



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

**Υπαίθριες Γραμμές  
Διανομής Χαμηλής Τάσης  
σε Περιβάλλον Πυρκαγιών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ελευθέριος Γ. Ψαρρός

Αθήνα, Απρίλιος 2009





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

**Υπαίθριες Γραμμές  
Διανομής Χαμηλής Τάσης  
σε Περιβάλλον Πυρκαγιών**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Ελευθέριος Γ. Ψαρρός

**Συμβουλευτική Επιτροπή :** Περικλής Δ. Μπούρκας  
Νικόλαος Ι. Θεοδώρου  
Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 17<sup>η</sup> Μαρτίου 2009.

.....  
Π. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Μ. Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....  
Δ. Κουτσούρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Α. Μαχιάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ε. Πυργιώτη  
Επίκουρος Καθηγήτρια  
Πανεπιστημίου Πατρών

Αθήνα, Απρίλιος 2009

.....  
Ελευθέριος Γ. Ψαρρός

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

Copyright © Ελευθέριος Γ. Ψαρρός, 2009

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.

**στα αδέρφια μου  
Αποστόλη και Κυριακή**



# Πρόλογος

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ηλεκτρικών Μετρήσεων του τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα. Είναι ο άνθρωπος ο οποίος απλόχερα όλο αυτό το διάστημα μου πρόσφερε την ανεκτίμητη βοήθεια του και την αστείρευτη επιστημονική και ηθική υποστήριξή του. Οι πολύτιμες συμβουλές του, η καθοδήγησή του και η ενθαρρυντική του παρότρυνση βοήθησαν ουσιαστικά και αποτελεσματικά στην εκπόνηση αυτής μου της εργασίας. Προς τούτο, δεν έχω παρά να του εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες. Συγχρόνως όμως, θεωρώ υποχρέωσή μου να ευχαριστήσω τους αγαπητούς μου καθηγητές κκ. Νικόλαο Θεοδώρου και Κωνσταντίνο Καραγιαννόπουλο που με υπομονή συμπαραστάθηκαν στην επίπονη προσπάθειά μου.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη σχολαστική μελέτη της εργασίας μου και τις εποικοδομητικές σχετικές τους παρατηρήσεις καθώς και τους συνυποψήφιους μου διδάκτορες για τη δημιουργική συνεργασία που είχα μαζί τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στο διδάκτορα κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη με τον οποίο συνεργαστήκαμε για μεγάλο χρονικό διάστημα στην εκτέλεση των απαραίτητων πειραμάτων και στη συγγραφή των σχετικών επιστημονικών εργασιών.

Τέλος αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την πολυαγαπημένη μου εξαδέλφη, την αξιόλογη διδάκτορα κα. Αικατερίνη Πολυκράτη που βοήθησε ποικιλοτρόπως στην επίτευξη του σκοπού μου, διαθέτοντας με καλοσύνη και υπομονή ένα πολύ μεγάλο μέρος από τον πολύτιμο χρόνο της.

Ελευθέριος Ψαρρός  
Αθήνα, Απρίλιος 2009





# Περίληψη

Η εργασία αυτή αφορά τις υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης σε περιβάλλον πυρκαγιάς.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μία εισαγωγή στα εναέρια δίκτυα διανομής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Γίνεται μία σύντομη αναφορά στα φαινόμενα των σπινθηρισμών στις εναέρια γραμμές διανομής και στη θερμική καταπόνηση των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης κατά το βραχυκύκλωμα.

Ο σκοπός της εργασίας που καθορίζεται στο δεύτερο κεφάλαιο είναι: η θερμική καταπόνηση των γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής τόσο από την πυρκαγιά όσο και από το βραχυκύκλωμα. Εξετάζονται επίσης: η θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων από τους αγωγούς κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος καθώς και η παραμένουσα διαστολή των επιτόνων από την πυρκαγιά.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μία πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.

Ακολούθως προτείνεται ένα μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος, καθώς και μία εφαρμογή του (βλ. κεφάλαιο 4).

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα πειραματικά και τα θεωρητικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά των επιτόνων σε περιβάλλον πυρκαγιάς.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής έγιναν 5 προγράμματα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών του (βλ. κεφάλαιο 6): α) το πρόγραμμα υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων μετάλλου, β) το πρόγραμμα υπολογισμού του ύψους της φλόγας σύμφωνα με το σχήμα της βλάστησης, γ) το πρόγραμμα υπολογισμού του ύψους της φλόγας σύμφωνα με το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, δ) το πρόγραμμα αναλυτικού υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή διανομής χαμηλής τάσης και ε) το πρόγραμμα εμπειρικού υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης και της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή διανομής χαμηλής τάσης.

Τα σχόλια επί των πειραματικών και των θεωρητικών αποτελεσμάτων που προαναφέρθηκαν δίνονται στο έβδομο κεφάλαιο. Μπορεί να υποθεθεί ότι κατά την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος σε οποιαδήποτε γραμμή διανομής χαμηλής τάσης για την οποία ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης, δεν δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου γιατί η αύξηση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται είναι αμελητέα. Επίσης το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο φαίνεται ότι δίνει μία ικανοποιητική προσέγγιση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος. Από τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα φαίνεται ότι η φωτιά προκαλεί παραμένουσα διαστολή στους επιτόνους που έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ισορροπίας των δυνάμεων στους στύλους, με επακόλουθο να προκαλείται μείωση των αποστάσεων μόνωσης.

Στο όγδοο κεφάλαιο δίνεται περιληπτικά η προαναφερθείσα συνεισφορά της εργασίας (του 7<sup>ου</sup> κεφαλαίου) στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές.

Στο τέλος της εργασίας υπάρχουν τα παραρτήματα που αφορούν α) τον υπολογισμό της θερμικής ροής από ακτινοβολία σε αγωγό αλουμινίου από καιγόμενο δέντρο, β) τον υπολογισμό της θερμικής ροής από μεταφορά σε αγωγό αλουμινίου από φωτιά χαμηλής βλάστησης και γ) ένα παράδειγμα χρήσης του προγράμματος υπολογισμού του ύψους της φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς υπαίθρου κάτω από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου του δικτύου της χαμηλής τάσης, καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

# Abstract

This thesis explores the overhead lines of low voltage distribution network during a fire breakout.

The first chapter constitutes an introduction of the overhead networks of distribution and transmission of the electric power. It also presents a short report on the electrical spark phenomena around the overhead distribution lines and the thermal stress of the low voltage distribution lines during a short circuit.

The aim of this thesis is outlined in the second chapter as follows: the thermal stress of the distribution network bare conductors by a fire as well as a short circuit. The temperature of hypothetical incandescent particles emitted by the conductors during their collision to the ground as well as the permanent elongation of the stay wires by the firestorm, are also examined.

In the third chapter the short circuit condition concerning low voltage distribution lines is being explored on a theoretical as well as an experimental level.

And consequently a mathematical model on the calculation of temperature of the hypothetical particles during their collision to the ground is being proposed along with one of its possible applications (see ch. 4).

The fifth chapter presents in detail the results of both experimental work and theoretical study pertaining to the behaviour of the stay wires under firestorm conditions.

Within the parameters of this thesis, five separate computer programs have been developed in order to facilitate the calculations in case of a fire breakout (see ch. 6): a) a program to calculate the temperature of the hypothetical metal particles, b) a program to measure the height of the flames according to the shape of the surrounding nature, c) a program to measure the height of the flames according to the heat release rate, d) a program to calculate analytically the short circuit current as well as the temperature released within the conductors in case of a short circuit in a low voltage line and e) a program to calculate empirically the short circuit current as well as the temperature released within the conductors in case of a short circuit in a low voltage line..

The commentary pertaining to the results of the experiments and the theoretical findings mentioned earlier are given in the seventh chapter.

The eight chapter presents the contribution of this thesis to further research as well as practical applications.

Towards the end of the thesis a number of appendices are provided pertaining to: a) the calculation of the heat flow through radiation to an aluminium conductor by a flaming tree, b) the calculation of the heat flow through convection to an aluminium conductor by a bush fire and c) an example of how to use the program of measuring the height of the flames in case of a fire outbreak in the countryside under bare aluminium conductors of low voltage network, as well as the bibliography cited.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	7
Περίληψη.....	9
Abstract .....	11
Περιεχόμενα .....	13
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>17</b>
1.1 Η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας .....	17
1.1.1 Το εναέριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας .....	18
1.1.2 Η συντήρηση του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.....	25
1.1.3 Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
1.1.4 Ο ποιοτικός έλεγχος του εξοπλισμού του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.....	29
1.2 Η πυρκαγιά στο περιβάλλον των γραμμών διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.....	31
1.2.1 Η καύση με ή χωρίς ύπαρξη φλόγας .....	31
1.2.2 Χαρακτηριστικά της φλόγας .....	33
1.2.3 Συμπεριφορά των εναέριων αγωγών και των επιτόνων του δικτύου διανομής σε περιβάλλον πυρκαγιάς .....	35
1.3 Θερμικά φαινόμενα σε υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.....	47
1.3.1 Το βραχυκύκλωμα σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.....	47
1.4 Φαινόμενα σπινθηρισμών στα δίκτυα της ηλεκτρικής ενέργειας .....	59
1.4.1 Σπινθηρισμοί επί των μονωτήρων και περί τους αγωγούς μέσης και υψηλής τάσης.....	60
1.4.2 Σπινθηρισμοί και τήγματα μετάλλου σε κακές ηλεκτρικές επαφές (επαφές με μεγάλη αντίσταση διάβασης) .....	65
<b>2 Σκοπός της εργασίας .....</b>	<b>67</b>
<b>3 Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης σε γραμμές     διανομής χαμηλής τάσης.....</b>	<b>69</b>
<b>4 Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών     τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.....</b>	<b>75</b>
4.1 Εφαρμογή του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου .....	83
<b>5 Πειραματικά και θεωρητικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των επιτόνων σε     περιβάλλον πυρκαγιάς.....</b>	<b>91</b>
5.1 Τα πειραματικά αποτελέσματα .....	92
5.1.1 Θερμική καταπόνηση περί την βάση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 7 kg.....	92

5.1.2	Θερμική καταπόνηση περί την βάση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 14kg.....	93
5.2	Θεωρητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων κατά τη θερμική καταπόνηση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 7kg.....	94
5.2.1	Ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας.....	94
5.2.2	Υπολογισμός του ύψους της φλόγας και της επιμήκυνσης του επιτόνου εντός αυτής.....	94
5.3	Θεωρητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων κατά τη θερμική καταπόνηση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 14kg.....	95
5.3.1	Ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας.....	95
5.3.2	Υπολογισμός του ύψους της φλόγας και της επιμήκυνσης του επιτόνου εντός αυτής.....	96
5.3.3	Υπολογισμός της μηχανικής τάσης θραύσης του επιτόνου.....	97
<b>6</b>	<b>Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών.....</b>	<b>99</b>
6.1	Πρόγραμμα υπολογισμού θερμοκρασίας τηγμάτων.....	100
6.2	Πρόγραμμα υπολογισμού ύψους φλόγας σύμφωνα με το σχήμα της βλάστησης ..	104
6.3	Πρόγραμμα υπολογισμού ύψους φλόγας σύμφωνα με το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας.....	108
6.4	Πρόγραμμα αναλυτικού υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης καθώς και του υπολογισμού της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή χαμηλής τάσης.....	109
6.5	Πρόγραμμα εμπειρικού υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης καθώς και του υπολογισμού της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή χαμηλής τάσης.....	116
<b>7</b>	<b>Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων.....</b>	<b>119</b>
7.1	Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη συνθήκη ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.....	119
7.2	Σχόλια επί των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων για τις συνέπειες πλεγμένων κλαδιών δένδρου μεταξύ των γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.....	120
7.3	Σχόλια επί των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά τις επαναλαμβανόμενες γεφυρώσεις μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού και του υπερκείμενου του αγωγού της ίδιας φάσης του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.....	120
7.4	Σχόλια επί του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.....	120

7.5	Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη συμπεριφορά των επιτόνων σε περιβάλλον πυρκαγιάς .....	121
<b>8</b>	<b>Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και πρακτικές εφαρμογές.....</b>	<b>123</b>
	<b>Παραρτήματα.....</b>	<b>125</b>
	Παράρτημα Ι. Υπολογισμός θερμικής ροής από ακτινοβολία σε αγωγό αλουμινίου από καιόμενο δέντρο. ....	125
	Παράρτημα ΙΙ. Υπολογισμός θερμικής ροής από μεταφορά σε αγωγό αλουμινίου από φωτιά χαμηλής βλάστησης. ....	126
	Παράρτημα ΙΙΙ. Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος υπολογισμού του ύψους της φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς υπαίθρου κάτω από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου του δικτύου της χαμηλής τάσης. ....	127
	<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>129</b>





# 1 Εισαγωγή

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν στους σταθμούς παραγωγής και στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Κατά τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας συμβαίνουν αναπόφευκτα σφάλματα, τα οποία εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Τα σφάλματα μπορούν να χωριστούν σε αυτά που εκδηλώνονται λόγω ακραίων περιβαλλοντικών φαινομένων (κεραυνοπληξία, χιονοπτώσεις, ανεμοθύελλες, κτλ.) και άλλων απρόσμενων τυχαίων παραγόντων και σε εκείνα που οφείλονται σε ηλεκτρικά και διηλεκτρικά φαινόμενα, όπως διαρροή, βραχυκύκλωμα, σπινθηρισμοί, τόξα, διάσπαση κτλ. Τα σφάλματα που οφείλονται σε αυτά τα φαινόμενα μπορούν τις περισσότερες φορές να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν εγκαίρως ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι συνέπειες σε βάρος της λειτουργίας του δικτύου. Ένας από τους πιο σημαντικούς τρόπους αντιμετώπισης των φαινομένων αυτών είναι η αναζήτηση πληροφοριών για τις περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη μελέτη ενός δικτύου (σωστές αποστάσεις μόνωσης, κατάλληλα υλικά, σωστές αποστάσεις μεταξύ στύλων, κ.α.). Εξίσου σημαντική είναι η συντήρηση του δικτύου προς αποφυγή των σφαλμάτων, η οποία πρέπει να γίνεται σύμφωνα με τον Κανονισμό Εγκατάστασης και Συντήρησης Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ) και τις σχετικές οδηγίες που αφορούν τη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας [8].

Στις παρακάτω παραγράφους γίνεται μία σύντομη αναφορά στο εναέριο δίκτυο μεταφοράς και διανομής και δίνονται πληροφορίες για τα φαινόμενα που συναντώνται στο περιβάλλον του. Γίνεται επίσης αναφορά για πυρκαγιές υπαίθρου γιατί σχεδόν παντού υπάρχουν γραμμές της ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες συχνά εμπλέκονται σ' αυτές.

## 1.1 Η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις εύκολα και με μικρές απώλειες. Αυτό οφείλεται στους μετασχηματιστές μεταφοράς, με τους οποίους ανυψώνεται αρχικά η τάση (πχ. στα 150kV και στα 400kV), ώστε στη συνέχεια στα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (KYT) να διανεμηθεί σε γραμμές κυρίως των 20kV (ή 15 kV) απ'

όπου ακολούθως ηλεκτροδοτούνται οι μετασχηματιστές διανομής για να υποβιβαστεί η τάση στα 400V/230V και να διανεμηθεί μέσω γραμμών στους καταναλωτές χαμηλής τάσης. Εκτός των καταναλωτών χαμηλής τάσης υπάρχουν και καταναλωτές μέσης τάσης όταν τα φορτία τους ανά φάση είναι μεγαλύτερα από 200A. Τα εναέρια δίκτυα μεταφοράς και διανομής πλεονεκτούν έναντι των υπογείων δικτύων λόγω του μικρού τους κόστους [53].

### **1.1.1 Το εναέριο δίκτυο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας**

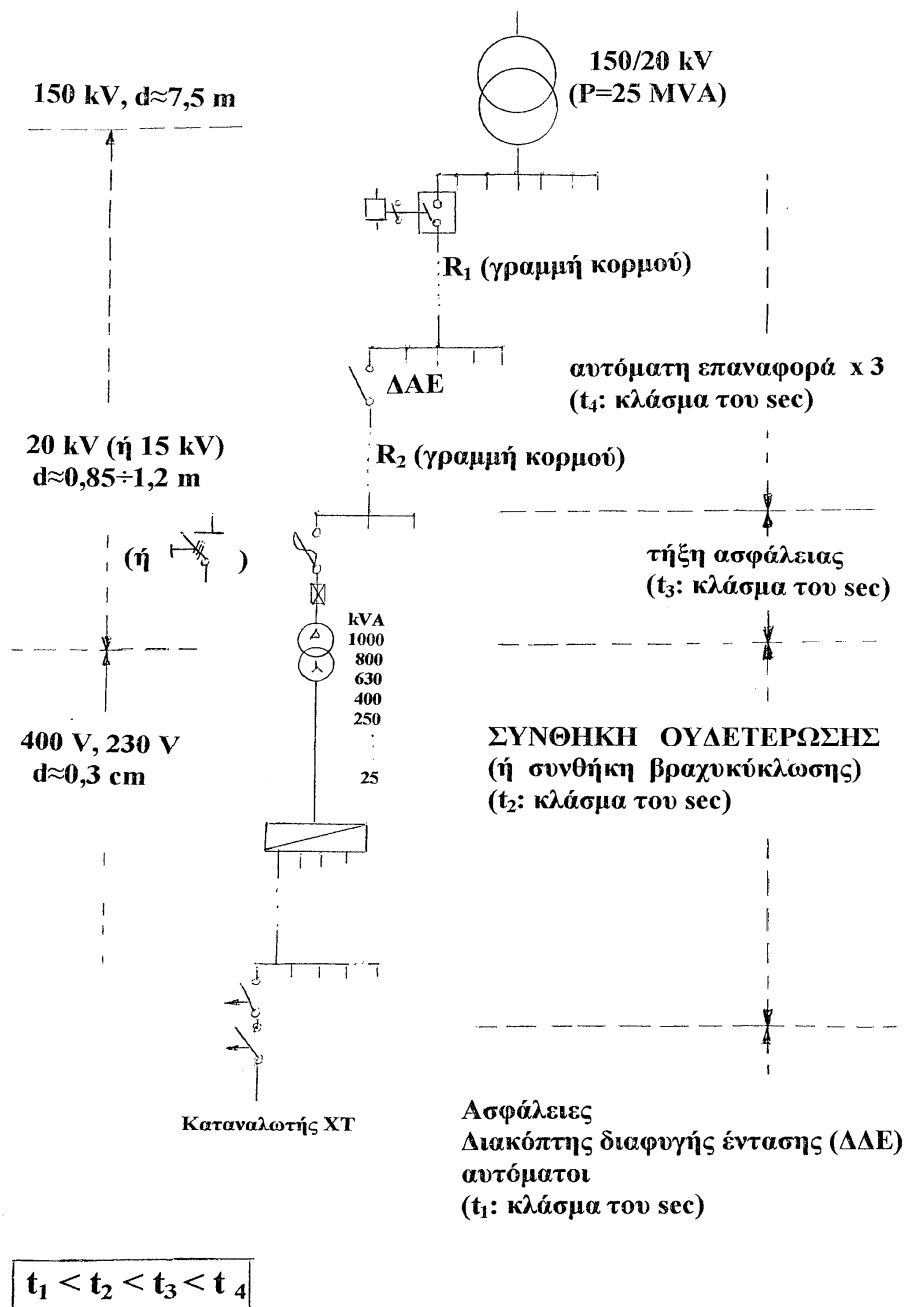
Οι εναέρια γραμμές συστημάτων μεταφοράς υψηλής τάσης κατασκευάζονται από γυμνούς αγωγούς που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα). Οι αγωγοί αυτοί αναρτώνται σε πυλώνες μέσω αλυσίδων μονωτήρων από πορσελάνη ή γυαλί.

Στο σχήμα 1.1.1-1, δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας [52]. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150kV/20kV, 25MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού» και συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R23) [52].

Καθεμία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής) μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού [52].

Όταν συμβεί ένα σφάλμα σε μία γραμμή κορμού (π.χ. βραχυκύκλωμα λόγω πτώσης ενός κλαδιού στη γραμμή), τότε ο διακόπτης προστασίας (ΑΔΕ ή ο ΔΑΕ) θα διακόψει αυτομάτως την ηλεκτροδότηση της συγκεκριμένης γραμμής και θα τεθεί αμέσως αυτομάτως στη θέση εντός για να ηλεκτροδοτηθεί η γραμμή και αν υπάρχει ακόμα το σφάλμα θα γίνει και πάλι αυτόματη διακοπή και ακολούθως αυτόματη εκ νέου ηλεκτροδότηση. Αν και κατά την δεύτερη αυτή αυτόματη προσπάθεια του διακόπτη συνεχίζει να υπάρχει το σφάλμα, θα γίνει και μία τρίτη αυτόματη «διακοπή-εκ νέου ηλεκτροδότηση» και μόνο αν εξακολουθεί να υπάρχει το σφάλμα θα συμβεί πλέον οριστική διακοπή ρεύματος της εν λόγω γραμμής κορμού. Είναι προφανές ότι η προαναφερθείσα σε τρεις κύκλους λειτουργία των ΑΔΕ και των ΔΑΕ αποσκοπεί, σε περιπτώσεις εμφάνισης παροδικών σφαλμάτων, τόσο στην προσπάθεια για απρόσκοπτη

ηλεκτροδότηση μίας μεγάλης περιοχής, όσο και στην αποφυγή άσκοπων μετακινήσεων συνεργείων. Σημειώνεται ότι η διακοπή της ηλεκτροδότησης σε κάθε κύκλο λειτουργίας των ΑΔΕ και των ΔΑΕ συμβαίνει πάντοτε σε κλάσμα του δευτερολέπτου (σχεδόν ακαριαία διακοπή, π.χ. 0,15s , 0,35s , κ.λ.π.), που στην πράξη σημαίνει πως δεν υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χρόνος για την εκδήλωση αξιόλογων θερμικών φαινομένων (δεν προκαλείται υπερθέρμανση της γραμμής πάνω από τα ανεκτά όρια [3,7,42,45,52], πολύ δε περισσότερο δεν δημιουργούνται τήγματα μετάλλου από τους αγωγούς).



Σχήμα 1.1.1-1: Απλοποιημένο παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας [52]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.1.1-1, οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με τη σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (20kV/400V, 230V ). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί στύλων ισχύος μέχρι 400kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) μεγαλύτερης ισχύος από 400kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών (βλ. σχήμα 1.1.1-1), ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών μέσης τάσης (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες και τριπολικοί αποζεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Η παροχή χαμηλής τάσης (400V, 230V) σε πελάτες χαμηλής τάσης γίνεται μέσω γραμμών χαμηλής τάσης (από γυμνούς αγωγούς ή συνεστραμμένα καλώδια) που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού (σχήμα 1.1.1-1)

Η παροχή μέσης τάσης σε καταναλωτές αφορά απορροφημένες εντάσεις ρεύματος άνω των 200Α ανά φάση, όπως συμβαίνει συνήθως σε βιομηχανίες, νοσοκομεία άνω των 100 κλινών, μεγάλα ξενοδοχεία, κτήρια ΑΕΙ, κ.λ.π..

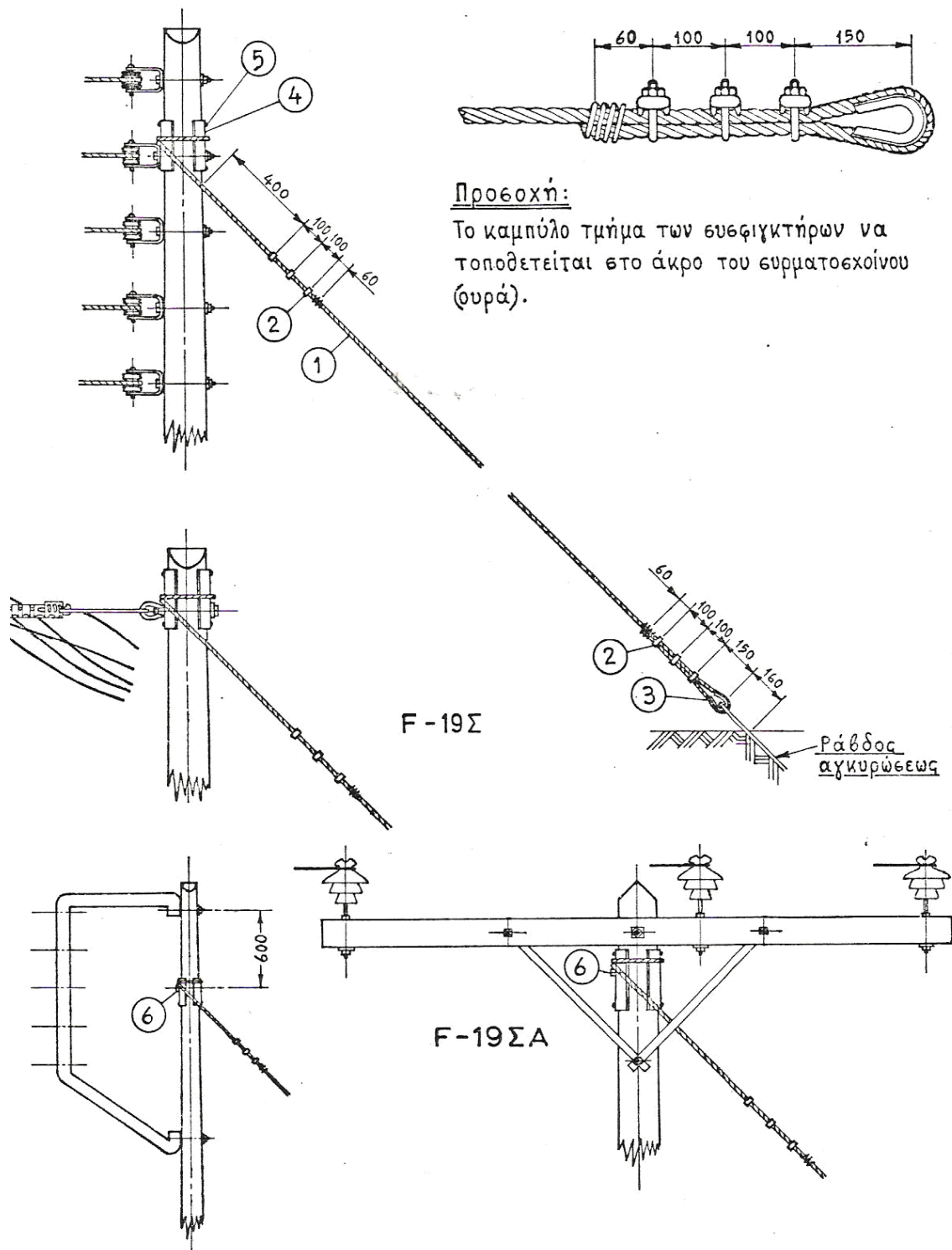
Στη μέση τάση και στη χαμηλή τάση χρησιμοποιούνται ξύλινοι στύλοι και μερικές φορές στις πόλεις, τσιμεντένιοι (και σπανιότερα μεταλλικοί). Τα υλικά και η εγκατάσταση κάθε ξύλινου στύλου είναι τυποποιημένα. Στο σχήμα 1.1.1-2 δίνεται ένα παράδειγμα για στύλο ευθυγραμμίας ή μικρής γωνίας με απλή στήριξη των γυμνών αγωγών μέσω ξύλινης τραβέρσας (βραχίονα) κατά τον κανονισμό της ΔΕΗ Ρ-3C [12].

Οι γυμνοί αγωγοί στα εναέρια δίκτυα χαμηλής τάσης είναι από κλώνους αλουμινίου (ή χαλκού). Στη μέση τάση χρησιμοποιούνται στα εναέρια δίκτυα γυμνοί αγωγοί ACSR, δηλαδή αγωγοί που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα) [42].



Σχήμα 1.1.1-2: Πίνακας ξύλινου στύλου με ξύλινη τραβέρσα, με μονωτήρες για τη στήριξη των γυμνών αγωγών μίας γραμμής μέσης τάσης. Στην εικόνα φαίνεται και η πρόσδεση του επιτόνου στο στύλο.

Η στήριξη των αγωγών πάνω στις ξύλινες τραβέρσες γίνεται με χρήση μονωτήρων που εξασφαλίζουν τη διηλεκτρική αντοχή μεταξύ αγωγών και αγωγών προς γη. Στο τέλος μίας εναέριας γραμμής ή σε αλλαγή της διεύθυνσής της τοποθετούνται επίτονοι (βλ.σχήμα 1.1.1-3) ή αντηρίδες γιατί εκεί αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις στους στύλους. Οι επίτονοι είναι συρματόσχοινα από ατσάλι που αγκυρώνονται εντός του εδάφους κατά τον κανονισμό π.χ. της ΔΕΗ F-25B [12]. Τοποθετούνται πάντοτε εντατήρες ώστε το συρματόσχοινο να τανυστεί σωστά. Το συρματόσχοινο δένεται ψηλά στο στύλο. Οι αντηρίδες είναι ξύλινοι στύλοι και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να στηρίζουν τους κύριους στύλους. Ο επίτονος σε στύλους μέσης τάσης έχει μονωτήρα στην πάνω μεριά του (δηλαδή προς τη θέση πρόσδεσής του στο στύλο), προς αποφυγή σπινθηρισμών (εκκενώσεων [42]) από τους αγωγούς προς τον επίτονο. Έχει συνήθως και προφυλακτήρα (προστατευτικό μεταλλικό κάλυμμα) προς τη μεριά πρόσδεσής του στο έδαφος [12]. Οι επίτονοι σε στύλους χαμηλής τάσης δεν διαθέτουν τον μονωτήρα που προαναφέρθηκε γιατί δεν υφίσταται πρόβλημα σπινθηρισμών στους αγωγούς και στους μονωτήρες χαμηλής τάσης [42].



Σχήμα 1.1.1-3: Σχηματική απεικόνιση πρόσδεσης επιτόνου σε ξύλινο στύλο και στο έδαφος[12]

Σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία αλλά και τους διεθνείς κανονισμούς, δεν προβλέπεται γείωση των επιτόνων αφού πρόκειται για συρματόσχοινα που χρησιμοποιούνται μόνο για την ορθή στήριξη των στύλων[8,12]. Τέλος, να σημειωθεί ότι

πολλές φορές γίνεται χρήση των δίδυμων στύλων, δηλαδή 2 στύλων μαζί που συνδέονται με κοχλίες, όταν είναι αδύνατη η χρησιμοποίηση επιτόνου ή αντηρίδας.

Η τάση του δικτύου είναι εναλλασσόμενη, ημιτονοειδούς μορφής και η ενεργός τιμή της κυματομορφής θεμελιώδους συχνότητας της τάσης αναφοράς καλείται ονομαστική τάση του δικτύου. Κάθε τμήμα του δικτύου σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί υπό ορισμένη ονομαστική τάση, και μπορεί να συνδέεται με διαφορετικά τμήματα του δικτύου που σχεδιάζονται να λειτουργούν υπό διαφορετική ονομαστική τάση μέσω μετασχηματιστών. Το δίκτυο χωρίζεται σε 3 μέρη σύμφωνα με το επίπεδο τάσης. Η ονομαστική τάση για το επίπεδο χαμηλής τάσης (XT) σε δίκτυο που αποτελείται από 4 κατακόρυφα διατεταγμένους γυμνούς αγωγούς είναι 230V μεταξύ φάσεως και ουδετέρου και καλείται φασική τάση, και 400 V μεταξύ φάσεων και καλείται πολική τάση. Η ονομαστική τάση για το επίπεδο μέσης τάσης (MT) σε δίκτυο που αποτελείται από τρεις οριζόντια διατεταγμένους γυμνούς αγωγούς είναι 20 kV (ή 15 kV). Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα εργοστάσια παραγωγής προς τα κέντρα διανομής υψηλής τάσης (KYT) γίνεται με τις γραμμές υψηλής 66kV, 150kV και 400kV.

Η συχνότητα του δικτύου αναφέρεται στον ρυθμό επανάληψης του θεμελιώδους κύματος της τάσης ανά δευτερόλεπτο, και είναι ενιαία και ίση με τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος για ολόκληρο το διασυνδεδεμένο δίκτυο και ενιαία για έκαστο απομονωμένο ηλεκτρικό δίκτυο μη διασυνδεδεμένου νησιού. Η ονομαστική τιμή της συχνότητας του δικτύου είναι ίση με 50 Hz.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ισχύει ότι [53]:

- 1) η μέγιστη αναμενόμενη τιμή της έντασης βραχυκύκλωσης στα διάφορα επίπεδα του δικτύου δεν υπερβαίνει στο δίκτυο XT για το υπόγειο δίκτυο συνήθως τα 25,0 kA, και κατ' εξαίρεση τα 32 kA, για εναέριο δίκτυο συνήθως τα 8,0 kA, και κατ' εξαίρεση τα 13 kA.
- 2) στο δίκτυο MT η ένταση βραχυκύκλωσης δεν ξεπερνά για τα 20 kV τα 7,2 kA, για τα 15 kV τα 9,6 kA και για τα παλαιά δίκτυα 6,6 kV και 22 kV τα 14,0 kA και τα 13,0 kA, αντίστοιχα και τέλος στο δίκτυο YT, για τα 150 kV τα 31,0 kA.
- 3) σε απομακρυσμένα ηλεκτρικά σημεία του δικτύου η ένταση βραχυκύκλωσης μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερη από τα παραπάνω αναφερόμενα μεγέθη.

Σημειώνεται ότι οι ανωτέρω τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης αφορούν την εναλλασσόμενη συνιστώσα του [3,7,42,45,52].

