{0,0000563} = 22.786.939,22 kg/m^2$$

$$\text{και αρχική επιφόρτιση } \gamma_1 = q_1/A_{av} = \frac{0,602}{0,0000563} = 10694,67 kg/m^3$$

Για την μηχανική καταπόνηση του αγωγού σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον αυτού, απαιτούνται οι παρακάτω επιπλέον παράμετροι.

$$\begin{aligned} \text{Επιφόρτιση αγωγού: ίδιο βάρος \& ανεμοπίεση : } q_2 &= 1,197 kg/m \\ \text{Μειωμένο μέτρο ελαστικότητας } E_{av,2} = \frac{E_{av,1}}{3} : E_{av,2} &= 933333,33 N/mm^2 \\ &= 9.333.333.333,33 kg/m^2 \\ \text{Θερμοκρασία : } t_2 &= 600^\circ C \\ \text{Νέα επιφόρτιση } \gamma_2 = q_1/A_{av} = \frac{1,197}{0,0000563} : \gamma_2 &= 21252,41 kg/m^3 \end{aligned}$$

Από την σχέση 1.52 προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_2^3}{9.333.333.333,33} + \sigma_2^2 \cdot \left[\frac{10694,67^2 \cdot 75^2}{24 \cdot 22.786.939,22^2} + 0,0000124 \cdot (600 - 10) \right] \\ - \sigma_2^2 \cdot \frac{22.786.939,22}{28.000.000.000,00} = \frac{21252,41^2 \cdot 75^2}{24} \quad (2.30) \end{aligned}$$

Έτσι η εφελκυστική τάση σ_2 του αγωγό στο σημείο $x = 0$ στην περίπτωση πυρκαγιάς είναι:

$$\sigma_2 = 3.896.784,48 kg/m^2 \quad (2.31)$$

Το βέλος κάμψης του αγωγού στην αρχική κατάσταση είναι σύμφωνα με την σχέση 1.49:

$$f_1 = \frac{l^2 \cdot \gamma_1}{8 \cdot \sigma_1} = \frac{75^2 \cdot 10694,67}{8 \cdot 22.786.939,22} = 0,33m \quad (2.32)$$

Το μήκος αγωγού στην αρχική κατάσταση είναι σύμφωνα με την σχέση 1.33:

$$L_1 = l \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f_1}{l} \right)^2 \right] = 75 \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{0,33}{75} \right)^2 \right] = 75,0004m \quad (2.33)$$

Το βέλος κάμψης του αγωγού στην περίπτωση της πυρκαγιάς υπολογίζεται ως εξής:

$$f_2 = \frac{l^2 \cdot \gamma_1}{8 \cdot \sigma_2} = \frac{75^2 \cdot 21252,41}{8 \cdot 3.896.784,48} = 3,84m \quad (2.34)$$

Το νέο μήκος του αγωγού υπολογίζεται από την σχέση 1.33:

$$L_2 = l \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f_2}{l} \right)^2 \right] = 75 \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{3,84}{75} \right)^2 \right] = 75,523m \quad (2.35)$$

Η διαφορά του βέλους κάμψης λόγω της πυρκαγιάς είναι η κάτωθι:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 3,84 - 0,33 = 3,505m \quad (2.36)$$

Ο ίδιος υπολογισμός γίνεται ακολούθως θεωρώντας ότι τα μέτρα ελαστικότητας παραμένουν ίδια, δηλαδή $E_{av,1} = E_{av,2} = 28.000.000.000,00kg/m^2$, προκειμένου να διαπιστωθεί πόσο επηρεάζουν την επιμήκυνση του αγωγού. Έτσι από την σχέση 1.48 προκύπτει:

$$\sigma_2^3 + \sigma_2^2 \cdot \left[\frac{28.000.000.000 \cdot 10694,67^2 \cdot 75^2}{24 \cdot 22.786.939,22} + 28.000.000.000 \cdot 0,0000124 \cdot (600 - 10) \right] - \sigma_2^2 \cdot 22.786.939,22 = \frac{28.000.000.000 \cdot 21252,41^2 \cdot 75^2}{24} \quad (2.37)$$

Έτσι η εφελκυστική τάση σ_2 του αγωγού στο σημείο $x = 0$ για την περίπτωση πυρκαγιάς είναι:

$$\sigma_2 = 3.976.145,35kg/m^2 \quad (2.38)$$

Το βέλος κάμψης και το μήκος του αγωγού στην αρχική κατάσταση παραμένουν τα ίδια όπως πριν:

$$f_1 = 0,33m \text{ και } L_1 = 75,004m$$

Το βέλος κάμψης του αγωγού στην περίπτωση της πυρκαγιάς υπολογίζεται ως εξής:

$$f_2 = \frac{l^2 \cdot \gamma_1}{8 \cdot \sigma_2} = \frac{75^2 \cdot 21252,41}{8 \cdot 3.976.145,35} = 3,76m \quad (2.39)$$

Το αρχικό μήκος του αγωγού υπολογίζεται ως εξής:

$$L_2 = l \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f_2}{l} \right)^2 \right] = 75 \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{3,76}{75} \right)^2 \right] = 75,502m \quad (2.40)$$

Η διαφορά του βέλους κάμψης λόγω της πυρκαγιάς είναι:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = 3,76 - 0,33 = 3,428m \quad (2.41)$$

Από τον παραπάνω υπολογισμό διαπιστώνεται ότι το βέλος κάμψης του αγωγού λόγω του μειωμένου μέτρου ελαστικότητας εξαιτίας της πυρκαγιάς, αλλάζει ελάχιστα, αφού από $\Delta f = 3,428m$ γίνεται $\Delta f = 3,505m$. Επομένως η μείωση του μέτρου ελαστικότητας δεν είναι ουσιαστική στον υπολογισμό.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η διαφορά θερμοκρασίας είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει το βέλος κάμψης τόσο στην αρχική κατάσταση, όσο και στην κατάσταση σε περίπτωση πυρκαγιάς. Συμπεραίνεται επίσης, ότι η συνεισφορά στο βέλος κάμψης λόγω ίδιου βάρους και ανεμοπίεσης είναι αμελητέα.

2.4.4 Επιφόρτιση λόγω διαφοράς θερμοκρασίας

Ακολούθως υπολογίζεται προσεγγιστικά η επιμήκυνση και το βέλος κάμψης ενός αγωγού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας από $t_1 = 10^\circ C$ σε $t_2 = 600^\circ C$. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω των σχέσεων της παραγράφου 1.2.8.

Τα δεδομένα μας για τον υπολογισμό είναι τα παρακάτω:

Απόσταση μεταξύ στύλων (άνοιγμα) :	l	=	$75m$
Για αγωγό τύπου ACSR :	α_t	=	$0,00001241/\text{grad}$
Αρχική θερμοκρασία :	t_1	=	$10^\circ C$
Θερμοκρασία πυρκαγιάς :	t_2	=	$600^\circ C$
Εφελκυστική δύναμη αγωγού στο σημείο ($x = 0$) :	$Z_{T,k} = H$	=	$1282,94kg$
Φόρτιση αγωγού: ίδιο βάρος :	$p_1 = q_1$	=	$0,602kg/m$

Η επιμήκυνση του αγωγού και το βέλος κάμψης στην αρχική κατάσταση υπολογίζονται σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, δηλαδή:

$$f_1 = \frac{l^2 \cdot q_1}{8 \cdot H_{q,1}} = \frac{75^2 \cdot 0,602}{8 \cdot 1282,94} = 0,33m \quad (2.42)$$

$$L_1 = l \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{f_1}{l} \right)^2 \right] = 75 \left[1 + \frac{8}{3} \cdot \left(\frac{0,33}{75} \right)^2 \right] = 75,0004m \quad (2.43)$$

Η επιμήκυνση του αγωγού λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μπορεί να υπολογιστεί με την βοήθεια της σχέσης 1.41:

$$\Delta L_t = \alpha_t \cdot \Delta T \cdot L_1 = 0,0000124 \cdot (600 - 10) \cdot 75 = 0,54m \quad (2.44)$$

Έτσι το νέο μήκος του αγωγού είναι:

$$L_{t,new} = L_1 + \Delta L_t = 75,0004 + 0,54m = 75,544m \quad (2.45)$$

Από το νέο μήκος του αγωγού μπορεί να υπολογιστεί και το νέο βέλος κάμψης που προέκυψε λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας:

$$f_2 = \sqrt{\left(\frac{L_{t,new}}{l} - 1\right) \cdot \frac{3}{8} \cdot l^2} = \sqrt{\left(\frac{75,544}{75} - 1\right) \cdot \frac{3}{8} \cdot 75^2} = 3,91m \quad (2.46)$$

Συγκρίνοντας το βέλος κάμψης $f_2 = 3,91m$ όπως αυτό απλοποιημένα υπολογίστηκε παραπάνω, με το βέλος κάμψης $f_2 = 3,84m$ όπως αυτό υπολογίστηκε στη παράγραφο 2.4.3 με την βοήθεια της σχέσης 2.34, διαπιστώνεται ότι η διαφορά τους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Επομένως για τον υπολογισμό του βέλους κάμψης στην περίπτωση πυρκαγιάς, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψιν μόνο ο παράγοντας της διαφοράς θερμοκρασίας.

2.4.5 Αποκοπή αγωγού σε περίπτωση εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον του

Ακολούθως εξετάζεται η αποκοπή ενός αγωγού ACSR $95mm^2$ λόγω εκδήλωσης πυρκαγιάς στο περιβάλλον του. Όπως περιγράφηκε αναλυτικά στη παράγραφο 2.4.3 η τάνηση του αγωγού γίνεται με μια εφελκυστική δύναμη $Z = 12829,37N$ (σχέση 2.24) και επομένως η χαλύβδινη ψυχή του αγωγού με διατομή $A_{St} = 24.7mm^2$ δέχεται μια εφελκυστική δύναμη $Z_{St} = 4222,86N$ (σχέση 2.26), ενώ οι κλώνοι αλουμινίου με διατομή $A_{Al} = 151.0mm^2$ δέχονται μια εφελκυστική δύναμη $Z_{Al} = 8606,51N$ (σχέση 2.25).

Η εφελκυστική τάση της χαλύβδινης ψυχής του αγωγού είναι:

$$\sigma_{St} = \frac{Z_{St}}{A_{St}} = \frac{4222,86}{24.7} = 170.90N/mm^2 \quad (2.47)$$

η οποία είναι μικρότερη της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα (βλέπε σ_{max} σχήμα 1.7).

Σε περίπτωση πυρκαγιάς όμως οι κλώνοι του αλουμινίου θα λιώσουν, με αποτέλεσμα η χαλύβδινη ψυχή να λάβει όλο το φορτίο Z . Η εφελκυστική τάση του χάλυβα τότε θα γίνει:

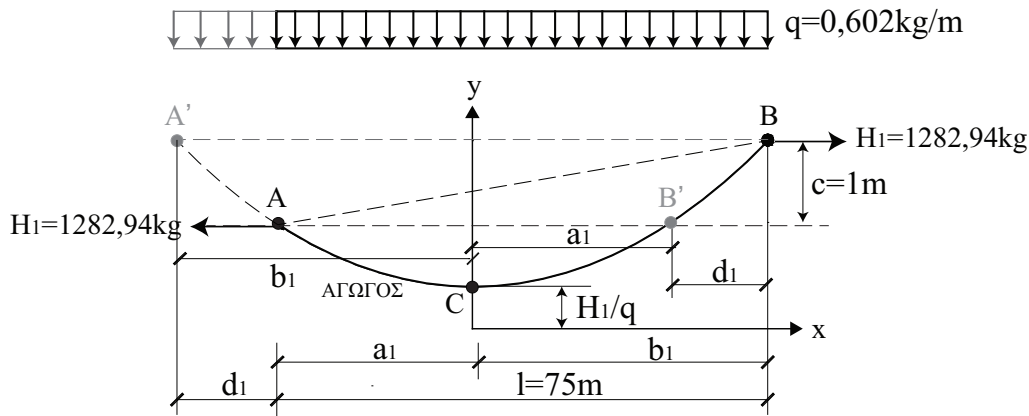
$$\sigma_{St} = \frac{Z}{A_{St}} = \frac{12829,37}{24.7} = 519,21N/mm^2 \quad (2.48)$$

Έτσι σύμφωνα με το σχήμα 1.7, η εν λόγω τάση υπερβαίνει τη αντοχή του χάλυβα σ_{max} με αποτέλεσμα να συμβεί αποκοπή του αγωγού.

$$\sigma_{St} > \sigma_{max} \quad \text{Η μηχανική αντοχή δεν επαρκεί} \quad (2.49)$$

2.4.6 Περίπτωση εναέριου αγωγού με ανισοϋψή στήριξη

Στη περίπτωση αυτή εξετάζεται ένας εναέριος αγωγός με την βοήθεια μιας συνάρτησης υπερβολής και όχι μιας παραβολής όπως έγινε προηγουμένως. Το σύστημα του αγωγού δίνεται στο σχήμα 2.17 και έχει τα ακόλουθα δεδομένα:



Σχήμα 2.17: Απεικόνιση αρχικής κατάστασης αγωγού, όπου a_1 , b_1 , c , d_1 , l είναι οι αποστάσεις όπως αυτές απεικονίζονται, H η εφελκυστική δύναμη του αγωγού και q η επιφόρτιση του αγωγού λόγω ιδίου βάρους

Απόσταση μεταξύ στύλων (άνοιγμα) :	l	=	$75m$
Για αγωγό τύπου ACSR :	α_t	=	$0,00001241/grad$
Αρχική θερμοκρασία :	t_1	=	$10^\circ C$
Θερμοκρασία πυρκαγιάς :	t_2	=	$600^\circ C$
Εφελκυστική δύναμη αγωγού στο σημείο ($x = 0$) :	$Z_{T,k} = H_1$	=	$1282,94kg$
Επιφόρτιση αγωγού: λόγω ιδίου βάρους :	q	=	$0,602kg/m$
Διαφορά ύψους μεταξύ A και B :	c	=	$1m$

Τα μήκη d , a και b μπορούν να υπολογιστούν, με την βοήθεια μαθηματικών προγραμμάτων, από τις σχέσεις (1.63) και (1.61):

$$d_1 = \frac{2H_1}{q} \operatorname{arcsinh} \frac{c}{\frac{2H_1}{q} \sinh \frac{l}{2H_1/q}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 1282,94}{0,602} \operatorname{arcsinh} \frac{1}{\frac{2 \cdot 1282,94}{0,602} \sinh \frac{75}{2 \cdot 1282,94/0,602}} = 56,81m \quad (2.50)$$

$$a_1 = \frac{l - d_1}{2} = \frac{75 - 56,81}{2} = 9,09m \quad (2.51)$$

$$b_1 = \frac{l + d_1}{2} = \frac{75 + 56,81}{2} = 65,91m \quad (2.52)$$

Για την εφελκυστική δύναμη του αγωγού $Z_{B,1}$ και $Z_{A,1}$ στα σημεία στήριξης B και A αντίστοιχα, ισχύει η σχέση 1.65, δηλαδή:

$$Z_{B,1} = q \frac{H_1}{q} \cosh \frac{b_1}{\frac{H_1}{q}} = 0,602 \frac{1282,94}{0,602} \cosh \frac{65,91}{\frac{1282,94}{0,602}} = 1283,55kg \quad (2.53)$$

$$Z_{A,1} = q \frac{H_1}{q} \cosh \frac{a_1}{\frac{H_1}{q}} = 0,602 \frac{1282,94}{0,602} \cosh \frac{9,09}{\frac{1282,94}{0,602}} = 1282,94kg \quad (2.54)$$

Το μήκος του αγωγού δίνεται από τη σχέση 1.64:

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{c^2 + \left(2 \frac{H_1}{q} \sinh \frac{l}{2H_1/q}\right)^2} \\ &= \sqrt{1^2 + \left(2 \frac{1282,94}{0,602} \sinh \frac{75}{2 \cdot 1282,94/0,602}\right)^2} = 75,01m \end{aligned} \quad (2.55)$$

Οι κάθετες συνιστώσες της εφελκυστικής δύναμης του αγωγού $V_{A,1}$ και $V_{B,1}$ είναι σύμφωνα με τη σχέση 1.69:

$$V_{A,1} = H_1 \sinh \frac{a_1}{H_1/q} = 1282,94 \sinh \frac{9,09}{1282,94/0,602} = 5,48kg \quad (2.56)$$

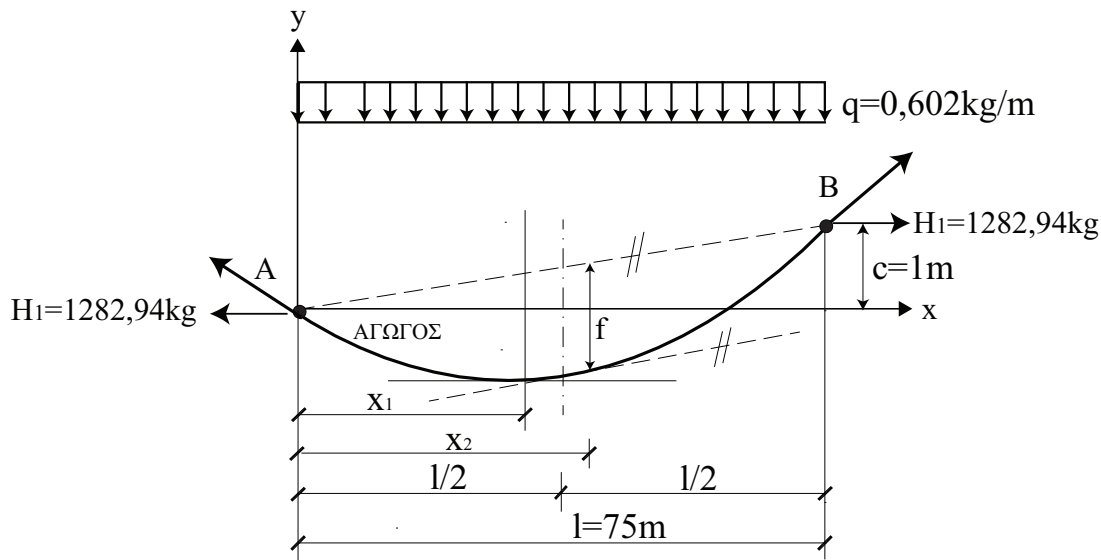
$$V_{B,1} = H_1 \sinh \frac{l - a_1}{H_1/q} = 1282,94 \sinh \frac{75 - 9,09}{1282,94/0,602} = 39,69kg \quad (2.57)$$

Έτσι το σύστημα συντεταγμένων που απεικονίζεται στο σχήμα 1.9, διαμορφώνεται πλέον όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.18. Το μέγιστο βέλος κάμψης παρουσιάζεται στο σημείο $x_{2,1}$ του άξονα- x , το οποίο σύμφωνα με τη σχέση 1.70, υπολογίζεται ως εξής:

$$x_{2,1} = \frac{H_1}{q} \operatorname{arcsinh} \frac{c}{l} + a_1 = \frac{1282,94}{0,602} \operatorname{arcsinh} \frac{1}{75} + 9,09 = 37,501m \quad (2.58)$$

Το μέγιστο βέλος κάμψης f σύμφωνα με την σχέση 1.71 είναι:

$$f_1 = \frac{c}{l} \cdot x_{2,1} - \frac{H_1}{q} \left(\cosh \frac{x_{2,1} - a_1}{H_1/q} - \cosh \frac{a_1}{H_1/q} \right) =$$



Σχήμα 2.18: Νέο σύστημα συντεταγμένων αγωγού, όπου x_1 , x_2 , c οι αποστάσεις όπως αυτές απεικονίζονται, l το άνοιγμα του αγωγού, H_1 η οριζόντια αντίδραση, f το βέλος κάμψης και q η επιφόρτιση λόγω ιδίου βάρους

$$= \frac{1}{75} \cdot 37,50 - \frac{1282,94}{0,602} \left(\cosh \frac{37,50 - 9,09}{\frac{1282,94}{0,602}} - \cosh \frac{9,09}{\frac{1282,94}{0,602}} \right) = 0,33m \quad (2.59)$$

Στην περίπτωση της πυρκαγιάς, η αύξηση θερμοκρασίας προκαλεί μια επιμήκυνση στον αγωγό, όπως αναλυτικά υπολογίστηκε στη παράγραφο 2.4.4, δηλαδή ισχύει:

$$\Delta L_t = \alpha_t \cdot \Delta T \cdot L_1 = 0,0000124 \cdot (600 - 10) \cdot 75,01 = 0,56m \quad (2.60)$$

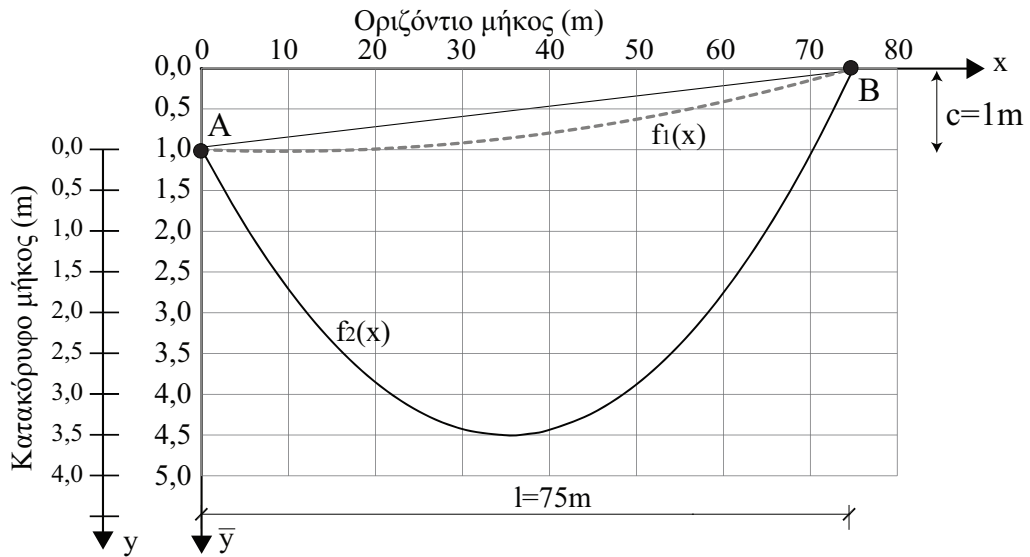
Έτσι το νέο μήκος του αγωγού είναι:

$$L_2 = L_1 + \Delta L_t = 75,01 + 0,56m = 75,57m \quad (2.61)$$

Γνωρίζοντας το νέο μήκος του αγωγού, μπορεί να υπολογιστεί η οριζόντια συνιστώσα H_2 του αγωγού με την βοήθεια της σχέσης 2.55, από όπου προκύπτει $H_2 = 106,6kg$. Γνωρίζοντας πλέον την H_2 μπορούν αντίστοιχα να υπολογιστούν όλοι νέοι παράμετροι, σύμφωνα με τις προαναφερόμενες σχέσεις. Έτσι αποδεικνύεται ότι ισχύουν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$\begin{array}{lll} d_2 = 4,69m & a_2 = 35,16m & b_2 = 39,84m \\ V_{A,2} = 21,31kg & V_{B,2} = 24,19kg & Z_{A,2} = 107,13kg \\ Z_{B,2} = 109,31kg & x_{2,2} = 37,52m & f_2 = 3,987m \end{array}$$

Ο πίνακας 2.1 και το σχήμα 2.19 δίνουν την παραμόρφωση του αγωγού και το βέλος κάμψης για την αρχική κατάσταση και για την κατάσταση πυρκαγιάς.