α/α	Επίπεδο Ρύπανσης	Τυπικό παράδειγμα περιβάλλοντος	Ελάχιστο μήκος ερπυσμού
I	Μικρό (0,006mg/cm <sup>2</sup> )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Περιοχές χωρίς βιομηχανίες και με μικρή πυκνότητα σπιτιών με κεντρική θέρμανση.</li> <li>2. Περιοχές με χαμηλή πυκνότητα εργοστασίων ή σπιτιών υπό συνήθεις ανέμους και/ή βροχές.</li> <li>3. Αγροτικές περιοχές (η χρήση λιπασμάτων μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο επίπεδο ρύπανσης).</li> </ol> <p><u>Σημείωση:</u> Οι προαναφερθείσες περιοχές θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 10km έως 20km από τη θάλασσα και να μην εκτίθενται σε ανέμους που έρχονται από τη θάλασσα.</p>	16mm/kV
II	Μεσαίο (0,20mg/cm <sup>2</sup> )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Περιοχές με εργοστάσια που δεν παράγουν ρυπαντικό καπνό και/ή με μέση πυκνότητα σπιτιών εξοπλισμένων με κεντρική θέρμανση.</li> <li>2. Περιοχές με υψηλή πυκνότητα σπιτιών και/ή εργοστάσια, αλλά εκτεθειμένες σε συνήθεις ανέμους και/ή βροχοπτώσεις.</li> <li>3. Περιοχές εκτεθειμένες σε ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα, αλλά όχι τόσο κοντά στην ακτή (το λιγότερο σε απόσταση αρκετών km).</li> </ol>	20mm/kV
III	Υψηλό (0,60mg/cm <sup>2</sup> )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Περιοχές με μεγάλη πυκνότητα εργοστασίων και προάστια μεγάλων πόλεων με μεγάλη πυκνότητα εγκαταστάσεων θέρμανσης που παράγουν καπνό.</li> <li>2. Περιοχές κοντά στη θάλασσα ή σε κάθε περίπτωση εκτεθειμένες σε σχετικά ισχυρούς ανέμους προερχόμενους από τη θάλασσα.</li> </ol>	25mm/kV
IV	Πολύ Υψηλό (>0,60mg/cm <sup>2</sup> )	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης εκτεθειμένες σε αγωγίμες σκόνες και σε βιομηχανικό καπνό ο οποίος παράγει ειδικά λεπτές αγωγίμες επικαθίσεις.</li> <li>2. Περιοχές γενικά μέτριας έκτασης πολύ κοντά στην ακτή ή εκτεθειμένες σε πολύ ισχυρό αέρα προερχόμενο από τη θάλασσα.</li> <li>3. Περιοχές ερήμου, που χαρακτηρίζονται από την απουσία βροχής για μεγάλες χρονικές περιόδους, εκτεθειμένες σε ισχυρούς ανέμους που μεταφέρουν άμμο και αλάτι.</li> </ol>	31mm/kV

Πίνακας 1.1.1-1: Επιλογή του ελάχιστου μήκους ερπυσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων αναλόγως του περιβάλλοντός τους [42]



Εκτός από το ρεύμα βραχυκύκλωσης που καταπονεί το δίκτυο (και γενικότερα τις ηλεκτροτεχνικές κατασκευές) δυναμικά και θερμικά [3,7,13,42,45,52], ενδιαφέρει ιδιαίτερα και η διηλεκτρική συμπεριφορά του εξοπλισμού των εγκαταστάσεων διανομής και βασικά των μονωτήρων, ώστε να περιορίζονται στο ελάχιστο κυρίως οι σπινθηρισμοί σε περιοχές με βιομηχανική ρύπανση ή με καθαλατώσεις. Στον πίνακα 1.1.1-1 δίνεται το μήκος ερπυσμού κεραμικών και γυάλινων μονωτήρων αναλόγως του περιβάλλοντός τους ώστε να διασφαλίζεται η διηλεκτρική αντοχή ανάλογα με το επίπεδο της τάσης.

### 1.1.2 Η συντήρηση του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Οι εναέριες γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης μελετώνται και κατασκευάζονται με αυστηρούς κανονισμούς τόσο στην Ελλάδα όσο και στις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε να μην αναιρούνται η μηχανική, η ηλεκτρική και η διηλεκτρική αντοχή από ετήσια σε ετήσια επιθεώρηση.

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της σχετικής νομοθεσίας που παρουσιάζεται στον Κανονισμό Εγκατάστασης Συντήρησης Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ, άρθρο 281), διενεργείται σε ετήσια βάση κλάδεμα των δέντρων που έρχονται σε επαφή ή γειτνιάζουν με εναέριες γραμμές χαμηλής τάσης και μέσης τάσης. Με το κλάδεμα αποφεύγονται επαφές των κλάδων των δέντρων με τις εναέριες εγκαταστάσεις, που θα είχαν ως αποτέλεσμα βλάβες στο δίκτυο και όχληση των καταναλωτών. Σύμφωνα με τον ΚΕΣΥΓΗΕ που διέπει τη λειτουργία των εναέριων δικτύων, οι αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται αφορούν αποστάσεις από τους ηλεκτροφόρους αγωγούς και όχι από τους στύλους πάνω στους οποίους είναι εγκατεστημένη η γραμμή μέσης τάσης.

Η ετήσια επιθεώρηση που διενεργείται (κατά τις οδηγίες Νο 9 και Νο 22 της ΔΕΗ [15,41]) είναι ένας οπτικός έλεγχος με κιάλια που αφορά την κατάσταση των αγωγών, των μονωτήρων (καθαλατώσεις, σκόνη, κτλ.) και των λοιπών στοιχείων του δικτύου (διακόπτες, συσφίξεις επαφών, κτλ.). Εκτός από τον οπτικό έλεγχο γίνονται μετρήσεις με τη θερμοκάμερα σε σημεία σύνδεσης των αγωγών και γενικά σε στατικές επαφές, από όπου διαπιστώνεται αν υπάρχει πρόβλημα μεγάλων αντιστάσεων διάβασης. Όταν η θερμοκρασία είναι αυξημένη, τότε ο λυόμενος ηλεκτρικός σύνδεσμος έχει μεγάλη αντίσταση και ενδέχεται να προκαλέσει σφάλματα λειτουργίας λόγω κακών επαφών ή λιώσιμο των επαφών [42,47].

### 1.1.3 Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας

Η διάρκεια ζωής των υπαίθριων εγκαταστάσεων διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται βασικά από εκείνη των μετασχηματιστών διανομής, των μονωτήρων, των αγωγών και των στύλων που στη συντριπτική πλειονότητά τους είναι ξύλινοι.

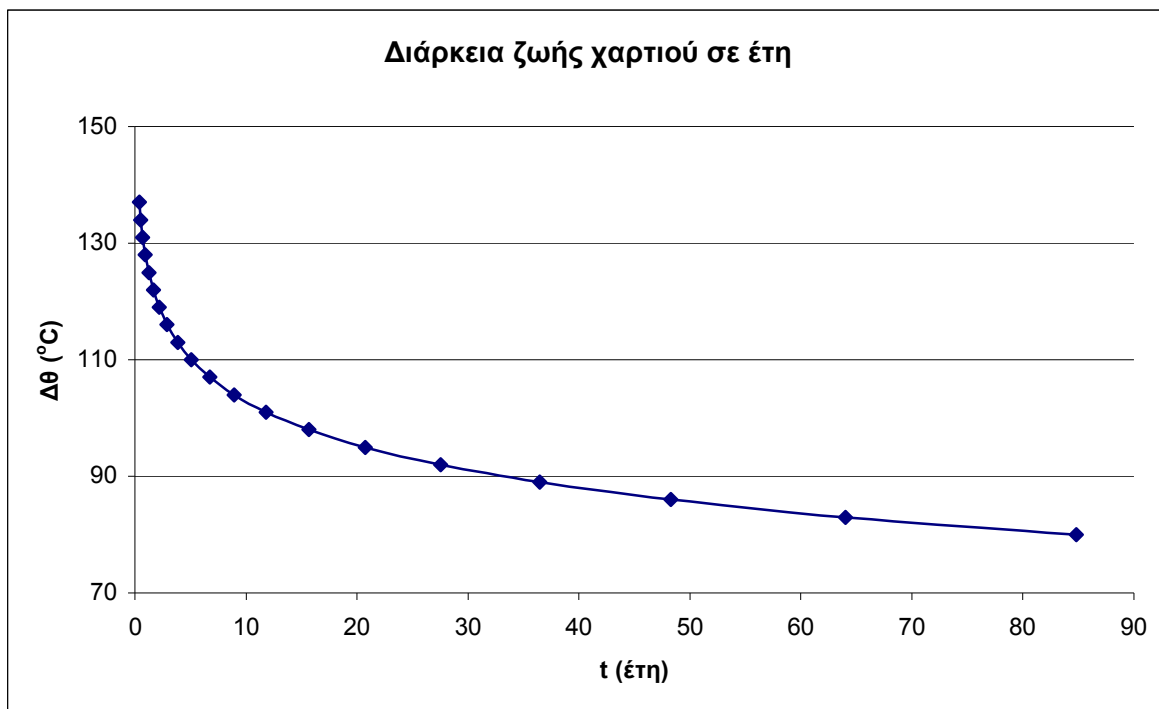
Η φυσιολογική γήρανση των μονώσεων συμβαίνει κάτω από τιμές της πεδιακής έντασης όπου η καταπόνηση μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κυρίως θερμική. Θερμική καταπόνηση από τις απώλειες Joule υφίστανται τα ηλεκτρομονωτικά υλικά όλων των ηλεκτροτεχνικών κατασκευών, ιδιαίτερα όταν συμβαίνει κακή απαγωγή θερμότητας. Η εικόνα που παρουσιάζει μία θερμικά καταπονημένη μόνωση από στερεά μονωτικά είναι η απανθράκωση και τήξη τους στην περιοχή όπου οι απώλειες Joule είναι ιδιαίτερα αυξημένες [4,25,42,45,51].

Για την επίδραση της θερμοκρασίας στη διάρκεια ζωής των στερεών μονωτικών υλικών έχουν γίνει αρκετές έρευνες, που δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για τις πρακτικές εφαρμογές. Οι χαρακτηριστικές π.χ. κατά τις σχέσεις (1.1.3-1), (1.1.3-2) και (1.1.3-3) δίνουν τη διάρκεια ζωής του χαρτιού, ανάλογα με τη θερμοκρασία  $\theta$ . Από τη μαθηματική προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτών (μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή) ισχύουν αντίστοιχα οι σχέσεις [4,42,51]:

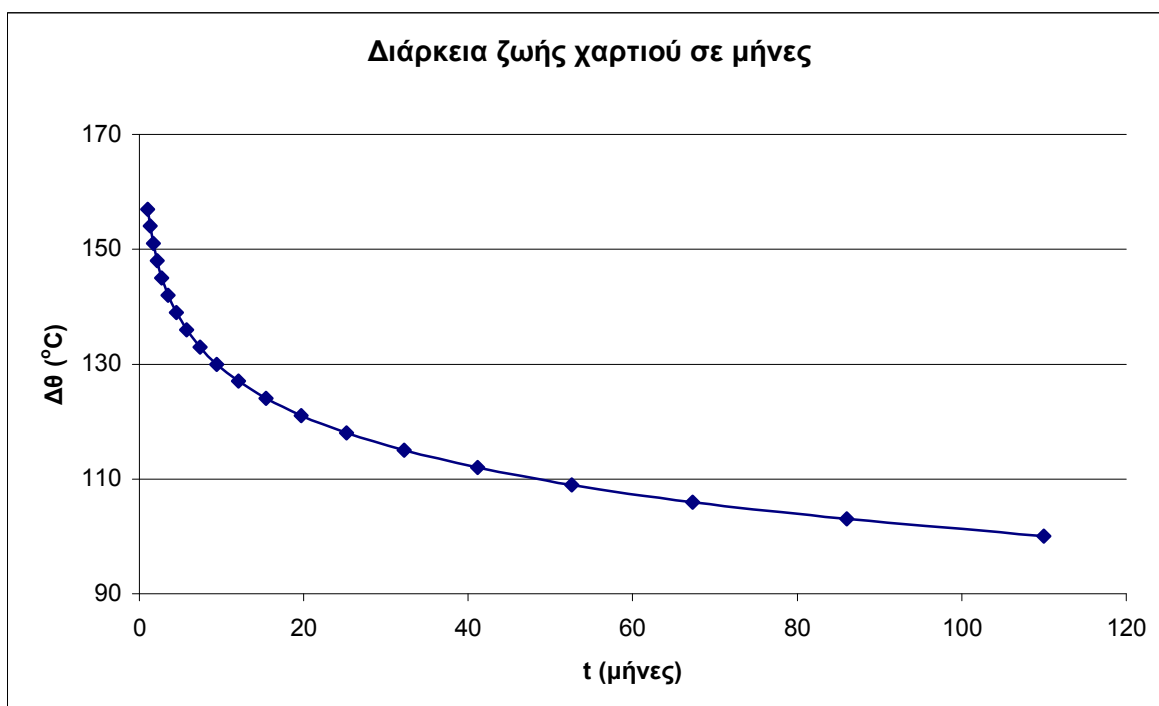
$$1) \quad \text{διάρκεια ζωής σε έτη:} \quad t = 1,57945 \times 10^5 e^{-0,0938 \Delta\theta} \quad (1.1.3-1)$$

$$2) \quad \text{διάρκεια ζωής σε μήνες:} \quad t = 3,96329 \times 10^5 e^{-0,0819 \Delta\theta} \quad (1.1.3-2)$$

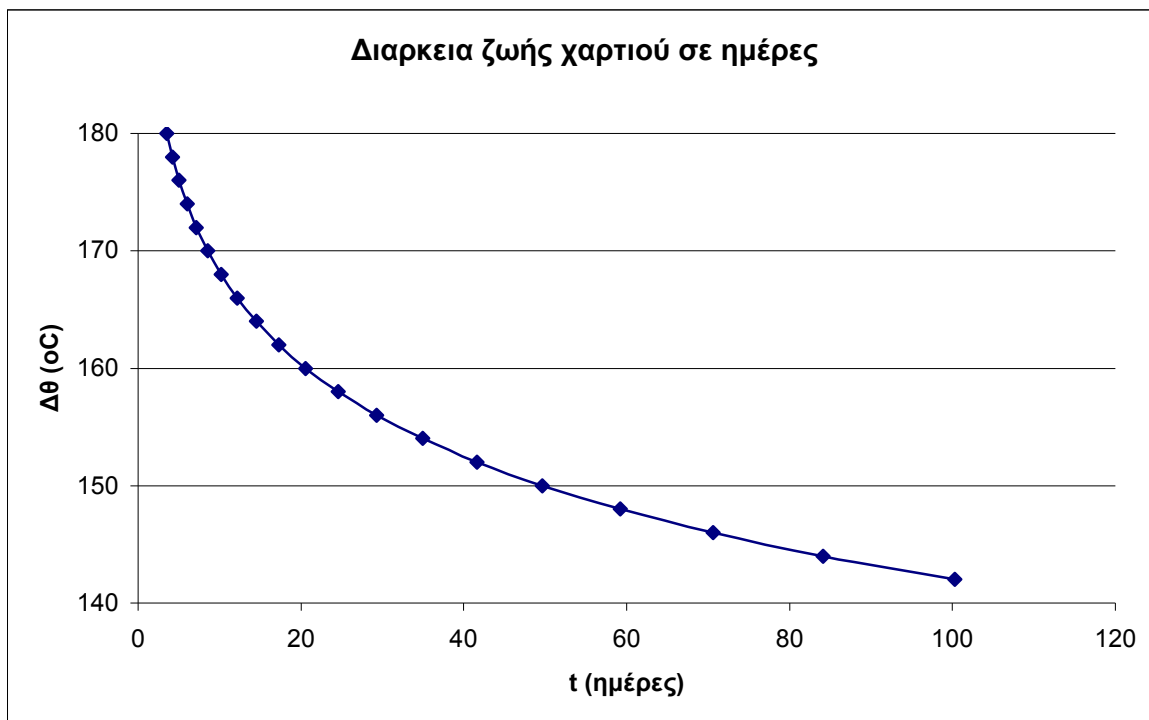
$$3) \quad \text{διάρκεια ζωής σε ημέρες:} \quad t = 264,29728 \times 10^5 e^{-0,0879 \Delta\theta} \quad (1.1.3-3)$$



Σχήμα 1.1.3-1: Διάρκεια ζωής του χαρτιού σε έτη ανάλογα με τη θερμοκρασία



Σχήμα 1.1.3-2: Διάρκεια ζωής του χαρτιού σε μήνες ανάλογα με τη θερμοκρασία



Σχήμα 1.1.3-3: Διάρκεια ζωής του χαρτιού σε ημέρες ανάλογα με τη θερμοκρασία

Έτσι, επειδή το χαρτί μαζί με το λάδι αποτελούν κυρίως τη μόνωση ενός μετασχηματιστή διανομής μπορεί κανείς να εκτιμήσει (μετά από μετρήσεις στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης) τον μέγιστο υπολειπόμενο χρόνο ζωής του από τη σχέση [49,51]:

$$\Delta\theta = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \quad (1.1.3-4)$$

όπου  $R_0$  η αρχική τιμή της αντίστασης μόνωσης,  $R$  η τιμή της αντίστασης κατά τον χρόνο μέτρησης υπό διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta\theta$  και  $\beta$  ένας συντελεστής που για τους μετασχηματιστές διανομής είναι περίπου 0,05.

Από τις χαρακτηριστικές των σχημάτων 1.1.3-1, 1.1.3-2 και 1.1.3-3 συμπεραίνεται ότι η διάρκεια ζωής στην πλειονότητα των μετασχηματιστών διανομής είναι της τάξεως των 50 ετών, δεδομένου ότι η θερμοκρασία λειτουργίας τους δεν υπερβαίνει συνήθως τους  $80^\circ\text{C}$ .

Για διάρκεια ζωής των μονωτήρων των γραμμών διανομής μέσης τάσης (20kV ή 15kV) υπάρχουν μετρήσεις ανάλογα με τη θερμοκρασία. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία η διάρκεια ζωής των μονωτήρων αυτών από γυαλί ή πορσελάνη είναι άνω των 50 ετών για θερμοκρασίες της τάξεως των  $80^\circ\text{C}$  [4]. Για τους πλαστικούς μονωτήρες που τοποθετούνται τα τελευταία χρόνια στα δίκτυα μέσης τάσης, δεν υπάρχουν ακόμη πληροφορίες σχετικά με

τη διάρκεια ζωής τους. Επειδή όμως όπως είναι γνωστό από την πράξη, είναι υδρόφοβοι δεν ευνοούν την εκδήλωση εξωτερικών μερικών εκκενώσεων και για το λόγο αυτό αναμένεται η διάρκεια ζωής τους να είναι αντίστοιχη με εκείνη των μονωτήρων από γυαλί ή πορσελάνη. Για τους μονωτήρες των γραμμών διανομής χαμηλής τάσης (400V/220V) ισχύουν κατά μείζονα λόγο τα προαναφερθέντα για τους κεραμικούς μονωτήρες, δεδομένου ότι στο επίπεδο αυτό της τάσης δεν μπορούν να εκδηλωθούν (σύμφωνα με το νόμο του Paschen και τη θεωρία του Townsend [4,7,25,42,45]) φαινόμενα ιονισμού αποδιδόμενα στο ατμοσφαιρικό αέρα.

Σε ότι αφορά τους αγωγούς (τόσο στη μέση τάση όσο και στη χαμηλή) στην από αλουμίνιο επιφάνειά τους σχηματίζεται με την πάροδο του χρόνου αλουμίνα ( $Al_2O_3$ ) που σε περιοχές μακριά από τη θάλασσα τους προστατεύει, γιατί είναι μονωτικό με μεγάλη διηλεκτρική αντοχή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος [3,7]. Γι' αυτό η διάρκεια ζωής των γυμνών αγωγών στις γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης είναι τουλάχιστον 50 έτη, όπως εξάλλου προκύπτει και από την αποκτηθείσα εμπειρία στα δίκτυα.

Τέλος, οι ξύλινοι στύλοι (που κυρίως χρησιμοποιούνται στα εναέρια δίκτυα) προέρχονται από κορμούς κωνοφόρων δένδρων, που επιδέχονται επεξεργασία με ειδικά υγρά (κρεόζωτο), ώστε να μην υφίστανται διάβρωση εντός του εδάφους από διάφορα παράσιτα. Από τις πρακτικές εφαρμογές προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής των στύλων αυτών συμβαδίζει συνήθως με εκείνη των υπόλοιπων στοιχείων του δικτύου, που προαναφέρθηκαν, πολύ δε περισσότερο όταν πρόκειται για τσιμεντένιους ή σιδερένιους στύλους.

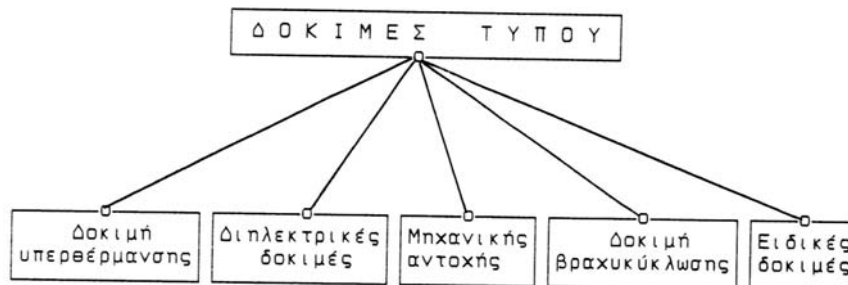
#### **1.1.4 Ο ποιοτικός έλεγχος του εξοπλισμού του δικτύου διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας**

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία μίας 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 διεθνείς κανονισμούς (VDE, IEC κτλ.) και στους κανονισμούς της ΔΕΗ και διακρίνονται στις δοκιμές τύπου και στις δοκιμές σειράς [25,42,45].

Οι δοκιμές **τύπου** γίνονται σε περιορισμένο αριθμό των παραχθέντων και έτοιμων προς διάθεση προϊόντων (π.χ. σε ορισμένους μονωτήρες μίας σύμβασης), ενώ οι **δοκιμές σειράς**

πραγματοποιούνται σε όλα ανεξαιρέτως τα τεμάχια (π.χ. σε όλους τους μονωτήρες μίας σύμβασης) [25,42,45].

Όταν μία συσκευή δεν αντεπεξέλθει επιτυχώς σε κάποια από τις προβλεπόμενες γι' αυτή δοκιμές τύπου και σειράς, τότε κρίνεται ακατάλληλη [25,42,45].



Σχήμα 1.1.4-1: Κατηγορίες των δοκιμών τύπου [42].

Οι δοκιμές τύπου, που προβλέπονται στους κανονισμούς VDE, IEC κλπ είναι η δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης θερμοκρασίας), οι διηλεκτρικές δοκιμές, η δοκιμή μηχανικής αντοχής, η δοκιμή βραχυκύκλωσης και τέλος ειδικές δοκιμές που ανάλογα με την περίπτωση περιγράφονται αναλυτικά στους κανονισμούς (σχήμα 1.1.4-1).

Η **δοκιμή υπερθέρμανσης (ή ανύψωσης της θερμοκρασίας)** αφορά την εξακρίβωση του ονομαστικού ρεύματος (μέγιστο ρεύμα συνεχούς λειτουργίας) μίας κατασκευής. Η τιμή αυτή δεν μπορεί να είναι τυχαία, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται σε προδιαγεγραμμένες τιμές ρεύματος [7,42,45].

Οι **διηλεκτρικές δοκιμές** στοχεύουν στην εξακρίβωση της ικανότητας μόνωσης. Η ονομαστική τάση (ή τάση σειράς) κάθε κατασκευής δεν μπορεί να είναι μία τυχαία τιμή, γιατί πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγεγραμμένη διαβάθμιση των τάσεων του δικτύου, που είναι π.χ. : 15kV, 20kV, 150kV, κλπ. Οι μετρήσεις, που γίνονται για τον έλεγχο της ικανότητας μόνωσης, αφορούν κυρίως τις μέγιστες λειτουργικές καταστάσεις της κατασκευής (κυρίως υπερτάσεις από κεραυνούς και χειρισμούς), από τις οποίες επιβεβαιώνεται η στάθμη μόνωσης [7,42,45].

Η **δοκιμή μηχανικής αντοχής** αφορά τη στιβαρότητα της κατασκευής [7,25,42,45].

Τέλος, με τη **δοκιμή βραχυκύκλωσης** ελέγχεται η καταπόνηση μίας ηλεκτροτεχνικής κατασκευής από τις μεγάλες δυνάμεις και θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά το βραχυκύκλωμα [7,14,25,42,45].

Είναι φανερό ότι οι παραπάνω δοκιμές τύπου είναι εφαρμόσιμες όπου υπάρχει νόημα. Σε ένα μονωτήρα π.χ. δεν έχει νόημα η δοκιμή υπερθέρμανσης, πολύ δε περισσότερο σε ένα στύλο, ενώ έχει μεγάλη σημασία για τις ηλεκτρικές επαφές ενός ασφαλειοδιακόπτη ή μίας ασφαλειοθήκης κ.λ.π..

Οι δοκιμές σειράς αφορούν το σύνολο του εξοπλισμού και είναι ιδιαίτερες για κάθε στοιχείο του (μετασχηματιστές, μονωτήρες, αποζεύκτες, κ.λ.π.). Οι δοκιμές π.χ. σειράς για ένα μετασχηματιστή διανομής είναι κυρίως οι παρακάτω [7,45]: οι απώλειες σιδήρου και χαλκού, η σχετική τάση βραχυκύκλωσης (η οποία για τους μετασχηματιστές διανομής του ελληνικού δικτύου είναι κατά μέσο όρο περίπου 4%), η σχέση μετασχηματισμού, η διηλεκτρική αντοχή (τόσο από την πλευρά της μέσης τάσης όσο και στη χαμηλή τάση), κ.λ.π..

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παραλαβή όλου του εξοπλισμού του δικτύου από τις εταιρείες ηλεκτρισμού, γίνεται μετά από την πραγματοποίηση των δοκιμών που προαναφέρθηκαν, γεγονός που συντελεί οπωσδήποτε στη μεγάλη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού κατά τη παράγραφο 1.1.3.

## **1.2 Η πυρκαγιά στο περιβάλλον των γραμμών διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας**

### **1.2.1 Η καύση με ή χωρίς ύπαρξη φλόγας**

Οι πυρκαγιές αρχίζουν συνήθως από μία μικρή εστία όταν συνυπάρχουν οι παρακάτω 4 παράγοντες [16]:

- 1) η καύσιμη ύλη,
- 2) η θερμότητα ικανή να διατηρήσει υψηλή θερμοκρασία (τη θερμοκρασία ανάφλεξης που εξαρτάται από το είδος της καύσιμης ύλης – βλ. πίνακα 1.2.1-1),
- 3) το οξυγόνο (ή γενικότερα ένα οξειδωτικό μέσο) το οποίο είναι σε ποσοστό 21% κατ' όγκο στον ατμοσφαιρικό αέρα,
- 4) η διαδικασία αυτοσυντήρησης της φωτιάς

Η πυρκαγιά από αυτανάφλεξη (που συνήθως εκδηλώνεται σε σκουπιδότοπους), οφείλεται στη δημιουργία ενός μίγματος με την αυτόματη αναπήδηση φλόγας και φωτιάς [16].

Υλικό	Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)	Θερμοκρασία αυτανάφλεξης(°C)
άχυρα	175	-
βαμβάκι	230-266	254
εφημερίδες	185	-
χαρτί	230	-
μαλλί	200	-
πευκόξυλο	228-264	260
PVC	391	454

Πίνακας 1.2.1-1: Θερμοκρασία ανάφλεξης και αυτανάφλεξης ορισμένων στερεών υλικών που αποτελούν συνήθως καύσιμη ύλη σε πυρκαγιές υπαίθρου [16].

Πολλές φορές υπό περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου μπορεί να υπάρξει καύση χωρίς ύπαρξη φλόγας που ονομάζεται αργή καύση και εμφανίζεται όταν μία στερεά επιφάνεια υφίσταται ταυτόχρονα πυράκτωση και αποτέφρωση. Αυτή η πυράκτωση είναι μία ένδειξη ότι η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 1000°C [28]. Περιπτώσεις αργής καύσης είναι η καύση στο τσιγάρο ή η καύση των κάρβουνων. Αλλάζοντας τις συνθήκες καύσης αυξάνοντας τη ροή αέρα (άρα και του οξυγόνου στην καιγόμενη επιφάνεια), μπορεί η αργή καύση να μετατραπεί σε φλεγόμενη καύση με ύπαρξη φλόγας, όπως συμβαίνει για παράδειγμα φυσώντας τα χωρίς φλόγα καρβουνιασμένα ξύλα μέσα σε ένα τζάκι [28]. Οι φωτιές μπορούν να σβήσουν με την απομάκρυνση ενός από τα 4 απαραίτητα στοιχεία για την ύπαρξή της, δηλαδή την καύσιμη ύλη ή το οξυγόνο ή την θερμότητα ή την αυτοσυντήρηση της φωτιάς. Η πυρόσβεση με νερό προκαλεί την ελάττωση της θερμότητας ενώ με διοξείδιο του άνθρακα τη μείωση της ποσότητας οξυγόνου.

Η μείωση του οξυγόνου στο περιβάλλον της πυρκαγιάς μπορεί να προκαλέσει αίσθηση πνιγμονής, ασφυξία και τελικά το θάνατο. Πολύ μεγάλος είναι ο κίνδυνος από το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) που συνυπάρχει στα καυσαέρια. Ένα ποσοστό του στον ατμοσφαιρικό αέρα 1% έως 1,3% κατ' όγκο προκαλεί το θάνατο. Από το διοξείδιο του άνθρακα μπορούν να προκληθούν σοβαρά αναπνευστικά προβλήματα (σε ποσοστό μέχρι 5%), ενώ σε ποσοστό 10% σε συνδυασμό με την έλλειψη οξυγόνου μπορεί να προκληθεί απώλεια των αισθήσεων ακόμα και ο θάνατος [16].



## 1.2.2 Χαρακτηριστικά της φλόγας

Η φλόγα συνοδεύεται από θερμότητα και αποτελείται γενικά από μία μίξη οξυγόνου (από τον αέρα) και κάποιου άλλου αερίου (από την καύσιμη ύλη) που συνήθως αποτελείται από άνθρακα και υδρογόνο. Στην περίπτωση π.χ. του κεριού οι ατμοί του που παράγονται λόγω της θερμότητας αντιδρούν με το οξυγόνο του αέρα και παράγουν θερμότητα και φωτεινή ακτινοβολία (λάμψη) η οποία είναι η φλόγα. Ένα άλλο παράδειγμα είναι το ξύλο το οποίο αποσυντίθεται από τη θερμότητα, σε αέρια καύσιμη ύλη (ξυλάνθρακα) που μαζί με το οξυγόνο του αέρα παράγουν θερμότητα και φλόγα (φωτεινή ακτινοβολία). Αυτή η διαδικασία αποσύνθεσης καλείται πυρόλυση [28]. Οι φωτεινότερες φλόγες δεν είναι και πάντα οι πιο θερμές. Για παράδειγμα, το υδρογόνο καίγεται με οξυγόνο για να παράξει νερό με μία φλόγα σχεδόν αδιαφανή τόσο που ακόμα και σε ένα σκοτεινό δωμάτιο δεν είναι ορατή [44]. Σε περιπτώσεις πυρκαγιών υπαίθρου η θερμοκρασία της φλόγας είναι γενικά από 870°C έως 1020°C [35,44].

Το ύψος φλόγας υπολογίζεται με διάφορες μεθόδους [5,23,26,28,44,45,46]. Ο πίνακας 1.2.2-1 περιγράφει μερικούς από αυτούς.

Ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας  $\dot{Q}$  είναι ένα μέγεθος που αφορά την ισχύ της φωτιάς. 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 [28]:

$$\dot{Q} = \dot{m}'' A \Delta H_c \text{ σε kW} \quad (1.2.2-1)$$

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

Ο συντελεστής  $\dot{Q}^*$  δίνεται από τη σχέση [28,39]:

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho c_p T \sqrt{g D D^2}} \quad (1.2.2-2)$$

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

Δηλαδή,

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{1101 D^{5/2}} \quad (1.2.2-3)$$

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

Πίνακας 1.2.2-1: Σχέσεις υπολογισμού ύψους φλόγας κατά τη βιβλιογραφία [5,23,26,28,44,45,46].

$\dot{Q}^*$ : ένας συντελεστής

H : το ύψος της φλόγας (m )

$\rho$  : η πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα (1,2 kg/m<sup>3</sup>)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s<sup>2</sup>)

D : η διάμετρος της φωτιάς

$\dot{m}''$  : ο ρυθμός απώλειας μάζας ανά μονάδα επιφανείας και μονάδα χρόνου (kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$\dot{Q}$  : ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας (kW)

Από πειράματα που έχουν γίνει σχετικά με το ύψος της φλόγας ( $H_\phi$ ) με καύσιμη ύλη έλατα διαφορετικών υψών, έχει προταθεί η σχέση υπολογισμού [43]:

$$H_\phi = 2,0 H_k \quad (1.2.2-4)$$

όπου  $H_k$  είναι το αποκαλούμενο «ύψος κορώνας» που αντιστοιχεί στο ύψος της φυλλωσιάς και ισούται με τη διαφορά μεταξύ του συνολικού ύψους δέντρου και του ύψους του γυμνού

κορμού του. Ειδικότερα από τα συμπεράσματα της άνω βιβλιογραφίας φαίνεται ότι όσο πιο ψηλό είναι το δέντρο τόσο πιο μικρός είναι ο λόγος αυτός. Σε περιπτώσεις δέντρων γύρω στα 1,3 μέτρα ύψους κορώνας, το ύψος της φλόγας ήταν περίπου 4 μέτρα δηλαδή με έναν μέσο λόγο ύψους φλόγας ως προς ύψος κορώνας ίσο με 3. Για πιο ψηλά δέντρα από προηγούμενως (γύρω στα 2,4 μέτρα) ο λόγος αυτός έπεσε στο 2 και για ακόμα ψηλότερα δέντρα (περίπου 3,5 μέτρα), ο λόγος έγινε γύρω στο 1,5. Συνεπώς η σχέση (1.2.2-4) είναι μία ικανοποιητική προσέγγιση για δέντρα μέχρι ύψη 3,5 μέτρα

### 1.2.3 Συμπεριφορά των εναέριων αγωγών και των επιτόνων του δικτύου διανομής σε περιβάλλον πυρκαγιάς

Η θερμική διαστολή είναι η ιδιότητα της ύλης να αλλάζει σε όγκο σαν αποτέλεσμα των αλλαγών της θερμοκρασίας. Όταν ένα σώμα ζεσταίνεται, τα μόριά του κινούνται πιο έντονα και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο. Υλικά που συστέλλονται με αύξηση της θερμοκρασίας είναι ασυνήθιστα στη φύση και, όταν συμβαίνει, ισχύει μόνο για περιορισμένες ζώνες θερμοκρασιών. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα, στις θερμοκρασίες 0-4°C για το νερό και τον πάγο όταν ο πάγος λιώνει και ελαττώνεται ο όγκος του. Ο βαθμός της διαστολής προς την αλλαγή της θερμοκρασίας καλείται συντελεστής θερμικής διαστολής και γενικά ποικίλει με τις διάφορες θερμοκρασίες. Τα συνηθισμένα από την εφαρμοσμένη μηχανική στερεά έχουν θερμικούς συντελεστές οι οποίοι δεν αλλάζουν ιδιαίτερα με την αλλαγή της θερμοκρασίας και μπορεί να θεωρηθεί ότι η τιμή τους είναι σταθερή και ίση με το μέσο όρο των τιμών τους [17].

Μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία π.χ. ενός αγωγού διανομής ή ενός επιτόνου αρχικού μήκους  $L$ , η επιμήκυνσή του ( $\Delta L$ ) θα είναι ανάλογη με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ( $\Delta\theta$ ). Η σχέση που διέπει τη γραμμική αυτή διαστολή είναι [17]:

$$\Delta L = \alpha L \Delta\theta \quad (1.2.3-1)$$

όπου ο  $\alpha$  είναι ο συντελεστής γραμμικής διαστολής και εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του μετάλλου [17]. Κατά τη βιβλιογραφία, ο συντελεστής γραμμικής διαστολής  $\alpha$  για το ατσάλι είναι  $1,24 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [38] και του αλουμινίου  $2,4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [17]. Βέβαια η διαστολή δεν αφορά μόνο το μήκος της, αλλά γίνεται ταυτόχρονα σε όλες τις διαστάσεις. Αυξάνεται, δηλαδή, και το εμβαδόν των επιφανειών (επιφανειακή διαστολή), αλλά και ο όγκος (κυβική διαστολή ή διαστολή όγκου). Η μεταβολή του όγκου ( $\Delta V$ ) ενός αντικειμένου (στην υπό εξέταση περίπτωση ενός αγωγού ή ενός επιτόνου) όταν μεταβληθεί

η θερμοκρασία του κατά  $\Delta\theta$ , είναι ανάλογη τόσο του αρχικού όγκου ( $V$ ) όσο και της τιμής  $\Delta\theta$ , και δίνεται από τη σχέση [17]:

$$\Delta V = \beta V \Delta\theta \quad (1.2.3-2)$$

όπου ο  $\beta$  είναι ο συντελεστής διαστολής όγκου του υλικού που εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού [17].