Σχήμα 2.19: Διάγραμμα της παραμόρφωσης του αγωγού λόγω πυρκαγιάς στο περιβάλλον αυτού, όπου $f_1(x)$ η αρχική κατάσταση, $f_2(x)$ η τελική κατάσταση, A και B οι θέσεις των στύλων και l το άνοιγμα του αγωγού

Πίνακας 2.1: Υπολογισμός της παραμόρφωσης του αγωγού λόγω πυρκαγιάς στο περιβάλλον του

(1) Αρχική κατάσταση				(2) Κατάσταση πυρκαγιάς			
x	y	$f_1 =$	$\bar{y} =$	x	y	$f_2 =$	$\bar{y} =$
(m)	Εξίσωση 1.66 (m)	$\frac{c}{l} \cdot x - y$ (m)	$\frac{c}{l} \cdot (l - x) + f_1$ (m)	(m)	Εξίσωση 1.66 (m)	$\frac{c}{l} \cdot x - y$ (m)	$\frac{c}{l} \cdot (l - x) + f_2$ (m)
0,0	0,00	0,00	1,00	0,0	0,00	0,00	1,00
5,0	-0,015	0,082	1,015	5,0	-0,9276	0,994	1,928
10,0	-0,0191	0,153	1,019	10,0	-1,7119	1,845	2,712
15,0	-0,0112	0,211	1,011	15,0	-2,3535	2,554	3,354
20,0	0,0085	0,258	0,991	20,0	-2,8532	3,120	3,853
25,0	0,0339	0,293	0,960	25,0	-3,2108	3,544	4,211
30,0	0,0832	0,317	0,917	30,0	-3,4272	3,827	4,427
35,0	0,1381	0,329	0,862	35,0	-3,5022	3,969	4,502
37,5	0,1699	0,330	0,830	37,5	-3,4868	3,987	4,487
40,0	0,2048	0,329	0,795	40,0	-3,4360	3,969	4,436
45,0	0,2832	0,317	0,717	45,0	-3,2286	3,829	4,229
50,0	0,3733	0,293	0,627	50,0	-2,8797	3,546	3,880
55,0	0,4752	0,258	0,525	55,0	-2,3891	3,122	3,389
60,0	0,5888	0,211	0,411	60,0	-1,7564	2,556	2,756
65,0	0,7141	0,153	0,286	65,0	-0,9811	1,848	1,981
70,0	0,8512	0,082	0,149	70,0	-0,0625	0,996	1,063
75,0	1,00	0,00	0,00	75,0	1,00	0,00	0,00

2.4.7 Αποκοπή αγωγού αλουμινίου λόγω μετάδοσης θερμότητας σε αυτόν με ακτινοβολία και μεταφορά

Στο δίκτυο διανομής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται πολύ συχνά αγωγοί αλουμινίου λόγω της πολύ καλής αγωγιμότητάς τους. Για το λόγο αυτό εξετάζεται παρακάτω η μηχανική συμπεριφορά ενός αγωγού αλουμινίου σε περιβάλλον που έχει εκδηλωθεί πυρκαγιά.

Η επιμήκυνση ενός αγωγού ΔL λόγω αύξησης της θερμοκρασίας κατά $\Delta\theta$ δίνεται από την παρακάτω σχέση (βλ. παράγραφο 1.2.8):

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta\theta \cdot L \quad (2.62)$$

Όπου α ο γραμμικός συντελεστής διαστολής (η τιμή του οποίου είναι για το αλουμίνιο $0,000023 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ [96, 101]) και L το αρχικό μήκος του αγωγού στο υπό εξέταση τμήμα.

Έτσι θεωρώντας για παράδειγμα μια διαφορά θερμοκρασίας $\Delta\theta = 250^{\circ}\text{C}$ λόγω μετάδοσης της θερμότητας με ακτινοβολία και μεταφορά από εκδήλωση πυρκαγιάς κοντά σε αγωγό μήκους $L = 54\text{m}$, η επιμήκυνση του αγωγού θα είναι:

$$\Delta L = 0,000023 \cdot 250 \cdot 54 = 0,31\text{m}$$

Το μέτρο ελαστικότητας για το αλουμίνιο είναι $E = 70000\text{N/mm}^2$ [9, 58] και σύμφωνα με σχέση 1.45 η αξονική τάση του αγωγού θα είναι:

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L} \cdot E = \frac{0,31}{54} \cdot 70000 = 401,85\text{N/mm}^2$$

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το καθαρό αλουμίνιο αστοχεί σε μία εφελκυστική τάση περίπου 180N/mm^2 η οποία μπορεί να φτάσει συνήθως μέχρι τα 250N/mm^2 ανάλογα με τις προσμίξεις που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή αγωγών διανομής [9, 58]. Συγκρίνοντας την τάση που υπολογίστηκε, με την εφελκυστική αντοχή του αλουμινίου όπως αυτή δίνεται στη βιβλιογραφία, προκύπτει ότι ο αγωγός στο παράδειγμα που εξετάστηκε θα αποκοπεί.

3 Έκθεση εργαζομένων σε μαγνητικό πεδίο χαμηλών συχνοτήτων

3.1 Μαγνητικό πεδίο και όρια ασφαλείας

Η έκθεση του ανθρώπου στο ηλεκτρικό και στο μαγνητικό πεδίο συχνότητας 50Hz και 60Hz), που δημιουργούνται από τον εξοπλισμό και τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται στην καθημερινή ζωή, έχει απασχολήσει την Κοινή Γνώμη εδώ και αρκετά χρόνια. Οι πιθανές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία από την έκθεση στα εν λόγω πεδία χαμηλής συχνότητας παρουσιάζονται σε αρκετές έρευνες, με ενδεικτικές αυτές των D. McNamee et al. και L. Kheifets et al. [69, 89]. Επίσης πολλές επιστημονικές εργασίες επικεντρώνονται στην μέτρηση αυτής της έκθεσης στο μαγνητικό πεδίο, εργαζομένων αλλά και του κοινού γενικότερα [32, 45, 60, 74, 75, 83, 84, 90, 100].

Πολλές χώρες μάλιστα έχουν θέσει όρια στην μέγιστη τιμή των εν λόγω πεδίων στα οποία μπορεί να εκτίθενται το κοινό και οι εργαζόμενοι, τα οποία βασίζονται σε κανονισμούς που έχουν θεσπίσει διεθνείς οργανισμοί όπως η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας Έναντι Μη Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας (I.C.N.I.R.P.) και το Εθνικό Συμβούλιο Προστασίας από Ακτινοβολία (N.R.P.B.) [64, 94]. Σύμφωνα με τις οδηγίες της επιτροπής (I.C.N.I.R.P.), τα όρια έκθεσης για το μαγνητικό πεδίο στα 50Hz και για το ηλεκτρικό πεδίο, έχουν καθοριστεί όσον αφορά στο κοινό σε 200μT και 5kV/m και όσον αφορά στους επαγγελματίες σε 1000μT και 10kV/m αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα εν λόγω όρια εμπεριέχουν μεγάλους συντελεστές ασφαλείας προκειμένου να διασφαλίσουν οποιαδήποτε επιστημονική αμφιβολία [61, 62].

Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 1.1, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία μιας ηλεκτρολογικής συσκευής, θα πρέπει να δοκιμαστεί σε λειτουργικές συνθήκες που αντιστοιχούν στις μελλοντικές μέγιστες καταπονήσεις της. Οι δοκιμές αυτές, που συνήθως αποτελούν την τελευταία φάση της παραγωγικής διαδικασίας, προβλέπονται στους κανονισμούς (VDE, IEC κλπ.) και διακρίνονται στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς.

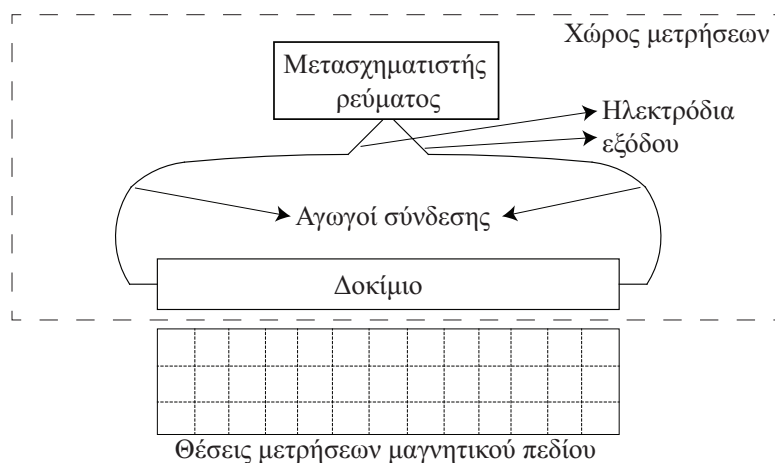
Οι δοκιμές τύπου γίνονται σε περιορισμένο αριθμό παραγόμενων προϊόντων, ενώ οι δοκιμές σειράς πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα προϊόντα. Η δοκιμή υπερ-

θέρμανσης εφαρμόζεται προκειμένου να διαπιστωθεί ποιό είναι το ονομαστικό ρεύμα (μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα) της συσκευής. Η εν λόγω δοκιμή μπορεί να έχει διάρκεια πολλών ωρών. Χαρακτηριστικά μπορεί να αναφερθεί η δοκιμή ενός μετασχηματιστή ελαίου, η οποία διαρκεί περίπου 24 ώρες.

Ακολούθως γίνεται μέτρηση του μαγνητικού πεδίου στο οποίο εκτίθεται το προσωπικό κατά τη διάρκεια της δοκιμής υπερθέρμανσης του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρόλο που ο αριθμός των ατόμων που εργάζονται σε αυτό το τομέα είναι μικρός, η έκθεση στο μαγνητικό πεδίο είναι σχετικά μεγάλη αφού το ρεύμα δοκιμής είναι σε αρκετές περιπτώσεις άνω των 100A. Το μαγνητικό πεδίο μετρήθηκε κατά την δοκιμή διαφόρων διακοπών και καλωδίων και εκτιμήθηκε κατά προσέγγιση ο χρόνος που εκτίθεται ένας εργαζόμενος σε αυτό. Οι τιμές των μετρήσεων συγκρίνονται με τα όρια που έχουν θεσπιστεί από την επιτροπή (I.C.N.I.R.P.) και προτείνονται αποστάσεις ασφαλείας ανάλογα με το ονομαστικό ρεύμα του δοκιμίου.

3.2 Η διαδικασία των μετρήσεων κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης

Η δοκιμή υπερθέρμανσης πραγματοποιήθηκε με την σύνδεση του δοκιμίου (διακόπτες, καλώδια κλπ.) σε έναν μετασχηματιστή ρεύματος (2500A/2, 5V, 50Hz) ο οποίος ρυθμίζεται να παρέχει το ονομαστικό ρεύμα της συσκευής (Σχήμα 3.1). Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε κάθε 10 λεπτά με την βοήθεια θερμοστοιχείων τα οποία συνδέθηκαν σε βολτόμετρο. Ο τεχνικός που εκτελεί την δοκιμή ήταν στη θέση εργασίας του, σε απόσταση 5 μέτρων από την συσκευή. Σε τακτά διαστήματα όμως πλησίαζε το δοκίμιο για να παρατηρήσει την άνοδο της θερμοκρασίας και να ελέγξει τη συσκευή για τυχόν βλάβες που μπορεί να προκληθούν λόγω της δοκιμής.



Σχήμα 3.1: Πειραματική διάταξη της δοκιμής υπερθέρμανσης

Η δοκιμή υπερθέρμανσης θεωρείται επιτυχής όταν η αύξηση της θερμοκρασίας ως προς τη θερμοκρασία περιβάλλοντος υπό ονομαστικό ρεύμα, δεν υπερβαίνει την τιμή των $50 - 60^{\circ}C$. Η διαδικασία της δοκιμής θεωρείται επιτυχημένη και σταματάει στην περίπτωση που η θερμοκρασία του δοκιμίου σταθεροποιείται, δηλαδή όταν δεν διαφοροποιείται πάνω από $1^{\circ}C$ σε περίοδο μιας ώρας.

3.3 Η μέτρηση του μαγνητικού πεδίου και η έκθεση των εργαζομένων σε αυτό κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής υπερθέρμανσης σε δοκίμια

Για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε η συσκευή "High Field EMDEX II" Enertech Consultants, η οποία έχει εύρος συχνοτήτων $40 - 800Hz$ και εύρος μέτρησης $0,4\mu T - 12mT$ με ακρίβεια $\pm 1\%$. Με την βοήθεια των εσωτερικών αισθητήρων της συσκευής μπορούν να μετρηθούν οι διανυσματικές συνιστώσες x , y και z του μαγνητικού πεδίου και τα αποτελέσματα μπορούν να αποθηκευτούν στη μνήμη της συσκευής ή να μεταφερθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω ανάλυση. Η συσκευή μετράει το συνολικό μαγνητικό πεδίο που προκύπτει από την σχέση 3.1.