Η μετάδοση όμως της θερμότητας για να συμβεί η ανωτέρω διαστολή δε γίνεται μόνο μέσω της μάζας του σώματος (μετάδοση της θερμότητας με αγωγή) αλλά και με ακτινοβολία και μεταφορά της θερμότητας μέσω του αέρα [34,37,40,48]. Η δι' αγωγής θερμότητα από τη φλόγα σε μία εναέρια γραμμική διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί μόνο να συμβεί όταν οι αγωγοί βρίσκονται υπό την άμεση επίδρασή της. Αυτό μπορεί να συμβεί σπάνια γιατί, λόγω των ετήσιων προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης, δεν υπάρχει συνήθως καύσιμη ύλη (δηλαδή κλαδιά δέντρων) πλησίον των αγωγών ώστε σε περίπτωση πυρκαγιάς να βρεθούν υπό την άμεση επίδραση της φλόγας. Γι' αυτό η διαστολή των αγωγών από τη φωτιά οφείλεται βασικά στην ακτινοβολούμενη θερμότητα και τη μεταφορά της θερμότητας μέσω του αέρα. Όμως στην περίπτωση του επιτόνου, η μετάδοση της θερμότητας σε αυτόν κατά την εκδήλωση πυρκαγιάς γίνεται τόσο με ακτινοβολία και μεταφορά μέσω του αέρα όσο και με αγωγή, δεδομένου ότι οι επίτονοι βρίσκονται υπό την άμεση επίδραση της φλόγας αφού αγκυρώνονται στο έδαφος. Αν λάβει κανείς υπόψη ότι οι επίτονοι κατασκευάζονται από χάλυβα, μπορεί να προκληθούν προβλήματα στην τάνυση των αγωγών (χαλάρωση του δικτύου που οδηγεί σε μεγαλύτερο βέλος κάμψης των αγωγών μεταξύ δύο στύλων) γιατί από τη βιβλιογραφία είναι γνωστό [9,16] ότι ο χάλυβας αποκτά σε θερμοκρασίες άνω των  $400^{\circ}\text{C}$  μία παραμένουσα διαστολή. Η θερμοκρασία δηλαδή αυτή που συναντάται σε περιπτώσεις πυρκαγιών (αφού όπως προαναφέρθηκε στην παρ.1.2.1 η θερμοκρασία της φλόγας είναι από  $870^{\circ}\text{C}$  έως  $1020^{\circ}\text{C}$ ) είναι δυνατόν να προκαλέσει προβλήματα στην εξισορρόπηση δυνάμεων στους στύλους λόγω επιμήκυνσης (χαλάρωση) των επιτόνων.

Περισσότερες πληροφορίες από τη βιβλιογραφία για τη μετάδοση της θερμότητας (και κυρίως κατά τον συνδυασμό των τριών προαναφερθέντων μηχανισμών) δίνονται στη παράγραφο 1.2.3.1 που ακολουθεί, όπου γίνεται και βιβλιογραφική αναφορά για τους αριθμούς Reynolds και Nusselt [34,37,40,48] που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα στους υπολογισμούς για περιπτώσεις υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου από τις γραμμές και

γενικότερα από ηλεκτρικές επαφές των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων γενικά (δίκτυα, βιομηχανικές και κτηριακές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις) [45].

### 1.2.3.1 Η μετάδοση της θερμότητα με αγωγή, ακτινοβολία και μεταφορά (συναγωγή)

Η θερμότητα είναι η μορφή ενέργειας που μεταφέρεται από ένα σύστημα σε ένα δεύτερο λόγω της ύπαρξης θερμοκρασιακής διαφοράς. Η μεταφορά θερμότητας πάντα γίνεται από το θερμότερο σύστημα προς το ψυχρότερο, μέχρι τα δύο συστήματα να αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία.

Όπως προαναφέρθηκε (βλ. παρ. 1.2.3) η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους: την αγωγή, την ακτινοβολία και τη μεταφορά (ή συναγωγή). Και στις τρεις περιπτώσεις χρειάζεται ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των συστημάτων που εξετάζονται [34,37,40,48].

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. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας με αγωγή μέσω μίας διαχωριστικής επιφάνειας  $A$  μεταξύ των υλών είναι ανάλογος της θερμοκρασιακής διαφοράς  $\Delta\theta$  και αντιστρόφως ανάλογος του πάχους  $\Delta x$  της επιφάνειας. Ισχύει η σχέση [34,37,40,48]:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{\Delta\theta}{\Delta x} \quad (1.2.3.1-1)$$

όπου η σταθερά  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Στην περίπτωση κατά την οποία το  $\Delta x$  τείνει στο μηδέν, η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -k A \frac{d\theta}{dx} \quad (1.2.3.1-2)$$

και ονομάζεται νόμος θερμικής αγωγιμότητας του Fourier [34,37,40,48].

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. Όταν το ρευστό βρίσκεται σε ηρεμία έχουμε **ελεύθερη μεταφορά** (natural convection) και η κίνηση του είναι αποτέλεσμα δυνάμεων άνωσης που δημιουργούνται λόγω διαφοράς πυκνότητας η οποία οφείλεται στην αύξηση ή τη μείωση της θερμοκρασίας του. Όταν το ρευστό έχει κάποια ταχύτητα συμβαίνει **εξαναγκασμένη μεταφορά** (forced convection). Στην εξαναγκασμένη μεταφορά ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας είναι μεγαλύτερος από ότι στην ελεύθερη μεταφορά λόγω αύξησης του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας  $h$  [34,37,40,48].

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι ανάλογη της διαφοράς  $\Delta\theta$  μεταξύ της θερμοκρασίας του ρευστού στην επιφάνεια του σώματος (ταυτίζεται με αυτή της επιφάνειας του σώματος) και αυτής του ρευστού σε απόσταση τέτοια από το σώμα, ώστε να μην επηρεάζεται από τη θερμότητα του σώματος. Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή εκφράζεται από το νόμο ψύξης του Newton και είναι [34,37,40,48]:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = -h A \Delta\theta \quad (1.2.3.1-3)$$

όπου η σταθερά  $h$  είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και  $A$  είναι η επιφάνεια του σώματος που συμμετέχει στη διαδικασία της συναγωγής.

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. Όλα τα σώματα που έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Όλα τα σώματα σε όλο τον όγκο τους ακτινοβολούν θερμότητα σε διαφορετικό βαθμό, ανεξάρτητα από τη φυσική τους κατάσταση (στερεή, υγρή, αέρια). Όμως, η θερμική ακτινοβολία για τα στερεά που είναι αδιαφανή, όπως τα μέταλλα, θεωρείται ότι είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει μόνο στην επιφάνειά τους αφού η εκπεμπόμενη από το εσωτερικό ακτινοβολία δεν μπορεί ποτέ να φτάσει έξω από την επιφάνεια του σώματος. Ο μέγιστος ρυθμός ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος απόλυτης θερμοκρασίας  $\theta$  (K) δίνεται από το νόμο Stefan–Boltzmann και είναι [34,37,40,48]:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma A \theta^4 \quad (1.2.3.1-4)$$

όπου η σταθερά  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan–Boltzmann και ισούται με  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{-K}$  και  $A$  η επιφάνεια η οποία εκπέμπει. Η ιδεατή επιφάνεια που εκπέμπει ακτινοβολία στο μέγιστο βαθμό, καλείται μέλαν σώμα. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από μία πραγματική επιφάνεια είναι μικρότερη από αυτή του μέλανος σώματος στις ίδιες θερμοκρασίες και δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A \theta^4 \quad (1.2.3.1-5)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής που παίρνει τιμές ανάμεσα στο μηδέν και τη μονάδα και δηλώνει το κατά πόσο ένα σώμα πλησιάζει το μέλαν σώμα για το οποίο το  $\varepsilon$  είναι ίσο με τη μονάδα. Σε περιπτώσεις φλογών το  $\varepsilon$  εξαρτάται από το πάχος τους. Ο συντελεστής εκπομπής για τις φλόγες δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = 1 - e^{-k \cdot l} \quad (1.2.3.1-6)$$

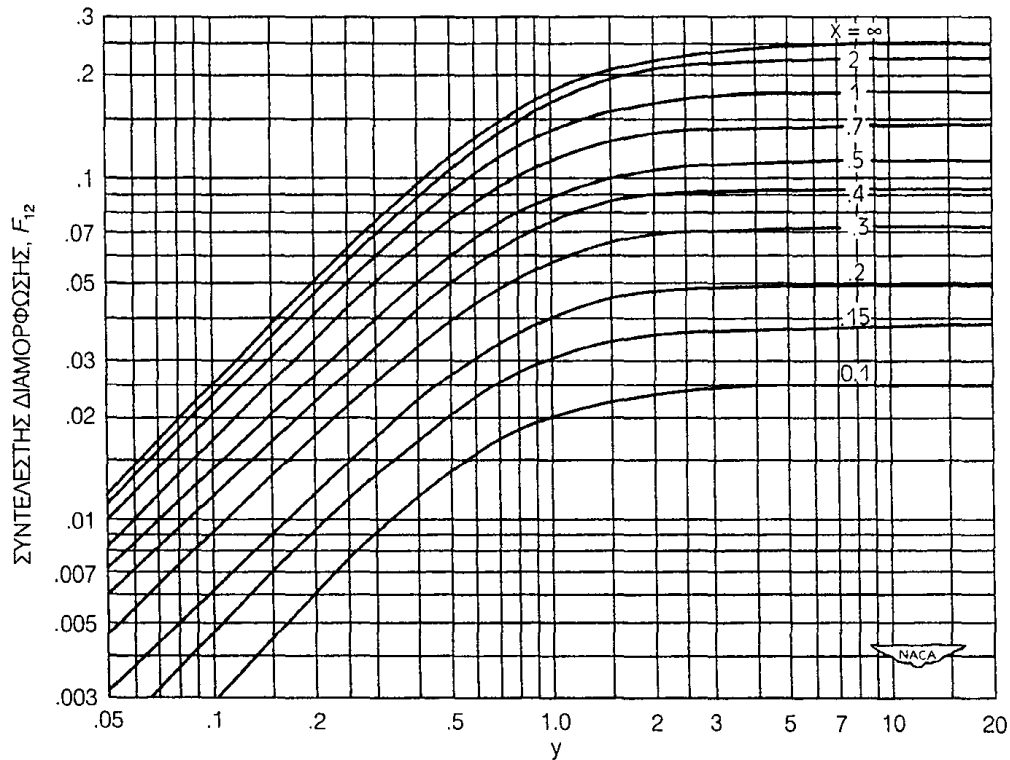
όπου  $k$  είναι ο συντελεστής απορροφητικότητας και  $l$  το πάχος της φλόγας. Ο συντελεστής απορροφητικότητας είναι μία ιδιότητα της φλόγας που καθορίζει πόσο εύκολα η ακτινοβολία θα διαπεράσει τη φλόγα. Για συνήθεις φλόγες με πάχος  $2\text{m}$ , ή και περισσότερο το  $\varepsilon$  θα είναι σχεδόν 1. Σε πολύ μεγάλες φλόγες η αιθάλη μπορεί να «κρύψει» τη φλόγα μειώνοντας την ακτινοβόλο ροή θερμότητας προς το περιβάλλον της. Εκτός όμως από το συντελεστή εκπομπής, υπάρχει κι ο συντελεστής διαμόρφωσης  $F_{12}$  ο οποίος αντιπροσωπεύει το κλάσμα των ακτίνων που μπορούν να ιδωθούν από ένα «στόχο» ο οποίος βρίσκεται σε μία απόσταση  $c$  από τη φλόγα. Ο συντελεστής διαμόρφωσης εξαρτάται από την απόσταση  $c$ , το μέγεθος της πηγής (φλόγα) καθώς και από τον προσανατολισμό της φλόγας και του στόχου. Ο συντελεστής  $F_{12}$  δίνεται από γραφήματα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του στόχου και της πηγής. Στην περίπτωση της φλόγας και του σώματος-στόχου που δέχεται ακτινοβολία σε απόσταση  $c$ , η τιμή του  $F_{12}$  υπολογίζεται από το σχήμα 1.2.3-1. Δηλαδή, η θερμική ροή  $\dot{q}''$  που δέχεται ένα αντικείμενο από μία φλόγα είναι:

$$\dot{q}'' = \varepsilon \sigma \theta^4 F_{12} \quad (1.2.3.1-7)$$

Σε περιπτώσεις που το σώμα βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το διπλάσιο της διαμέτρου της φλόγας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η εμπειρική σχέση:

$$\dot{q}'' = \frac{X_r \dot{Q}}{4 \pi c^2} \quad (1.2.3.1-8)$$

όπου  $\dot{Q}$  είναι ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας καύσεως της φωτιάς σε kW και  $X_r$  είναι το κλάσμα της ακτινοβολούμενης ενέργειας σχετικά με την απελευθερωμένη ενέργεια και παίρνει τιμές από 20% έως 40% για περιπτώσεις ξύλου. Στο παράρτημα I θα παρουσιαστεί ένα παράδειγμα υπολογισμού της θερμικής ροής σε αγωγό αλουμινίου λόγω της ακτινοβολίας από φλόγα ενός δέντρου.



Σχήμα 1.2.3-1: Ο συντελεστής διαμόρφωσης για περίπτωση ενός σώματος στόχου σε απόσταση  $c$  από μία φλόγα [28].

$x$ : ο λόγος του ύψους της φλόγας προς την απόστασή της από το σώμα

$y$ : λόγος του πλάτους της φλόγας προς την απόστασή της από το σώμα

Όταν ένα σώμα με συντελεστή εκπομπής  $\epsilon$  και επιφάνεια  $A$  σε απόλυτη θερμοκρασία  $\theta$  περικλείεται από ένα ρευστό που βρίσκεται σε απόλυτη θερμοκρασία  $\theta_\infty$  τότε η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δίνεται από τη σχέση [34,37,40,48]:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = -\epsilon \sigma A (\theta^4 - \theta_\infty^4) \quad (1.2.3.1-9)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να πάρει τη μορφή (για  $\theta \neq \theta_\infty$ ):

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = -h_r A (\theta - \theta_\infty) \quad (1.2.3.1-10)$$



όπου ο συντελεστής  $h_r$  δίνεται από τη σχέση:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{\theta^4 - \theta_\infty^4}{\theta - \theta_\infty} \quad (1.2.3.1-11)$$

Αν συνυπάρχει και αγωγή ή συνεπαγωγή με την ακτινοβολία, τότε η μετάδοση θερμότητας δίνεται από τη σχέση [34,37,40,48]:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = -h_{\text{comp}} A (\theta - \theta_\infty) \quad (1.2.3.1-12)$$

όπου ο συντελεστής  $h_{\text{comp}}$  είναι ο συνδυασμένος συντελεστής θερμικής μεταφοράς και λαμβάνει υπόψη του όλα τα φαινόμενα που συμμετέχουν στη μετάδοση θερμότητας.

Στην ύπαρξη και συναγωγής, η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο σε περιπτώσεις που υπάρχει ελεύθερη μεταφορά ενώ σε περιπτώσεις εξαναγκασμένης μεταφοράς θεωρείται αμελητέα, ειδικότερα σε περιπτώσεις σωμάτων με μικρό συντελεστή εκπομπής.

Η θερμότητα που λαμβάνει ένα σώμα σε απόσταση από μία θερμή πηγή είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης [18,21,33].

Στις μελέτες της συναγωγής, συνηθίζεται να συνδυάζονται μεταβλητές και να δίνουν αριθμούς αδιάστατους με στόχο να μειώνεται το πλήθος των μεταβλητών στις σχέσεις. Επίσης ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή  $h$  συνηθίζεται να γίνεται αδιάστατος με το να ενσωματώνεται μέσα στον αριθμό Nusselt ο οποίος δίνεται από τη σχέση [34,37,40,48]:

$$Nu = \frac{h L}{k} \quad (1.2.3.1-13)$$

όπου  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του ρευστού και  $L$  το χαρακτηριστικό μήκος (σε περιπτώσεις σφαίρας ταυτίζεται με τη διάμετρό της). Για να γίνει πιο κατανοητή η ύπαρξη του αριθμού Nusselt, ο αριθμός περιγράφεται σαν το λόγο της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή προς τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή. Από τις σχέσεις (1.2.3.1-1) και (1.2.3.1-3) αν θεωρήσουμε ένα στρώμα ρευστού με πάχος  $\Delta x$  ίσο με το χαρακτηριστικό μήκος  $L$  ισχύει ότι:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{conv}}}{\dot{Q}_{\text{cond}}} = \frac{-h A \Delta\theta}{-k A \frac{\Delta\theta}{L}} = \frac{h L}{k} = Nu \quad (1.2.3.1-14)$$

Ένας άλλος αριθμός που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις συναγωγής είναι ο αριθμός Prandtl. Ο αριθμός αυτός περιγράφεται σαν τον λόγο της μοριακής διάχυσης της ορμής ως προς τη μοριακή διάχυση της θερμότητας και δίνεται από την παρακάτω σχέση [34,37,40,48]:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (1.2.3.1-15)$$

όπου  $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού,  $\alpha$  είναι η θερμική διάχυση,  $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού,  $c_p$  η ειδική θερμότητά του και  $k$  η θερμική αγωγιμότητά του. Για το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  ισχύει [34,37,40,48]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_f} \quad (1.2.3.1-16)$$

όπου  $\rho_f$  η πυκνότητα του ρευστού ενώ για τη θερμική διάχυση  $\alpha$  ισχύει [34,37,40,48]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho_f c_p} \quad (1.2.3.1-17)$$

Στα αέρια ρευστά ο αριθμός Prandtl είναι περίπου ίσος με τη μονάδα πράγμα που δηλώνει ότι στα αέρια τόσο η ορμή όσο και η θερμότητα διαχέονται στον ίδιο βαθμό [34,37,40,48].

Ένας τρίτος αδιάστατος αριθμός είναι ο αριθμός Reynolds  $Re$  ο οποίος περιγράφεται σαν τον λόγο των δυνάμεων αδρανείας προς τις δυνάμεις ιξώδους και δίνεται από τη σχέση [34,37,40,48]:

$$Re = \frac{u_\infty L}{\nu} = \frac{\rho_f u_\infty L}{\mu} \quad (1.2.3.1-18)$$

όπου  $u_\infty$  είναι η ταχύτητα του ρευστού σε απόσταση τέτοια ώστε να μην επηρεάζεται από το σώμα το οποίο υπόκειται τη συναγωγή.

Στις μεγάλες τιμές του αριθμού Reynolds, οι δυνάμεις αδρανείας, που είναι ανάλογες της ταχύτητας του ρευστού και της πυκνότητάς του, είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με τις δυνάμεις του ιξώδους με αποτέλεσμα οι δυνάμεις ιξώδους να μη μπορούν να αποτρέψουν τις τυχαίες και γρήγορες αναταράξεις του ρευστού. Στις μικρές τιμές του αριθμού Reynolds οι δυνάμεις ιξώδους είναι αρκετά μεγάλες ώστε να υπερνικήσουν τις δυνάμεις αδρανείας

και να κρατήσουν τη ροή του ρευστού ομαλή. Στην πρώτη περίπτωση η ροή θεωρείται τυρβώδης ενώ στη δεύτερη έχουμε στρωτή ροή [34,37,40,48].

Ένα στάσιμο ρευστό ασκεί μόνο τη φυσιολογική πίεση στην επιφάνεια ενός σώματος που βρίσκεται μέσα σ' αυτό. Απεναντίας, ένα κινούμενο ρευστό ασκεί και εφαπτομενικές δυνάμεις στην επιφάνεια του σώματος εξαιτίας των δυνάμεων τριβής από την επίδραση του ιξώδους. Και οι δύο αυτές δυνάμεις έχουν συνιστώσες στη διεύθυνση της κίνησης και έτσι η δύναμη οπισθέλκουσας (ή δύναμη αντίστασης) είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των συνιστωσών αυτών. Οι κάθετες συνιστώσες στη διεύθυνση κίνησης είναι υπεύθυνες για τις δυνάμεις άνωσης. Η δύναμη αντίστασης  $F_D$  εξαρτάται από την πυκνότητα  $\rho_f$  και τη ταχύτητα του ρευστού  $u_\infty$  καθώς και το μέγεθος και το σχήμα του σώματος. Τα χαρακτηριστικά του σώματος περιγράφονται από έναν αδιάστατο αριθμό που καλείται συντελεστής οπισθέλκουσας ή αντίστασης  $C_D$ . Η δύναμη αντίστασης δίνεται από τη σχέση [34,37,40,48]:

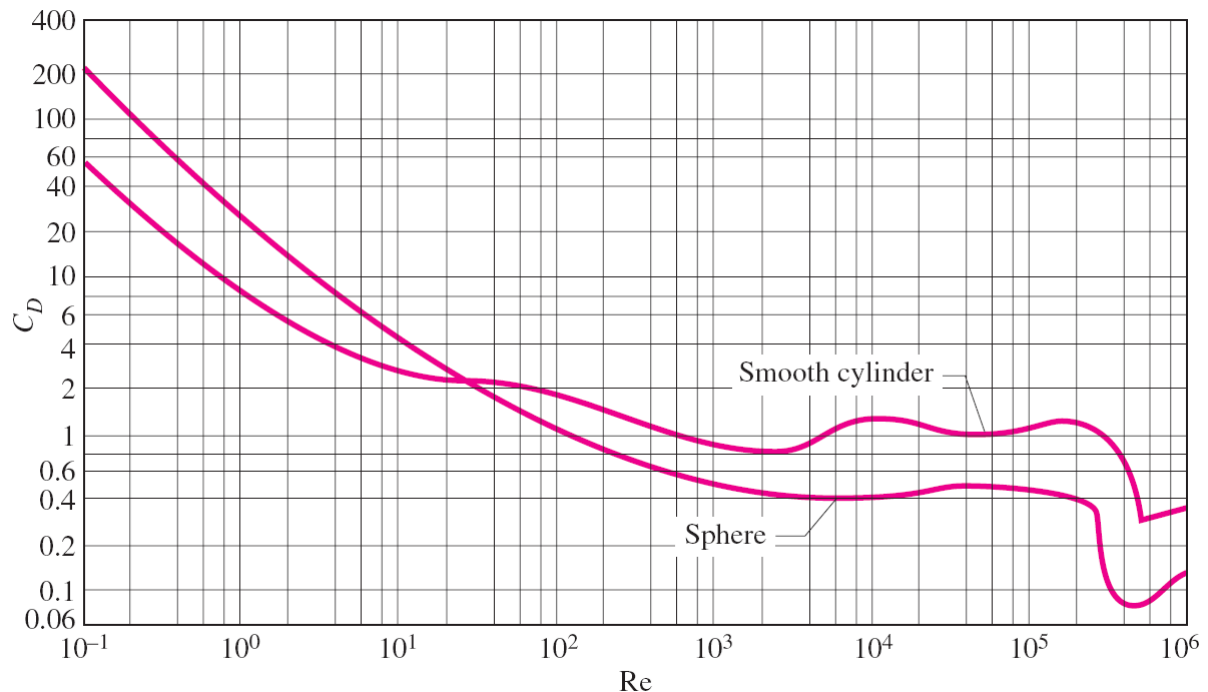
$$F_D = \frac{1}{2} \rho_f C_D A u_\infty^2 \quad (1.2.3.1-19)$$

όπου  $A$  είναι η προβαλλόμενη επιφάνεια του σώματος στο επίπεδο που είναι κάθετο στην κίνηση για περιπτώσεις που η κίνηση του ρευστού εμποδίζεται από το σώμα, ενώ ισούται με την επιφάνεια της πλευράς του σώματος όταν το ρευστό κινείται επιφανειακά στη μία πλευρά του σώματος. Ο συντελεστής αντίστασης εξαρτάται από το σχήμα του σώματος αλλά κι από τον αριθμό Reynolds  $Re$  και από την τραχύτητα της επιφάνειας του σώματος. Η ροή ενός ρευστού πάνω σε ένα σφαιρικό ή σχεδόν σφαιρικό σώμα συναντάται πολύ συχνά (σχεδόν σε όλα τα αθλήματα που παίζονται με μπάλα). Το χαρακτηριστικό μήκος για μία σφαίρα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η διάμετρος της. Οπότε ο αριθμός Reynolds δίνεται από τη σχέση [34,37,40,48]:

$$Re = \frac{\rho_f u_\infty D}{\mu} \quad (1.2.3.1-20)$$

Η κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds για ροή πάνω από σφαίρα είναι περίπου  $Re \approx 2 \cdot 10^5$ . Μέχρι αυτή την τιμή, η ροή θεωρείται στρωτή ενώ για τιμές μεγαλύτερες θεωρείται τυρβώδης. Η τραχύτητα της επιφάνειας του σώματος επηρεάζει αρκετά την τιμή του συντελεστή αντίστασης ανάλογα με την τιμή του Reynolds. Για  $Re = 10^5$  ο συντελεστής αντίστασης  $C_D$  είναι ίσος με 0,1 για μια σφαίρα με άγρια επιφάνεια ενώ 0,5 για μια σφαίρα με λεία επιφάνεια. Όμως για  $Re = 10^6$  ο συντελεστής αντίστασης  $C_D$  είναι ίσος με 0,4 για

μια σφαίρα με άγρια επιφάνεια ενώ μόλις 0,1 για μια σφαίρα με λεία επιφάνεια. Στο σχήμα 1.2.3-2 παρουσιάζεται ο μέσος συντελεστής αντίστασης για ροή πάνω από έναν λείο κύλινδρο και μια λεία σφαίρα σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds [34].



Σχήμα 1.2.3-2: Μέσος συντελεστής αντίστασης ( $C_D$ ) για ροή πάνω από έναν λείο κύλινδρο και μια λεία σφαίρα σε συνάρτηση με τον αριθμό Reynolds ( $Re$ ) [34].

Αντίστοιχα συμπεράσματα για την τάξη μεγέθους του συντελεστή αντίστασης δίνονται και σε εργασία πειραματικού υπολογισμού του για περιπτώσεις πυρακτωμένων σταγόνων αλουμινίου [6].

Η ροή ρευστών πάνω από σφαίρες είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί με αναλυτικό τρόπο. Γι' αυτό τέτοιες ροές μελετούνται είτε πειραματικά είτε αριθμητικά και πολλοί ερευνητές έχουν καταλήξει σε διάφορες εμπειρικές σχέσεις για να περιγράψουν το συντελεστή θερμικής μεταφοράς με συναγωγή. Διευκρινίζεται ότι οι σχέσεις που ακολουθούν ισχύουν μόνο στην περίπτωση του αέρα (δεν ισχύουν για άλλα ρευστά). Για τη ροή πάνω από σφαίρα ο Whitaker [22,34,37,48] προτείνει την παρακάτω σχέση για τον αριθμό Nusselt:

$$Nu = 2 + (0,4 Re^{\frac{1}{2}} + 0,06 Re^{\frac{2}{3}}) Pr^{\frac{2}{5}} \left( \frac{\mu_{\infty}}{\mu_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1.2.3.1-21)$$

(η σχέση αυτή ισχύει όταν:  $3,5 \leq Re \leq 8 \times 10^4$ ,  $0,7 \leq Pr \leq 380$  και  $1 \leq \frac{\mu}{\mu_s} \leq 3,2$ )

όπου  $\mu_\infty$  το δυναμικό ιξώδες του αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και  $\mu_s$  το δυναμικό ιξώδες του αέρα σε θερμοκρασία ίση με αυτή της επιφάνειας του σώματος.

Άλλες εμπειρικές σχέσεις [32] είναι οι παρακάτω:

$$Nu = c_p u_\infty \rho_f \left( \frac{2.2}{Re} + \frac{0.48}{Re^{0.5}} \right)^{0.6} \quad (1.2.3.1-22)$$

(η σχέση αυτή ισχύει για:  $1 \leq Re \leq 25$ )

$$Nu = 0,37 (Re)^{0.6} \quad (1.2.3.1-23)$$

(η σχέση αυτή ισχύει για  $25 \leq Re \leq 10^5$ )

Σε μία ερευνητική εργασία προτείνεται ότι αφού υπολογιστούν όλες οι παράμετροι σε συνθήκες θερμοκρασίας  $\frac{T_s + T_\infty}{2}$  όπου  $T_s$  και  $T_\infty$  οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του σώματος και του ρευστού σε απόσταση μεγάλη από το σώμα, ο αριθμός Nu δίνεται από τη σχέση [10]:

$$Nu = 2 + (0,25 Re + 3 \times 10^{-4} Re^{1.6})^{0.5} \quad (1.2.3.1-24)$$

όταν ισχύει ότι  $100 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ , ενώ όταν ισχύει ότι  $4 \times 10^5 \leq Re \leq 5 \times 10^6$  δίνεται από τη σχέση:

$$Nu = 430 + 5 \times 10^{-3} Re + 0,25 \times 10^{-9} Re^2 + 3,1 \times 10^{-17} Re^3 \quad (1.2.3.1-25)$$





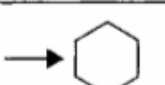



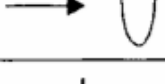
Για περιπτώσεις τηγμάτων με μορφή σταγόνας ισχύει η παρακάτω σχέση [2,29]:

$$Nu = 2 + 0,6 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (1.2.3.1-26)$$

Σε περιπτώσεις σωμάτων με σχήμα διαφορετικό από σφαίρα ισχύει για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds Re [31] η σχέση:

$$Nu = c (Re)^m \quad (1.2.3.1-27)$$

όπου τις τιμές του c και του m παρουσιάζονται στον πίνακα 1.2.3-1.

Geometry	Re <sub>D</sub>	c	m
	5000-100 000	0.092	0.675
	2500-8000	0.160	0.699
	5000-100 000	0.222	0.588
	2500-7500	0.261	0.624
	5000-19500	0.144	0.638
	19 500-100 000	0.035	0.782
	5000-100 000	0.138	0.638
	2500-15 000	0.224	0.612
	3000-15 000	0.085	0.804
	4000-15 000	0.205	0.731

Πίνακας 1.2.3-1: Τιμές των c και m για σώματα με γεωμετρία διαφορετική από σφαίρα και κύλινδρο για τις διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds [31]. Το χαρακτηριστικό μήκος είναι η ισοδύναμη κυκλική διάμετρος και δίνεται διαιρώντας την περίμετρο του σώματος με το π.

Σε περιπτώσεις κυλίνδρων οι οποίοι βρίσκονται σε κάθετη θέση στη ροή ενός ρευστού προτάθηκε από τους Churchill και Bernstein η σχέση [22,34,37,48]:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}}{[1 + (\frac{0,4}{Pr})^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} \left[ 1 + \left( \frac{Re}{282000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} \quad (1.2.3.1-28)$$

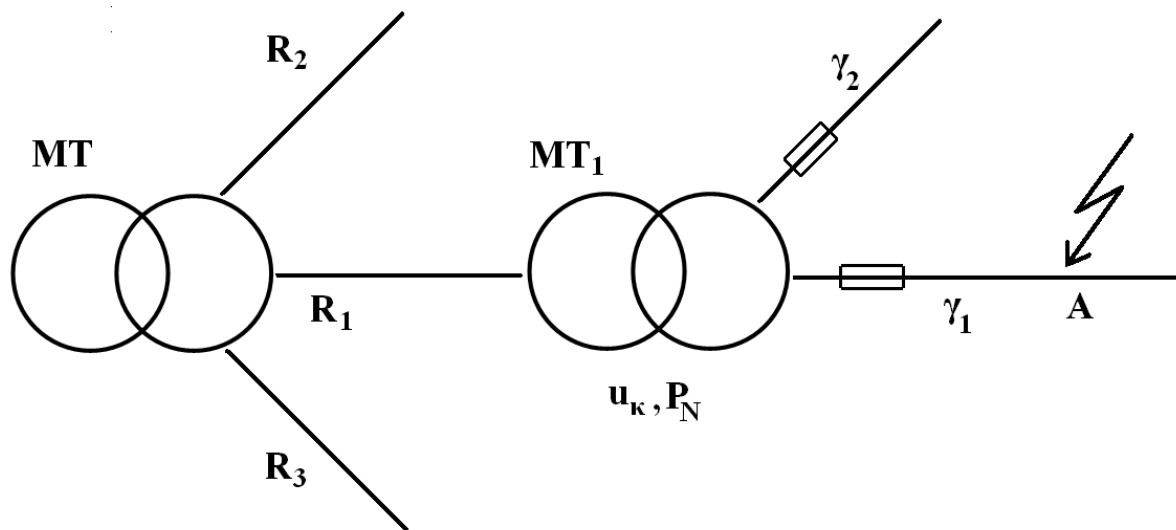
ο οποίος ισχύει όταν  $Re Pr > 0,2$ . Οι ιδιότητες του ρευστού υπολογίζονται σε συνθήκες θερμοκρασίας  $\frac{\theta_s + \theta_\infty}{2}$  όπου  $\theta_s$  και  $\theta_\infty$  οι θερμοκρασίες της επιφάνειας του σώματος και του ρευστού σε απόσταση μεγάλη από τον κύλινδρο.

### **1.3 Θερμικά φαινόμενα σε υπαίθριες γραμμές διανομής χαμηλής τάσης**

Όταν εκδηλώνεται μία πυρκαγιά υπαίθρου υπάρχει σχεδόν πάντοτε πλησίον της μία γραμμή της εταιρείας ηλεκτρισμού. Αυτό είναι φυσικό αφού σχεδόν σε κάθε δρόμο, αλλά και γενικότερα σχεδόν παντού σε καλλιεργήσιμες και μη εκτάσεις υπάρχουν δίκτυα. Γεννάται συνεπώς το εύλογο ερώτημα, κατά πόσο μία γραμμή διανομής μπορεί να υπήρξε η αιτία της πυρκαγιάς ή αν η πυρκαγιά προήλθε από άλλη αιτία και προκάλεσε ζημιές και στο δίκτυο ηλεκτρισμού. Για την απάντηση στο παραπάνω ερώτημα θα πρέπει να εξεταστούν οι θερμικές συνέπειες που μπορεί να έχουν ανεπιθύμητες καταστάσεις λειτουργίας των εναέριων γραμμών διανομής που είναι το βραχυκύκλωμα (μεταξύ αγωγών και αγωγών προς γη) και η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής τους. Ακολουθώς δίνονται πληροφορίες για το θέμα αυτό από την βιβλιογραφία [7,25,42,45] οι οποίες βασικά εξετάζονται στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.

#### **1.3.1 Το βραχυκύκλωμα σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης**

Ο υπολογισμός των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων διανομής χαμηλής τάσης βασίζεται στην καταπόνησή τους υπό βραχυκύκλωμα. Αν θεωρηθεί ότι εκδηλώνεται τριφασικό βραχυκύκλωμα στο σημείο A της γραμμής χαμηλής τάσης του σχήματος 1.3.1-1, τότε η συνολική ισχύς του δικτύου θα οδεύσει προς το σημείο αυτό. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι η τιμή του ρεύματος στο σημείο A. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την ισχύ του δικτύου μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 1.3.1-1: Απλοποιημένο παράδειγμα τριφασικού βραχυκυκλώματος.  
 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  
 $R_1, R_2$  και  $R_3$ : γραμμές κορμού μέσης τάσης  
 MT<sub>1</sub>: μετασχηματιστής διανομής ονομαστικής ισχύος  $P_N$  σχετικής τάσης βραχυκύκλωσης  $u_k$  περίπου 4%  
 $\gamma_1$  : 1<sup>η</sup> γραμμή χαμηλής τάσης  
 $\gamma_2$  : 2<sup>η</sup> γραμμή χαμηλής τάσης

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.1-2, το ρεύμα βραχυκύκλωσης εμφανίζεται αρχικά ως ασύμμετρο και κατόπιν ως συμμετρικό. Το ασύμμετρο τμήμα περιλαμβάνει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sw}$ ) και το 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 παραπάνω τιμές του ρεύματος βραχυκύκλωσης ( $I_s$ ) ισχύουν οι σχέσεις [14,20,27,30.42,52]:

$$I_s = \kappa \sqrt{2} I_{sw} \quad (1.3.1-1)$$

$$I_{sw} = \frac{1,1U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R_{o\lambda}^2 + X_{o\lambda}^2}} \quad (1.3.1-2)$$



όπου  $\kappa$  ένας συντελεστής η τιμή του οποίου δίνεται στον πίνακα 1.3.1-1 και είναι  $\kappa = f(R_{ολ} + X_{ολ})$ ,  $U_N$  η ονομαστική τάση στη θέση βραχυκύκλωσης,  $R_{ολ}$  η ολική ωμική αντίσταση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης και  $X_{ολ}$  ολική επαγωγική αντίδραση μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης

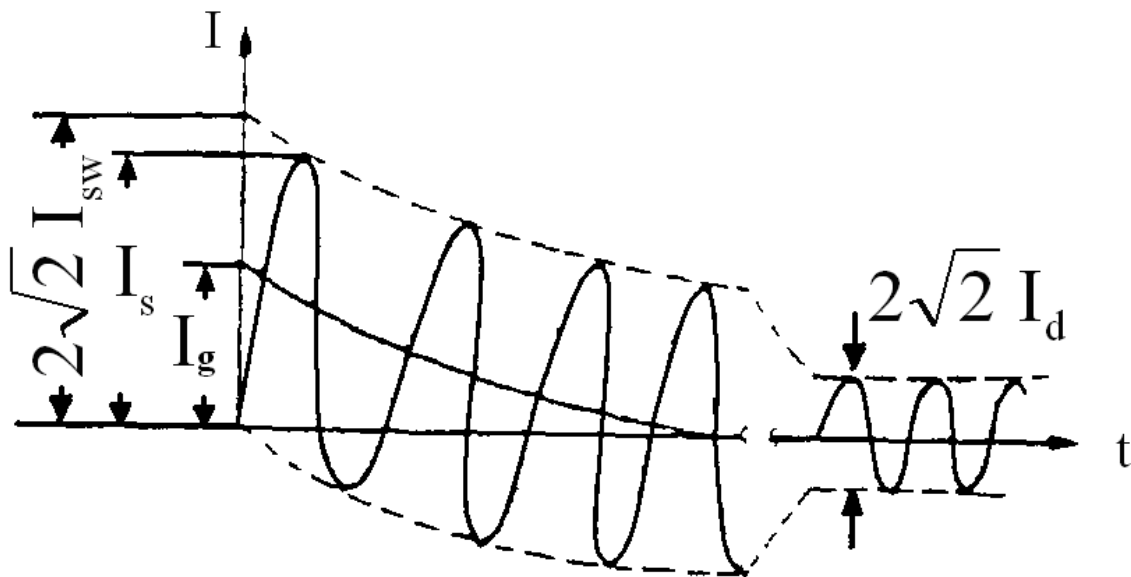
$$\text{και } I_d = \mu_d I_{sw} \quad (1.3.1-3)$$

όπου  $\mu_d$  ένας συντελεστής κατά τον πίνακα 1.3.1-2:  $\mu_d = f(I_{sw}/I_G)$

$I_G$  είναι το ονομαστικό ρεύμα της πηγής (των γεννητριών).

Η συνισταμένη των  $R_{ολ}$  και  $X_{ολ}$  στη σχέση (1.3.1-2) είναι η ολική σύνθετη αντίσταση ( $Z_{ολ}$ ) της διαδρομής βραχυκύκλωσης:

$$Z_{ολ}^2 = R_{ολ}^2 + X_{ολ}^2 \quad (1.3.1-4)$$



Σχήμα 1.3.1-2: Μορφή του ρεύματος κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα [42,52]

$I_s$  : κρουστικό ρεύμα βραχυκύκλωσης

$I_{sw}$  : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

$I_d$  : διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης

$I_g$  : συνεχές ρεύμα βραχυκύκλωσης

$R_{ολ}/X_{ολ}$	$\kappa$
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 1.3.1-1:  $\kappa = f(R_{ολ} + X_{ολ})$ 

$I_{sw}/I_G$	$\mu_d$ για $\cos\phi=0,8$
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

Πίνακας 1.3.1-2:  $\mu_d = f(I_{sw}/I_G)$ 

Στο σχήμα 1.3.1-3 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα όλων των αντιστάσεων της διαδρομής βραχυκύκλωσης κατά το σχήμα 1.3.1-1. Η μελέτη αντοχής σε τριφασικό βραχυκύκλωμα περιλαμβάνει:

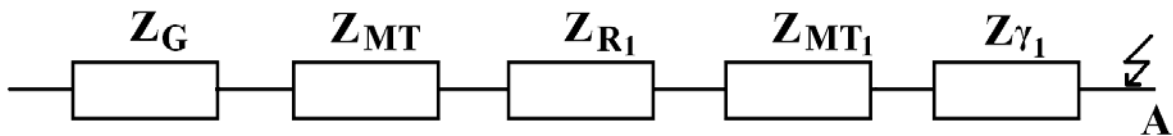
- 1) τον υπολογισμό της συνολικής σύνθετης αντίστασης ( $Z_{ολ}$ )

2) τον υπολογισμό των ρευμάτων  $I_{sw}$ ,  $I_s$  και  $I_d$ .

Η σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση [42]:

$$Z_G \approx \varepsilon \frac{U_G^2}{P_G} \quad (1.3.1-5)$$

όπου:  $\varepsilon$  η σχετική τάση διασποράς,  $U_G$  η παραγόμενη τάση και  $P_G$  η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας



Σχήμα 1.3.1-3: Ισοδύναμο κύκλωμα των σύνθετων αντιστάσεων του δικτύου κατά το σχήμα 1.3.1-1

$Z_G$ : σύνθετη αντίσταση της γεννήτριας

$Z_{MT}$ : σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή μεταφοράς

$Z_{R1}$ : σύνθετη αντίσταση της γραμμής μέσης τάσης

$Z_{MT1}$ : σύνθετη αντίσταση του μετασχηματιστή διανομής

$Z_{\gamma_1}$ : σύνθετη αντίσταση της γραμμής χαμηλής τάσης

μέχρι το σημείο βραχυκύκλωσης A

Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας ισχύουν οι σχέσεις [42]:

$$R_{MT} = u_r \frac{U_2^2}{P_N} \quad (1.3.1-6)$$

και

$$X_{MT} = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \frac{U_2^2}{P_N} \quad (1.3.1-7)$$

όπου  $U_2$  η τάση του δευτερεύοντος σε kV (20kV),  $P_N$  η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή σε MVA και  $u_k$  και  $u_r$  οι συνιστώσες της σχετικής τάσης βραχυκύκλωσης σε % (20% και 0,6% αντίστοιχα) [42].

Γραμμή ΜΤ	Πραγματική διατομή σε mm	R σε Ω/km	ωL σε Ω/km
ACSR 3×16	29 (25/4)	1,268	0,422
ACSR 3×35	65 (59/9)	0,576	0,397
ACSR 3×95	175 (150/25)	0,215	0,334
Cu 3×16	16	1,274	0,417
Cu 3×35	35	0,596	0,393
Cu 3×95	95	0,220	0,358

Πίνακας 1.3.1-3: Αντίσταση γραμμών μέσης τάσης, τύπου ACSR και Cu [42,52]

R: η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού

ωL: η επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού

$P_N$ [KVA]	15	25	50	75	100	150	200	250	400	500	630	750	1000
R [mΩ]	356	175	75	40	29	18,3	13,4	10,5	5,7	4,5	3,6	3,0	2,2
X [mΩ]	320	228	122	86,8	65,5	44,5	33,5	26,8	17	13,7	10,8	9,1	6,9

Πίνακας 1.3.1-4: Αντιστάσεις των συνήθων μεγεθών των μετασχηματιστών μέσης προς χαμηλή τάση [42,52].

 $P_N$ : η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή

R: η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή

X: η επαγωγική αντίσταση του μετασχηματιστή

Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης των γραμμών ACSR μέσης τάσης (στο παράδειγμα γραμμή κορμού  $R_1$ ) ισχύει ο πίνακας 1.3.1-3 [42,52]. Οι αντιστάσεις των συνήθων μεγεθών μετασχηματιστών διανομής και των γυμνών αγωγών αλουμινίου και των συνεστραμμένων καλωδίων δίνονται αντίστοιχα στους πίνακες 1.3.1-4 και 1.3.1-5 [42,52].

Στους προηγούμενους υπολογισμούς των ρευμάτων βραχυκύκλωσης μέσω των αντιστάσεων της διαδρομής βραχυκύκλωσης (βλ. σχήμα 1.3.1-3) έχει σημασία αν το βραχυκύκλωμα είναι τριφασικό, διφασικό ή προς γη. Στον πίνακα 1.3.1-6 δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού αναλόγως της περίπτωσης του βραχυκυκλώματος. Στις σχέσεις του πίνακα αυτού δεν περιλαμβάνονται οι αντιστάσεις του μετασχηματιστή μεταφοράς της γραμμής μέσης τάσης και της γεννήτριας. Αυτό έγινε γιατί οι τιμές τους είναι πολύ μικρές ως προς τις αντιστάσεις του μετασχηματιστή διανομής των γραμμών χαμηλής τάσης και των άλλων αντιστάσεων που δίνονται στους πίνακες 1.3.1-3, 1.3.1-4 και 1.3.1-5.

Σημειώνεται ότι οι τιμές των αντιστάσεων  $R_{\Delta}$ ,  $R_T$  και  $R_{\gamma\eta\varsigma}$  θα πρέπει να προσδιορίζονται ανάλογα με τις συνθήκες που συνέβηκε το βραχυκύκλωμα (πετρώδες έδαφος, μεταλλική επαφή κ.λ.π.).

Είδος γραμμής χαμηλής τάσης	R σε [mΩ/km]	X σε [mΩ/km]
Γυμνοί αγωγοί 4×16 mm <sup>2</sup>	1140	330
Γυμνοί αγωγοί 4×35 mm <sup>2</sup>	533	306
Γυμνοί αγωγοί 4×50 mm <sup>2</sup>	381	294
Γυμνοί αγωγοί 4×70 mm <sup>2</sup>	277	284
Συνεστραμμένα καλώδια 3×35 mm <sup>2</sup> + 54,6 mm <sup>2</sup>	888 + 630	443 + 630
Συνεστραμμένα καλώδια 3×70 mm <sup>2</sup> + 54,6 mm <sup>2</sup>	1127	100

Πίνακας 1.3.1-5: Αντιστάσεις των γυμνών αγωγών αλουμινίου και των συνεστραμμένων καλωδίων που χρησιμοποιούνται σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης  
 R: η ωμική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του  
 X: η επαγωγική αντίσταση της γραμμής ανά μήκος του αγωγού  
 Οι διατομές των γυμνών αγωγών που δίνονται στον πίνακα αφορούν ισοδύναμη διατομή χαλκού

Από την εύρεση των τιμών των ρευμάτων βραχυκύκλωσης δίνεται ακολούθως η δυνατότητα να υπολογιστεί η δυναμική και θερμική καταπόνηση στη θέση βραχυκύκλωσης. Ειδικότερα η θερμική καταπόνηση του αγωγού κατά το βραχυκύκλωμα μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση [42,45]:

$$\Delta\theta = \frac{\kappa}{A^2} I_d^2 \left[ t + T \left( I_{sw} / I_d \right)^2 \right] \text{ σε } ^\circ\text{C} \quad (1.3.1-8)$$

όπου  $I_d$  το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης και  $I_{sw}$  η ενεργός τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε A,  $\Delta\theta$  η αύξηση της θερμοκρασίας σε  $^\circ\text{C}$ ,  $\kappa$  σταθερά του υλικού (για χαλκό  $\kappa=0,0058$ , για αλουμίνιο  $\kappa=0,0135$ ),  $A$  η διατομή του αγωγού σε mm<sup>2</sup>,  $t$  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  $0,25$ ). Η τιμή  $T$  μειώνεται με την απόσταση από τη θέση βραχυκύκλωσης.

α/α	Βραχυκύκλωμα	$I_{SW}$
1	Τριφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\gamma} + R_{M\Sigma})^2 + (X_{\gamma} + X_{M\Sigma})^2}}$
2	Τριφασικό βραχυκύκλωμα προς γη	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3} \sqrt{(R_{\gamma} + R_{M\Sigma} + R_{\Delta})^2 + (X_{\gamma} + X_{M\Sigma})^2}}$
3	Διφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα	$I_{SW} = \frac{U_{\Pi}}{2 \sqrt{(R_{\gamma} + R_{M\Sigma})^2 + (X_{\gamma} + X_{M\Sigma})^2}}$
4	Διφασικό βραχυκύκλωμα προς γη	$I_{SW} = \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{(2 R_{\gamma} + 2 R_{M\Sigma} + R_{\Delta})^2 + (2 X_{\gamma} + 2 X_{M\Sigma})^2}}$
5	Βραχυκύκλωμα 1 αγωγού προς γη	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(R_{\gamma} + R_{M\Sigma} + R_{\Delta} + R_T + R_{\gamma\eta\varsigma})^2 + (X_{\gamma} + X_{M\Sigma})^2}}$
6	Βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού του ουδετέρου και του υποκειμένου του αγωγού φασής	$I_{SW} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{(2 R_{\gamma} + R_{M\Sigma})^2 + (2 X_{\gamma} + X_{M\Sigma})^2}}$

Πίνακας 1.3.1-6: Σχέσεις υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης αναλόγως του είδους του βραχυκυκλώματος

$I_{SW}$ : εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

$U_{\phi}$ : φασική τάση

$U_{\Pi}$ : πολική τάση

$R_{\gamma}, X_{\gamma}$ : αντιστάσεις της γραμμής μέχρι τη θέση βραχυκύκλωσης

$R_{M\Sigma}, X_{M\Sigma}$ : αντιστάσεις του μετασχηματιστή

$R_{\Delta}$ : αντίσταση διάβασης

$R_T$ : αντίσταση τόξου

$R_{\gamma\eta\varsigma}$ : αντίσταση διαδρομής επιστροφής μέσω γης

Ο χρόνος του βραχυκυκλώματος είναι πάντοτε μικρότερος του 1 sec. Στην περίπτωση των αυτόματων διακοπών και των διακοπών αυτόματης επαναφοράς του δικτύου διανομής μέσης τάσης πρόκειται για κλάσμα του δευτερολέπτου, ενώ οι ασφάλειες χαμηλής τάσης στα ασφαλειοκιβώτια των υποσταθμών θεωρείται ότι διακόπτουν λόγω της συνθήκης ουδετέρωσης το βραχυκύκλωμα πρακτικά ακαριαία [15,45]. Ως οριακές θερμοκρασίες θεωρούνται για γυμνούς αγωγούς από χαλκό οι 200°C, από αλουμίνιο οι 180°C και από χάλυβα οι 300°C [45].

Ένας άλλος υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας κατά το βραχυκύκλωμα στη περιοχή της χαμηλής τάσης γίνεται μέσω του ονομαστικού ρεύματος  $I_{N\alpha}$  της ασφάλειας. Ισχύει στη περίπτωση αυτή στο τέλος της γραμμής η σχέση [19,42]:

$$\Delta\theta = \frac{\kappa}{A^2} I_{\beta}^2 t \text{ σε } ^\circ\text{C} \quad (1.3.1-9)$$

όπου:  $\kappa$  σταθερά του υλικού (για χαλκό  $\kappa= 0,0058$ , για αλουμίνιο  $\kappa= 0,0135$ ),  $I_{\beta}=3I_{N\alpha}$  σε A (όπου  $I_{N\alpha}$  το ονομαστικό ρεύμα της ασφάλειας),  $t$  ο χρόνος ο οποίος λαμβάνεται 5s και  $A$  η διατομή του αγωγού σε  $\text{mm}^2$ . Διευκρινίζεται ότι η τιμή  $I_{\beta}$  στη σχέση (1.3.1-9) είναι μία προσέγγιση του διαρκούς ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_d$  (βλ. σχήμα 1.3.1-2).

Από υπολογισμούς που έγιναν τόσο με τη σχέση (1.3.1-8) όσο και με τη σχέση (1.3.1-9) για όλες τις γραμμές του ελληνικού δικτύου διανομής χαμηλής τάσης (όταν ισχύει η συνθήκη βραχυκύκλωσης [42]) προέκυψε ότι υπό συνθήκες καύσωνα ( $40^\circ\text{C}$ ), η τιμή  $\Delta\theta$  λαμβάνει τιμές το πολύ μέχρι περίπου  $48^\circ\text{C}$  [54]. Συνεπώς όταν ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης, το βραχυκύκλωμα στις γραμμές χαμηλής τάσης προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας που δεν μπορεί λόγω αυτής να παραχθούν τήγματα μετάλλου (αλουμινίου) από τους αγωγούς.

Σημειώνεται ότι 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. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται από τη σχέση:

$$I_{sw} \leq \frac{100 I_N}{u} \text{ σε kA} \quad (1.3.1-10)$$

όπου  $I_N$ : σε kA και το  $u$  σε %.

Οι τιμές που υπολογίζονται από την παραπάνω σχέση 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 υπόψη καθόλου τις αντιστάσεις και είναι σαν να εξετάζεται το βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες του μετασχηματιστή.

Σημειώνεται επίσης ότι από έρευνα που έχει γίνει σχετικά με το κατά πόσο ένας αγωγός που βρέθηκε λιωμένος μετά την πυρκαγιά προκάλεσε τη φωτιά ή η φωτιά προκάλεσε την τήξη του, δεν μπορεί κανείς να δώσει απάντηση για το θέμα αυτό, δεδομένου ότι όλες οι πειραματικές έρευνες που έχουν γίνει [56-99] είναι αλληλοσυγκρουόμενες και δεν κατέστη δυνατό να επαληθευτούν σε άλλα εργαστήρια [36].

### 1.3.1.1 Η επιλογή των ασφαλειών στις γραμμές χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής (συνθήκη ουδετέρωσης)

Στους πίνακες 1.3.1.1-1 και 1.3.1.1-2 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 χωρίς το καλώδιο παροχής (συγκεντρικό καλώδιο 2×6mm<sup>2</sup> μήκους 30m) και το μεγαλύτερο μήκος, τη γραμμή με το καλώδιο παροχής [15,45]

Τα μήκη των γραμμών στους πίνακες 1.3.1.1-1 και 1.3.1.1-2 προκύπτουν από τη παρακάτω σχέση [15] η οποία έχει αποδειχθεί θεωρητικά [50]:

$$l \leq \sqrt{\left(\frac{220}{3Z_{\gamma}I_{N\alpha}}\right)^2 - \left(\frac{R_{\gamma}X_{MT} - X_{\gamma}R_{MT}}{Z_{\gamma}^2}\right)^2} - \left(\frac{R_{\gamma}R_{MT} + X_{\gamma}X_{MT}}{Z_{\gamma}^2}\right) \quad (1.3.1.1-1)$$

όπου  $l$ : το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος δικτύου σε km,  $I_{N\alpha}$ : η ονομαστική τιμή της ασφάλειας της γραμμής (σε A), η οποία επιλέγεται βάσει του M/Σ που χρησιμοποιείται κάθε φορά,  $Z_{\gamma}$ : η σύνθετη αντίσταση της γραμμής (σε Ω/km),  $R_{\gamma}$ ,  $X_{\gamma}$ : η ωμική και αυτεπαγωγική αντίσταση της γραμμής στη χαμηλή τάση (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  $\alpha$  μέτρων αγωγού αντίστασης  $Z_{\alpha}$  (σε Ω/km) σε αντίσταση  $Z_{\beta}$  (σε Ω/km) ισχύει η σχέση[15,45]:

$$\beta = \alpha (Z_{\alpha}/Z_{\beta}) \quad (1.3.1.1-2)$$

Στον πίνακα 1.3.1.1-3 δίνεται το πηλίκο  $Z_{\alpha}/Z_{\beta}$  για γυμνούς αγωγούς και συγκεντρικά καλώδια.



Σημειώνεται 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.

Ισχύς P [KVA]	Ασφάλεια I <sub>ασφ.</sub> [A]	Γυμνοί Αγωγοί Al [16 mm <sup>2</sup> ]	Γυμνοί Αγωγοί Al [35 mm <sup>2</sup> ]	Γυμνοί Αγωγοί Al [50 mm <sup>2</sup> ]	Γυμνοί Αγωγοί Al [70 mm <sup>2</sup> ]	Συνεστραμμένο Καλώδιο Al [3x35+54,6mm <sup>2</sup> ]	Συνεστραμμένο Καλώδιο Al [3x70+54,6mm <sup>2</sup> ]
		Μήκος γραμμής σε m					
15	25	1030 950					
	32	760 690					
25	32	850 770					
	40	660 580				1000 380	
50	50	560 480	1070 30			840 720	1130 1010
	63	440 360	830 690	1090 920		660 540	920 750
	80	330 250	630 490	830 660	1010 820	500 380	700 530
75	63	450 370	870 730	1140 970		680 560	950 780
	80	350 270	670 530	880 710	1080 880	530 410	740 570
	100	280 200	530 380	690 510	840 640	420 300	580 410
	125	220 140	410 270	530 360	650 450	330 210	450 290
100	63	460 380	890 750	1160 990		690 570	970 800
	80	360 280	690 550	900 730	1110 910	540 420	760 580
	100	280 210	540 400	710 530	870 670	430 310	600 430
	125	220 150	420 270	550 380	680 480	340 220	470 300
	160	170 90	320 180	420 240	510 310	260 140	360 190

Πίνακας 1.3.1.1-1: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης της Δ.Ε.Η., ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή.

Σημείωση: οι αγωγοί είναι αλουμινίου και η διατομή που δίνεται αφορά ισοδύναμη χαλκού.

Ισχύς P [KVA]	Ασφάλεια $I_{ασφ}$ [A]	Γυμνοί Αγωγοί Al [16 mm <sup>2</sup> ]	Γυμνοί Αγωγοί Al [35 mm <sup>2</sup> ]	Γυμνοί Αγωγοί Al [50 mm <sup>2</sup> ]	Γυμνοί Αγωγοί Al [70 mm <sup>2</sup> ]	Συνεστραμμένο Καλώδιο Al [3x35+54,6mm <sup>2</sup> ]	Συνεστραμμένο Καλώδιο Al [3x70+54,6mm <sup>2</sup> ]
		Μήκος γραμμής σε m					
150 160 200	80	370 290	710 570	940 760	1150 950	550 430	770 600
	100	300 210	570 420	740 560	910 710	440 320	610 440
	125	230 150	450 300	590 410	720 510	350 230	480 320
	160	180 100	350 200	450 270	560 340	270 150	370 210
	200		270 130	360 170	440 220	210 90	300 130
	250		210 70	280 90	340 110		230 70
250- 400	80	370 290	720 580	960 770	1170 970	560 440	780 610
	100	300 220	580 480	760 580	940 730	450 330	620 460
	125	240 160	460 310	600 420	740 540	360 240	500 330
	160	180 110	360 210	470 280	580 360	280 160	400 220
500- 630	200		280 140	370 180	460 240	220 100	310 140
	250		230 80	300 100	360 40		250 80
750- 1000	315			230 40	280 50		
	400				220		
	500						

Πίνακας 1.3.1.1-2: Τιμές ασφαλειών σε πίνακες χαμηλής τάσης της Δ.Ε.Η., ανάλογα με την ισχύ του μετασχηματιστή.

Σημείωση: οι αγωγοί είναι αλουμινίου και η διατομή που δίνεται αφορά ισοδύναμη χαλκού.

Έστω ότι μία γραμμή που αποτελείται από 300m 4×50mm<sup>2</sup> ACSR, 100m 4×16mm<sup>2</sup> Cu και 40 m 2×6mm<sup>2</sup> Cu, προστατεύεται στον πίνακα χαμηλής τάσης (ενός υποσταθμού 25 KVA, 20kV/400V) μέσω ασφαλειών 50A. Θα εξεταστεί στη συνέχεια αν είναι σωστό το μέγεθος των ασφαλειών. Ισχύει ότι:

- 300m 50 mm<sup>2</sup> ACSR ισοδυναμεί με  $300 \times 0,376 = 112,8m$  Cu 16 mm<sup>2</sup>

- 100m 16 mm<sup>2</sup> Cu    ισοδυναμεί με 100 × 1,000 = 100,0m Cu 16 mm<sup>2</sup>
- 40m 6 mm<sup>2</sup> Cu    ισοδυναμεί με 30 × 3,017 = 90,51m Cu 16 mm<sup>2</sup>

Επομένως το ισοδύναμο μήκος της γραμμής είναι  $L = 112,8+100,0+90,51= 303,31$  m.  
Συνεπώς από τον πίνακα 1.3.1.1-1 διαπιστώνεται ότι οι ασφάλειες πρέπει να γίνουν 32 Α.

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

Πίνακας 1.3.1.1-3: Τιμές Z<sub>α</sub>/Z<sub>β</sub> για γυμνούς αγωγούς Cu ή ισοδύναμου Al και συγκεντρικά καλώδια

## 1.4 Φαινόμενα σπινθηρισμών στα δίκτυα της ηλεκτρικής ενέργειας

Ως σπινθηρισμοί αποκαλούνται γενικά στην πράξη φωτεινά φαινόμενα που παρατηρούνται στα δίκτυα. Διακρίνονται [42]:

- στους σπινθηρισμούς που παρατηρούνται λόγω διηλεκτρικών φαινομένων σε μονωτήρες και στους αγωγούς και,

- στους σπινθηρισμούς που εκδηλώνονται σε στατικές ηλεκτρικές επαφές στις θέσεις σύνδεσης μεταξύ των αγωγών, στις επαφές διακοπών σε λειτουργία και στις ασφαλειοθήκες .

Το ερώτημα που γεννάται είναι αν οι σπινθηρισμοί αυτοί εκδηλώνονται στις υπαίθριες γραμμές διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή τόσο στις γραμμές μέσης τάσης όσο και στις γραμμές χαμηλής τάσης) και αν πρόκειται για τήγματα μετάλλου ή για φωτεινή ακτινοβολία, που συνοδεύονται και στις δύο περιπτώσεις από θόρυβο (τριγμούς). Ακολουθώς γίνεται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση για το θέμα αυτό.

#### **1.4.1 Σπινθηρισμοί επί των μονωτήρων και περί τους αγωγούς μέσης και υψηλής τάσης**

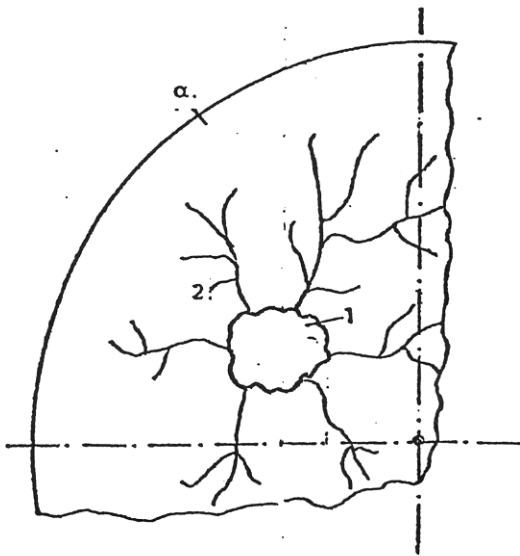
Ως σπινθηρισμούς επί των μονωτήρων εννοεί κανείς φωτεινές μερικές εκκενώσεις (δηλαδή εκκενώσεις περιορισμένης διαδρομής επί της επιφάνειας των μονωτήρων) συνοδευόμενες από θόρυβο. Ως σπινθηρισμοί συνηθίζεται να αποκαλούνται επίσης στην πράξη και οι φωτεινές μερικές εκκενώσεις περί τους αγωγούς, που συνοδεύονται με θόρυβο (φαινόμενο Κορονα). 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 [4,7,42,45,52].

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) [45,52].

Οι σπινθηρισμοί και η εξέλιξή τους σε έρπουσες εκκενώσεις επί των μονωτήρων οφείλονται κατά κανόνα σε ταυτόχρονη επίδραση υγρασίας της ατμόσφαιρας (που επικάθεται 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 έρπουσών ηλεκτρικών εκκενώσεων, επιφανειακής διάσπασης ή

υπερπήδησης. 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 [45,52].

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 ομιλεί κανείς για στεγνές ζώνες επί του μονωτήρα και στη δεύτερη για υγρές ζώνες [42,45].



Σχήμα 1.4.1-1: Παράδειγμα εικόνας επιφανειακών διαταραχών κατά την καταπόνηση στερεών βιομηχανικών μονωτικών. α: επιφάνεια στερεού μονωτικού, 1: κρατήρας, 2: σπήλαια

Η μορφή, την οποία παρουσιάζουν τα στερεά βιομηχανικά ηλεκτρομονωτικά υλικά κατά τη διαχρονική επιφανειακή καταπόνησή τους λόγω ξένων επικαθίσεων δίνεται στο σχήμα 1.4.1-1 [42,45] και ονομάζεται εικόνα επιφανειακών διαταραχών. Πρόκειται για μία μόνιμη παραμόρφωση του υλικού, η οποία σχετίζεται με την εκδήλωση φωτεινής

ακτινοβολίας (υπό μορφή δενδρίτη). Τα σπήλαια και ο κρατήρας έχουν αποδοθεί στη θερμική καταπόνηση του μονωτικού, που είναι αποτέλεσμα κάποιας τήξης του στα ίχνη του επιφανειακού δενδρίτη. Τα θραύσματα (αν υπάρχουν) δημιουργούνται κυρίως στην περιοχή του κρατήρα, η οποία είναι και η θέση, όπου θα συμβεί η διάτρηση.

Η πεδιακή ένταση για την έναρξη μερικών εκκενώσεων (δηλαδή σπινθηρισμών) στους αγωγούς μίας γραμμής υπό ατμοσφαιρικό αέρα δίνεται από τη σχέση [11,45]:

$$E = m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 \cdot \left( 1 + \frac{0,3}{(\delta \cdot r)^{\frac{1}{2}}} \right) \text{ kV/cm} \quad (1.4.1-1)$$

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  $\delta$  περίπου 0,91.

Η πεδιακή ένταση  $E_1$  για τάση  $U$  μεταξύ δύο αγωγών δίνεται από τη σχέση [7,42]:

$$E_1 = \frac{U}{\eta \cdot d} \quad (1.4.1-2)$$

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

Για τη γεωμετρική σταθερά του πεδίου μεταξύ δύο αγωγών ισχύει κατά τη βιβλιογραφία [7,45] η σχέση:

$$p = \frac{(r + d)}{r} \quad (1.4.1-3)$$

Από τη σχέση (1.4.1-3) υπολογίζεται η τιμή  $p$ , οπότε για τιμή  $p < 19,6$  από τη χαρακτηριστική  $p=f(\eta)$  βρίσκεται ο συντελεστής χρησιμοποίησης ( $\eta$ ) [45]. Για τιμές  $p > 19,6$  ισχύει η σχέση [7,45]:

$$\eta = \frac{2 \cdot r \cdot \ln\left(2 + \frac{d}{r}\right)}{d} \quad (1.4.1-4)$$

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

### 1.4.1.1 Εκδήλωση σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς μέσης τάσης

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. Πράγματι, 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 (1.4.1-1) και είναι π.χ. για  $r = 8,62\text{mm}$  (αγωγός τύπου ACSR ισοδύναμης διατομής χαλκού  $95\text{mm}^2$  [38]),  $m_1=0,83$ ,  $m_2=1$  και  $\delta=0,91$ :

$$E = m_1 \cdot m_2 \cdot \delta \cdot 30 \cdot \left( 1 + \frac{0,3}{(\delta \cdot r)^{\frac{1}{2}}} \right) = 0,83 \cdot 1 \cdot 0,91 \cdot 30 \cdot \left( 1 + \frac{0,3}{2,8} \right) = 25,15 \text{ kV/cm} \quad (1.4.1.1-1)$$

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

Για τη γεωμετρική σταθερά (p) του πεδίου μεταξύ δύο αγωγών (που απέχουν μεταξύ τους κατά d) προκύπτει από τη σχέση (1.4.1-3):  $p > 19,6$  Συνεπώς συντελεστής χρησιμοποίησης του πεδίου ( $\eta$ ) είναι με βάση τη σχέση (1.4.1-4):

$$\eta = \frac{2 \cdot r \cdot \ln\left(2 + \frac{d}{r}\right)}{d} = \frac{2 \cdot 8,62 \cdot \ln\left(2 + \frac{1000}{8,62}\right)}{1000} = 0,02 \quad (1.4.1.1-2)$$

Επομένως η πεδιακή ένταση  $E_1$  για τάση  $U=20 \text{ kV}$  είναι σύμφωνα με τη σχέση (1.4.1-2):

$$E_1 = \frac{U}{\eta \cdot d} = \frac{20}{0,02 \cdot 100} = 10 \text{ kV/cm} \quad (1.4.1.1-3)$$

Η τιμή  $E_1$  είναι περίπου 2,5 φορές μικρότερη από την τιμή E ανωτέρω και συνεπώς αποκλείεται η εκδήλωση μεταξύ των αγωγών: θορύβου, σπινθηρισμών, ή άλλων μορφών μερικών εκκενώσεων, πολύ δε περισσότερο διάσπαση μεταξύ των αγωγών. 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. Η ειδική αγωγιμότητα του άνθρακα είναι  $\rho_{av}=0,083$  έως  $33,3\mu\Omega\cdot\text{m}$  και του ατμοσφαιρικού αέρα  $\rho > 1000\text{T}\Omega\cdot\text{m}$ . Γι' αυτό, η καπναιθάλη δημιουργεί αγωγίμες διαδρομές στον αέρα, προκαλώντας έτσι την εκδήλωση σπινθηρισμών, ή ακόμα και τη διάσπαση.