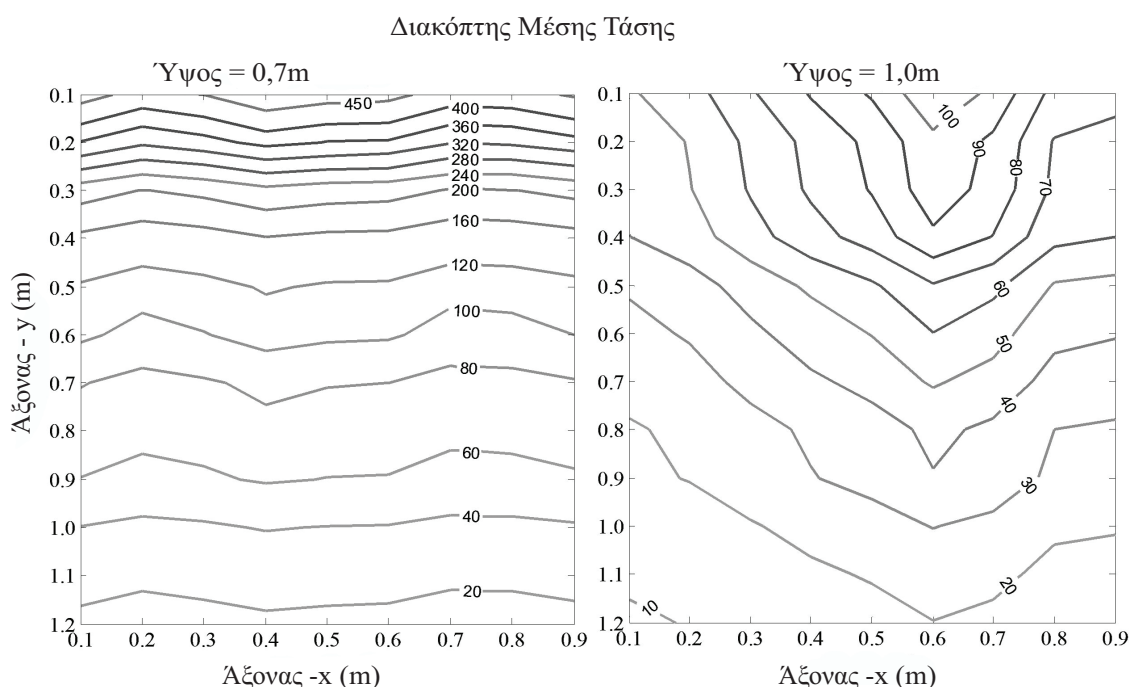
$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3.1)$$

Όπου B_x , B_y και B_z είναι οι ανυσματικές συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου στους άξονες x , y και z αντίστοιχα.

Για την μέτρηση της έκθεσης του προσωπικού των μετρήσεων στο μαγνητικό πεδίο, έγινε δοκιμή υπερθέρμανσης σε έναν διακόπτη μέσης τάσης, σε έναν ασφαλειοαποζεύκτη μέσης τάσης και σε ένα συγκεντρικό καλώδιο χαμηλής τάσης, των οποίων το ονομαστικό ρεύμα I_N ήταν αντίστοιχα $250A$, $65A$ και $35A$. Οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου πραγματοποιήθηκαν γύρω από τη συσκευή δοκιμής όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.1. Η μέτρηση γινόταν κάθε $10cm$ στους άξονες x και y σε δύο διαφορετικά ύψη από το έδαφος ($0,7m$ και $1,0m$) ενώ καθοριζόταν παράλληλα η απόσταση στην οποία το μαγνητικό πεδίο έπεφτε κάτω από το όριο του $1,0\mu T$.

Το προσωπικό που έλαβε μέρος στην μέτρηση της έκθεσης στο μαγνητικό πεδίο, αποτελούνταν από 9 άτομα τα οποία είχαν εμπειρία στις δοκιμές τύπου και σειράς των δοκιμών που προαναφέρθηκαν. Το προσωπικό πραγματοποίησε τις δοκιμές υπερθέρμανσης των εν λόγω δοκιμών έχοντας τη συσκευή μέτρησης μαγνητικού πεδίου δεμένη στη μέση τους σε ύψος περίπου $1,0m$ από το έδαφος. Η συσκευή μέτρησης προγραμματίστηκε να μετράει το μαγνητικό πεδίο σε πλήρες εύρος ($40 - 800Hz$) παίρνοντας δείγμα κάθε $5sec$. Κάθε ένα από τα δοκίμια δοκιμάστηκε, για λόγους αξιοπιστίας των μετρήσεων, από 3 διαφορετικούς εργαζόμενους.

Το μαγνητικό πεδίο του διακόπτη μέσης τάσης για τα δύο διαφορετικά ύψη απεικονίζεται στο σχήμα 3.2. Τα κύρια αποτελέσματα και των τριών δοκιμών που μετρήθηκαν δίνονται στον πίνακα 3.1. Η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου μετρήθηκε κατά την δοκιμή του διακόπτη μέσης τάσης (με ονομαστικό ρεύμα $I_N = 250A$) στο σημείο ανάμεσα στην έξοδο των ηλεκτροδίων του μετασχηματιστή ρεύματος και ήταν $2035\mu T$, δηλαδή 2 φορές μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη τιμή που έχει θεσπιστεί από την επιτροπή (I.C.N.I.R.P.).



Σχήμα 3.2: Μέτρηση μαγνητικού πεδίου για τα ύψη 0,7m και 1,0m για τον διακόπτη μέσης τάσης

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα κύριων μετρήσεων των τριών συσκευών δοκιμής

Ηλεκτρολογική συσκευή	Μαγνητικό πεδίο (μT) (απόσταση=0,1m)	Μαγνητικό πεδίο (μT) (απόσταση=1,0m)	Απόσταση για $<1\mu T$ (m)	Μέγιστη τιμή μαγνητικού πεδίου (μT)
Διακόπτης Μ.Τ.	466	40,8	7,9	2035
Ασφαλαιοαποζεύκτης Μ.Τ.	143	10,6	3,1	459
Συγκεντρικό καλώδιο	1,8	0	0,5	24,0

Οι αποστάσεις είναι στον άξονα y . Το όργανο μέτρησης τοποθετήθηκε στη μέση του άξονα x στο ύψος των ρευματοφόρων τμημάτων.

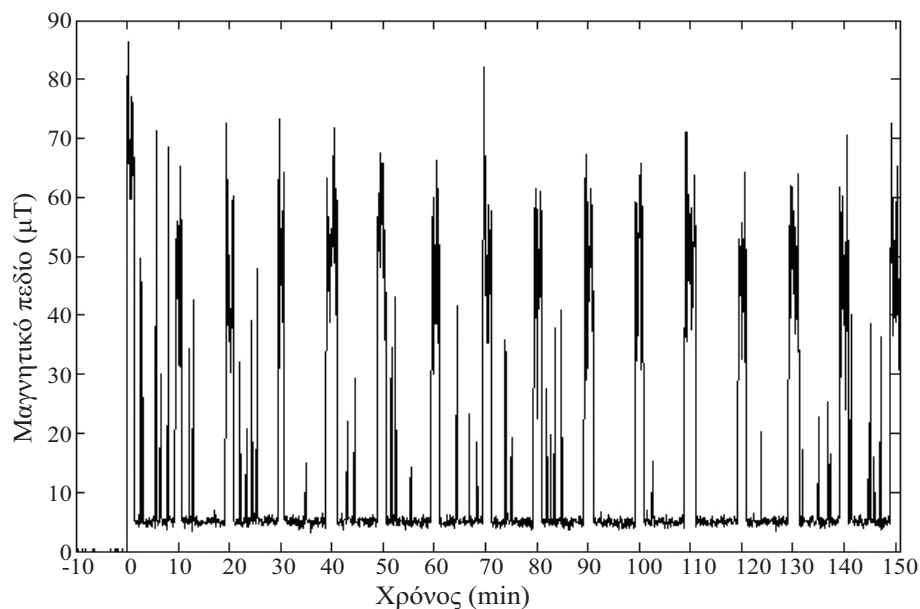
Θα πρέπει να αναφερθεί ότι όσο αυξανόταν η απόσταση από το δοκίμιο κατά το άξονα y εξασθενούσε το μαγνητικό πεδίο με μεγάλο ρυθμό. Συγκεκριμένα όταν η απόσταση από το δοκίμιο, από 0,1m αυξήθηκε σε 1,0m το μαγνητικό πεδίο εξασθένησε κατά 91,2% για τον διακόπτη μέσης τάσης και κατά 92,6% για τον ασφαλαιοαποζεύκτη. Στον πίνακα 3.1 δίνονται οι αποστάσεις στις οποίες το μαγνητικό πεδίο ήταν μικρότερο από $1\mu T$.

Η διάρκεια της δοκιμής υπερθέρμανσης ήταν 2,5 ώρες για τον διακόπτη μέσης τάσης και τον ασφαλειοαποξεύκτη και 2 ώρες για το συγκεντρικό καλώδιο. Τα σχήματα 3.3 ως 3.5 αποτυπώνουν χαρακτηριστικά παραδείγματα των τιμών έκθεσης των εργαζομένων κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης όπως μετρήθηκαν με το όργανο EMDEX, ενώ στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μετρήσεις της έκθεσης για κάθε δοκίμιο. Η μέση αριθμητική τιμή του πεδίου κατά την διάρκεια της δοκιμής ήταν $14,95\mu T$ για τον διακόπτη μέσης τάσης, $2,43\mu T$ για τον ασφαλειοαποξεύκτη και $0,17\mu T$ για το συγκεντρικό καλώδιο. Αντίστοιχα η μέση μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου που μετρήθηκε ήταν $86,48\mu T$ για τον διακόπτη μέσης τάσης, $32,78\mu T$ για τον ασφαλειοαποξεύκτη και $1,19\mu T$ για το συγκεντρικό καλώδιο. Η απόλυτη μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου μετρήθηκε $92,27\mu T$.

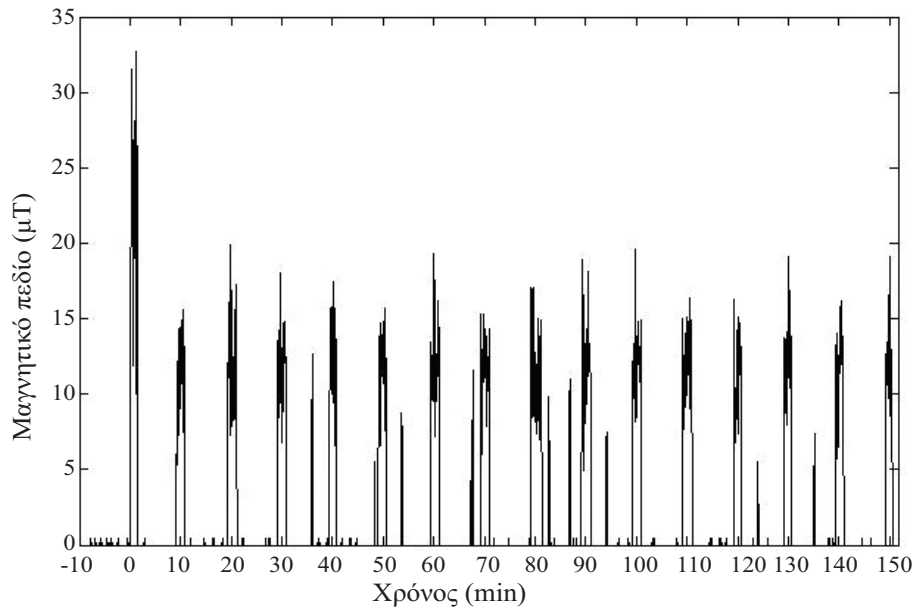
Πίνακας 3.2: Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένων στο μαγνητικό πεδίο

	Max (μT)	M.O. (μT)	T.A.	P_{90} (μT)	P_{99} (μT)	F_i (%)	F_j (%)
Διακόπτης Μ.Τ.	86,48	14,95	18,33	49,32	69,30	24,86	9,42
Ασφαλειοαποξεύκτης Μ.Τ.	32,78	2,43	5,03	11,98	18,14	19,81	14,27
Συγκεντρικό καλώδιο	1,19	0,17	0,35	0,88	1,06	19,30	2,87