Πράγματι, η αντίσταση μόνωσης ( $R$ ) θεωρείται γενικά ως κατάλληλη όταν  $R \geq 1000 \Omega/V$ . Μία κυλινδρική π.χ. στήλη ατμοσφαιρικού αέρα διατομής  $1\text{mm}^2$  μεταξύ των αγωγών (που βρίσκονται σε απόσταση  $l=1\text{m}$ ) έχει αντίσταση μόνωσης:

$$R_1 = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{10^{15} \cdot 1}{10^{-6}} = 10 \times 10^{20} \Omega \quad (1.4.1.1-4)$$

Επειδή η ανωτέρω τιμή υπερπληροί 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.  $I=10\text{mA}$ ). Έτσι, αν θεωρηθεί ότι η προηγούμενη στήλη έγινε μείγμα αέρος και καπναιθάλης, τότε η τιμή  $R_2$  της αντίστασης του μείγματος αυτού θα είναι:

$$R_2 = \frac{U}{I} = \frac{20000}{10 \cdot 10^{-3}} = 2 \times 10^6 \Omega \quad (1.4.1.1-5)$$

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  $R \geq 2 \times 10^7 \Omega$ ). Η ειδική αντίσταση  $\rho_2$  του εν λόγω μείγματος αέρα καπναιθάλης είναι:

$$\rho_2 = \frac{R_2 \cdot A}{l} = 20 \Omega \cdot \text{m} = 0.00002 \text{M}\Omega \cdot \text{m} \quad (1.4.1.1-6)$$

Από την ανωτέρω τιμή  $R_2$  (ή την  $\rho_2$ ) συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει πλέον σωστή μόνωση, γιατί έχει δημιουργηθεί μία αγωγίμη διαδρομή μεταξύ των αγωγών με αποτέλεσμα την εκδήλωση σπινθηρισμών[45].

#### 1.4.1.2 Η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης

Στις γραμμές χαμηλής τάσης (380V/220V) με γυμνούς αγωγούς ισχύει  $d=30\text{cm}$  [45]. Αν υποθεθεί για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, ότι πρόκειται για τους ίδιους γυμνούς αγωγούς, που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, τότε είναι  $\rho > 19,6$  και  $\eta = 0,02$ . Επομένως η πεδιακή ένταση  $E_1$  για τάση  $U=0,38 \text{kV}$  έχει την τιμή:

$$E_1 = \frac{U}{\eta \cdot d} = \frac{0,28}{0,02 \cdot 30} = 0.0002 \text{kV/cm} \quad (1.4.1.2-1)$$



Δηλαδή ισχύει ότι:

$$E=1,25 \times 10^8 E_1 \quad (1.4.1.2-2)$$

Είναι φανερό ότι για να συμβούν σπινθηρισμοί σε γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης απαιτείται πάρα πολύ ρυπασμένο περιβάλλον συγκριτικά προς τις εναέριες γραμμές μέσης τάσης, που συνήθως δεν συναντάται στην πράξη. Αυτός είναι ο λόγος, που οι σπινθηρισμοί είναι ένα αρκετά σύνηθες ηλεκτρικό φαινόμενο στις γραμμές υψηλής τάσης και στις γραμμές μέσης τάσης (όταν βεβαίως συνυπάρχουν ρύπανση και υγρασία υπό μορφή δρόσου) και όχι στους γυμνούς αγωγούς των γραμμών χαμηλής τάσης [45,52].

Η αδυναμία εκδήλωσης σπινθηρισμών στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης (που εξηγήθηκε ανωτέρω με ένα αριθμητικό παράδειγμα) προκύπτει επίσης από το νόμο του Paschen και την θεωρία του Townsend [42] γιατί αποκλείεται η εκδήλωση φαινομένων ιονισμού στις γραμμές χαμηλής τάσης, πολύ δε περισσότερο που οι γυμνοί αγωγοί απέχουν μεταξύ τους 30cm (όταν η απόσταση μόνωσης στη χαμηλή τάση είναι της τάξεως των 2,5mm).

#### **1.4.2 Σπινθηρισμοί και τήγματα μετάλλου σε κακές ηλεκτρικές επαφές (επαφές με μεγάλη αντίσταση διάβασης)**

Σε περιπτώσεις ηλεκτρικών επαφών με μεγάλη αντίσταση διάβασης (λόγω π.χ. δημιουργίας μεγάλου ποσοστού οξειδίων σε μία επαφή διακόπτη ή χαλάρωση της σύσφιγξης των δύο μερών) αυξάνει η πτώση τάσης στην επαφή και μπορεί να δημιουργηθούν σπινθηρισμοί και τήγματα μετάλλου από τα υλικά του λυόμενου συνδέσμου. Η μέτρηση (συνήθως εξ αποστάσεως) της θερμοκρασίας στις επαφές αυτές (που γίνεται κατά τους κανονισμούς σε ετήσια βάση στις γραμμές μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας – βλ. παρ. 1.1.2) έχει δείξει στην πράξη ότι είναι ικανοποιητική για την αξιόπιστη λειτουργία τους.



## 2 Σκοπός της εργασίας

Από τα αναφερθέντα στις προηγούμενες παραγράφους διαπιστώνεται ότι μία πειραματική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης στις γραμμές χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, θα μπορούσε να συνεισφέρει στα συμπεράσματα των υπολογισμών κατά το βραχυκύκλωμα, ότι δηλαδή όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα σε μία γραμμή διανομής χαμηλής τάσης, τήκεται σχεδόν ακαριαία η ασφάλεια (ή οι ασφάλειες) και συνεπώς δεν εκδηλώνονται σπινθηρισμοί και η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς είναι άνευ σημασίας. Αν προσεγγισθεί αυτό πειραματικά τότε θα ενισχυθεί σημαντικά η άποψη ότι κατά το βραχυκύκλωμα των αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης δεν παράγονται τήγματα. Για να διευκολυνθούν οι θεωρητικοί υπολογισμοί της αύξησης της θερμοκρασίας στους αγωγούς κατά το βραχυκύκλωμα θα δοθεί ένα απλό πρόγραμμα υπολογισμού.

Κρίθηκε επίσης σκόπιμο να υπολογισθεί η θερμοκρασία υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου από υπαίθριες γενικά γραμμές διανομής (γραμμές μέσης τάσης και χαμηλής τάσης) κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος κάτι που όπως γνωρίζουμε από την πράξη δεν έχει ακόμα ερευνηθεί επαρκώς. Σαν εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου θα δοθεί πρόγραμμα υπολογισμού της θερμοκρασίας αυτών των τηγμάτων κατά τη πτώση τους από αγωγούς αλουμινίου ή από επαφές μετασχηματιστών.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι ακόμα η πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της συμπεριφοράς των επιτόνων σε περιπτώσεις πυρκαγιών στο περιβάλλον των γραμμών διανομής. Επίσης, κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία ενός προγράμματος που θα διευκολύνει στον υπολογισμό του ύψους της φλόγας σε πυρκαγιές υπαίθρου.



### 3 Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

Ακολούθησε η παρακάτω διαδικασία: Κατασκευάστηκε ένα ξύλινο ικρίωμα, πάνω στο οποίο τοποθετήθηκαν δύο γυμνοί αγωγοί αλουμινίου του δικτύου χαμηλής τάσης σε απόσταση μεταξύ τους 30cm, απόσταση ίση με αυτή που υπάρχει μεταξύ αγωγών χαμηλής τάσης στο δίκτυο. Το ικρίωμα ήταν σε απόσταση 30cm από το έδαφος και κάτω από αυτό είχε τοποθετηθεί χαρτί προκειμένου να αναγνωριστεί ενδεχόμενη δημιουργία τηγμάτων αλουμινίου κατά το βραχυκύκλωμα ή ακόμα και ανάφλεξη του χαρτιού από τα τήγματα. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα πειράματα έγιναν με μήκη και ασφάλειες που εναρμονίζονται με τους κανονισμούς της ΔΕΗ (βλ. παρ. 1.3.1.1, [15,44]). Τα δοκίμια ήταν αγωγοί αλουμινίου διατομής 16mm<sup>2</sup>, 35mm<sup>2</sup> και 50mm<sup>2</sup>. Ο ένας εκ των δύο αγωγών συνδέθηκε στην παροχή ρεύματος μέσω ασφάλειας, η οποία στην περίπτωση των διατομών 35mm<sup>2</sup> και 50mm<sup>2</sup> ήταν 80A, ενώ για τους αγωγούς διατομής 16 mm<sup>2</sup> ήταν 63A.

Η αγώγιμη γεφύρωση των δύο αγωγών της ίδιας διατομής γινόταν με μονωτική ράβδο που στο ένα άκρο της συνδεόταν ο ένας εκ των δύο αγωγών, ενώ οι αγωγοί ήταν ήδη υπό τάση. Η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ρυθμίστηκε σε όλες τις περιπτώσεις στην τριπλάσια τιμή του ονομαστικού ρεύματος της ασφάλειας. Επίσης, έγιναν μετρήσεις για μεγαλύτερα ρεύματα με τιμές 880A και 1000A. Για τις τιμές δοκιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης πολλαπλάσιες του ονομαστικού ρεύματος των ασφαλειών, έγιναν επαναλαμβανόμενες αγώγιμες γεφυρώσεις των δύο κατά περίπτωση αγωγών μέσω της μονωτικής ράβδου που προαναφέρθηκε. Η μέτρηση της θερμοκρασίας των αγωγών έγινε με θερμοζεύγη που είχαν τοποθετηθεί πάνω τους.

Σε επόμενη πειραματική διαδικασία έγινε προσπάθεια να εξομοιωθεί η περίπτωση περιπλεγμένων κλαδιών (στεγνών και βρεγμένων) με αγωγούς χαμηλής τάσης. Σε ξύλινο πλαίσιο 2x2m<sup>2</sup> τοποθετήθηκαν σε κατακόρυφη παράλληλη διάταξη 4 γυμνοί αγωγοί αλουμινίου διατομής 50mm<sup>2</sup>, σε απόσταση 30cm μεταξύ τους. Οι τρεις κάτω αγωγοί συνδέθηκαν στις τρεις φάσεις και ο επάνω στον ουδέτερο (όπως δηλαδή τοποθετούνται στην πράξη οι γυμνοί αγωγοί στις γραμμές χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής). Για φορτίο τοποθετήθηκε ανά φάση λαμπτήρας πυράκτωσης 60W. Έγιναν μετρήσεις των

ρευμάτων προς το φορτίο τόσο για στεγνά όσο και για βρεγμένα κλαδιά πεύκου και ελιάς περιπεπλεγμένα μεταξύ των αγωγών καθώς και χωρίς κλαδιά.

Σε τρίτη πειραματική διαδικασία διερευνήθηκαν επαναλαμβανόμενα βραχυκυκλώματα μεταξύ του αγωγού του δημοτικού φωτισμού και της υπερκείμενης αυτού φάσης. Οι διατομές των από αλουμίνιο γυμνών αγωγών ήταν: της φάσης  $50\text{mm}^2$  και του δημοτικού φωτισμού  $16\text{mm}^2$ . Οι αγωγοί απείχαν μεταξύ τους  $30\text{cm}$  (όπως συμβαίνει στην πράξη) και είχαν τοποθετηθεί πάλι σε ξύλινο πλαίσιο  $2 \times 2\text{m}^2$  σε απόσταση  $30\text{cm}$  από το δάπεδο. Ο ένας εκ των δύο αγωγών συνδέθηκε μέσω ασφάλειας NH1 80A στον ένα ακροδέκτη της πηγής σταθεροποιημένου ρεύματος και ο άλλος αγωγός στον άλλο ακροδέκτη. Η αγωγή γεφύρωση των δύο αγωγών γινόταν με μονωτική ράβδο στο άκρο της οποίας συνδέθηκε ο ένας αγωγός. Η πηγή σταθεροποιημένου ρεύματος ρυθμίστηκε έτσι ώστε το ρεύμα κατά την αγωγή γεφύρωση των δύο αγωγών να είναι  $80\text{A}$ . Για τη γεφύρωση των δύο αγωγών διερευνήθηκαν και η περίπτωση που ο δημοτικός φωτισμός ήταν σε λειτουργία (παράλληλη σύνδεση προς τους αγωγούς φορτίου  $1\text{kW}$ ) αλλά και η περίπτωση που ο δημοτικός φωτισμός ήταν εκτός λειτουργίας (λειτουργία άνευ φορτίου). Κάτω από το ικρίωμα είχε τοποθετηθεί όπως και στην πρώτη πειραματική διαδικασία επί του δαπέδου χαρτί ανοικτού καφέ χρώματος, τόσο για τον εύκολο εντοπισμό τηγμάτων αλουμινίου (σε ενδεχόμενη δημιουργία τους κατά το βραχυκύκλωμα), όσο και για να υπάρχει η δυνατότητα του άμεσου οπτικού ελέγχου από ενδεχόμενα ίχνη καύσης των άνω τηγμάτων επ' αυτού. Η μέτρηση της θερμοκρασίας των αγωγών έγινε με θερμοζεύγη που είχαν τοποθετηθεί πάνω τους. Τα πειράματα έγιναν με επαναλαμβανόμενες γεφυρώσεις των δύο αγωγών.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται ακολούθως:

### **1) Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά την πειραματική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης**

Μία θεωρητική ερμηνεία των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι η ακόλουθη:

Για τη θερμική ενέργεια ισχύει η σχέση:

$$W_{\theta} = V c \Delta\theta = A L c \Delta\theta \quad (3-1)$$

όπου  $V$  ο όγκος,  $c$  η ειδική θερμότητα,  $A$  η διατομή του αγωγού και  $L$  το μήκος του. Για την ηλεκτρική ενέργεια  $W_{\eta}$  στην αντίσταση  $R$  του αγωγού λόγω του ρεύματος βραχυκύκλωσης ενεργού τιμής  $I_{\beta}$  ισχύει:

$$W_{\eta} = I_{\beta}^2 R t = I_{\beta}^2 \rho (L/A) t \quad (3-2)$$

όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση και  $t$  ο χρόνος βραχυκύκλωσης. Από τις δύο ανωτέρω σχέσεις έπεται ότι:

$$\Delta\theta = \kappa I_{\beta}^2 t/A^2 \quad (3-3)$$

όπου  $\kappa = \rho/c$ . Για τον χαλκό είναι  $\rho = 1/50 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  και  $c = 3,44 \text{ W s } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ cm}^{-3}$  και επομένως είναι  $\kappa = 0,0053$ . Για το αλουμίνιο ισχύει  $\kappa = 0,0135$ .

Είδος αγωγού	Ασφάλεια [A]	$I_{\beta}$ [A]	t [s]	$\theta_x$ [°C]	$\theta$ [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	Παρατηρήσεις
Al, 16 mm <sup>2</sup>	63	189	5,00	25	33,7	8,7	1. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα
		880	0,08		25,8	0,8	1. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα και δεν παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί.
		1000	0,00		25,0	0,0	2 Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις προκλήθηκε ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα
Al, 35 mm <sup>2</sup>	80	240	5,00	25	28,0	3,0	1. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα
		880	0,08		25,6	0,6	1. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα και δεν παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί.
		1000	0,00		25,0	0,0	2 Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις προκλήθηκε ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα
Al, 50 mm <sup>2</sup>	80	240	5,00	25	26,5	1,5	1. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα
		880	0,08		25,3	0,3	1. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα και δεν παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί.
		1000	0,08		25,0	0,0	2 Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις προκλήθηκε ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα

Πίνακας 3-1: Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά την πειραματική διερεύνηση της συνθήκης ουδετέρωσης (ή βραχυκύκλωσης)

Μεταξύ των μετρούμενων τιμών  $\Delta\theta$  στον πίνακα 3-1 και των υπολογιζόμενων στον πίνακα 3-2 παρατηρείται ικανοποιητική ταύτιση αποτελεσμάτων.

Είδος αγωγού	Ασφάλεια [A]	$I_{\beta}$ [A]	t [sec]	$\Delta\theta$ [°C]
Al, 16mm <sup>2</sup>	63	189	5,00	8,73
		880	0,08	0,02
		1000	0,00	0,00
Al, 35mm <sup>2</sup>	80	240	5,00	3,17
		880	0,08	0,67
		1000	0,00	0,00
Al, 50mm <sup>2</sup>	80	240	5,00	1,55
		880	0,08	0,33
		1000	0,00	0,00

Πίνακας 3-2: Υπολογιζόμενες τιμές της αύξησης της θερμοκρασίας των αγωγών κατά το βραχυκύκλωμα.

**2) Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά την πειραματική διερεύνηση συνεπειών ή μη περιπελεγμένων με τους αγωγούς κλαδιών δένδρων (στεγνών ή βρεγμένων)**

Ως φορτίο ανά φάση χρησιμοποιήθηκε λαμπτήρας 60W. Σε σειρά με τις λάμπες είχαν τοποθετηθεί αμπερόμετρα. Τα κλαδιά ήταν στεγνά και κατόπιν βράχθηκαν με νερό. Η τιμή του ρεύματος ήταν σε όλες τις περιπτώσεις περίπου 252mA (όση ήταν δηλαδή η απορροφημένη ένταση ανά φάση). Συνεπώς, δεν υπήρξε διαρροή ρεύματος (αν υπήρχε ρεύμα διαρροής θα προέκυπτε ως διαφορά των δύο ρευμάτων - τιμή ρεύματος χωρίς κλαδιά και τιμή ρεύματος με κλαδιά). Επίσης, δεν παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών και των κλαδιών, ούτε συνέβη ανάφλεξη των κλαδιών, ούτε υπήρξαν φωτεινά και ηχητικά φαινόμενα.

**3) Αποτελέσματα των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά την πειραματική διερεύνηση επαναλαμβανόμενων αγωγίμων επαφών μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού και του υπερκείμενού του αγωγού φάσεως**

Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού (Al 16mm<sup>2</sup>) και του υπερκείμενού του αγωγού φάσης (Al 50mm<sup>2</sup>), με τον δημοτικό φωτισμό εντός λειτουργίας (φορτίο 1000W) ή εκτός λειτουργίας (άνευ φορτίου), διαπιστώθηκαν τα εξής:

1. Παρατηρήθηκαν σπινθηρισμοί συνοδευόμενοι από ήχο (τριγμοί), που μπορούν να αποδοθούν στο διακοπτικό φαινόμενο λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο αγωγών.



2. Δεν αυξήθηκε η θερμοκρασία των αγωγών.
3. Δεν δημιουργήθηκαν τήγματα αλουμινίου.



## 4 Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

Αρχικά διερευνάται η τροχιά που διαγράφει ένα τήγμα που πέφτει από ύψος  $H$  υπό πνέοντα οριζόντιο άνεμο. Λόγω της ανεξαρτησίας των κινήσεων σε κάθε άξονα υπολογίζονται οι συνισταμένες δυνάμεις. Για τον κατακόρυφο άξονα ισχύει:

$$F_y = B - F_{Dy} \quad (4-1)$$

όπου το  $B$  είναι το βάρος του σώματος και  $F_{Dy}$  είναι η δύναμη αντίστασης. Οπότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τις δυνάμεις με τα ίσα τους προκύπτει:

$$m\gamma_y = mg - z_y u_y^2 \quad (4-2)$$

όπου  $m$  η μάζα του σώματος,  $\gamma_y$  η επιτάχυνση του σώματος,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $u_y$  η ταχύτητα στον κατακόρυφο άξονα τη χρονική στιγμή  $t$  και  $z_y$  δίνεται από τη σχέση [34,37,40]:

$$z_y = \frac{1}{2} \rho C_d S_y \quad (4-3)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $C_d$  ο συντελεστής αντίστασης που εξαρτάται από το σχήμα του σώματος και την υφή του και  $S_y$  η προβαλλόμενη επιφάνεια του σώματος στο επίπεδο που είναι κάθετο στην κατακόρυφη κίνηση.

Η επιτάχυνση  $\gamma_y$  του σώματος αντιστοιχεί με το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας και συνεπώς η σχέση κίνησης στον κατακόρυφο άξονα γίνεται:

$$m \frac{du_y}{dt} = mg - z_y u_y^2 \quad (4-4)$$

Διαιρώντας με τη μάζα  $m$  κάθε μέλος της ισότητας προκύπτει η τροχιά του τήγματος στον κατακόρυφο άξονα με τη μορφή της παρακάτω διαφορικής εξίσωσης:

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

---

$$u'_y[t] + \frac{z_y}{m} u_y^2[t] - g = 0 \quad (4-5)$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης δίνεται από τη σχέση:

$$u_y[t] = \sqrt{\frac{g m}{z_y}} \operatorname{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} (t + c_1)\right] \quad (4-6)$$

όπου  $c_1$  η σταθερά ολοκλήρωσης. Για να υπολογιστεί η σταθερά ολοκλήρωσης λαμβάνεται υπόψη η οριακή συνθήκη για τη χρονική στιγμή  $t = 0$  όπου το σώμα θεωρείται ακίνητο.

Άρα:

$$t = 0, u_y = 0.$$

Εισάγοντας την οριακή συνθήκη στην εξίσωση υπολογίζεται η σταθερά ολοκλήρωσης:

$$u_y[0] = \sqrt{\frac{g m}{z_y}} \operatorname{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} (0 + c_1)\right] \quad (4-7)$$

$$0 = \sqrt{\frac{g m}{z_y}} \operatorname{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} c_1\right] \quad (4-8)$$

$$0 = \operatorname{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} c_1\right] \quad (4-9)$$

και άρα

$$c_1 = 0$$

Αντικαθιστώντας τη σταθερά ολοκλήρωσης στη σχέση (4-6) προκύπτει ότι

$$u_y[t] = \sqrt{\frac{g m}{z_y}} \operatorname{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} t\right] \quad (4-10)$$

Για τον οριζόντιο άξονα ισχύει ότι η συνισταμένη δύναμη είναι:

$$F_x = F_{Dx} \quad (4-11)$$

όπου  $F_{Dx}$  είναι η δύναμη αντίστασης η οποία παρασύρει το σώμα. Οπότε αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση τις δυνάμεις με τα ίσα τους προκύπτει:

$$m\gamma_x = z_x (u_a - u_x)^2 \quad (4-12)$$

όπου  $m$  η μάζα του σώματος,  $\gamma_x$  η επιτάχυνση του σώματος,  $u_x$  η ταχύτητα στον οριζόντιο άξονα την χρονική στιγμή  $t$  και  $z_x$  δίνεται από τη σχέση:

$$z_x = \frac{1}{2} \rho C_d S_x \quad (4-13)$$

όπου  $S_x$  η προβαλλόμενη επιφάνεια του σώματος στο επίπεδο που είναι κάθετο στην οριζόντια κίνηση.

Η επιτάχυνση  $\gamma_x$  του σώματος αντιστοιχεί με το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας και συνεπώς η σχέση κίνησης στον άξονα γίνεται:

$$m \frac{du_x}{dt} = z_x (u_a - u_x)^2 \quad (4-14)$$

Διαιρώντας με τη μάζα  $m$  κάθε μέλος της ισότητας προκύπτει η τροχιά του τμήματος στον οριζόντιο άξονα με τη μορφή της παρακάτω διαφορικής εξίσωσης:

$$u_x' [t] - \frac{z_x}{m} (u_a - u_x [t])^2 = 0 \quad (4-15)$$

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης δίνεται από τη σχέση:

$$(u_x [t] - u_a)^{-1} = \left( \frac{z_x}{m} t + c \right) \quad (4-16)$$

$$u_x [t] = \frac{-m + u_a z_x t + m u_a c_2}{z_x t + m c_2} \quad (4-17)$$

όπου  $c_2$  η σταθερά ολοκλήρωσης. Για να υπολογιστεί η σταθερά ολοκλήρωσης λαμβάνεται υπόψη η οριακή συνθήκη για τη χρονική στιγμή  $t = 0$  όπου το σώμα θεωρείται ακίνητο. Άρα:

$$t = 0, u_x = 0.$$

Εισάγοντας την οριακή συνθήκη στην εξίσωση, η σταθερά ολοκλήρωσης υπολογίζεται :

$$0 = \frac{-m + m u_a c_2}{m c_2} \quad (4-18)$$

δηλαδή:

$$0 = -m + m u_a c_2 \quad (4-19)$$

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

---

άρα τελικά ισχύει:

$$c_2 = \frac{1}{u_a} \quad (4-20)$$

Αντικαθιστώντας τη σταθερά ολοκλήρωσης στη σχέση (4-17) ισχύει ότι

$$u_x [t] = \frac{-m + u_a z_x t + m u_a \frac{1}{u_a}}{z_x t + m \frac{1}{u_a}} \quad (4-21)$$

$$u_x [t] = u_a \frac{-m + u_a z_x t + m}{u_a z_x t + m} \quad (4-22)$$

$$u_x [t] = u_a \left( \frac{u_a z_x t + m}{u_a z_x t + m} - \frac{m}{u_a z_x t + m} \right) \quad (4-23)$$

$$u_x [t] = u_a \left( 1 - \frac{m}{u_a z_x t + m} \right) \quad (4-24)$$

Η σχετική ταχύτητα ως προς την ταχύτητα του ανέμου  $u_a$ , στον οριζόντιο άξονα είναι:

$$u_{xs} = u_a - u_x \quad (4-25)$$

Άρα :

$$u_{xs} [t] = u_a \frac{m}{u_a z_x t + m} \quad (4-26)$$

Η συνισταμένη ταχύτητα :

$$u = \sqrt{u_{xs}^2 + u_y^2} \quad (4-27)$$

από τις σχέσεις (4-10), (4-26) και (4-27) προκύπτει:

$$u = \sqrt{\frac{g m}{z_y} \left( \text{Tanh} \left[ \sqrt{\frac{g z_y}{m}} t \right] \right)^2 + u_a^2 \left( \frac{m}{m + u_a z_x t} \right)^2} \quad (4-28)$$

Η απόσταση  $y$  την οποία έχει διανύσει το τήγμα σε κάθε χρονική στιγμή  $t$  στον κατακόρυφο άξονα υπολογίζεται από τη σχέση (4-10) που δίνει την ταχύτητα ( $u_y$ ), δια ολοκλήρωσεως στον χρόνο ( $t$ ). Η σχέση που προκύπτει είναι η ακόλουθη:

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

$$\frac{dy}{dt} = \sqrt{\frac{g m}{z_y}} \operatorname{Tanh}\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} t\right] \quad (4-29)$$

$$y = \frac{m}{z_y} \ln\left[\cosh\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} t\right]\right] + c_3 \quad (4-30)$$

όπου  $c_3$  η σταθερά ολοκλήρωσης. Για να υπολογιστεί η σταθερά ολοκλήρωσης λαμβάνεται υπόψη η οριακή συνθήκη για τη χρονική στιγμή  $t = 0$  όπου το σώμα θεωρείται ότι δεν έχει διανύσει κανένα διάστημα. Άρα:

$$t = 0, y = 0.$$

Εισάγοντας την οριακή συνθήκη στην εξίσωση, η σταθερά ολοκλήρωσης υπολογίζεται :

$$c_3 = 0$$

Αντικαθιστώντας τη σταθερά ολοκλήρωσης στη σχέση ισχύει:

$$y = \frac{m}{z_y} \ln\left[\cosh\left[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} t\right]\right] \quad (4-31)$$

Λύνοντας την προηγούμενη σχέση ως προς  $t$  έχουμε:

$$t = \sqrt{\frac{m}{g z_y}} \operatorname{ArcCosh}\left[\operatorname{Exp}\left[\frac{y z_y}{m}\right]\right] \quad (4-32)$$

Η χρονική διάρκεια της πτώσης  $t_\pi$  δίνεται αν αντικατασταθεί στην προηγούμενη σχέση το  $y$  με το αρχικό ύψος της πτώσης. Οπότε:

$$t_\pi = \sqrt{\frac{m}{g z_y}} \operatorname{ArcCosh}\left[\operatorname{Exp}\left[\frac{H z_y}{m}\right]\right] \quad (4-33)$$

Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του τήγματος  $\theta(t)$ , κατά την διάρκεια της πτώσης του, εξετάζεται το ισοζύγιο της θερμότητας στο τήγμα που περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση:

$$m c \frac{d\theta}{dt} = -h A \Delta\theta - h_r A \Delta\theta \quad (4-34)$$

δηλαδή:

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

---

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = -\frac{h A}{m c} \Delta\theta - \frac{h_r A}{m c} \Delta\theta \quad (4-35)$$

όπου  $\Delta\theta$  η διαφορά θερμοκρασίας  $\theta_p$  του τήγματος από την θερμοκρασία  $\theta_e$  του περιβάλλοντος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $c$  η ειδική θερμότητα του υλικού του τήγματος,  $A$  η εξωτερική επιφάνεια του τήγματος,  $h$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας με συνεπαγωγή και  $h_r$  ο συντελεστής ακτινοβολίας.

Ο συντελεστής  $h$  δίνεται από τη σχέση (1.2.3.1-10) ως συνάρτηση του αριθμού Nusselt και είναι:

$$h = Nu \frac{k}{L} \quad (4-36)$$

όπου  $k$  η αγωγιμότητα του ρευστού και  $L$  το χαρακτηριστικό μήκος. Ο αριθμός Nusselt υπολογίζεται εμπειρικά και στο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (βλ. παρ. 1.2.3.1):

$$Nu = 0,37 (Re)^{0,6} \quad (4-37)$$

όταν ισχύει  $25 \leq Re \leq 10^5$

Ο αριθμός Reynolds ( $Re$ ) ορίζεται με την παρακάτω σχέση (βλ. παρ. 1.2.3.1):

$$Re = u \frac{L}{\nu} = \rho u \frac{L}{\mu} \quad (4-38)$$

όπου  $u$  ταχύτητα του ρευστού σε μεγάλη απόσταση από το σώμα,  $L$  το χαρακτηριστικό μήκος,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $\nu$  το κινηματικό ιξώδες του ρευστού,  $\mu$  το δυναμικό ιξώδες του ρευστού. Ο αριθμός Prandtl ( $Pr$ ) ορίζεται με την παρακάτω σχέση (βλ. παρ. 1.2.3.1):

$$Pr = \frac{c_f \mu}{k} \quad (4-39)$$

όπου  $c_f$  η ειδική θερμότητα του αέρα.

Ο συντελεστής  $h_r$  δίνεται από τη σχέση (βλ. παρ. 1.2.3.1):

$$h_r = \epsilon \sigma \frac{\theta_p^4 - \theta_e^4}{\Delta\theta} \quad (4-40)$$



Θεωρείται ότι το σώμα δεν ακτινοβολεί καθόλου και μελετάται η μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος μόνο λόγω της συνεπαγωγής μέσω του αέρα. Η παραδοχή αυτή έγινε λόγω του μεγάλου βαθμού δυσκολίας επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης με τη χρήση του συντελεστή ακτινοβολίας, λόγω της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας του τήγματος στην προηγούμενη σχέση. Η παραδοχή αυτή είναι ρεαλιστική αφού η συμμετοχή της ακτινοβολίας στο ρυθμό απώλειας θερμότητας από το τήγμα είναι μικρή (όπως αναφέρθηκε στην παρ.1.2.3.1 η ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε περιπτώσεις ελεύθερης μεταφοράς ενώ σε περιπτώσεις εξαναγκασμένης μεταφοράς θεωρείται αμελητέα, ειδικότερα σε περιπτώσεις σωμάτων με μικρό συντελεστή εκπομπής). Εξάλλου η παραδοχή αυτή είναι προς όφελος του μοντέλου στο οποίο υπολογίζεται η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία που μπορεί να φθάσει το σώμα στο έδαφος.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω η διαφορική εξίσωση (4-35) διαμορφώνεται ως εξής:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{h A}{m c} \Delta\theta \quad (4-41)$$

Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης θεωρώντας ότι ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας  $\frac{d\theta}{dt}$  ισούται με το ρυθμό μεταβολής της διαφοράς της θερμοκρασίας  $\frac{d\Delta\theta}{dt}$  ισχύει ότι:

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{dt} = -\frac{h A}{m c} \Delta\theta(t) \quad (4-42)$$

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(t)} = -\frac{h A}{m c} dt \quad (4-43)$$

Αντικαθιστώντας τον συντελεστή συνεπαγωγής  $h$  από την ισότητα (4-36) ισχύει:

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(t)} = -\frac{Nu k A}{m c L} dt \quad (4-44)$$

Αντικαθιστώντας τον αριθμό Nusselt  $Nu$  από την ισότητα (4-37) ισχύει:

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(t)} = -\frac{0,37 (Re)^{0,6} k A}{m c L} dt \quad (4-45)$$

και τον αριθμό Reynolds  $Re$  από την ισότητα (4-38) ισχύει:

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

---

$$\frac{d\Delta\theta(t)}{\Delta\theta(t)} = - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \{u(t)\}^{0,6} dt \quad (4-46)$$

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης είναι:

$$\ln(\Delta\theta) + c_4 = \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^t \{u(t)\}^{0,6} dt \right) \quad (4-47)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την οριακή συνθήκη σύμφωνα με την οποία τη χρονική στιγμή  $t=0$  η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι ίση με τη διαφορά της αρχικής θερμοκρασίας του υλικού του τήγματος από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος  $\Delta\theta_0$

$$\ln(\Delta\theta_0) + c_4 = \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^0 \{u(t)\}^{0,6} dt \right) \quad (4-48)$$

$$\ln(\Delta\theta_0) + c_4 = 0 \quad (4-49)$$

Άρα :

$$c_4 = - \ln(\Delta\theta_0) \quad (4-50)$$

Αντικαθιστώντας τη σταθερά  $c_4$  στην (4-47) έχουμε:

$$\ln(\Delta\theta) - \ln(\Delta\theta_0) = \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^t \{u(t)\}^{0,6} dt \right) \quad (4-51)$$

$$\ln\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_0}\right) = \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^t \{u(t)\}^{0,6} dt \right) \quad (4-52)$$

$$\Delta\theta = \Delta\theta_0 \text{Exp} \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^t \{u(t)\}^{0,6} dt \right) \quad (4-53)$$

Ισχύει όμως ότι:

$$\Delta\theta = \theta_p - \theta_e \quad (4-54)$$

Αντικαθιστώντας το  $\Delta\theta$  με το ίσο του στη σχέση (4-53) έχουμε:

$$\theta_p = \Delta\theta_o \text{Exp} \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^t u(t)^{0,6} dt \right) + \theta_e \quad (4-55)$$

Για να υπολογίσουμε τη θερμοκρασία του τήγματος τη στιγμή που το σώμα προσκρούει στο έδαφος αντικαθιστούμε το χρόνο ( $t$ ) με το συνολικό χρόνο πτώσης ( $t_\pi$ ) από τη σχέση (4-33). Άρα:

$$\theta_p = \Delta\theta_o \text{Exp} \left( - \frac{0,37 \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^{t_\pi} u(t)^{0,6} dt \right) + \theta_e \quad (4-56)$$

Η σχέση (4-56) δίνει την θερμοκρασία του τήγματος σαν συνάρτηση του χρόνου πτώσης του.

## 4.1 Εφαρμογή του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου

Στην παρακάτω εφαρμογή έχουν γίνει οι παρακάτω παραδοχές για υποθετικά τήγματα αλουμινίου που εκτοξεύονται από αγωγούς που βρίσκονται σε ύψος  $h$ . Το σχήμα του τήγματος αντιστοιχεί σε αυτό του δισκοειδούς με μεγάλη ακτίνα  $a$  και μικρή  $b$  αφού ταιριάζει στη μορφή τηγμάτων που έχουν βρεθεί σε περιπτώσεις τόξων κάτω από δίκτυα μέσης τάσης. Το εμβαδόν της επιφάνειας του δισκοειδούς δίνεται από τη σχέση [55]:

$$A = 2 \pi a^2 + \frac{\pi b^2}{\varepsilon} \ln\left(\frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}\right) \quad (4.1-1)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η ελλειπτικότητα (ellipticity) του δισκοειδούς για την οποία ισχύει [55]:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (4.1-2)$$

και ο όγκος του δισκοειδούς από τη σχέση:

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

---

$$V = \frac{4}{3} \pi a^2 b \quad (4.1-3)$$

Η μάζα του δισκοειδούς δίνεται από τη σχέση:

$$m = d V \quad (4.1-4)$$

όπου το  $d$  είναι η πυκνότητα του τήγματος αλουμινίου στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα εμβαδά των προβολών του δισκοειδούς στα δύο επίπεδα κίνησης είναι :

$$S_1 = \pi a b \quad (4.1-5)$$

και

$$S_2 = \pi a^2 \quad (4.1-6)$$

Οι περιμέτροι των προβολών του δισκοειδούς στα δύο επίπεδα κίνησης είναι [1,55]:

$$C_1 \approx \pi (a + b) \left( 1 + 3 \frac{\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}{10 + \sqrt{4 - 3\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}} \right) \quad (4.1-7)$$

που αντιστοιχεί σε εμπειρική σχέση υπολογισμού περιμέτρου της έλλειψης και

$$C_2 = 2 \pi a \quad (4.1-8)$$

που αντιστοιχεί στην περίμετρο ενός κύκλου. Το χαρακτηριστικό μήκος  $L$  είναι ίσο με την περίμετρο  $C_1$  δια το  $\pi$  για να βρεθεί η ισοδύναμη κυκλική διάμετρος. Άρα:

$$L \approx (a + b) \left( 1 + 3 \frac{\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}{10 + \sqrt{4 - 3\left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}} \right) \quad (4.1-9)$$

Το ρευστό είναι ο αέρας ο οποίος κινείται με ταχύτητα  $u_a$  ως προς γη, έχει πυκνότητα

$$\rho = 1,205 \text{ kgr/m}^3 \quad (4.1-10)$$

δυναμικό ιξώδες:

$$\mu = 1,821 \times 10^{-5} \text{ kgr/m-s} \quad (4.1-11)$$

και κινηματικό ιξώδες:

$$v = 1,511 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (4.1-12)$$

συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας :

$$k = 1,511 \times 10^{-5} \text{ W/m-K} \quad (4.1-13)$$

και ειδική θερμότητα :

$$c_f = 1005 \text{ J/kg-K} \quad (4.1-14)$$

Η σχέση (4-33) δίνει το συνολικό χρόνο πτώσης ( $t_\pi$ ) που είναι:

$$t_\pi = \sqrt{\frac{m}{g z_y}} \text{ArcCosh}[\text{Exp}[\frac{H z_y}{m}]] \quad (4.1-15)$$

Οι σχέσεις (4-10), (4-26) και (4-28) δίνουν την ταχύτητα του σώματος στον κατακόρυφο άξονα, τη σχετική ταχύτητα ως προς τον αέρα στον οριζόντιο άξονα και τη συνολική σχετική ταχύτητα του τήγματος ως προς τον αέρα αντίστοιχα σαν συνάρτηση του χρόνου πτώσης του. Οι σχέσεις αυτές είναι:

$$u_y[t] = \sqrt{\frac{g m}{z_y}} \text{Tanh}[\sqrt{\frac{g z_y}{m}} t] \quad (4.1-16)$$

$$u_{xs}[t] = u_a \frac{m}{u_a z_x t + m} \quad (4.1-17)$$

$$u = \sqrt{\frac{g m}{z_y} \left( \text{Tanh} \left[ \sqrt{\frac{g z_y}{m}} t \right] \right)^2 + u_a^2 \left( \frac{m}{m + u_a z_x t} \right)^2} \quad (4.1-18)$$

Η σχέση (4-56) δίνει την θερμοκρασία του τήγματος σαν συνάρτηση του χρόνου πτώσης του και είναι:

$$\theta = \Delta\theta_o \text{Exp} \left[ - \frac{0,37 \left( \frac{\rho L}{\mu} \right)^{0,6} k A}{m c L} \int_0^{t_\pi} u(t)^{0,6} dt \right] + \theta_e \quad (4.1-19)$$

Στη συνέχεια δίδεται μία εφαρμογή του μοντέλου για διάφορα τήγματα αλουμινίου τα οποία έχουν διαστάσεις δισκοειδούς με μεγάλη ακτίνα δεκαπλάσια από τη μικρή, με μεγάλη ακτίνα από 0,5mm έως 4mm, που πέφτουν από διάφορα ύψη, από 10m έως 6m, για διάφορες ταχύτητες ανέμου από 0m/sec έως 20m/sec. Στον πίνακα 4.1-1 παρουσιάζονται τα

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

χαρακτηριστικά των τηγμάτων αλουμινίου που έχουν διαστάσεις μεγάλης ακτίνας a (από 0,5mm έως 4mm με βήμα 0,5mm) και μικρής ακτίνας b (από 0,05mm έως 0,5mm με βήμα 0,05mm).

<b>a (mm)</b>	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
<b>b (mm)</b>	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
<b>V (mm<sup>3</sup>)</b>	0,052	0,419	1,413	3,349	6,542	11,304	17,950	26,795
<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	1,617	6,469	14,555	25,876	40,431	58,220	79,244	103,503
<b>L (mm)</b>	0,647	1,294	1,940	2,587	3,234	3,881	4,528	5,174
<b>S<sub>1</sub> (mm<sup>2</sup>)</b>	0,079	0,314	0,707	1,256	1,963	2,826	3,847	5,024
<b>S<sub>2</sub> (mm<sup>2</sup>)</b>	0,785	3,140	7,065	12,560	19,625	28,260	38,465	50,240
<b>m (gr)</b>	0,00014	0,00113	0,00382	0,00904	0,01766	0,03052	0,04847	0,07235
<b>z<sub>x</sub> (gr/mm)</b>	2,22×10 <sup>-8</sup>	8,89×10 <sup>-8</sup>	2×10 <sup>-7</sup>	3,56×10 <sup>-7</sup>	5,56×10 <sup>-7</sup>	8×10 <sup>-7</sup>	1,09×10 <sup>-6</sup>	1,42×10 <sup>-6</sup>
<b>z<sub>y</sub> (gr/mm)</b>	2,22×10 <sup>-7</sup>	8,89×10 <sup>-7</sup>	2×10 <sup>-6</sup>	3,56×10 <sup>-6</sup>	5,56×10 <sup>-6</sup>	8×10 <sup>-6</sup>	1,09×10 <sup>-5</sup>	1,42×10 <sup>-5</sup>

Πίνακας 4.1-1: Τιμές των διαφόρων χαρακτηριστικών των τηγμάτων ανάλογα με τις διαστάσεις τους.

a : μεγάλη ακτίνα

b : μικρή ακτίνα

V : όγκος

A : εξωτερική επιφάνεια

L : χαρακτηριστικό μήκος

S<sub>1</sub>: διατομή (προβαλλόμενη επιφάνεια σε επίπεδο κάθετο στην οριζόντια κίνηση)

S<sub>2</sub>: διατομή (προβαλλόμενη επιφάνεια σε επίπεδο κάθετο στην κατακόρυφη κίνηση)

m : μάζα

z<sub>x</sub> : συντελεστής για την αντίσταση του αέρα στην οριζόντια κίνηση

z<sub>y</sub> : συντελεστής για την αντίσταση του αέρα στην κατακόρυφη κίνηση

Ανάλογα με τις διαστάσεις των τηγμάτων και το ύψος από το οποίο ξεκινάει η πτώση τους, καθορίζεται ο χρόνος πτώσης τους. Στον πίνακα 4.1-2 παρουσιάζονται οι χρόνοι πτώσης τηγμάτων ανάλογα με τις διαστάσεις τους.

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

	Διαστάσεις τήγματος αλουμινίου							
a (mm)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
b (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Ύψος (m)	Χρόνος πτώσης $t_{\pi}$ (sec)							
10	4,18	3,08	2,62	2,36	2,19	2,07	1,98	1,91
9,5	3,98	2,94	2,50	2,25	2,10	1,98	1,90	1,84
9	3,78	2,80	2,39	2,15	2,01	1,90	1,83	1,77
8,5	3,58	2,66	2,27	2,05	1,92	1,82	1,75	1,70
8	3,38	2,51	2,16	1,95	1,83	1,74	1,67	1,62
7,5	3,18	2,37	2,04	1,85	1,74	1,66	1,60	1,55
7	2,98	2,23	1,92	1,75	1,65	1,57	1,52	1,48
6,5	2,78	2,09	1,81	1,65	1,56	1,49	1,44	1,40
6	2,58	1,95	1,69	1,55	1,47	1,41	1,36	1,33

Πίνακας 4.1-2: Χρόνοι πτώσης τηγμάτων αλουμινίου ανάλογα με τις διαστάσεις τους και το αρχικό ύψος από το οποίο ξεκινάει η πτώση τους.

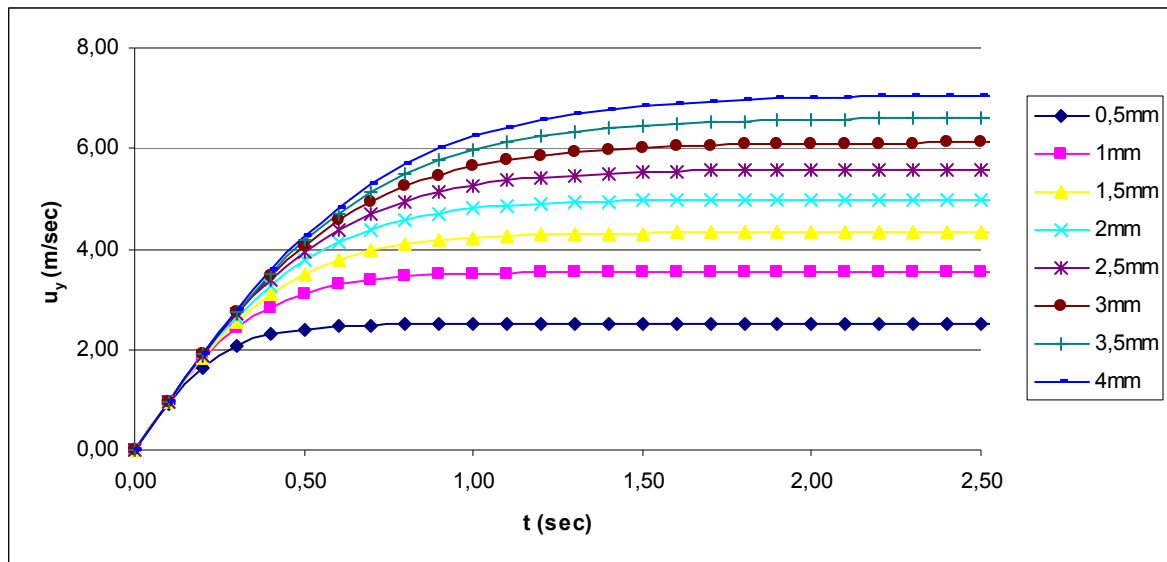
Αντίστοιχα, ανάλογα με τις διαστάσεις των τηγμάτων και το ύψος από το οποίο ξεκινάει η πτώση τους, καθορίζεται και η θερμοκρασία τους όταν προσκρούουν στο έδαφος. Στον πίνακα 4.1-3 παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες των τηγμάτων όταν προσκρούουν στο έδαφος θεωρώντας ότι πνέει οριζόντιος άνεμος 20m/s.

	Διαστάσεις τήγματος αλουμινίου							
a (mm)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
b (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
Ύψος (m)	Θερμοκρασία πρόσκρουσης στο έδαφος $\theta$ (°C)							
10	20,00	20,53	31,78	65,46	114,63	168,23	219,67	265,04
9,5	20,00	20,68	33,44	69,84	120,41	175,72	227,14	272,95
9	20,00	20,87	35,37	74,71	127,40	183,66	234,94	281,16
8,5	20,00	21,12	37,83	80,12	134,96	192,08	244,28	289,71
8	20,00	21,47	40,46	86,14	143,15	201,03	254,13	299,89
7,5	20,00	21,89	43,83	92,86	152,03	210,52	263,17	309,18
7	20,00	22,46	47,82	100,37	161,66	221,93	274,02	318,85
6,5	20,00	23,21	52,14	108,79	172,13	232,76	285,47	330,39
6	20,00	24,21	57,74	118,23	183,52	244,29	297,54	340,94

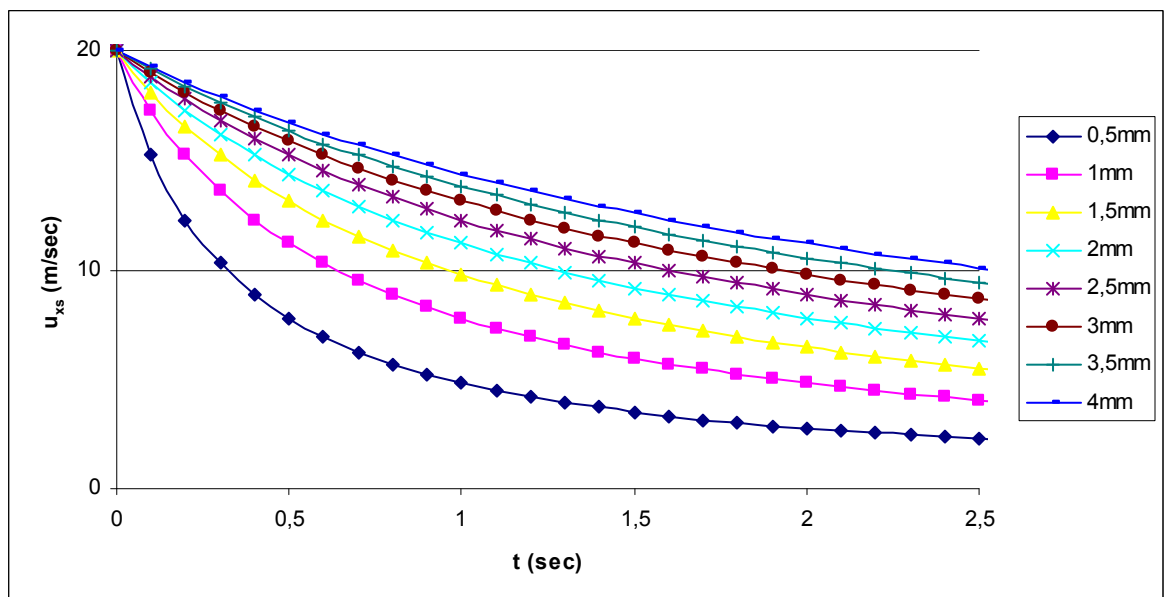
Πίνακας 4.1-3: Θερμοκρασίες πρόσκρουσης στο έδαφος τηγμάτων αλουμινίου ανάλογα με τις διαστάσεις τους και το αρχικό ύψος από το οποίο ξεκινάει η πτώση τους υπό οριζόντιο πνέοντα άνεμο 20m/s.

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

Στα σχήματα 4.1-1, 4.1-2 και 4.1-3 δίνονται οι ταχύτητες των σωματιδίων αλουμινίου στον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα καθώς και η συνολική ταχύτητά τους αντίστοιχα. Η οριζόντια ταχύτητα και η συνολική ταχύτητα υπολογίζονται σχετικά ως προς τον αέρα ο οποίος κινείται με ταχύτητα 20m/sec.



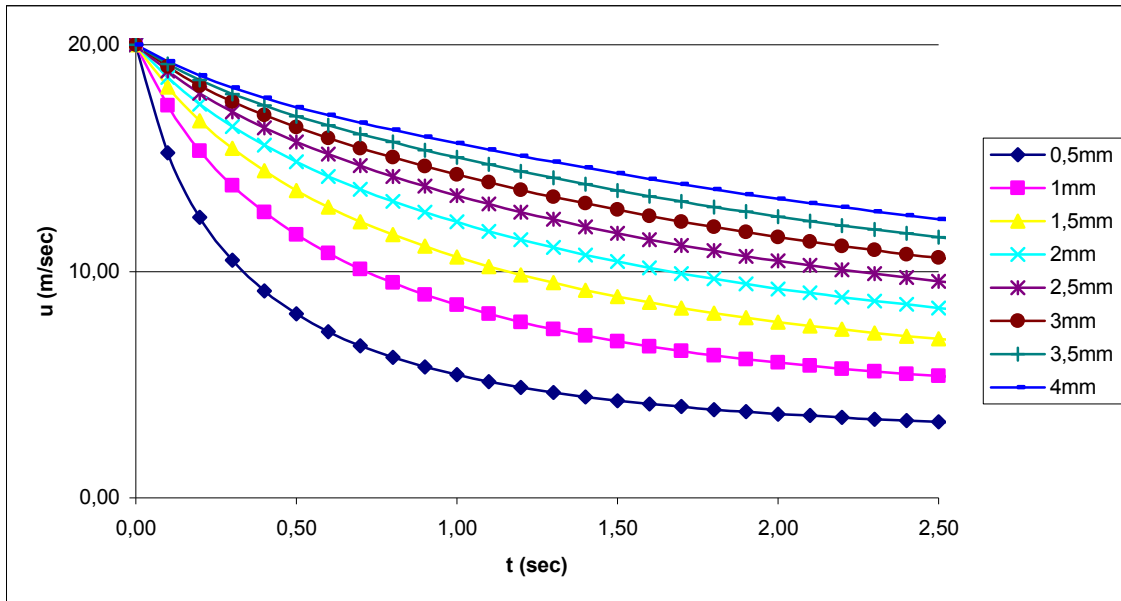
Σχήμα 4.1-1: Κατακόρυφη ταχύτητα τηγμάτων αλουμινίου μορφής δισκοειδούς με μεγάλη ακτίνα από 0,5mm έως 4mm και μικρή ίσης με το 1/10 της μεγάλης κάθε φορά, στη διάρκεια της πτώσης τους



Σχήμα 4.1-2: Σχετική ταχύτητα τηγμάτων αλουμινίου μορφής στη διάρκεια της πτώσης τους. Η ταχύτητα είναι σχετική ως προς τον αέρα που θεωρείται ότι κινείται οριζόντια με ταχύτητα 20m/sec

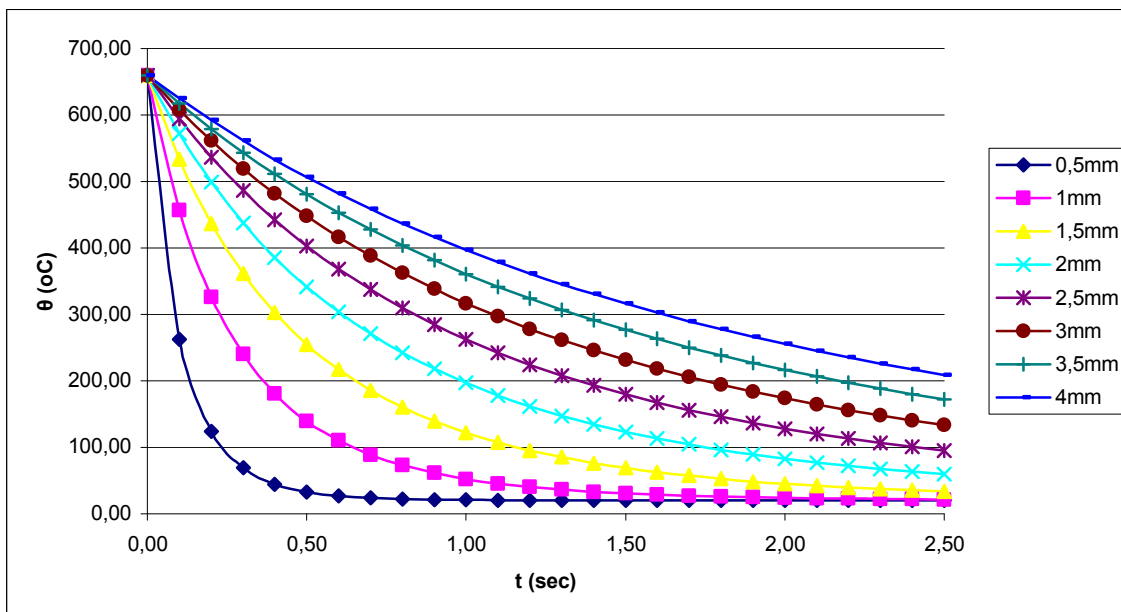


4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.



Σχήμα 4.1-3: Συνολική ταχύτητα τηγμάτων αλουμινίου στη διάρκεια της πτώσης τους. Η ταχύτητα είναι σχετική ως προς τον αέρα που θεωρείται ότι κινείται οριζόντια με ταχύτητα 20m/sec

Στο σχήμα 4.1-4 δίνονται οι τιμές της θερμοκρασίας ως προς το χρόνο για τα τήγματα αλουμινίου διαφόρων διαστάσεων. Οι θερμοκρασίες με τις οποίες φτάνουν τα τήγματα στο έδαφος ανάλογα με το μέγεθός τους παρουσιάζονται στον πίνακα 4.1-3.



Σχήμα 4.1-4: Θερμοκρασία τηγμάτων αλουμινίου στη διάρκεια της πτώσης τους

4. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τμημάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος.

---

## 5 Πειραματικά και θεωρητικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των επιτόνων σε περιβάλλον πυρκαγιάς

Τα τεχνικά, με βάση τις προδιαγραφές, χαρακτηριστικά του επιτόνου [13], με τον οποίο έγιναν τα πειράματα είναι: βάρος 0,306kg/m, διάμετρος 7,8mm, 7 χαλύβδινους κλώνους (διάμετρου 2,67mm ο καθένας) και φορτίο θραύσης 3630kg.

Μία άποψη της πειραματικής διάταξης στο προαύλιο της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δίνεται στο σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Εικόνα που δείχνει το κρέμασμα του επιτόνου μέσω βαρούλκου.  
1.Βαρούλκο, 2.Δυναμόμετρο, 3.Βάρος (δύναμη τάνυσης), 4.Μέτρο, 5.Επίτονος, 6.Θάμνος και χόρτα

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για διάφορες περιπτώσεις θάμνων και χόρτων σαν υλικό για τη φωτιά τριγύρω από τη βάση του επιτόνου (στο σημείο που ο επίτονος συναντά το έδαφος). Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις, από τις διάφορες που διερευνήθηκαν, ως χαρακτηριστικές. Αυτά τα πειράματα έγιναν:

- 1) Με ένα θάμνο και χόρτα συνολικού βάρους περίπου 7 kg και με τις παρακάτω περίπου γεωμετρικές διατάσεις της καύσιμης ύλης
  - Επιφάνεια βάσης επί του εδάφους  $S=1\times 1\text{m}^2$
  - Ύψος  $h=1\text{m}$
- 2) Με ένα θάμνο και χόρτα συνολικού βάρους περίπου 14 kg και με τις παρακάτω περίπου γεωμετρικές διαστάσεις της καύσιμης ύλης:
  - Επιφάνεια βάσης επί του εδάφους  $S=1,3\times 1,3\text{m}^2$
  - Ύψος  $h=1,4\text{m}$

Και στα δύο ανωτέρω πειράματα χρησιμοποιήθηκε καινούριος επίτονος με τις ίδιες γεωμετρικές διαστάσεις στήριξης (δηλαδή περίπου 8m ύψος και οριζόντια απόσταση από το σημείο πρόσδεσης του επιτόνου στο έδαφος περίπου 8m). Η ανάρτηση και τάνυση του επιτόνου (με ένα βάρος περίπου 400kg) έγιναν μέσω βαρούλκου, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της μεταβολής του μήκους του επιτόνου κατά τη σταδιακή διαστολή του λόγω της φωτιάς και την συστολή του τόσο κατά τη διαχρονική μείωση της έντασης (του ύψους) της φωτιάς όσο και μετά το σβήσιμό της.

## **5.1 Τα πειραματικά αποτελέσματα**

### **5.1.1 Θερμική καταπόνηση περί την βάση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 7 kg**

Πριν από την ανάφλεξη του πυροθερμικού φορτίου μετρήθηκε το μήκος του επιτόνου εντός του θάμνου και των χόρτων και βρέθηκε ότι ήταν περίπου 1,1m.

Με την ανάφλεξη του πυροθερμικού φορτίου των 7kg άρχισε σχεδόν αμέσως η διαστολή του επιτόνου. Το ύψος της φλόγας (για χρόνο περίπου μέχρι 1,5min) ήταν της τάξεως των 2m. Η μέτρηση της θερμοκρασίας της φλόγας γινόταν από απόσταση περίπου 3m με θερμοκάμερα και ήταν (στις διάφορες θέσεις της καύσιμης ύλης) της τάξεως των 750°C έως 950°C. Σε χρόνο περίπου 1,5min επετεύχθη η μέγιστη επιμήκυνση (διαστολή)

του επιτόνου, η οποία ήταν περίπου 3,3cm. Μετά τον χρόνο αυτό, μειωνόταν προοδευτικά η ένταση της φωτιάς (το ύψος της φλόγας γινόταν μικρότερο) και άρχισε να συστέλλεται ο επίτονος. Σε περίπου 12min είχε καεί η καύσιμη ύλη και όταν ο επίτονος είχε αποκτήσει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος είχε επέλθει συστολή του κατά περίπου 1,1cm, που σημαίνει ότι είχε τελικά επιμηκυνθεί κατά περίπου 2,2cm (παραμένουσα επιμήκυνση).

Εκ του ανωτέρω πειραματικού αποτελέσματος προκύπτει (δια της απλής μεθόδου των τριών) ότι η επιμήκυνση του επιτόνου ανά μέτρο εντός της φωτιάς ήταν της τάξεως των 2cm. Συνεπώς, σε υποθετική υπερθέρμανση του συνολικού μήκους των 15m του επιτόνου (λόγω υπέρθερμου περιβάλλοντος από μία πυρκαγιά) η συνολική επιμήκυνσή του θα ήταν της τάξεως των 30cm.

### **5.1.2 Θερμική καταπόνηση περί την βάση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 14kg**

Με την ανάφλεξη του πυροθερμικού φορτίου των 14kg άρχισε σχεδόν αμέσως η διαστολή του επιτόνου. Το ύψος της φλόγας ήταν της τάξεως των 2,7m. Η μέτρηση της θερμοκρασίας της φλόγας γινόταν από απόσταση περίπου 3m με θερμοκάμερα και ήταν στις διάφορες θέσεις της καύσιμης ύλης της τάξεως των 750°C έως 950°C. Σε χρόνο περίπου 3min (και ενώ ήδη είχε διασταλεί ο επίτονος κατά περίπου 3,5cm άρχισε απότομα (σε κλάσμα του δευτερολέπτου) ταχύτατη διαστολή του επιτόνου μέχρι περίπου 7cm, και κόπηκε αμέσως σε δύο κομμάτια. Το κόψιμο συνέβη στο τμήμα του επιτόνου που ήταν εντός της φωτιάς.

Εκ των πειραματικών αποτελεσμάτων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Το χρησιμοποιηθέν κατά το πείραμα πυροθερμικό φορτίο των 14kg ήταν αρκετό για να προκαλέσει ταχύτατη πτώση της μηχανικής αντοχής του επιτόνου, ώστε τελικά να συμβεί θραύση του.
2. Η επιμήκυνση του επιτόνου λόγω της φωτιάς μπορεί να αποδοθεί μόνο στη μείωση της μηχανικής αντοχής του, που κατά τη βιβλιογραφία είναι γνωστή ιδιότητα του χάλυβα για θερμοκρασίες καταπόνησής του από 400÷450°C και άνω [9,16].

## 5.2 Θεωρητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων κατά τη θερμική καταπόνηση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 7kg

### 5.2.1 Ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας

Για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας  $\dot{Q}_1$  του εν λόγω θάμνου ισχύει κατά τη σχέση (1.2.2-1):

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}'' A_1 \Delta H_c = 11 \cdot (5 \cdot 1) \cdot 15 = 825 \text{ kJ/s} \quad (5.2.1-1)$$

όπου για να προσομοιωθεί η επιφάνεια του υλικού θεωρήθηκε ότι η συνολική επιφάνεια του υλικού είναι ίση με τις 5 από τις 6 επιφάνειες ενός παραλληλεπιπέδου με ακμές βάσης 1m και ύψος 1m, δηλαδή οι 5 πλευρές ενός κύβου. Άρα η συνολική επιφάνεια είναι  $5 \times 1 \text{m}^2$

Για να υπολογιστεί η διάμετρος της φλόγας υπολογίζεται η ισοδύναμη διάμετρος  $D_1$  ενός κύκλου με ίδιο εμβαδόν με την επιφάνεια βάσης ( $1 \text{m}^2$ ) του υλικού. Ισχύει δηλαδή:

$$\pi \frac{D_1^2}{4} = 1 \text{ m}^2 \Rightarrow D_1 \approx 1,13 \text{m} \quad (5.2.1-2)$$

### 5.2.2 Υπολογισμός του ύψους της φλόγας και της επιμήκυνσης του επιτόνου εντός αυτής

Ο συντελεστής  $\dot{Q}_1^*$  υπολογίζεται από τη σχέση (1.2.2-3):

$$\dot{Q}_1^* = \frac{\dot{Q}_1}{1101 D_1^{5/2}} = \frac{825}{1101 \cdot 1,13^{5/2}} \approx 0,55 \quad (5.2.2-1)$$

Επειδή η τιμή του  $\dot{Q}_1^*$  είναι περίπου 0,55 για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας ισχύουν οι σχέσεις κατά του Zukoski για  $0,15 < \dot{Q}_1^* < 1$ :

$$H_{Z1} = 3,3 \dot{Q}_1^{*2/3} D_1 = 3,3 \cdot 0,55^{2/3} \cdot 1,13 \approx 2,5 \text{m} \quad (5.2.2-2)$$

κατά Cox & Chitty για  $0,28 < \dot{Q}_1^* < 0,55$ :

$$H_{C1} = 3,2 \dot{Q}_1^* D_1 = 3,2 \cdot 0,55 \cdot 1,13 \approx 2 \text{m} \quad (5.2.2-3)$$

και κατά Heskestad για  $0,12 < \dot{Q}_1^* < 1,2 \cdot 10^4$

$$H_{HI} = 3,7 \dot{Q}_1^{* \frac{2}{5}} D_1 - 1,02 D_1 = 3,7 \cdot 0,55^{\frac{2}{5}} \cdot 1,13 - 1,02 \cdot 1,13 \approx 2,1m \quad (5.2.2-4)$$

Οπότε ο μέσος όρος των υψών είναι:

$$H_1 = \frac{H_{Z1} + H_{C1} + H_{HI}}{3} = \frac{2,5 + 2,0 + 2,1}{3} = 2,2m \quad (5.2.2-5)$$

Διαπιστώνεται ότι το ανωτέρω αποτέλεσμα εναρμονίζεται με το ύψος της φλόγας που παρατηρήθηκε κατά το πείραμα (βλ. παράγραφο 5.1.1). Συνεπώς, για το μήκος του επιτόνου που ήταν εντός της φωτιάς κατά το πείραμα (περίπου 1,1m= 110cm) προκύπτει επιμήκυνση ( $\Delta L$ ):

$$\Delta L = \alpha L \Delta\theta = 0,000012 \cdot 110 \cdot 850 \approx 1,1 \text{ cm} \quad (5.2.2-6)$$

Όμως, λόγω της σταθερής τάνυσης του επιτόνου και της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας στο 1/3 περίπου (βλ. παρ. 1.2.3) υπήρξε τελικά επιμήκυνση του επιτόνου κατά τουλάχιστον τρεις φορές μεγαλύτερη από προηγουμένως, ώστε λόγω της συστολής μετά το σβήσιμο της φωτιάς η επιμήκυνσή του ήταν περίπου:

$$\Delta L \approx 2,2cm \quad (5.2.2-7)$$

Παρατηρεί κανείς ότι το ανωτέρω αποτέλεσμα εναρμονίζεται με την τελική επιμήκυνση που μετρήθηκε κατά το πείραμα. Συνεπώς, εκ του ανωτέρω θεωρητικού αποτελέσματος προκύπτει (δια της απλής μεθόδου των τριών), όπως και από το πείραμα, ότι η επιμήκυνση του επιτόνου ανά μέτρο εντός της φωτιάς ήταν της τάξεως των 2cm. Επομένως για υποθετική υπερθέρμανση του συνολικού μήκους των 15m του επιτόνου (λόγω ενός υπέρθερμου περιβάλλοντος από πυρκαγιά) η συνολική επιμήκυνση του επιτόνου θα ήταν της τάξεως των 30cm.

### **5.3 Θεωρητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων κατά τη θερμική καταπόνηση του επιτόνου με τον θάμνο και τα χόρτα συνολικού βάρους περίπου 14kg**

#### **5.3.1 Ο ρυθμός έκλυσης της θερμότητας**

Για το ρυθμό έκλυσης θερμότητας  $\dot{Q}_2$  του εν λόγω πυροθερμικού φορτίου ισχύει κατά τη σχέση (1.2.2-1):

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}'' A_2 \Delta H_c = 11 \cdot (4 \cdot 1,3 \cdot 1,4 + 1,3^2) \cdot 15 = 11 \cdot 8,97 \cdot 15 \approx 1480 \text{ kJ/s} \quad (5.3.1-1)$$

όπου για να προσομοιωθεί η επιφάνεια του υλικού θεωρήθηκε ότι η συνολική επιφάνεια του υλικού είναι ίση με τις 5 από τις 6 επιφάνειες ενός παραλληλεπίπεδου με ακμές βάσης 1,3m και ύψος 1,4m. Άρα η συνολική επιφάνεια είναι  $4 \times 1,3 \times 1,4 + 1 \times 1,3 \times 1,3$  δηλαδή ίση με  $8,97\text{m}^2$

Για να υπολογιστεί η διάμετρος της φλόγας υπολογίζεται η ισοδύναμη διάμετρος  $D_2$  ενός κύκλου με ίδιο εμβαδόν με την επιφάνεια βάσης ( $1,3 \times 1,3 = 1,69\text{m}^2$ ) του υλικού. Ισχύει δηλαδή:

$$\pi \frac{D_2^2}{4} = 1,69\text{m}^2 \Rightarrow D_2 \approx 1,47\text{m} \quad (5.3.1-2)$$

### 5.3.2 Υπολογισμός του ύψους της φλόγας και της επιμήκυνσης του επιτόνου εντός αυτής

Ο συντελεστής  $\dot{Q}_2^*$  υπολογίζεται από τη σχέση (1.2.2-3):

$$\dot{Q}_2^* = \frac{\dot{Q}_2}{1101 D_2^{5/2}} = \frac{1480}{1101 \cdot 1,47^{5/2}} \approx 0,51 \quad (5.3.2-1)$$

Επειδή η τιμή του  $\dot{Q}_2^*$  είναι περίπου 0,51 για τον υπολογισμό του ύψους της φλόγας ισχύουν οι σχέσεις κατά του Zukoski για  $0,15 < \dot{Q}_2^* < 1$ :

$$H_{Z2} = 3,3 \dot{Q}_2^{*2/3} D_2 = 3,3 \cdot 0,51^{2/3} \cdot 1,47 \approx 3,1\text{m} \quad (5.3.2-2)$$

κατά Cox & Chitty για  $0,28 < \dot{Q}_2^* < 0,55$ :

$$H_{C2} = 3,2 \dot{Q}_2^* D_2 = 3,2 \cdot 0,51 \cdot 1,47 \approx 2,4\text{m} \quad (5.3.2-3)$$

και κατά Heskestad για  $0,12 < \dot{Q}_2^* < 1,2 \cdot 10^4$

$$H_{H2} = 3,7 \dot{Q}_2^{*2/5} D_2 - 1,02 D_2 = 3,7 \cdot 0,51^{2/5} \cdot 1,47 - 1,02 \cdot 1,47 \approx 2,7\text{m} \quad (5.3.2-4)$$

Οπότε ο μέσος όρος των υψών είναι:

$$H_2 = \frac{H_{Z2} + H_{C2} + H_{H2}}{3} = \frac{3,1 + 2,4 + 2,7}{3} \approx 2,7\text{m} \quad (5.3.2-5)$$



Διαπιστώνεται ότι το ανωτέρω αποτέλεσμα εναρμονίζεται με το ύψος της φλόγας που παρατηρήθηκε κατά το πείραμα (βλ. παράγραφο 5.1.2).