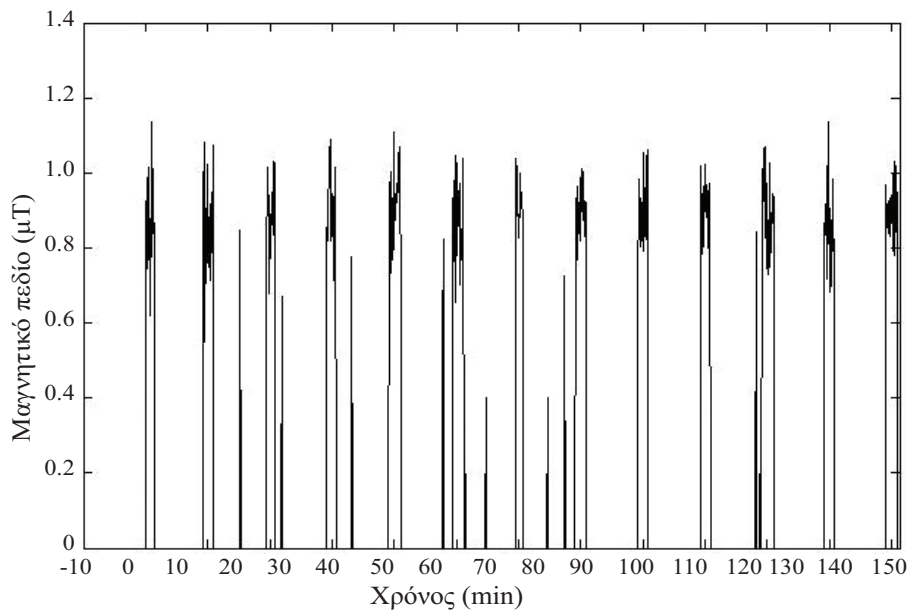
Max=Μέγιστη τιμή, M.O.=Μέσος όρος, T.A.=Τυπική απόκλιση, P_{90} = 90% των μετρήσεων έχουν τιμή μικρότερη ή ίση από αυτήν, P_{99} = 99% των μετρήσεων έχουν τιμή μικρότερη ή ίση από αυτήν, F_i και F_j είναι το ποσοστό των μετρήσεων που η τιμή τους ξεπερνάει την τιμή i και j , όπου $i=8, 1, 0,5\mu T$ και $j=50, 10, 1\mu T$ για τον διακόπτη μέσης τάσης, τον ασφαλειοαποξεύκτη και το συγκεντρικό καλώδιο αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα μετρήσεων μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του διακόπτη μέσης τάσης



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα μετρήσεων μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του ασφαλειοαποξεύκτη



Σχήμα 3.5: Παράδειγμα μετρήσεων μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του συγκεντρικού καλωδίου

3.4 Σχόλια

Όπως φαίνεται από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης δοκιμίων (διακόπτες, καλώδια κλπ.), μπορεί να ξεπεράσει τα όρια που έχουν θεσπιστεί για την προστασία των εργαζομένων. Η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης, μετρήθηκε $2035\mu T$ στην έξοδο των ηλεκτροδίων του μετασχηματιστή ρεύματος. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι η πρόσβαση των εργαζομένων στο συγκεκριμένο σημείο δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη, επομένως θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την μέγιστη τιμή του πεδίου που μετρήθηκε σε προσβάσιμα σημεία του χώρου δοκιμής. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου ήταν $92,27\mu T$, δηλαδή εντός των ορίων.

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την έκθεση του προσωπικού που πραγματοποιεί τις δοκιμές υπερθέρμανσης του διακόπτη μέσης τάσης, διαπιστώθηκε ότι το μαγνητικό πεδίο στην θέση εργασίας του, που είναι $5m$ μακριά από τη συσκευή δοκιμής, δεν ξεπερνάει τα $5\mu T$. Οι κορυφώσεις του μαγνητικού πεδίου που παρουσιάζονται στα διαστήματα των 10 λεπτών όπου ο τεχνικός μετράει την θερμοκρασία αποτυπώνονται στο σχήμα 3.3. Οι επιπλέον κορυφώσεις που παρατηρούνται στα διαστήματα των 10 λεπτών, οφείλονται στον οπτικό έλεγχο που κάνει ο τεχνικός κοντά στο δοκίμιο, για τυχόν ζημιές που μπορεί να προκληθούν σε αυτήν εξαιτίας της δοκιμής.

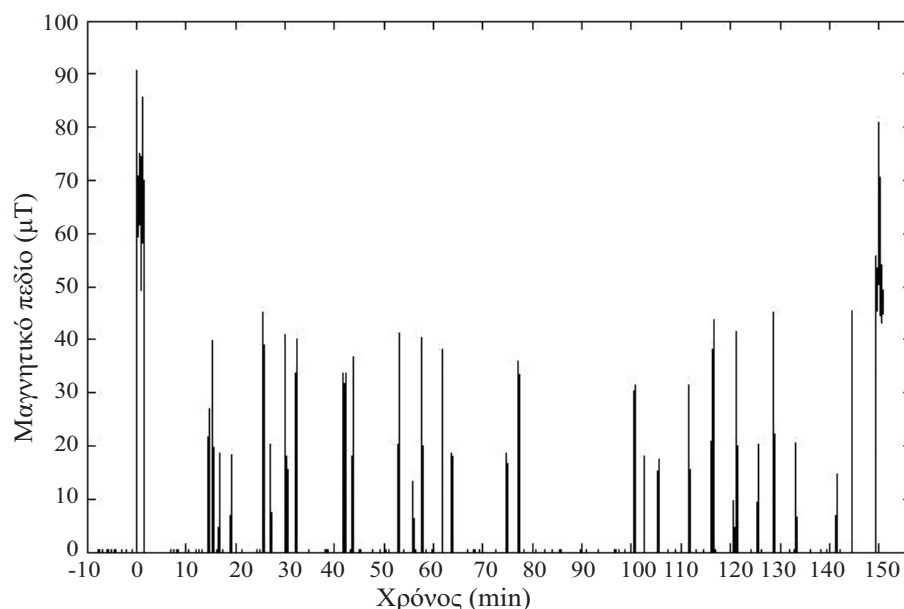
Αντίστοιχες απεικονίσεις παρουσιάζονται και στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στον ασφαλειοαποζεύκτη και στο συγκεντρικό καλώδιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις όμως το μαγνητικό πεδίο στον σταθμό εργασίας που βρίσκεται σε απόσταση $5m$ από την συσκευή, ήταν κάτω από $1\mu T$. Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου όπως αυτό καταγράφηκε και αποτυπώνεται στα διαγράμματα, παρουσιάζει δύο τοπικά μέγιστα. Το πρώτο μέγιστο οφείλεται στις μετρήσεις κατά την διάρκεια των οποίων ο τεχνικός ήταν στην θέση εργασίας του ($5\mu T$, $0\mu T$ και $0\mu T$ για τα τρία δοκίμια αντίστοιχα), ενώ το δεύτερο ($53,1\mu T$, $11,5\mu T$ και $0,89\mu T$ για τα τρία δοκίμια αντίστοιχα) στις μετρήσεις που έγιναν, κατά την διάρκεια των οποίων ο τεχνικός βρισκόταν κοντά στην συσκευή δοκιμής για επιθεώρηση.

Ο χρόνος που περνάει ο τεχνικός κοντά στο δοκίμιο που εξετάζεται (διάρκεια υψηλής έκθεσης) μπορεί να προσεγγιστεί με την μέτρηση του ποσοστού των μετρήσεων F_i στις οποίες το μαγνητικό πεδίο είχε τιμή μεγαλύτερη από αυτή στην θέση εργασίας. Έτσι γνωρίζοντας τον συνολικό χρόνο της δοκιμής, προκύπτει ότι ο χρόνος εργασίας κοντά στην συσκευή δοκιμής ήταν 37 λεπτά της ώρας για τον διακόπτη μέσης τάσης, 29 λεπτά για τον ασφαλειοαποζεύκτη και 23 λεπτά για το συγκεντρικό καλώδιο. Αντίστοιχα F_j είναι το ποσοστό των μετρήσεων κατά τις οποίες η τιμή του μαγνητικού πεδίου ξεπερνάει τα $50\mu T$ για τον διακόπτη μέσης τάσης, τα $10\mu T$ για τον ασφαλειοαποζεύκτη και το $1\mu T$ για το συγκεντρικό καλώδιο και σε συνδυασμό με το δεύτερο τοπικό μέγιστο που προαναφέρθηκε, μπορεί να διευκρινιστεί η κατανομή των κορυφώσεων του μαγνητικού πεδίου.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων μπορεί να γίνει μια πρόταση για την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που πρέπει να τηρείται, ανάλογα με το είδος του δοκιμίου και του ονομαστικού της ρεύματος, ώστε να αποκλείεται παντελώς η ύπαρξη τιμών του μαγνητικού πεδίου άνω των επιτρεπόμενων ορίων. Έτσι στην περίπτωση μονοφασικών συσκευών, όπως διακόπτες, ασφάλειες, γυμνοί αγωγοί κλπ., μέσης και χαμηλής τάσης, προτείνεται μια απόσταση ασφαλείας 5m ανά 100A. Στην περίπτωση τριφασικών συσκευών και μονοφασικών με ουδέτερο, όπως τα συγκεντρικά καλώδια ή τα εναέρια συνεστραμμένα καλώδια, προτείνεται μια απόσταση ασφαλείας 1,5m ανά 100A. Στον πίνακα 3.3 δίνεται μια ενδεικτική λίστα δοκιμών και προτεινόμενων αποστάσεων ασφαλείας.

Πίνακας 3.3: Τύποι συσκευών και προτεινόμενες αποστάσεις ασφαλείας

Τύπος συσκευής	Ονομαστικό ρεύμα (A)	Απόσταση ασφαλείας (m)	Χαρακτηρικά παραδείγματα
Μονοφασική Μ.Τ.	100	5	Ασφαλειοδιακόπτες
	250	12,5	Αποζεύκτες
Τριφασική Μ.Τ.	400	6	Καλώδια
Μονοφασική Χ.Τ.	100	5	Γυμνοί αγωγοί
	250	12,5	Ασφάλειες
Μονοφ. + ουδέτερος Χ.Τ.	100	1,5	Συγκεντρικά καλώδια
Τριφ. + ουδέτερος Χ.Τ.	200	3	Εναέρια συνεστραμμένα καλώδια



Σχήμα 3.6: Μέτρηση μαγνητικού πεδίου μετά την εφαρμογή των προτεινόμενων αποστάσεων ασφαλείας

Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις που δοκιμάζεται ηλεκτροτεχνικός εξοπλισμός με μεγάλο ονομαστικό ρεύμα, τότε οι προτεινόμενες αποστάσεις ασφαλείας με τον κανόνα $5m$ ανά $100A$, ίσως να συνεπάγονται πολύ μεγάλες αποστάσεις. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι αντισοικονομικό ή ακόμα και μη εφαρμόσιμο. Η αξιοπιστία πάντως του προαναφερόμενου κανόνα, επιβεβαιώθηκε μέσω επανάληψης της δοκιμής υπερθέρμανσης του διακόπτη μέσης τάσης εφαρμόζοντας τις νέες αποστάσεις ασφαλείας. Έτσι ο σταθμός εργασίας του τεχνικού μεταφέρθηκε στα $12,5m$ από τον διακόπτη, μαζί με το βολτόμετρο που δείχνει την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο σχήμα 3.6 δίνεται το μαγνητικό πεδίο όπως αυτό μετρήθηκε με την νέα διάταξη.

Ο μέσος όρος της έκθεσης στο μαγνητικό πεδίο μειώθηκε σε $2,17\mu T$ (μείωση $85,5\%$), ενώ η διάρκεια της υψηλής έκθεσης (F_i) μειώθηκε στο ποσοστό $5,64\%$. Η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου που μετρήθηκε ήταν $90,59\mu T$. Από αυτές τις μετρήσεις συμπεραίνεται ότι η υιοθέτηση των προτεινόμενων αποστάσεων ασφαλείας δεν επηρεάζει φυσικά την ένταση του μαγνητικού πεδίου, αλλά μπορεί να μειώσει την διάρκεια της μέσης έκθεσης του εργαζομένου σε αυτό. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα διεθνή όρια που έχουν τεθεί για την ασφάλεια των εργαζομένων αφορούν στην μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου και όχι στην διάρκεια της έκθεσης σε αυτό. Η διάρκεια της έκθεσης είναι όμως ένας σημαντικός παράγοντας που είναι χρήσιμο να ερευνηθεί.

3.5 Συμπεράσματα

Από την προηγούμενη ανάλυση είναι φανερό ότι η έκθεση των εργαζομένων στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού (διακόπτες, καλώδια κλπ.), είναι σημαντική. Από τις μετρήσεις που έγιναν, συμπεραίνεται ότι το μαγνητικό πεδίο θα μπορούσε σε κάποιες περιπτώσεις να υπερβεί και τα όρια ασφαλείας που έχουν θεσπιστεί από την επιτροπή I.C.N.I.R.P.. Για το λόγο αυτό έγινε μια πρόταση για την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που πρέπει να τηρείται, ανάλογα με το είδος της συσκευής και του ονομαστικού της ρεύματος. Για την εξακρίβωση της ορθότητας των προτεινόμενων αποστάσεων επαναλήφθηκε η δοκιμή υπερθέρμανσης για τον διακόπτη μέσης τάσης εφαρμόζοντας τις νέες αποστάσεις ασφαλείας. Οι νέες μετρήσεις έδειξαν ότι η διάρκεια της μέσης έκθεσης του εργαζομένου μειώθηκε κατά $85,5\%$.