### 5.3.3 Υπολογισμός της μηχανικής τάσης θραύσης του επιτόνου

Ο επίτονος αποτελείται από 7 κλώνους χάλυβα που ο κάθε ένας έχει διάμετρο  $d=0,267\text{cm}$  (βλ. παρ. 0). Η διατομή  $A$  του επιτόνου είναι επομένως:

$$A=7\cdot(\pi\cdot d^2/4) = 7\cdot(\pi\cdot 0,267^2/4) = 0,392 \text{ cm}^2 \quad (5.3.3-1)$$

Συνεπώς, η μηχανική τάση ( $\sigma$ ) του επιτόνου λόγω της εξασκούμενης σε αυτόν δύναμης  $F=400\text{kg}$  ήταν:

$$\sigma=F/A = 400/0,392 \approx 1020 \text{ kg/cm}^2 \quad (5.3.3-2)$$

Όπως αποδείχτηκε, λόγω της θραύσης του δοκιμίου σε περίπου 3min κατά το πείραμα, η ανωτέρω τιμή της μηχανικής τάσης ήταν τελικά η μηχανική τάση θραύσης του επιτόνου, ο οποίος υπό κανονικές συνθήκες (χωρίς την φωτιά) ήταν κατάλληλος για μέγιστη μηχανική τάση:

$$\sigma_{\max} \leq F_{\max}/A=3630/0,392 \approx 9260 \text{ kg/cm}^2$$

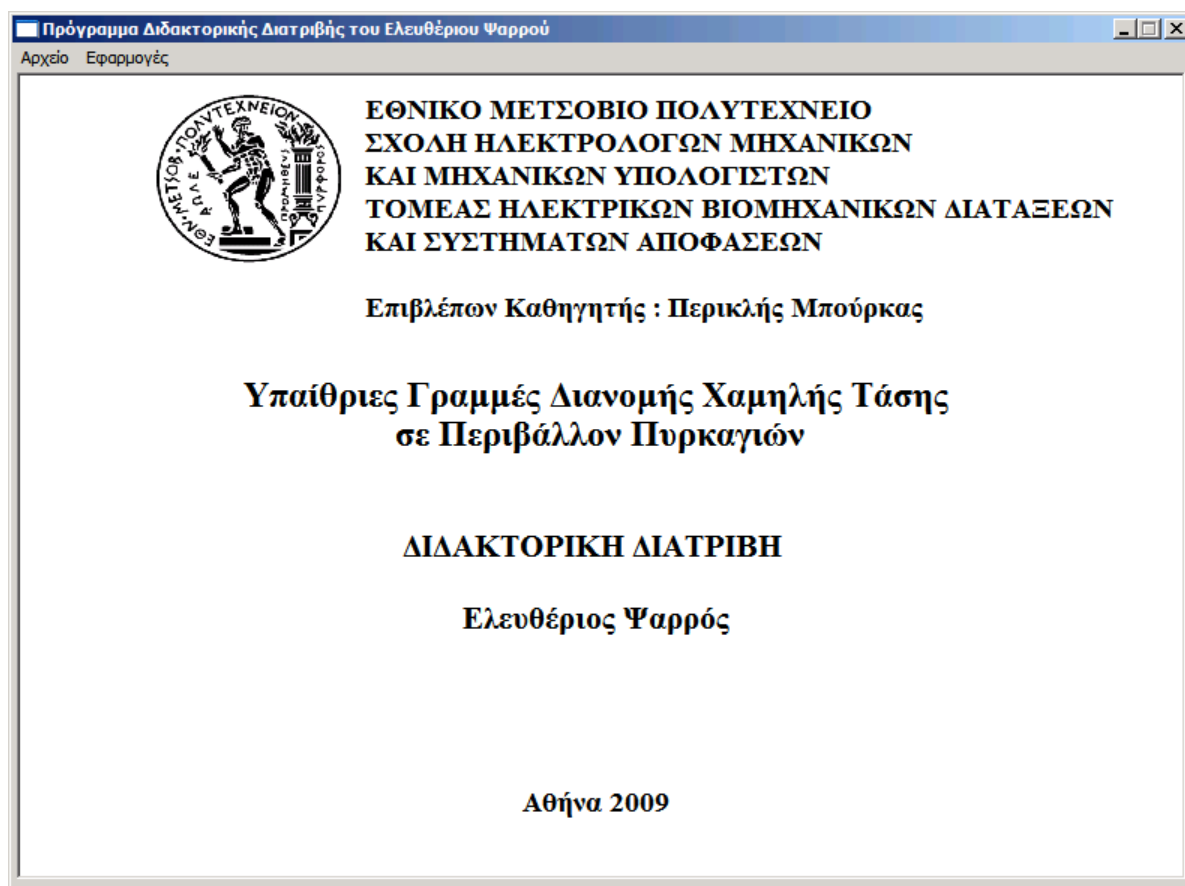
όπου  $F_{\max} = 3630 \text{ kg}$  το φορτίο θραύσης του επιτόνου κατά τον Κανονισμό CS-2 της ΔΕΗ. [13].

Συνεπώς, λόγω της φωτιάς επήλθε μείωση της μηχανικής αντοχής σε θραύση του επιτόνου κατά 9 περίπου φορές, που προκάλεσε το σχεδόν ακαριαίο κόψιμό του στο τμήμα που ήταν μέσα στην φωτιά.



## 6 Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

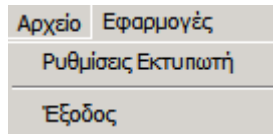
Στα πλαίσια της εργασίας αυτής κρίθηκε σκόπιμο να αναπτυχθούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή προγράμματα υπολογισμού 1) της θερμοκρασίας τηγμάτων κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος, 2) του ύψους της φλόγας σε περιπτώσεις πυρκαγιών υπαίθρου, και 3) του ρεύματος βραχυκύκλωσης. Τα προγράμματα αυτά βασίζονται τόσο στους θεωρητικούς υπολογισμούς όσο και στα πειράματα των προηγούμενων παραγράφων και η πρόσβαση σ' αυτά γίνεται μέσω ενός κατάλογου δυνατοτήτων (μενού) μίας κεντρικής οθόνης (σχήμα 6-1). Η πρόσβαση στην οθόνη αυτή γίνεται δίνοντας σαν συνθηματικό, όταν ζητείται, τη λέξη «θ.ο».



Σχήμα 6-1: Κεντρική οθόνη προγραμμάτων

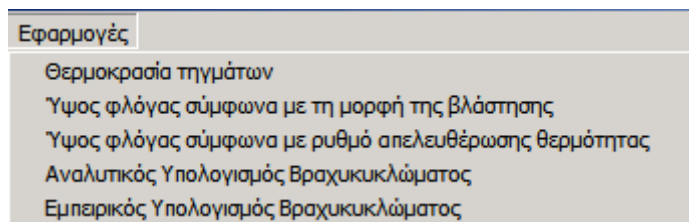
6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

Στο μενού του προγράμματος επιλέγοντας το «Αρχείο» εμφανίζεται ένα πτυσσόμενο μενού από το οποίο επιτρέπεται η επιλογή και ρύθμιση του εκτυπωτή, καθώς και η έξοδος από το πρόγραμμα (σχήμα 6-2).



Σχήμα 6-2: Δυνατότητες του μενού «Αρχείο»

Η επιλογή «Εφαρμογές» οδηγεί σ' ένα δεύτερο πτυσσόμενο μενού με τις πέντε δυνατότητες επιλογής που δίνονται στο σχήμα 6-3.



Σχήμα 6-3: Δυνατότητες του μενού «Εφαρμογές»

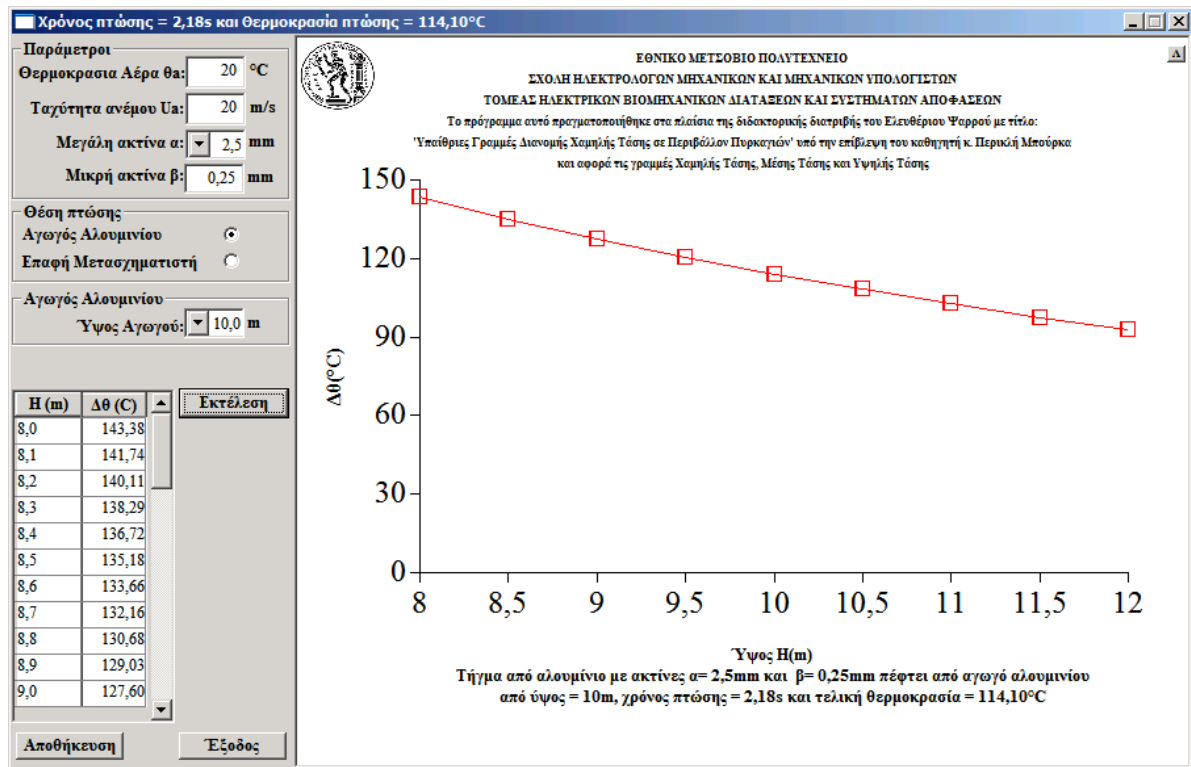
Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί αναλυτικά η λειτουργικότητα των προηγούμενων εφαρμογών

## 6.1 Πρόγραμμα υπολογισμού θερμοκρασίας τηγμάτων

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει τους χρόνους πτώσης υποθετικών τηγμάτων από διάφορα ύψη καθώς και τη θερμοκρασία που τελικά θα έχουν τη χρονική στιγμή που φτάνουν στο έδαφος. Το πρόγραμμα επιτρέπει στον χρήστη να μεταβάλλει τόσο τις διαστάσεις του τήγματος όσο και των περιβαλλοντικών συνθηκών μέσα στις οποίες δημιουργήθηκε με βάση τις παραμέτρους που παρουσιάστηκαν στις παραγράφους 0 και 4.1. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ τηγμάτων που θα μπορούσαν να δημιουργηθούν είτε σε γυμνούς από αλουμίνιο αγωγούς (που συνήθως βρίσκονται πάνω από τα 8 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους) είτε π.χ. σε κάποιο ακροδέκτη μετασχηματιστή χαμηλής τάσης που βρίσκεται πάνω από 3m ύψος. Στο πρόγραμμα επιλέχτηκε να εμφανίζονται προεπιλεγμένες τιμές στα πεδία των παραμέτρων της οθόνης που αντιστοιχούν σε τήγμα αλουμινίου με μορφή δίσκου με μεγάλη διάμετρο 5mm, που πέφτει από γυμνό αγωγό αλουμινίου

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

εγκατεστημένου σε ύψος 10m υπό οριζόντιο άνεμο 20m/s (βλ. σχήμα 6.1-1). Ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τον υπολογισμό ανάλογα με τις παραμέτρους του προγράμματος.



Σχήμα 6.1-1: Οθόνη υπολογισμού θερμοκρασίας τηγμάτων που θα μπορούσαν να πέφτουν από γυμνό αγωγό αλουμινίου εγκατεστημένο σε ύψος 10m.

Συγκεκριμένα στην περίπτωση τήγματος από αγωγό αλουμινίου:

1) Ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις δύο ακτίνες του τήγματος. Αλλάζοντας την μεγάλη ακτίνα α (με βήμα 0,5mm), η μικρή ακτίνα β αλλάζει αυτόματα και παίρνει τιμή ίση με το 1/10 του α. Η σχέση υπολογισμού της επιφάνειας του δισκοειδούς δίνεται από τη σχέση:

$$A = 2 \pi \alpha^2 + \frac{\pi \beta^2}{\varepsilon} \ln\left(\frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}\right) \quad (6.1-1)$$

όπου ε είναι η ελλειπτικότητα (ellipticity) του δισκοειδούς για την οποία ισχύει:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2}} \quad (6.1-2)$$

Ο όγκος του δισκοειδούς υπολογίζεται από τη σχέση:

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

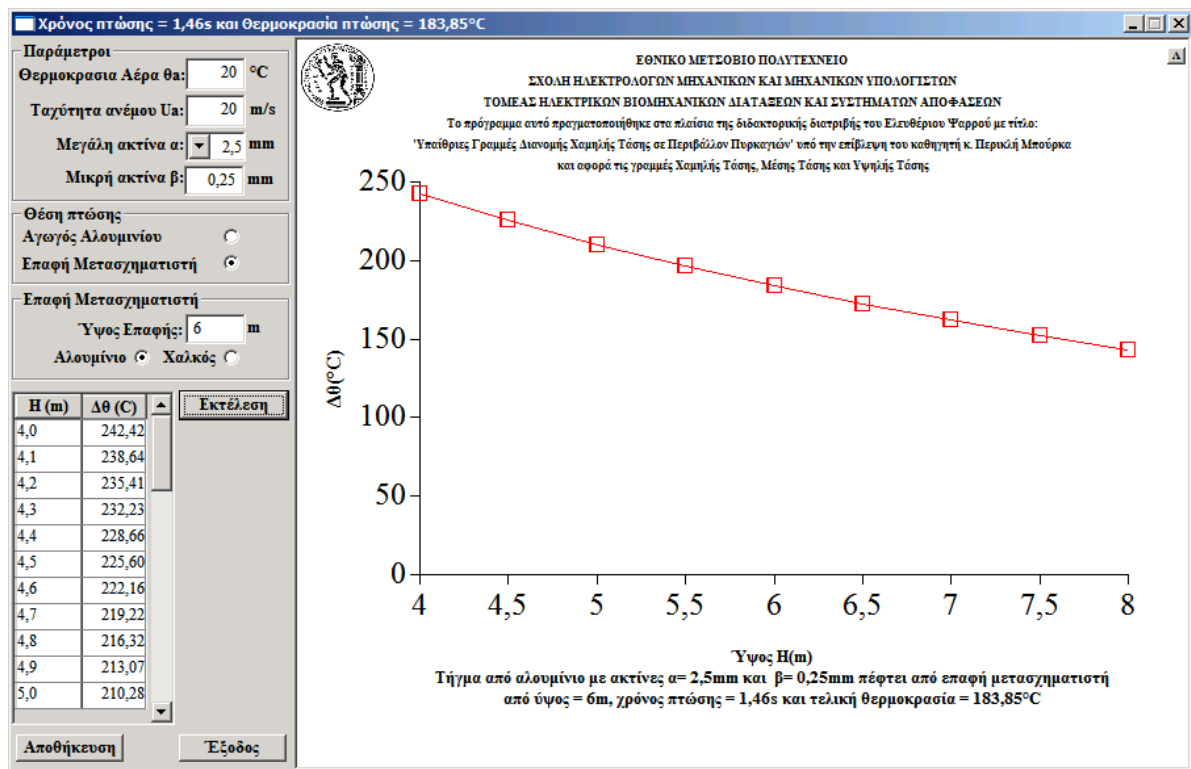
$$V = \frac{4}{3} \pi \alpha^2 \beta \quad (6.1-3)$$

Τέλος η μάζα του δίνεται πολλαπλασιάζοντας τον όγκο με την πυκνότητα του τήγματος σύμφωνα με τη σχέση:

$$m = d V \quad (6.1-4)$$

όπου d η πυκνότητα του μετάλλου.

2) Ο χρήστης μπορεί να ορίσει τις παραμέτρους του περιβάλλοντος που είναι (βλ. σχήμα 6.1-2): η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου (θεωρείται ύπαρξη οριζόντιου ανέμου) καθώς και το ύψος από το οποίο ξεκινάει η πτώση του τήγματος (από 8m -12m με βήμα 0,2m).



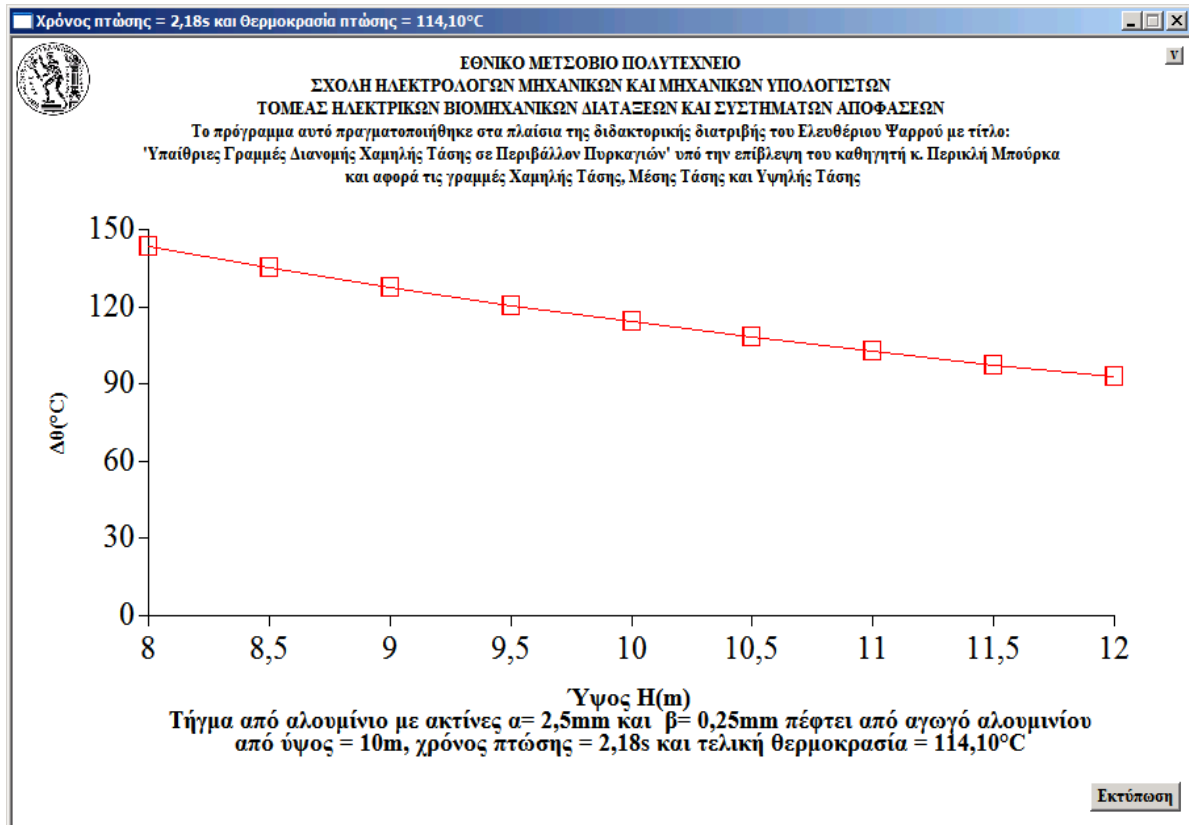
Σχήμα 6.1-2: Οθόνη υπολογισμού θερμοκρασίας τηγμάτων που θα μπορούσαν να πέφτουν από γυμνό αγωγό αλουμινίου εγκατεστημένο σε ύψος 10m.

Στη περίπτωση τήγματος που θα μπορούσε να πέφτει από επαφή μετασχηματιστή (βλ. σχήμα 6.1-2) ισχύει ότι:

α) Ο χρήστης μπορεί πάλι να ορίσει τις διαστάσεις του τήγματος όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

β) Μπορεί να ορίσει τις συνθήκες περιβάλλοντος και το ύψος πτώσης μόνο που τώρα μπορεί να επιλέξει οποιοδήποτε ύψος πάνω από 3m .

γ) Τελικά, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει μεταξύ του χαλκού και του αλουμινίου καθορίζοντας δηλαδή το υλικό του ηλεκτρικού συνδέσμου στον μετασχηματιστή και κατά συνέπεια το υλικό του τήγματος.



Σχήμα 6.1-3: Οθόνη προεπισκόπησης εκτύπωσης του γραφήματος της θερμοκρασίας του τήγματος σε συνάρτηση με το ύψος πτώσης

Αφού οριστούν όλες οι παραπάνω παράμετροι, με την επιλογή «Εκτέλεση» δίνονται στην οθόνη τα παρακάτω:

I) Στο κάτω αριστερό μέρος δίνεται ένας πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται οι θερμοκρασίες που έχει το τήγμα ανάλογα με το ύψος πτώσης του . Στην περίπτωση του γυμνού αγωγού αλουμινίου το εύρος των υψών είναι από 8m έως 12m με βήμα 0,1m ενώ στη περίπτωση του ηλεκτρικού συνδέσμου στον μετασχηματιστή υπολογίζονται οι θερμοκρασίες για ύψη από 2m πριν έως 2m μετά το ύψος που έχει θέση ο χρήστης πάλι με βήμα 0,1m. Κάτω από τον πίνακα υπάρχει η επιλογή «Αποθήκευση» των αποτελεσμάτων σε αρχείο κειμένου για οποιαδήποτε επιπλέον επεξεργασία σε άλλο πρόγραμμα.

II) Στο δεξί τμήμα της οθόνης παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της θερμοκρασίας ως προς το ύψος πτώσης για τις περιπτώσεις των υψών που προαναφέρθηκαν για τις δύο περιπτώσεις. Στο κάτω μέρος του γραφήματος δίνεται η χρονική στιγμή που το τήγμα φτάνει στο έδαφος και η θερμοκρασία που έχει αυτή τη χρονική στιγμή. Στο πάνω δεξιά μέρος του γραφήματος υπάρχει η δυνατότητα αύξησης του μεγέθους ( $\Lambda$ ) που εμφανίζει το γράφημα σε όλο το μέγεθος της οθόνης και με την επιλογή «Εκτύπωση» δίνεται η δυνατότητα εκτύπωσης του γραφήματος (σχήμα 6.1-3). Η επαναφορά του γραφήματος στην αρχική κατάσταση γίνεται με την επιλογή μείωσης μεγέθους ( $V$ ).

Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η σχέση (4-56). Ο υπολογισμός του ολοκληρώματος της ταχύτητας ( $\int_0^{t^*} u(t)^{0.6} dt$ ) έγινε αριθμητικά με τη βοήθεια του κανόνα των τραπεζίων. Τα τραπέζια που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίζονται με βήμα χρόνου 0,001s ώστε να υπάρξει όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση στον υπολογισμό του εμβαδού και συνεπώς του ολοκληρώματος.

## 6.2 Πρόγραμμα υπολογισμού ύψους φλόγας σύμφωνα με το σχήμα της βλάστησης

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει το μέσο όρο των υψών της φλόγας ανάλογα με το σχήμα της βλάστησης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (βλ. παρ. 1.2.2). Η οθόνη του προγράμματος χωρίζεται σε τρία πλαίσια. Αριστερά δίνεται το πλαίσιο επιλογής παραμέτρων και δεξιά δίνονται τα πλαίσια των αποτελεσμάτων. Οι παράμετροι που επιλέγει ο χρήστης είναι η θερμοκρασία  $\theta$  του περιβάλλοντος, το πλάτος  $a$  και το ύψος  $h$  του σώματος, ο τύπος (δέντρο ή θάμνος) και η μορφή του (κυβική, κυλινδρική, κωνική και σφαιρική).



6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

Σχήμα 6.2-1: Οθόνη υπολογισμού του ύψους της φλόγας σύμφωνα με το σχήμα της βλάστησης

Η μορφή του σώματος καθορίζει τον τρόπο υπολογισμού της επιφάνειας ατμοποίησης κατά προσέγγιση. Οι διαφορές μεταξύ του θάμνου και του δέντρου είναι ότι στο δέντρο θεωρείται ότι όλες οι επιφάνειες συμμετέχουν στην ατμοποίηση, ενώ στο θάμνο η κάτω επιφάνειά του δεν συμμετέχει. Επίσης, στη σφαιρική μορφή, ανάλογα με τις διαστάσεις του θάμνου, θεωρείται ότι, αν το πλάτος ισούται με το διπλάσιο του ύψους ( $\alpha = 2 h$ ) ο θάμνος έχει τη μορφή ημισφαιρίου, αν το πλάτος είναι μεγαλύτερο του διπλάσιου ύψους ( $\alpha > 2 h$ ) ο θάμνος έχει τη μορφή μισού δισκοειδούς, ενώ αν το πλάτος είναι μικρότερο του διπλάσιου ύψους ( $\alpha < 2 h$ ) ο θάμνος έχει τη μορφή μισού επιμήκους σφαιροειδούς. Αντίθετα στην περίπτωση του δέντρου όταν το πλάτος είναι μικρότερο από το ύψος, το σχήμα είναι αυτό του επιμήκους σφαιροειδούς, όταν είναι ίσα το σχήμα είναι αυτό της σφαίρας και τέλος όταν είναι μικρότερο το πλάτος από το ύψος, το σχήμα είναι αυτό του δισκοειδούς. Για την επιφάνεια ατμοποίησης του δέντρου με κυβική μορφή χρησιμοποιήθηκε η σχέση:

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

---

$$A = 4 \alpha h + 2 \alpha^2 \quad (6.2-1)$$

ενώ για το θάμνο η σχέση:

$$A = 4 \alpha h + \alpha^2 \quad (6.2-2)$$

Στη περίπτωση της κυλινδρικής μορφής ισχύει για το δέντρο:

$$A = 2 \pi \frac{\alpha}{2} h + 2 \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \quad (6.2-3)$$

ενώ για το θάμνο ισχύει:

$$A = 2 \pi \frac{\alpha}{2} h + \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \quad (6.2-4)$$

Στη μορφή του κώνου για το δέντρο ισχύει:

$$A = \pi \frac{\alpha}{2} \sqrt{h^2 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2} + \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \quad (6.2-5)$$

ενώ για το θάμνο:

$$A = \pi \frac{\alpha}{2} \sqrt{h^2 + \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2} \quad (6.2-6)$$

Στην περίπτωση άλλων μορφών δέντρου (σφαιροειδείς μορφές) ισχύει [55]:

1) αν έχει μορφή πεπλατυσμένου σφαιροειδούς:

$$A = 2 \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\pi \left(\frac{h}{2}\right)^2}{\varepsilon} \ln\left(\frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}\right) \quad (6.2-7)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η ελλειπτικότητα (ellipticity) του σφαιροειδούς για την οποία ισχύει:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha^2}} \quad (6.2-8)$$

2) αν έχει μορφή επιμήκους σφαιροειδούς είναι:

$$A = 2 \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + 2 \frac{\pi \frac{\alpha}{2} \frac{h}{2}}{\varepsilon} \sin^{-1} \varepsilon \quad (6.2-9)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η ελλειπτικότητα του σφαιροειδούς για την οποία τώρα ισχύει:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{\alpha^2}{h^2}} \quad (6.2-10)$$

3) αν έχει μορφή σφαίρας ισχύει:

$$A = 4 \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \quad (6.2-11)$$

Στην περίπτωση του θάμνου ισχύει:

1) αν έχει μορφή πεπλατυσμένου σφαιροειδούς:

$$A = \frac{2 \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\pi h^2}{\varepsilon} \ln\left(\frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)}{2} \quad (6.2-12)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η ελλειπτικότητα (ellipticity) του σφαιροειδούς για την οποία ισχύει:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{h^2}{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}} \quad (6.2-13)$$

2) αν έχει μορφή επιμήκους σφαιροειδούς είναι:

$$A = \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 + \frac{\pi \frac{\alpha}{2} h}{\varepsilon} \sin^{-1} \varepsilon \quad (6.2-14)$$

όπου  $\varepsilon$  είναι η ελλειπτικότητα του σφαιροειδούς για την οποία τώρα ισχύει:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2}{h^2}} \quad (6.2-15)$$

3) αν έχει μορφή σφαίρας ισχύει:

$$A = 2 \pi \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \quad (6.2-16)$$

Με την επιλογή «Εκτέλεση» εμφανίζεται στην οθόνη ένα σχήμα που αντιστοιχεί στον τύπο και στη μορφή του δέντρου ή θάμνου. Στο πλαίσιο των αποτελεσμάτων δίνεται ο ρυθμός απελευθέρωσης θερμότητας σύμφωνα με τη σχέση (1.2.2-1). Η διάμετρος D

ταυτίζεται με το πλάτος  $\alpha$  σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την περίπτωση της κυβικής μορφής. Σ' αυτήν την περίπτωση ισούται με την ανηγμένη διάμετρο που θα είχε ένας κύκλος με επιφάνεια ίδια με αυτή ενός τετραγώνου με πλευρά  $\alpha$ . Δηλαδή στην περίπτωση αυτή ισχύει:

$$D = \left( \frac{2 \alpha}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (6.2-17)$$

Τέλος δίνεται ο συντελεστής  $\dot{Q}^*$  καθώς και τα ύψη της φλόγας για κάθε ξεχωριστή περίπτωση όπως παρουσιάζονται στις σχέσεις του πίνακα 1.2.2-1 ενώ το μέσο ύψος φλόγας είναι ο μέσος όρος των υπολογισμένων υψών. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εκτυπώσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών την επιλογή «Εκτύπωση».

### **6.3 Πρόγραμμα υπολογισμού ύψους φλόγας σύμφωνα με το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας**

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει το μέσο όρο των υψών της φλόγας ανάλογα με το ρυθμό απελευθέρωσης της θερμότητας σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (βλ. παρ. 1.2.2). Το πρόγραμμα ζητάει από το χρήστη να συμπληρώσει το ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας, τη διάμετρο  $D$  της φλόγας καθώς και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (σχήμα 6.3-1). Με την επιλογή «Εκτέλεση» υπολογίζεται ο συντελεστής  $\dot{Q}^*$  καθώς και τα ύψη της φλόγας για κάθε ξεχωριστή περίπτωση όπως και στο προηγούμενο πρόγραμμα από τις σχέσεις του πίνακα 1.2.2-1 ενώ το μέσο ύψος φλόγας είναι και πάλι ο μέσος όρος των υπολογισμένων υψών. Το πρόγραμμα παρέχει και σ' αυτήν την περίπτωση, τη δυνατότητα στο χρήστη να εκτυπώσει τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

Υπολογισμός ύψους φλόγας με σχέσεις της βιβλιογραφίας

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

Επιλογή Παραμέτρων

Θερμ. περιβάλλοντος (θ): 20 °C

Ρυθμός απελευθ. θερμότητας: 594,00 kW

Διάμετρος φλόγας D: 0,68 m

Αποτελέσματα

Qstar: 1,41

Υψος Φλόγας

Υψος κατά Zukoski: 2,57 m

Υψος κατά Cox and Chitty: 0 m

Υψος κατά Thomas: 2,85 m

Υψος κατά Heskestad: 2,19 m

Υψος κατά Steward: 3,24 m

Μέσο Υψος Φλόγας: 2,71 m

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορική διατριβής του Ελευθέριου Ψαρρού με τίτλο:  
"Υπαίθριες Γραμμές Διανομής Χαμηλής Τάσης σε Περιβάλλον Πυρκαγιών"  
υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα  
και αφορά τις γραμμές Χαμηλής Τάσης, Μέσης Τάσης και Υψηλής Τάσης

Εκτύπωση Εκτέλεση Εξόδος

Σχήμα 6.3-1: Οθόνη υπολογισμού του ύψους της φλόγας σύμφωνα με τον ρυθμό απελευθέρωσης θερμότητας και τη διάμετρο της φλόγας

#### 6.4 Πρόγραμμα αναλυτικού υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης καθώς και του υπολογισμού της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή χαμηλής τάσης.

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς και τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους αγωγούς μίας γραμμής χαμηλής τάσης σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (βλ. παρ.1.3.1). Το πρόγραμμα αυτό έχει σαν στόχο να διευκολύνει στους υπολογισμούς και δεν εμπεριέχει λογική ελέγχων των τιμών που δίνει ο χρήστης (προτείνεται να δίνονται δεδομένα από πραγματικές περιπτώσεις δικτύων).

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

**Αναλυτικός Υπολογισμός Βραχυκυκλώματος**

**Συμπληρώστε τα στοιχεία του δικτύου Χαμηλής Τάσης (400V)**

**Μετασχηματιστής ΜΤ/ΧΤ**

Ισχύς Μετασχηματιστή σε kVA : 100

Επαγωγική Αντίσταση X (mΩ) : 65,50

Ωμική Αντίσταση R (mΩ) : 29,00

**Γραμμή ΧΤ**

Τύπος - Διατομή Αγωγού : Γυμνοί αγωγοί 4x16mm<sup>2</sup>

Μήκος Γραμμής μέχρι το βραχυκύκλωμα (m) : 50,0

Επαγωγική Αντίσταση X (mΩ) : 16,5

Ωμική Αντίσταση R (mΩ) : 57,0

**Συμπληρώστε επιπρόσθετες παραμέτρους για το βραχυκύκλωμα**

**Επιπλέον Παράμετροι**

Διάρκεια βραχυκυκλώματος (έως 1 s) : 0,150

Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C) : 35

Υπολογισμός

**Σχήμα 6.4-1:** Οθόνη εισαγωγής των στοιχείων του δικτύου χαμηλής τάσης καθώς και του χρόνου που διαρκεί το βραχυκύκλωμα.

Ο χρήστης χρειάζεται να επιλέξει αρχικά την ισχύ του μετασχηματιστή διανομής χαμηλής τάσης οπότε και αυτόματα συμπληρώνονται τα πεδία τιμών της επαγωγικής και ωμικής αντίστασης του μετασχηματιστή. Στη συνέχεια ο χρήστης χρειάζεται να επιλέξει τον τύπο και διάμετρο των αγωγών και το μήκος της γραμμής μέχρι το βραχυκύκλωμα (βλ. σχήμα 6.4-1).

Συμπληρώνοντας τη χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος (μέχρι ένα δευτερόλεπτο) και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (η προεπιλεγμένη τιμή είναι 40°C που αντιστοιχεί σε συνθήκες καύσωνα), με την επιλογή «Υπολογισμός» εμφανίζεται μία νέα οθόνη με τα στοιχεία που αφορούν το βραχυκύκλωμα (βλ. σχήμα 6.4-2).