4 Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στους κινδύνους που προέρχονται από το ηλεκτρικό ρεύμα, μέσα από την ανάλυση πραγματικών περιστατικών και ατυχημάτων που συνέβησαν σε διάφορους χώρους εργασίας, με δυσάρεστα κάθε φορά αποτελέσματα για την ανθρώπινη ζωή και περιουσία. Η κατανόηση και ανάλυση αυτών των ατυχημάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική προκειμένου να γίνουν προτάσεις ώστε να μειωθούν τα θανατηφόρα ατυχήματα που οφείλονται στο ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτός είναι και ο πρωταρχικός στόχος της εργασίας και οι προτάσεις που προβάλλονται μέσα από αυτή μπορούν να θεωρηθούν ως η κυριότερη συμβολή της στην έρευνα και στις πρακτικές εφαρμογές.

Συγκεκριμένα η ανάλυση του πραγματικού θανατηφόρου ατυχήματος που προκλήθηκε από την επαφή βαρέως οχήματος με τους εναέριους ηλεκτροφόρους αγωγούς διανομής, καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό παρόμοιων ηλεκτρικών ατυχημάτων που συμβαίνουν σε παγκόσμιο επίπεδο σε διάφορους παραγωγικούς τομείς. Από την εν λόγω ανάλυση βγήκαν σημαντικά συμπεράσματα και έγιναν πολλές οργανωτικές και τεχνικές προτάσεις με σκοπό την επίτευξη διαρθρωτικών αλλαγών τόσο σε επίπεδο οργάνωσης όσο και σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής, προκειμένου να υιοθετηθεί μια νοοτροπία ασφαλούς εργασίας και να ευαισθητοποιηθεί η κοινωνία γενικότερα (βλ. παρ. 2.1).

Από την ανάλυση του πραγματικού ατυχήματος που προκλήθηκε λόγω εσφαλμένου χειρισμού ασφαλειοαποζεύκτη έγινε κατανοητό ότι ακόμα και σε συνηθισμένες και τυποποιημένες εργασίες αποκατάστασης βλαβών του δικτύου, είναι δυνατό να προκληθούν θανατηφόρα ατυχήματα και μάλιστα από τεχνικούς με μεγάλη εμπειρία και τεχνική κατάρτιση. Έτσι διαπιστώθηκε ότι συχνά εφαρμόζεται από τους τεχνικούς μια ανορθόδοξη μέθοδος χειρισμού του ασφαλειοαποζεύκτη η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση προκάλεσε το θάνατο του εργαζομένου. Για τον λόγο αυτό γίνεται μια σειρά προτάσεων για την ενημέρωση των τεχνικών που απαρτίζουν τα συνεργεία αποκατάστασης βλαβών και την ευαισθητοποίησή τους για την αναγκαιότητα χρήσης των ατομικών μέσων προστασίας μέσα από σεμινάρια ανάλυσης ατυχημάτων όπου οι εργαζόμενοι θα

έχουν ενεργό ρόλο και θα συνεισφέρουν με την εμπειρία και τη γνώση τους. Επίσης προτείνεται μια τεχνική λύση αντιμετώπισης παρόμοιων περιστατικών με την αντικατάσταση των ασφαλειοαποζευκτών με αυτόματους διακόπτες.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι ηλεκτρικά ατυχήματα δεν συμβαίνουν μόνο στο χώρο εργασίας αλλά και στους ιδιωτικούς χώρους. Για τον λόγο αυτό αναλύονται περιστατικά που συνέβησαν σε οικίες καταναλωτών και προτείνονται μέτρα προστασίας από κινδύνους στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών με την τοποθέτηση ισοδυναμικών συνδέσεων, διακόπτη διαφυγής έντασης και αξιόπιστου ηλεκτρολογικού υλικού γενικότερα που έχει υποστεί τις δοκιμές τύπου και σειράς που προβλέπονται από τους διεθνείς κανονισμούς.

Στην εργασία αυτή εξετάζεται επίσης η συμπεριφορά των εναέριων αγωγών διανομής σε διάφορες επιφορτίσεις (λόγω ανεμοπίεσης, επίστρωσης πάγου επί αυτών και θερμική καταπόνησή τους σε περιβάλλον πυρκαγιάς) και βγαίνουν σημαντικά συμπεράσματα για την μηχανική αντοχή τους. Από την εν λόγω ανάλυση διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στην περίπτωση πυρκαγιάς επηρεάζει σε τέτοιο βαθμό το σύστημα των αγωγών ώστε οι επιφορτίσεις λόγω του βάρους και της ανεμοπίεσης να μπορούν να αγνοηθούν. Όταν μάλιστα ο αγωγός αποτελείται από κλώνους αλουμινίου διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ πιθανή η αποκοπή του σε περιβάλλον πυρκαγιάς πλησίον αυτού. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μπορούν να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό των δικτύων διανομής ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι γραμμές περνούν μέσα από δάση με ψηλά δέντρα.

Τέλος έγιναν μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου στο οποίο εκτίθεται το τεχνικό προσωπικό κατά την διάρκεια της δοκιμής υπερθέρμανσης των ηλεκτρολογικών συσκευών. Από την ανάλυση της διαδικασίας δοκιμής και από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι η έκθεση των εργαζομένων στο μαγνητικό πεδίο είναι σημαντική και μάλιστα σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια που έχουν θεσπιστεί. Για τον λόγο αυτό έγινε μια πρόταση για την ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που πρέπει να τηρείται ανάλογα με το είδος του δοκιμίου (μετασχηματιστές, διακόπτες, καλώδια κλπ.) και του ονομαστικού ρεύματος. Για την ορθότητα των προτεινόμενων αποστάσεων επαναλήφθηκαν οι μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου και διαπιστώθηκε ότι η μέση έκθεση του εργαζομένου μειώθηκε σε πολύ μεγάλο ποσοστό.

Όπως διαπιστώνεται από την βιβλιογραφία και από τις πρακτικές εφαρμογές, οι κίνδυνοι που οφείλονται στο ηλεκτρικό ρεύμα είναι πολλοί και παρουσιάζονται τόσο συχνά λόγω του μεγάλου πεδίου εφαρμογής του. Έτσι τα ηλεκτρικά ατυχήματα είναι μια από τις συχνότερες αιτίες θανάτου στο χώρο εργασίας ανά τον κόσμο και γι' αυτό οι αρμόδιοι φορείς θα πρέπει να στηρίζουν οργανωμένες προσπάθειες ενημέρωσης και πρόληψης. Η παρούσα εργασία προσπάθησε να συμβάλει όσο το δυνατόν περισσότερο στον σκοπό αυτό.

Βιβλιογραφία

- [1] Lupfert H. Metallische Werkstoffe. C.F. Winterische Verlagshandlung, Prien, 1958.
- [2] Lesch, G. Lehrbuch der Hochspannungstechnik. Berlin-Goettingen-Heidllberg, 1959.
- [3] Oberdorfer G. Lehrbuch der Elektrotechnik. R. Oldenbourg Verlag Muenchen, 1961.
- [4] Thomas P.H. The Size of Flames from Nature Fires. 9th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, Pennsylvania, 844-859, 1962.
- [5] Wolf W. Stahlbau Ein Handbuch fuer Studium und Praxis - Band 2. 2. Neubearbeitete Auflage, Stahlbau Verlags-GmbH Koeln, Oldenburg, 1964.
- [6] Mazis A. Physics Athens, 1966.
- [7] Philippow E. Taschenbuch Elektrotechnik, Band 2, Starkstromtechnik. VEB Verlag Technik Berlin, 1966.
- [8] Philippow E. Taschenbuch Elektrotechnik, Band 1, Grundlagen. VEB Verlag Technik Berlin, 1968.
- [9] Europa. Fachbuchreihe Elektrotechnik, Tabellenbuch Elektrotechnik. *Europa-Nr. 30103*, 1970.
- [10] Heuer W. Handbuch fuer den Stahlbau - Band III Konstruktionen. Verlag fuer Bauwesen Berlin, 1970.
- [11] Hammer Willie. Energy Analysis in Handbook of System and Product Safety. Prentice-Hall, USA, 1972.
- [12] Leplat J. Accident analyses and work analyses. *Journal of Occupational Accidents 1*, παγες 331-340, 1978.
- [13] Holm R. Electric contacts theory and applications. *4th ed. Springer Verlag*, 1979.

- [14] PPC Standard C2. Overhead power lines clearances, 1982.
- [15] Public Power Corporation S.A. Minimum distances of M.V. line's conductors to the ground. *Specification No. C14, Athens*, 1982.
- [16] Hosemann-Boeck. Grundlängen der elektrischen Energietechnik. Springer Verlag, 1983.
- [17] Γδούτου Ε., Ζαχαροπούλου Δ. Προβλήματα θεωρίας ελαστικότητας. Εκδοτικός οίκος Αφοι Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, 1984.
- [18] Belus, K.P., Rodichev, Yu.M., Okhrimenko, G.M., Bogatyr, I.S., Veligura, V.V., Orlova, N.P., Zolotarev, P.F., Perevorukhov, G.I. Structural strength of hard porcelain with allowance for technological factors. *Strength of Materials*, 16(1):38–43, 1984.
- [19] IEC129/84. Alternating current disconnections and earthing switches. IEC, 1984.
- [20] Κανονισμός ΔΕΗ. Κανονισμός ΟΔ-22/ΔΕΔ-ΤΤΕ Δ-4/4-7-88. 1988.
- [21] Reason, J., Manstead, A., Stradling, S., Baxter, J., Campbell, K. Errors and violations on the roads: a real distinction? *Ergonomics*, 33(10-11):1315–1332, 1990.
- [22] VDI-WaermeAtlas. Berechnungsblaetter fuer den Waermeuebergang. VDI Sechste erweiterte Auflage, 1991.
- [23] Καραγιαννόπουλος Κ. Μη γραμμικά φαινόμενα σε στατικές ηλεκτρικές επαφές. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, 1992.
- [24] Dingus T.A., Wreggit S.S., Hathaway J.A. Warning variables affecting personal protective equipment use. *Safety Science*, 16:655–673, 1993.
- [25] Paques, J. J. Crane accidents by contact with powerlines. *Safety Science*, 16:129–142, 1993.
- [26] Αντωνόπουλος Γ. Μαθήματα Πυροσβεστικής Τέχνης, 1994.
- [27] Akbar-Khanzadeh, F., Bisesi, M.S., Rivas, R.D. Comfort of personal protective equipment. *Applied Ergonomics*, 26(3):195–198, 1995.
- [28] Buys R., Clark L. Events and causal factors analysis. Technical research and analysis center, Schientech Inc., Idaho., 1995.
- [29] Μπούρκας Π. Δ. Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 1996.

- [30] Hamins A. et al. Characteristics of pool fire burning. Fire Resistance of Industrial Fluids, Indianapolis, 1996.
- [31] Heskestad G. Flame Heights of Fuel Arrays with Combustion in Depth. Proceedings of the 5th International Symposium of Fire Safety Science, International Association of Fire Safety Science, 427-438, 1997.
- [32] Skotte J.H., Hjollund H.I. Exposure of welders and other metal workers to ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 18:470–477, 1997.
- [33] CIGRE Taskforce 33.04.01. A review of current knowledge: Polluted Insulators. CIGRE Brochure No 158-2000, 1998.
- [34] Lawton, R. Not working to rule: understanding procedural violations at work. *Safety Science*, 28(2):77–95, 1998.
- [35] Quintiere J.G. Principles of Fire Behavior. Delmar Publishers, 1998.
- [36] Williamson, A., Feyer, M. The causes of electrical fatalities at work. *Journal of Safety Research*, 29:187–196, 1998.
- [37] DOE Workbook, Revision 2. Conducting Accident Analysis Investigations. US Department of Energy, DC, USA, 1999.
- [38] Sacks, H. K., Cawley, J. C., Homce, G. T., Yenchek, M. R. Feasibility study to reduce injuries and fatalities caused by contact of cranes, drill rigs and haul trucks with high tension lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37:914–919, 1999.
- [39] Batra, P. E. Electric occupational accidents in the production, transmission distribution of electric energy in Greece. Dissertation work in National Technical University of Athens, 2000.
- [40] DIN VDE 0701/2000. Instandsetzung, Aenderung und Pruefung elektrischer Gereate fuer den Hausgebrauch und aehnliche Zwecke. DIN, 2000.
- [41] ABB. Switchgear Manual” 10th Edition. Cornelsen Verlag, Berlin Germany, 384, 459, 715, 2001.
- [42] ASHRAE. ASHRAE Handbook - Fundamentals. SI Edition, Atlanta, 2001.
- [43] Garavan, T.N., O’Brien, F. An investigation into the relationship between safety climate and safety behaviors in Irish organizations . *Irish Journal of Management*, 22(1):141–170, 2001.
- [44] Homce, G. T, Cawley, J. C., Yenchek, M. R., Sacks, H. K. An arlam to warn of overhead power line contact by mobile equipment. *Industry Applications Conference, Thirty Six IAS Annual Meeting*, 2:1376 – 1383, 2001.

- [45] Kim Y.S., Cho Y.S. Exposure of Workers to Extremely Low Frequency Magnetic Fields and Electric Appliances. *J Occup Health*, 43:141–149, 2001.
- [46] Petersen C. Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 3 Auflage, Vieweg, 2001.
- [47] Λαμπρόπουλος Κ. Μηχανική Αντοχή εναέριων δικτύων διανομής. Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Γενική Διεύθυνση Διανομής, Πάτρα, 2002.
- [48] Cengel Y. A Practical Approach, 2002.
- [49] DIN VDE 0700/2002. Sicherheit elektrischer Gereate fuer den Hausgebrauch und aehnliche Zwecke. DIN, 2002.
- [50] Gherardi, S., Nicolini, D. Learning the trade: a culture of safety in practice. *Organization* 9, 2:191–223, 2002.
- [51] Hazard Information Foundation Inc. (HIFI). Safety interventions to control hazards related to power line contacts by mobile cranes and other boomed equipment. Research Report, 2002.
- [52] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ. Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2003.
- [53] Βάγιας Ι. Σιδηρές Κατασκευές - Ανάλυση και διαστασιολόγηση. Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2003.
- [54] Bejan A., Kraus A. A Heat transfer Handbook. John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.
- [55] Cawley, J. C., Homce, G. T. Occupational electrical injuries in the United States, 1992 - 1998, and recommendations for safety research. *Journal of Safety Research*, 34(3):241–248, 2003.
- [56] Chen WF, Richard Liew JY. The Civil Engineering Handbook. CRC Press, 2003.
- [57] Dupuy J., Marechal J., Morvan D. Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties. *Combustion and Flame* 135, 65-76, 2003.
- [58] Guenther Valtinat. Aluminium im Konstruktiven Ingenieurbau. *Ernst and Sohn*, 2003.
- [59] Lienhard J. IV, Lienhard J. V. A Heat transfer Textbook 3rd Edition. Cambridge Phlogiston Press, 2003.
- [60] Sakurazawa H., Iwasaki A., Higashi T., Nakayama T., Kusaka Y. Assessment of Exposure to Magnetic Fields in Occupational Settings. *J Occup Health*, 45:104–110, 2003.

- [61] Μπούρκας Π. Δ. Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2004.
- [62] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ. Μετρήσεις σε βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2004.
- [63] Fire Dynamics Tools (FDTs). Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Final Report, 2004.
- [64] NRPB. Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0 - 300 GHz). *Doc.*, 15:1–215, 2004.
- [65] Polykrati, A. D., Paisios, M. P., Karagiannopoulos, C. G., Bourkas, P.D. A model for electric couplings temperature estimation suffering heavy lightning currents. *IEE Proc.-Generation, Transmission and Distribution*, 151(1):90–94, 2004.
- [66] Wetzell O. Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln. 31. Auflage, Teubner Verlag, 2004.
- [67] Πολυκράτη Α. Συμπεριφορά στατικών ηλεκτρικών συνδέσμων υπό ταχέως μεταβαλλόμενες ηλεκτρικές καταπονήσεις. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, 2005.
- [68] Eurocode 1. Eiwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten. Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005, 2005.
- [69] Kheifets L., Shimkhada R. Childhood leukemia and EMF: Review of the epidemiologic evidence. *Bioelectromagnetics*, 26:51–59, 2005.
- [70] Stratton B. Determining Flame Height and Flame Pulsation Frequency and Estimating Heat Release Rate from 3D Flame Reconstruction. Fire Engineering Research Report 05/2, New Zealand , 2005.
- [71] Latif M. Jiji. Heat Convection. Springer Verlag, Berlin, Heiderberg, 2006.
- [72] Bundesanstalt fuer Wasserbau. Berechnungsgrundlagen fuer Hochseilanlagen der Gierfaehren in Bundeswasserstrassen. BAW, 2007.
- [73] Hirt M., Bez R., Nussbaumer A. Stahlbau Grundbegriffe und Bemessungsverfahren. Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 2007.
- [74] Li C.-Y., Sung F.-C., Chen F.-L., Lee P.-C., Silva M., Mezei G. Extremely-low-frequency magnetic field exposure of children at schools near high voltage transmission lines. *Science of The Total Environment*, 376:151–159, 2007.

- [75] Paniagua J., Jimenez A., Rufo M., Gutierrez J., Gomez F., Antolin A. Exposure to extremely low frequency magnetic fields in an urban area. *Radiation and Environmental Biophysics*, 46:69–76, 2007.
- [76] Young H., Freedman R. University Physics with modern Physics. 12. Edition, Addison Wesley, 2007.
- [77] Μπούρκας Π. Δ. Εφαρμογές κτιριακών και βιομηχανικών εγκαταστάσεων, Βιβλίο Ασκήσεων. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2008.
- [78] Κατσούλου Α. Έλεγχος συνθήκης ουδετέρωσης σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, 2008.
- [79] Bryman, A. Social Research Methods, 3rd ed. Oxford University Press, Oxford, 2008.
- [80] Cawley, J. C., Homce, G. T. Trends in Electrical Injury in the U.S., 1992-2002. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(4):962–972, 2008.
- [81] Choudhry, R. M., Fang, D. Why operatives engage in unsafe work behavior: investiagating factors on construction sites. *Safety Science*, 46(4):566–584, 2008.
- [82] Janicak, C. A. Occupational fatalities due to electrocutions in the construction industry. *Journal of Safety Research*, 39:617–621, 2008.
- [83] Joseph W., Verloock L., Martens L. Measurements of Elf Electromagnetic Exposure of the General Public From Belgian Power Distribution Substations. *Health Physics*, 94:57–66, 2008.
- [84] Lin I.F., Li C.-Y., Wang J.-D. Analysis of individual- and school-level clustering of power frequency magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, 29:564–570, 2008.
- [85] Ψαρρός Ε. Υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιών. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2009.
- [86] Chi, Chia-Fen, Yang, Chong-Cheng, Chen, Zheng-Lun. In-depth accident analysis of electrical fatalities in the construction industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39:635–644, 2009.
- [87] Crow, D. Ray. Contact with Overhead Power Lines How Can We Prevent This. IEEE Paper No. ESW, August 2009.
- [88] Li Jianfeng, Zahng Bin, Wang Yang, Liu Mao. The unfolding of 12.23 Kaixian blowout accident in China. *Safety Science*, 47(8):1107–1117, 2009.

- [89] McNamee D., Legros A., Krewski D., Wisenberg G., Prato F., Thomas A. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 82:919–933, 2009.
- [90] Paraskevopoulos A.A.P., Bourkas P.D., Karagiannopoulos C.G. Magnetic induction measurements in high voltage centers of 150 to 20 kV. *Measurement*, 42:1188–1194, 2009.
- [91] Psarros E., Kondokostas Ch, Tsarabaris P., Karagiannopoulos C., Bourkas P. Overhead Lines Insulation Distance Reduction due to stay Wire’s Expansion from Ground Fires. Institution of Engineering and Technology, IET Generation, Transmission and Distribution, Vol. 3, Iss.3 pp. 237-241, 2009.
- [92] Halevidis, C.D., Anagnostatos, S.D., Polykrati, A.D., Koufakis, E.I., Bourkas, P.D. Proposal of a protection method against probable consequences to humans and the environment from short-circuit or abruption of a low voltage distribution line conductor. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 4(7):793–800, 2010.
- [93] Heinze P. Technische Mechanik II - Festigkeitslehre. Hochschule Wismar, 2010.
- [94] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields(1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 99:818–836, 2010.
- [95] Reynolds, R. L. Informational Report 1035: Field Evaluation of a Proximity Alarm Device. *Pittsburgh Technical Support Center, Pittsburgh PA*, παγες 107–115, 2010.
- [96] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ. Εφαρμογές ηλεκτρολογικών τεχνικών εκθέσεων πραγματογνωμοσύνης σε βιομηχανικές και κτιριακές εγκαταστάσεις. Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2011.
- [97] Χαλεβίδης, Κ., Κουφάκης Ε., Μπούρκας Π. Συστήματα προστασίας έναντι διακυμάνσεων της τάσης και αποκοπής αγωγού (φάσεως ή ουδέτερου) σε γραμμές χαμηλής τάσης. *Ελληνική Επιτροπή CIGRE, Σύνοδος “Αθήνα 2011”*, παγες 1–12, 2011.
- [98] Europa Lehrmittel. Tabellenbuch Elektrotechnik. Verlag Europa-Lehrmittel Nr. 30103, 2011.
- [99] Halevidis, C., Karagiannopoulos G., Bourkas P. Causes of conductor abruption during normal weather conditions. *10th IASTED European Conference (EuroPES 2011), Crete Greece*, 2011.

- [100] Hanna S.A., Motai Y., Varhue W., Titcomb S. Measurement evaluations of static and low frequency magnetic fields in the near field region. *Measurement*, 44:1412–1421, 2011.
- [101] Haynes W. CRC Handbook of Chemistry and Physics. 92. Edition, Taylor and Francis, 2011.
- [102] Mouzakitis, P. I., Halevidis, C. D., Soulinaris, G. K., Koustellis, J. D., Koufakis, E. I. Feasibility of fire ignition from molten particles of electrical appliances. 10th IASTED European Conference on Power and Energy Systems, Crete, Greece, 2011.

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Κατηγορίες δοκιμών τύπου [61, 77]	2
1.2	Απλοποιημένο παράδειγμα τριφασικού βραχυκυκλώματος [61, 85] όπου: MT: μετασχηματιστής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. 150kV/20kV) με σχετική τάση βραχυκύκλωσης u_k περίπου 20% για το φανταστικό μέρος και σχετική τάση βραχυκύκλωσης $u_r=0,6\%$ για το πραγματικό μέρος R_1, R_2, R_3 : γραμμές κορμού μέσης τάσης, MT1: μετασχηματιστής διανομής ονομαστικής ισχύος P_N σχετικής τάσης βραχυκύκλωσης u_k περίπου 4%, γ_1 : 1η γραμμή χαμηλής τάσης, γ_2 : 2η γραμμή χαμηλής τάσης, γ_3 : 3η γραμμή χαμηλής τάσης	4
1.3	Μορφή του ρεύματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα [61, 96] όπου: I_s : κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{sw} : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_d : διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_g : συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης	4
1.4	Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών βιομηχανικών μονωτικών, όπου α: επιφάνεια στερεού μονωτικού, 1: κρατήρας, 2: σπήλαια [61, 85]	15
1.5	Φόρτιση αγωγού λόγω βάρους και ανέμου	23
1.6	Επιρροή της θερμοκρασίας στο διάγραμμα (σ-ε) του χάλυβα [53]	27
1.7	Διάγραμμα (σ-ε) του χάλυβα S235 [73]	29
1.8	Περιγραφή συστήματος αγωγού με την βοήθεια συνάρτησης υπερβολής [46], όπου a, b, c, d, l οι αποστάσεις όπως αυτές αποτυπώνονται, H η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης και q η επιφόρτιση	30
1.9	Περιγραφή συστήματος αγωγού με την βοήθεια συνάρτησης υπερβολής με νέο σύστημα συντεταγμένων [46] όπου: $x_1, x_2, l, l/2, c$ οι αποστάσεις όπως αυτές αποτυπώνονται, f το βέλος κάμψης, H η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης και q η επιφόρτιση.	32
1.10	Μπάρα για την προστασία του προσωπικού από πιθανούς κινδύνους [37]	36
1.11	Σύμβολα λογικών σχέσεων [12]	40
2.1	Απόσταση καλωδίων από το έδαφος πριν και μετά την επίχωση	45

2.2	Λειτουργία του αυτόματου διακόπτη	46
2.3	Τυπικό παράδειγμα υπαίθριου υποσταθμού διανομής επί δίστυλου	54
2.4	Φωτογραφία τυπικού υποσταθμού σε δίστηλο	56
2.5	Μονογραμμικό υποσταθμού	57
2.6	Διάγραμμα ατυχήματος	61
2.7	Απλοποιημένο διάγραμμα διαρροής ρεύματος χωρίς ισοδυναμικές συνδέσεις	66
2.8	Παράδειγμα ισοδυναμικών συνδέσεων στο χώρο μιας γεννήτριας με πετρελαιοκινητήρα	67
2.9	Αποκοπή ουδετέρου που γειώνεται προ του μετρητή	68
2.10	Αποκοπή ουδετέρου που γειώνεται στο μετασχηματιστή	68
2.11	Αποκοπή ουδετέρου στην εγκατάσταση του καταναλωτή όταν γειώνεται ο ουδέτερος προ του μετρητή	69
2.12	Αποκοπή του ουδετέρου στην εγκατάσταση του καταναλωτή όταν γειώνεται ο ουδέτερος στον μετασχηματιστή	69
2.13	Ενεργοποίηση συστήματος GSM σε περίπτωση αποκοπής αγωγού a: Ηλεκτρονόμος, b: Πίνακας διανομής χαμηλής τάσης c: Μετασχηματιστής 20kV/400V, d: Αυτόματος διακόπτης	70
2.14	Κύκλωμα ηλεκτρονόμου επιτήρησης τάσης με χρονοκαθυστέρηση για προστασία των ευαίσθητων μηχανημάτων του καταναλωτή από την αποκοπή του αγωγού του ουδετέρου της γραμμής της ΔΕΗ ή από την αποκοπή αγωγού (ή αγωγών) φάσεως	71
2.15	Διάταξη προστασίας μέσω επιτηρητή τάσης	71
2.16	Παράδειγμα επιφόρτισης αγωγού λόγω βάρους και ανέμου	75
2.17	Απεικόνιση αρχικής κατάστασης αγωγού, όπου a_1, b_1, c, d_1, l είναι οι αποστάσεις όπως αυτές απεικονίζονται, H η εφελκυστική δύναμη του αγωγού και q η επιφόρτιση του αγωγού λόγω ιδίου βάρους	82
2.18	Νέο σύστημα συντεταγμένων αγωγού, όπου x_1, x_2, c οι αποστάσεις όπως αυτές απεικονίζονται, l το άνοιγμα του αγωγού, H_1 η οριζόντια αντίδραση, f το βέλος κάμψης και q η επιφόρτιση λόγω ιδίου βάρους ..	84
2.19	Διάγραμμα της παραμόρφωσης του αγωγού λόγω πυρκαγιάς στο περιβάλλον αυτού, όπου $f_1(x)$ η αρχική κατάσταση, $f_2(x)$ η τελική κατάσταση, A και B οι θέσεις των στήλων και l το άνοιγμα του αγωγού	85
3.1	Πειραματική διάταξη της δοκιμής υπερθέρμανσης	88
3.2	Μέτρηση μαγνητικού πεδίου για τα ύψη 0,7m και 1,0m για τον διακόπτη μέσης τάσης	90
3.3	Παράδειγμα μετρήσεων μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του διακόπτη μέσης τάσης	91
3.4	Παράδειγμα μετρήσεων μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του ασφαλειοαποζεύκτη	92
3.5	Παράδειγμα μετρήσεων μαγνητικού πεδίου κατά την δοκιμή υπερθέρμανσης του συγκεντρικού καλωδίου	92

3.6	Μέτρηση μαγνητικού πεδίου μετά την εφαρμογή των προτεινόμενων αποστάσεων ασφαλείας	94
-----	--	----

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Τιμές του συντελεστή κ	6
1.2	Τιμές του συντελεστή μ_d	6
1.3	Τιμές ασφαλειών σε πίνακες Χ.Τ. της Δ.Ε.Η (15kVA έως 100kVA)....	8
1.4	Τιμές ασφαλειών σε πίνακες Χ.Τ. (150kVA ως 1000kVA)	8
1.5	Τιμές Z_α/Z_β για γυμνούς αγωγούς Cu ή ισοδύναμου Al και συνγκεντρικά καλώδια	9
1.6	Δοκιμή της αντοχής της συσκευής σε τάση [96].....	12
1.7	Ελάχιστη απόσταση (d) και απόσταση ασφαλείας σε γραμμές μέσης τάσης (Μ.Τ.) και υψηλής τάσης (Υ.Τ.) [96]	13
1.8	Σχέσεις υπολογισμού ύψους φλόγας κατά τη βιβλιογραφία [4, 30, 31, 35, 63, 61, 70, 85, 96]	20
1.9	Ανεμομετρική κλίμακα Μποφόρ [96]	21
1.10	Επιφόρτιση αγωγών χαλκού (για Χ.Τ. και Μ.Τ.) [96]	22
1.11	Επιφόρτιση αγωγών αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (μόνο για Μ.Τ.) [96]	22
1.12	Επιφόρτιση αγωγών αλουμινίου (μόνο για Χ.Τ.) [96]	22
2.1	Υπογισμός της παραμόρφωσης του αγωγού λόγω πυρκαγιάς στο περιβάλλον του	85
3.1	Αποτελέσματα κύριων μετρήσεων των τριών συσκευών δοκιμής	90
3.2	Συνοπτικά αποτελέσματα μετρήσεων έκθεσης εργαζομένων στο μαγνητικό πεδίο	91
3.3	Τύποι συσκευών και προτεινόμενες αποστάσεις ασφαλείας	94

Κατάλογος Συντμήσεων

ΔΑΕ	Διακόπτης Αυτόματης Επαναφοράς
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΕΛΟΤ	Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΤΕΕ	Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος
ACSR	Aluminium conductor steel reinforced cable
DOE	Department of energy
GSM	Global system for mobile communications
ICNIRP	International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
MORT	Management oversight risk tree
NRPB	National Radiological Protection Board
SIM	Subscriber identify module
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.

Κατάλογος Συμβόλων

A	$[m^2]$	Επιφάνεια
F	$[kN]$	Δύναμη
E	$[V/m]$	Πεδιακή ένταση
E	$[N/mm^2]$	Μέτρο ελαστικότητας
I	$[A]$	Ρεύμα
I_d	$[A]$	Διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης
I_g	$[A]$	Συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης
I_N	$[A]$	Ονομαστικό ρεύμα
I_s	$[A]$	Κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης
I_{sw}	$[A]$	Εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης
L	$[m]$	Μήκος
\dot{Q}	$[kW]$	Ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας
R	$[\Omega]$	Αντίσταση
R_c	$[\Omega]$	Αντίσταση στένωσης
R_f	$[\Omega]$	Αντίσταση στρώματος επικαθίσεων
U	$[V]$	Τάση
V_P	$[V]$	Βηματική τάση
$Z_{R,d}$	$[kN]$	Εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού αγωγού
$Z_{R,k}$	$[kN]$	Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή αγωγού
$Z_{T,d}$	$[kN]$	Εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού αγωγού
$Z_{T,k}$	$[kN]$	Χαρακτηριστική εφελκυστική δύναμη αγωγού
d	$[m]$	Απόσταση
g	$[m/s^2]$	Επιτάχυνση βαρύτητας
k	$[W/(m^2K)]$	Συντελεστής θερμοπερατότητας
r	$[m]$	Απόσταση
u	$[\%]$	Σχετική τάση βραχυκύκλωσης
w	$[N/m^2]$	Πίεση ανέμου

α	$[1/^{\circ}C]$	Γραμμικός συντελεστής διαστολής
η		Συντελεστής χρησιμοποίησης πεδίου
θ	[K]	Θερμοκρασία
μ_o	$[Vs/(Am)]$	Μαγνητική διαπερατότητα του αέρα
ρ	$[\Omega \cdot m]$	Αντίσταση
ρ	$[kg/m^3]$	Πυκνότητα
σ	$[kg/m^2]$	Εφελκυστική τάση
$\Delta\vartheta_N$	[K]	Ονομαστική διαφορά θερμοκρασίας
$\Delta\vartheta_{max}$	[K]	Μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας

Κατάλογος δημοσιεύσεων του συγγραφέα

1. Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά

1.1. Koustellis J.D., Anagnostatos S.D., Halevidis C.D., Karagrigoriou F.S., Polykrati A.D., Bourkas P.D.: "Contact of heavy vehicles with overhead power lines", Elsevier, Safety Science, 2011, Vol. 49, pp. 951-955.

1.2. Halevidis C.D., Koustellis J.D., Polykrati A.D., Bourkas P.D.: "Exposure of workers to extremely low frequency magnetic fields during the temperature-rise test of electrotechnical equipment", Elsevier, Measurement, 2012, Vol. 45, pp. 1960-1965.

1.3. Koustellis J.D., Halevidis C.D., Polykrati A.D., Bourkas P.D.: "Analysis of a fatal electrical injury due to improper switch operation", Elsevier, Safety Science, 2013, Vol. 53, pp. 226-232.

2. Άρθρα δημοσιευμένα στα πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων μετά κρίσεως

2.1. Fotini S. Karagrigoriou, Panagiotis I. Mouzakis, John D. Koustellis, Emmanuel I. Koufakis, Constantinos G. Karagiannopoulos "Consumed electrical power in fuse cases of low voltage electrical boards", 10th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2011), Crete, Greece, 22-24 June 2011, p.p. 452-456.

2.2. John D. Koustellis, Fotini S. Karagrigoriou, Panagiotis I. Mouzakis, Aikaterini D. Polykrati, Perikles D. Bourkas, "Protection of technical personnel from electromagnetic field during the electrical devices overheating test", 10th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2011), Crete, Greece, 22-24 June 2011, p.p. 274-276.

2.3. John S. Katsanis, George N. Malahias, John D. Koustellis, Peris G. Halaris, "Electrical energy consumptions in hospitals - The case of lifts", 10th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2011), Crete, Greece, 22-24 June 2011, p.p. 313-319.

2.4. John D. Koustellis, Aikaterini D. Polykrati, John S. Katsanis, Peris G. Halaris, Perikles D. Bourkas, "Protective measures against electrical hazards of consumer installations", 10th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2011), Crete, Greece, 22-24 June 2011, p.p. 277-279.

2.5. Panagiotis I. Mouzakitis, Constantinos D. Halevidis, George K. Soulinaris, John D. Koustellis, Emmanuel I. Koufakis, "Feasibility of fire ignition from molten particles of electrical appliances", 10th Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES 2011), Crete, Greece, 22-24 June 2011, p.p. 292-295.

Βιογραφικό Σημείωμα

Ο κος Ιωάννης Κουστέλλης γεννήθηκε στην Αθήνα, την 29 Απριλίου 1973. Το ακαδημαϊκό έτος 1992-93 εισήχθη στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Βιέννης (TU WIEN), από όπου αποφοίτησε τον Ιούνιο του 2000 με βαθμό λίαν καλώς. Το έτος 2003 έγινε δεκτός ως υποψήφιος διδάκτορας με επιβλέποντα τον καθηγητή Π.Δ. Μπούρκα της Σχολής ΗΜΜΥ του ΕΜΠ, με γνωστικό αντικείμενο "Ηλεκτρικές Μετρήσεις και Υψηλές Τάσεις".

Από το 1999 έως το 2000 εργάστηκε για την εταιρεία BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG (BMW) Βιομηχανία κατασκευής κινητήρων αυτοκινήτων στην πόλη Steyr της Αυστρίας, υπό την αιγίδα του ερευνητικού κέντρου Profactor GmbH, όπου είχε ερευνητική έργο και έκανε πρακτική εφαρμογή, με κύριο αντικείμενο την προσομοίωση των παραγωγικών διαδικασιών της επιχείρησης και την δημιουργία ενός ψηφιακού εργαλείου λήψης αποφάσεων.

Από το 2000 έως και σήμερα ασκεί ιδιωτικό επάγγελμα με κύριο αντικείμενο την εκπόνηση μελετών (ηλεκτρομηχανολογικών, περιβαλλοντικών επιπτώσεων, πυρασφάλειας κλπ.) για βιομηχανικές εγκαταστάσεις, επιχειρήσεις, δημόσιους χώρους, ιστορικά μνημεία και αρχαιολογικούς χώρους. Παράλληλα έχει ερευνητική και εργαστηριακή συνεργασία με τους καθηγητές Ν. Θεοδώρου και Π. Μπούρκα σε θέματα ηλεκτρικών μετρήσεων και βιομηχανικών εγκαταστάσεων και έχει επικουρικό και διδακτικό έργο στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π..

Τον Ιούνιο του 2011 ήταν Πρόεδρος του Ευρωπαϊκού Συνεδρίου Ηλεκτρολόγων Μηχανικών "10th IASTED European Conference on Power and Energy Systems - EuroPES 2011" που πραγματοποιήθηκε στην Κρήτη. Επίσης από το 2011 μέχρι σήμερα, είναι κριτής επιστημονικών εργασιών προς δημοσίευση του διεθνούς περιοδικού "Safety Science", του εκδοτικού οίκου Elsevier.