- 110 -

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

**Αναλυτικός Υπολογισμός Βραχυκυκλώματος**

**Αντιστάσεις**

	Επαγωγική	Ωμική	
Δίκτυο Υψηλής Τάσης (mΩ) :	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Δίκτυο Μέσης Τάσης (mΩ) :	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (mΩ) :	82,00	86,00	
Συνολική :	82,00	86,00	118,83

**Αποτελέσματα**

Isw (kA) :

$\Delta\theta$  όταν Id/Isw=100% (°C) :

$\Delta\theta$  όταν Id/Isw=30% (°C) :

Η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς που υπολογίστηκε με τον αναλυτικό υπολογισμό μαζί με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (35°C) είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών αλουμινίου η οποία είναι 180°C. Αν επιθυμείτε πιο αναλυτικό υπολογισμό μπορείτε να υπολογίσετε ξανά τη θερμοκρασία αφού λάβετε υπόψη σας και τις αντιστάσεις του δικτύου Μέσης Τάσης.

Επιστροφή

Συνυπολογισμός Γραμμής ΜΤ και Μετασηματιστή ΥΤ/ΜΤ

Προεπισκόπηση Εκτύπωσης

**Σχήμα 6.4-2:** Οθόνη αποτελεσμάτων υπολογισμού βραχυκυκλώματος λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις αντιστάσεις του δικτύου χαμηλής τάσης

Συγκεκριμένα παρουσιάζονται η συνολική επαγωγική και ωμική αντίσταση του δικτύου χαμηλής τάσης και υπολογίζεται το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης για τριφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα με την αναλυτική μέθοδο υπολογισμού (βλ. την 1<sup>η</sup> σχέση του πίνακα 1.3.1-6). Επιπλέον υπολογίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας που εμφανίζεται στους αγωγούς σύμφωνα με την σχέση (1.3.1-8) θεωρώντας ότι το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι είτε ίσο με το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είτε είναι ίσο με το 30% της τιμής αυτού. Ο συντελεστής χρόνου T έχει θεωρηθεί ίσος με 0,3 που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή που ισχύει στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος. Στο κάτω μέρος της οθόνης αποτελεσμάτων εμφανίζεται ένα κείμενο που παροτρύνει τον χρήστη να συνεχίσει ή όχι σε πιο αναλυτικό υπολογισμό, αν γνωρίζει περαιτέρω στοιχεία για το δίκτυο, ανάλογα με την τιμή της αύξησης της θερμοκρασίας στους αγωγούς. Ελέγχει δηλαδή αν η τιμή αύξησης της θερμοκρασίας του αναλυτικού υπολογισμού στην οποία θεωρήθηκε ότι το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ίσο με το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μεγαλύτερη από την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

(για τους αγωγούς αλουμινίου η τιμή αυτή είναι 180°C [42]) θεωρώντας ότι η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι ίση με τη θερμοκρασία που έχει καταχωρήσει ο χρήστης.

**Αναλυτικός Υπολογισμός Βραχυκυκλώματος**

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

**Αντιστάσεις Δικτύου (Ω)**

Ωμική Αντίσταση (mΩ) : 86,00  
Επαγωγική Αντίσταση (mΩ) : 82,00  
Συνολική Αντίσταση (mΩ) : 118,83

**Αποτελέσματα**

Εναλλασ. Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (kA) : 1,95  
Δθ όταν Id/Is=100% (°C) : 38,60  
Δθ όταν Id/Is=30% (°C) : 26,89

Η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς που υπολογίστηκε με τον αναλυτικό υπολογισμό μαζί με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (35°C) είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών αλουμινίου η οποία είναι 180°C.

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορική διατριβής του Ελευθέριου Ψαρρού με τίτλο: "Υπαίθριες Γραμμές Διανομής Χαμηλής Τάσης σε Περιβάλλον Πυρκαγιών" υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα

Επιστροφή Εκτύπωση

Σχήμα 6.4-3: Οθόνη εκτύπωσης των αποτελεσμάτων

Με την επιλογή «Προεπισκόπηση Εκτύπωσης» εμφανίζεται μία οθόνη εκτύπωσης με τα αποτελέσματα των υπολογισμών (βλ. σχήμα 6.4-3). Με την επιλογή «Εκτύπωση» εκτυπώνεται το περιεχόμενο της οθόνης ενώ με την επιλογή «Επιστροφή» μπορεί ο χρήστης να γυρίσει στη οθόνη αποτελεσμάτων.



**Δίκτυο Μέσης Τάσης**

**Συμπληρώστε τα στοιχεία του δικτύου Μέσης Τάσης**

**Μετασχηματιστής ΥΤ/ΜΤ**

Ισχύς Μετασχηματιστή Υ/Μ σε ΜΒΑ :	10
Τάση του Δευτερεύοντος U (kV) :	20
Σχ. Τάση Βραχυκύκλωσης $u_x$ (επαγωγικό) (%) :	7,00
Σχ. Τάση Βραχυκύκλωσης $u_r$ (ωμικό) (%) :	0,00
Επαγωγική Αντίσταση X (mΩ/φάση) :	7,00
Ωμική Αντίσταση R (mΩ/φάση) :	0,00

**Γραμμή ΜΤ**

Τύπος - Διάμετρος Αγωγού :	ACSR 3x35
Μήκος Γραμμής μέσης τάσης (km) :	10
Επαγωγική Αντίσταση X (mΩ/φάση) :	992,50
Ωμική Αντίσταση R (mΩ/φάση) :	1440,00

Επιστροφή Αντίστασης    Έξοδος

Σχήμα 6.4-4: Οθόνη εισαγωγής των στοιχείων του δικτύου μέσης τάσης

Για να συνεχίσει ο χρήστης σε πιο αναλυτικό υπολογισμό χρειάζεται αρχικά να επιλέξει «Συνυπολογισμός Γραμμής ΜΤ και Μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ». Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται μία οθόνη καταχώρησης στοιχείων που αφορούν το δίκτυο μέσης τάσης (βλ. σχήμα 6.4-4). Στη συγκεκριμένη οθόνη χρειάζεται να συμπληρωθούν για το μετασχηματιστή μετατροπής από υψηλή σε μέση τάση η ισχύς του, η τάση λειτουργίας της γραμμής καθώς και η σχετική τάση βραχυκύκλωσης για το επαγωγικό και το ωμικό μέρος. Στη συνέχεια χρειάζεται να επιλεγθούν ο τύπος και η διάμετρος των αγωγών της γραμμής μέσης τάσης καθώς και το μήκος της γραμμής. Επιλέγοντας «Επιστροφή αντίστασης» κλείνει η συγκεκριμένη οθόνη και παρουσιάζεται και πάλι η οθόνη αποτελεσμάτων εμφανίζοντας τις νέες τιμές έχοντας λάβει υπόψη και τις αντιστάσεις του δικτύου μέσης τάσης. Στο κάτω μέρος της οθόνης αποτελεσμάτων εμφανίζεται ένα νέο κείμενο που παροτρύνει τον χρήστη και πάλι να συνεχίσει ή όχι σε πιο αναλυτικό υπολογισμό ανάλογα με την τιμή της αύξησης της θερμοκρασίας στους αγωγούς.

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

**Αναλυτικός Υπολογισμός Βραχυκυκλώματος**

Αντιστάσεις	Επαγωγική	Ωμική	
Δίκτυο Υψηλής Τάσης (mΩ) :			
Δίκτυο Μέσης Τάσης (mΩ) :	1,599	2,304	
Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (mΩ) :	82,00	86,00	
Συνολική :	83,60	88,30	121,60

**Αποτελέσματα**

Isw (kA) : 3,613

Δθ όταν Id/Isw=100% (°C) : 384,414

Δθ όταν Id/Isw=30% (°C) : 115,324

Η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς που υπολογίστηκε με τον αναλυτικό υπολογισμό μαζί με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (35°C) είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών αλουμινίου η οποία είναι 180°C. Αν επιθυμείτε πιο αναλυτικό υπολογισμό μπορείτε να υπολογίσετε ξανά τη θερμοκρασία αφού λάβετε υπόψη σας και τις αντιστάσεις του δικτύου Υψηλής Τάσης.

**Επιστροφή**      **Συνυπολογισμός Γεννήτριας και Διάταξης Ανύψωσης της Τάσης**      **Προεπισκόπηση Εκτόπωσης**

**Σχήμα 6.4-5:** Οθόνη αποτελεσμάτων υπολογισμού βραχυκυκλώματος λαμβάνοντας υπόψη τις αντιστάσεις του δικτύου χαμηλής και μέσης τάσης

Σχήμα 6.4-5: Οθόνη αποτελεσμάτων υπολογισμού βραχυκυκλώματος λαμβάνοντας υπόψη τις αντιστάσεις του δικτύου χαμηλής και μέσης τάσης

**Δίκτυο Μέσης Τάσης**

Αντιστάσεις Δικτύου Υψηλής Τάσης

Επαγωγική Αντίσταση (mΩ) : 0,000

Ωμική Αντίσταση (mΩ) : 0,000

**Επιστροφή Αντίστασης**      **Έξοδος**

\* οι αντιστάσεις χρειάζεται να δοθούν ανηγμένες στα 400V σημειώνεται επίσης ότι σε περίπτωση που δεν είναι γνωστές οι αντιστάσεις μπορούν να επιστραφούν μηδενικές τιμές αφού οι αντιστάσεις είναι απειροελάχιστες

**Σχήμα 6.4-6:** Οθόνη εισαγωγής των αντιστάσεων του δικτύου υψηλής τάσης

Σχήμα 6.4-6: Οθόνη εισαγωγής των αντιστάσεων του δικτύου υψηλής τάσης

Για να συνεχίσει ο χρήστης σε ακόμα πιο αναλυτικό υπολογισμό χρειάζεται αρχικά να επιλέξει «Συνυπολογισμός Γεννήτριας και Διάταξης Ανύψωσης Τάσης» (βρίσκεται στην

ίδια θέση με αυτό της μέσης τάσης βλ. σχήμα 6.4-5). Με την επιλογή αυτή εμφανίζεται μία οθόνη καταχώρησης της επαγωγικής και ωμικής αντίστασης που αφορά το δίκτυο υψηλής τάσης(βλ. σχήμα 6.4-6). Οι αντιστάσεις χρειάζεται να δοθούν ανηγμένες στα 400V. Αν δεν είναι γνωστές μπορούν να μη συμπληρωθούν, αφού οι τιμές τους είναι απειροελάχιστες. Με την επιλογή «Επιστροφή αντίστασης» κλείνει η συγκεκριμένη οθόνη και παρουσιάζεται και πάλι η οθόνη αποτελεσμάτων εμφανίζοντας τις νέες τιμές έχοντας λάβει υπόψη και τις αντιστάσεις του δικτύου υψηλής τάσης (βλ. σχήμα 6.4-7).

Αντιστάσεις	Επαγωγική	Ωμική	
Δίκτυο Υψηλής Τάσης (mΩ) :	0,000	0,000	
Δίκτυο Μέσης Τάσης (mΩ) :	1,599	2,304	
Δίκτυο Χαμηλής Τάσης (mΩ) :	82,00	86,00	
Συνολική :	83,60	88,30	121,60

Αποτελέσματα	
Isw (kA) :	3,613
Δθ όταν Id/Isw=100% (°C) :	384,414
Δθ όταν Id/Isw=30% (°C) :	115,324

Η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς που υπολογίστηκε με τον αναλυτικό υπολογισμό μαζί με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (35°C) είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών αλουμινίου η οποία είναι 180°C.

Επιστροφή

Προεπισκόπηση Εκτύπωσης

The schematic diagram on the right shows a power system starting with a generator (G) connected to a transformer (YT/MT), followed by a medium voltage line (γραμμή MT), another transformer (MT/XT), and finally a low voltage line (γραμμή XT) ending at point A.

Σχήμα 6.4-7: Οθόνη αποτελεσμάτων υπολογισμού βραχυκυκλώματος λαμβάνοντας υπόψη τις αντιστάσεις του δικτύου χαμηλής, μέσης και υψηλής τάσης

Στο κάτω μέρος της οθόνης αποτελεσμάτων εμφανίζεται ένα νέο κείμενο που αναφέρει αν τελικά η αύξηση της θερμοκρασίας ξεπερνά την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών αλουμινίου.

## 6.5 Πρόγραμμα εμπειρικού υπολογισμού του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης καθώς και του υπολογισμού της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στους αγωγούς σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σε μία γραμμή χαμηλής τάσης.

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης καθώς και τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους αγωγούς μίας γραμμής χαμηλής τάσης σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (βλ. παρ.1.3.1). Το πρόγραμμα αυτό έχει σαν στόχο να διευκολύνει στους υπολογισμούς και δεν εμπεριέχει λογική ελέγχων των τιμών που δίνει ο χρήστης (προτείνεται να δίνονται δεδομένα από πραγματικές περιπτώσεις δικτύων).

Εμπειρικός Υπολογισμός Βραχυκυκλώματος

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

Παράμετροι για το δίκτυο ΧΤ

Ισχύς Μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ (KVA) : 50

Τύπος - Διατομή Αγωγού : Γυμνοί αγωγοί 4x16mm<sup>2</sup>

Διάρκεια βραχυκυκλώματος (έως 1 s) : 1,000

Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C) : 35,0

Υπολογισμός

Αποτελέσματα

Εναλλασ. Ρεύμα Βραχυκύκλωσης (kA) : 1,806

Δθ όταν Id/Is=100% (°C) : 96,104

Δθ όταν Id/Is=30% (°C) : 28,831

Η αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς που υπολογίστηκε με τον εμπειρικό υπολογισμό μαζί με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (35°C) είναι μικρότερη από την οριακή θερμοκρασία λειτουργίας των αγωγών αλουμινίου η οποία είναι 180°C.

Το πρόγραμμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορική διατριβής του Ελευθέριου Ψαρρού με τίτλο:  
"Υπαίθριες Γραμμές Διανομής Χαμηλής Τάσης σε Περιβάλλον Πυρκαγιών"  
υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα

Εκτύπωση

Εξοδος

Σχήμα 6.5-1: Οθόνη εισαγωγής των στοιχείων του δικτύου χαμηλής τάσης καθώς και του χρόνου που διαρκεί το βραχυκύκλωμα.

Ο χρήστης χρειάζεται να επιλέξει αρχικά την ισχύ του μετασχηματιστή διανομής χαμηλής τάσης και τον τύπο και διάμετρο των αγωγών και το μήκος της γραμμής μέχρι το βραχυκύκλωμα (βλ. σχήμα 6.5-1).

Συμπληρώνοντας τη χρονική διάρκεια του βραχυκυκλώματος (μέχρι ένα δευτερόλεπτο) και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος (η προεπιλεγμένη τιμή είναι 40°C που αντιστοιχεί σε συνθήκες καύσωνα), με την επιλογή «Υπολογισμός» εμφανίζονται στην οθόνη, τα στοιχεία που αφορούν το βραχυκύκλωμα (βλ. σχήμα 6.5-1).

Συγκεκριμένα υπολογίζεται το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης για τριφασικό βραχυκύκλωμα στον αέρα με την εμπειρική μέθοδο υπολογισμού (βλ. τη σχέση (1.3.1-10)). Επιπλέον υπολογίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας που εμφανίζεται στους αγωγούς σύμφωνα με την σχέση (1.3.1-8) θεωρώντας ότι το διαρκές ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι είτε ίσο με το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης είτε είναι ίσο με το 30% της τιμής αυτού. Ο συντελεστής χρόνου  $T$  έχει θεωρηθεί ίσος με 0,3 που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή που ισχύει στην περίπτωση του τριφασικού βραχυκυκλώματος.

6. Τα προγράμματα που αναπτύχθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για τη διευκόλυνση των υπολογισμών σε περιπτώσεις πυρκαγιών

---

## 7 Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων

### 7.1 Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη συνθήκη ουδετέρωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης

Μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων του πίνακα 3-1 και των θεωρητικών υπολογισμών κατά τον πίνακα 3-2 υπάρχει ικανοποιητική ταύτιση. Οι ελάχιστα μεγαλύτερες θεωρητικές τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας ( $\Delta\theta$ ) προς αντίστοιχες πειραματικές μπορούν να αποδοθούν στο ότι δεν ελήφθη υπόψη στην σχέση (3-1) η απαγόμενη από τους αγωγούς θερμότητα προς το περιβάλλον. Τα παραπάνω αποτελέσματα εναρμονίζονται με υπολογισμούς που έχουν γίνει για όλες τις γραμμές διανομής του ελληνικού δικτύου από αγωγούς διανομής [54]. Συνεπώς, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι κατά την εκδήλωση βραχυκυκλώματος σε οποιαδήποτε γραμμή διανομής χαμηλής τάσης (για την οποία ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης - βλ. παρ. 1.3.1.1) δεν δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου γιατί η αύξηση των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται είναι αμελητέα ( $0\div 9,41^\circ\text{C}$  κατά τον πίνακα 3-2). Φαίνεται επίσης ότι δεν παρατηρούνται κατά το βραχυκύκλωμα σπινθηρισμοί γιατί συμβαίνει, λόγω της μεγάλης τιμής του ρεύματος βραχυκύκλωσης, τήξη της ασφάλειας (ή των ασφαλειών) σε κλάσμα του δευτερολέπτου (χρόνος δηλαδή που στην πράξη, χαρακτηρίζεται ως ακαριαίος [45]) και γι' αυτό δεν υπάρχει δυνατότητα για την εκδήλωση θερμικών και φωτεινών φαινομένων. Εξάλλου, σύμφωνα με τον νόμο του Paschen [4,7,25,42,45] δεν είναι δυνατό να εκδηλωθούν στις γραμμές χαμηλής τάσης φαινόμενα ιονισμού ώστε να παρατηρηθούν σπινθήρες. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση επαναλαμβανόμενης επαφής μεταξύ των αγωγών συμβαίνει ένα και μοναδικό βραχυκύκλωμα κατά την πρώτη επαφή τους, γεγονός που αιτιολογείται από την πρακτικά ακαριαία (κλάσμα του δευτερολέπτου) τήξη της ασφάλειας (ή των ασφαλειών).

Για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της αύξησης της θερμοκρασίας στους αγωγούς γραμμών χαμηλής τάσης κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα υλοποιήθηκε ένα πρόγραμμα. Το πρόγραμμα αυτό αποσκοπεί στη διευκόλυνση των αριθμητικών πράξεων.

## **7.2 Σχόλια επί των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων για τις συνέπειες πλεγμένων κλαδιών δένδρου μεταξύ των γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης**

Από τα πειράματα που έγιναν με στεγνά ή βρεγμένα κλαδιά δένδρου (πεύκο ή ελιά) πλεγμένα μεταξύ των αγωγών, δεν παρατηρήθηκε ούτε διαρροή ρεύματος, ούτε αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών, ούτε ανάφλεξη των κλαδιών. Επίσης δεν υπήρξε εκδήλωση κάποιων φωτεινών ή ηχητικών φαινομένων. Συνεπώς, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι τα κλαδιά των δένδρων (χλωρά ή ξερά, στεγνά ή βρεγμένα) μεταξύ των γυμνών αγωγών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης δεν δημιουργούν προβλήματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής. Φαίνεται ότι το μόνο που μπορούν να προκαλέσουν τα κλαδιά των δένδρων είναι η μηχανική καταπόνηση (και σε ακραία περίπτωση το βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγών για το οποίο ισχύουν τα αναφερθέντα στην παράγραφο 7.1), κάτι όμως που αντιμετωπίζεται στην πράξη στα πλαίσια των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης (βλ. παρ. 1.1.2).

## **7.3 Σχόλια επί των μετρήσεων και των οπτικών παρατηρήσεων κατά τις επαναλαμβανόμενες γεφυρώσεις μεταξύ αγωγού του δημοτικού φωτισμού και του υπερκείμενού του αγωγού της ίδιας φάσης του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης**

Από τα πειράματα προέκυψε ότι δεν αυξήθηκε η θερμοκρασία των αγωγών και δεν δημιουργήθηκαν τήγματα. Γι' αυτό μπορεί κανείς να υποθέσει ότι οι σπινθηρισμοί που παρατηρήθηκαν (συνοδευόμενοι από τριγμούς) οφείλονται στο διακοπτικό φαινόμενο που εκδηλωνόταν κατά την επαφή των δύο αγωγών, επειδή λόγω της διαφορετικής διατομής τους υπήρχε μεταξύ τους μία αντίσταση, που είχε ως επακόλουθο την πρόκληση διαφοράς δυναμικού.

## **7.4 Σχόλια επί του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος**

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο φαίνεται ότι δίνει μία ικανοποιητική προσέγγιση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου κατά την πρόσκρουσή τους στο έδαφος, γιατί βασίζεται στους κανόνες της φυσικής. Το μοντέλο αυτό δεν έχει βεβαίως πρακτική εφαρμογή σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης από γυμνούς



αγωγούς αλουμινίου, γιατί ως αναφέρθηκε στις παραγράφους 7.1, 7.2 και 7.3, στις γραμμές αυτές δεν δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου. Μπορεί όμως να έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις τημάτων από ηλεκτρικές επαφές, όπως αυτό ενδέχεται να συμβεί (σε περιπτώσεις που δεν γίνεται η απαιτούμενη ετήσια επιθεώρηση-συντήρηση -βλ. παρ 1.1.2) σε κακές ή οξειδωμένες συσφίξεις στατικών επαφών [42,47] χαμηλής τάσης (κυρίως ακροδέκτες μετασχηματιστών, κακές επαφές διακοπών και σφικτήρες). Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να έχει εφαρμογή (σε περιπτώσεις υποθετικής δημιουργία τημάτων μετάλλου) σε γραμμές μέσης τάσης και υψηλής τάσης, όπου εκτός από τα θερμικά φαινόμενα (λόγω του ρεύματος βραχυκύκλωσης) εκδηλώνονται και διηλεκτρικά φαινόμενα, τα οποία απουσιάζουν στην χαμηλή τάση.

Στα πλαίσια των παραπάνω περιπτώσεων υλοποιήθηκε ένα πρόγραμμα υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τημάτων που εκτοξεύονται από αγωγούς αλουμινίου των γραμμών χαμηλής τάσης και τημάτων αλουμινίου και χαλκού που ενδέχεται να δημιουργηθούν σε επαφές μετασχηματιστών, προκειμένου να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί σύμφωνα με το μοντέλο.

## **7.5 Σχόλια επί των πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη συμπεριφορά των επιτόνων σε περιβάλλον πυρκαγιάς**

Μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη συμπεριφορά των επιτόνων σε περιβάλλον φωτιάς γύρω από τη θέση αγκύρωσής τους στο έδαφος (φλεγόμενοι θάμνοι και χόρτα) παρατηρείται ικανοποιητική ταύτιση αποτελεσμάτων. Φαίνεται ότι η φωτιά προκαλεί παραμένουσα διαστολή στους επιτόνους η οποία είναι ιδιότητα του ατσαλιού σε θερμοκρασίες άνω των  $400\div 450^{\circ}\text{C}$  [9,16]. Αυτό είναι επόμενο να έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της ισορροπίας των δυνάμεων στους στύλους, με επακόλουθο να προκαλούνται μεταβολές των αποστάσεων μόνωσης μεταξύ των αγωγών λόγω αλλαγών των δυνάμεων τάνυσης. Γι' αυτό μετά από κάθε πυρκαγιά θα πρέπει να γίνεται έλεγχος στην τάνυση των αγωγών και των επιτόνων. Θα πρέπει επίσης, στα πλαίσια της ετήσιας επιθεώρησης-συντήρησης (βλ. παρ. 1.1.2), να καθαρίζεται η περιοχή περί τους επιτόνους από θάμνους και χόρτα.

Τέλος, το πρόγραμμα υπολογισμού του ύψους της φλόγας σε περιπτώσεις πυρκαγιών υπαίθρου, το οποίο έγινε στα πλαίσια της εργασίας αυτής βασίζεται τόσο στη βιβλιογραφία

[5,23,26,28,44,46] όσο και στα πειράματα που έγιναν (βλ. παρ. 5.1). Το πρόγραμμα αυτό, που δίνει μια δυνατότητα να γνωρίζει κανείς κατά πόσο η βλάστηση μίας περιοχής ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα σε μία υπερκείμενη αυτής γραμμής διανομής (αν συμβεί πυρκαγιά) είναι χρήσιμο τόσο για γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, όσο και μέσης τάσης. αλλά και υψηλής τάσης

## 8 Συμβολή της εργασίας στην έρευνα και πρακτικές εφαρμογές

Η εργασία αυτή πιστεύουμε ότι συνέβαλε στην έρευνα και τις πρακτικές εφαρμογές σχετικά με τις πυρκαγιές υπαίθρου σε περιβάλλον γραμμών διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης. Συγκεκριμένα:

- 1) Από τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα φαίνεται ότι στις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου (για τις οποίες ισχύει η συνθήκη ουδετέρωσης) δεν εκδηλώνονται κατά το βραχυκύκλωμα τήγματα αλουμινίου και σπινθηρισμοί.
- 2) Τα πλεγμένα κλαδιά δέντρων στους γυμνούς αγωγούς χαμηλής τάσης δεν δημιουργούν προβλήματα μείωσης της διηλεκτρικής αντοχής ανεξάρτητα του αν είναι χλωρά ή ξερά, στεγνά ή βρεγμένα.
- 3) Κατά τις επαναλαμβανόμενες αγωγίμες γεφυρώσεις μεταξύ του γυμνού αγωγού αλουμινίου του δημοτικού φωτισμού ( $16\text{mm}^2$ ) και του υπερκείμενού του γυμνού αγωγού αλουμινίου της ίδιας φάσης αλλά μεγαλύτερης διατομής ( $50\text{mm}^2$ ) δεν δημιουργούνται τήγματα αλουμινίου αλλά μόνο σπινθηρισμοί, γιατί πρόκειται για διακοπτικό φαινόμενο, που λόγω αυτού οι παρατηρούμενοι σπινθηρισμοί είναι μόνο φωτεινή ακτινοβολία και ήχος (τριγμοί).
- 4) Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο δίνει μία δυνατότητα υπολογισμού της θερμοκρασίας γενικά υποθετικών τηγμάτων μετάλλων κατά τη πρόσκρουσή τους στο έδαφος. Αν και το μοντέλο αυτό δεν έχει εφαρμογή στους γυμνούς αγωγούς αλουμινίου του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης, είναι χρήσιμο για περιπτώσεις δημιουργίας τηγμάτων από στατικές επαφές (κυρίως σφικτήρες και επαφές διακοπών). Το μοντέλο αυτό μπορεί επίσης να έχει εφαρμογή στα εναέρια δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης.
- 5) Από τα πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα φαίνεται ότι η φωτιά προκαλεί παραμένουσα διαστολή των επιτόνων, που έχει ως επακόλουθο τη μεταβολή των τανύσεων της γραμμής που βρέθηκε στο περιβάλλον μίας πυρκαγιάς. Γι' αυτό στα πλαίσια των προκαθορισμένων εργασιών συντήρησης θα πρέπει να καθαρίζεται η περιοχή περί τους επιτόνους από θάμνους και χόρτα.
- 6) Το πρόγραμμα υπολογισμού του ύψους της φλόγας, που δίνει μία δυνατότητα να γνωρίζει κανείς κατά πόσο η βλάστηση μίας περιοχής ενδέχεται να προκαλέσει

προβλήματα σε μία υπερκείμενη αυτής γραμμής διανομής (αν συμβεί πυρκαγιά), είναι χρήσιμο τόσο για γραμμές διανομής χαμηλής τάσης όσο και μέσης τάσης.

- 7) Το πρόγραμμα υπολογισμού της θερμοκρασίας υποθετικών τηγμάτων αλουμινίου ή χαλκού κατά τη πρόσκρουσή τους στο έδαφος.
- 8) Το πρόγραμμα υπολογισμού της αύξησης θερμοκρασίας των αγωγών των γραμμών διανομής της χαμηλής τάσης κατά το τριφασικό βραχυκύκλωμα που αποσκοπεί στην διευκόλυνση των αριθμητικών υπολογισμών .

# Παράρτημα

## Παράρτημα Ι. Υπολογισμός θερμικής ροής από ακτινοβολία σε αγωγό αλουμινίου από καιγόμενο δέντρο.

Αν υποθεθεί ότι ένα δέντρο καίγεται με ύψος φλόγας  $a$  ίση με  $3\text{m}$  και διαμέτρου  $b$  ίση με  $1,5\text{m}$  κοντά σε μία γραμμική διανομής χαμηλής τάσης αποτελούμενη από αγωγούς αλουμινίου, θα υπολογιστεί θεωρητικά η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του αγωγού από τη φλόγα προς τον αγωγό λόγω της ακτινοβολίας θεωρώντας ότι αυτός βρίσκεται σε απόσταση  $c$ , ίση με  $3\text{m}$ , από τη φλόγα.

Η θερμοκρασία της φλόγας θα θεωρηθεί ότι είναι  $800^\circ\text{C}$  δηλαδή:

$$\theta = 800 + 273 = 1073\text{K}$$

Αρχικά θα υπολογιστεί η ο συντελεστής διαμόρφωσης  $F_{12}$ . Για να υπολογιστεί το  $F_{12}$  πρέπει να υπολογιστούν οι λόγοι του ύψους  $a$  και της διαμέτρου  $b$  του δέντρου προς την απόσταση  $c$  από τον αγωγό. Ισχύει δηλαδή:

$$x = a/c = 3/3 = 1$$

$$y = b/c = 1,5/3 = 0,5$$

Από το σχήμα 1.2.3-1 υπολογίζεται ότι:

$$F_{12} = 0,1$$

Ο συντελεστής εκπομπής  $\varepsilon$  δίνεται από τη σχέση (1.2.3.1-6) σύμφωνα με την οποία για πάχος  $l$  ίσο με τη διάμετρο της φλόγας  $b$  και  $k$  ίσο με  $0,8$  [28] θα ισχύει:

$$\varepsilon = 1 - e^{-k b} = 1 - e^{-0,8 \cdot 1,5} = 0,7$$

Άρα η θερμική ροή ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι:

$$\dot{q}'' = \varepsilon \sigma \theta^4 F_{12} = 0,7 \cdot 5,559 \times 10^{-11} \cdot 1073^4 \cdot 0,1 = 5,158 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Η θερμική αυτή ροή είναι αρκετά μικρή αλλά σε περιπτώσεις μίας πυρκαγιάς μεγαλύτερης έκτασης μπορεί να πάρει αρκετά υψηλότερες τιμές.

## Παράρτημα II. Υπολογισμός θερμικής ροής από μεταφορά σε αγωγό αλουμινίου από φωτιά χαμηλής βλάστησης.

Αν υποθεθεί ότι πάνω από μία φωτιά υπαίθρου χαμηλής βλάστησης υπάρχουν γυμνοί αγωγοί αλουμινίου μίας γραμμής διανομής χαμηλής τάσης, θα υπολογιστεί θεωρητικά η ροή θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας του αγωγού από τον θερμό αέρα προς τον αγωγό λόγω θερμικής μεταφοράς. Θα θεωρηθεί ότι ο αέρας θερμαίνεται λόγω ελεύθερης μεταφοράς από την φωτιά και έχει αποκτήσει μία θερμοκρασία  $\theta_f$  ίση με  $100^\circ\text{C}$  και κινείται με μία ταχύτητα  $U_f$  ίση με  $20\text{m/s}$  [24]. Επίσης θα θεωρηθεί ότι το τμήμα του αγωγού που μελετάται έχει αρχικά θερμοκρασία  $\theta_s$  ίση με του περιβάλλοντος ( $20^\circ\text{C}$ ) και ότι βρίσκεται μέσα στη ροή ανοδικού θερμού αέρα της φωτιάς που έχει μορφή καμινάδας.

Αρχικά θα υπολογιστούν για τον αέρα σε θερμοκρασία  $\frac{\theta_s + \theta_f}{2} = 60^\circ\text{C}$  οι αριθμοί Reynolds

και Prandtl για τους οποίους ισχύει:

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} = \frac{20,17 \times 10^{-6} \cdot 1,009}{0,0285 \times 10^{-3}} = 0,714$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f u_f L}{\mu} = \frac{1,067 \cdot 20 \cdot 0,024}{20,17 \times 10^{-6}} = 25392$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο αριθμός Nusselt για τον οποίο ισχύει στη περίπτωση κυλίνδρου:

$$\text{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{\text{Pr}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{\text{Re}}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \Rightarrow$$

$$\text{Nu} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot 25392^{\frac{1}{2}} \cdot 0,714^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{0,714}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{25392}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} = 91,3658$$

Ο μέσος συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με εξαναγκασμένη μεταφορά είναι

$$h = \frac{\text{Nu} k}{L} = \frac{91,3658 \cdot 0,0285}{0,024} = 108,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Άρα η θερμική ροή ανά μονάδα επιφάνειας είναι:

$$\dot{q}'' = h \Delta\theta = 108,5 \cdot (293 - 373) = 8680 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 8,68 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

Η θερμική αυτή ροή λόγω μεταφοράς είναι αρκετά μικρή. Σημειώνεται ότι όσο ο αγωγός αποκτά διαχρονικά μεγαλύτερη θερμοκρασία τόσο θα γίνεται μικρότερη η παραπάνω τιμή μέχρι που, αν ο αγωγός ξεπεράσει τη θερμοκρασία του αέρα (πχ. λόγω ακτινοβολίας), να οδηγήσει σε απαγωγή θερμότητας από τον αγωγό προς τον περιβάλλοντα αέρα.

### **Παράρτημα III. Παράδειγμα χρήσης του προγράμματος υπολογισμού του ύψους της φλόγας σε περίπτωση πυρκαγιάς υπαίθρου κάτω από γυμνούς αγωγούς αλουμινίου του δικτύου της χαμηλής τάσης.**

Αν υποτεθεί ότι χρειάζεται να υπολογιστεί το ύψος της φλόγας σε περίπτωση ενός δέντρου ύψους 6m το οποίο βρίσκεται κάτω από τις γραμμές διανομής χαμηλής τάσης, τότε το ύψος του κορμού του δέντρου θα θεωρηθεί ίσο με 2m και της φυλλωσιάς ίσο με τα υπόλοιπα 4m. Επίσης θα θεωρηθεί ότι το πλάτος του είναι ίσο με το μισό του ύψους της φυλλωσιάς, δηλαδή ίσο με 2m.

Υπολογίζοντας το ύψος της φλόγας για το δέντρο αυτό (θεωρώντας ότι η μορφή είναι παραμετρική) δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας:

<b>Μορφή</b>	<b>Επιφάνεια Ατμοποίησης A (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ύψος φλόγας h (m)</b>
Κυβική	40	6,05
Κυλινδρική	31,4	5,57
Κωνική	16,09	3,22
Σφαιρική	25,32	4,65

Πίνακας III-1. Πίνακας υψών φλόγας για δέντρο ύψους 4m και πλάτους 2m ανάλογα με τη μορφή που θεωρείται ότι έχει το δέντρο.

Από τον πειραματικό υπολογισμό που έχει γίνει [43] (βλ.παρ.1.2.2) έχει βρεθεί ότι για ύψη φυλλωσιάς ελάτων μέχρι 3,5m το ύψος της φλόγας είναι κατά μέσο όρο περίπου 2 φορές το ύψος της φυλλωσιάς. Επίσης στην εργασία αυτή φαίνεται ότι για μικρότερα ύψη υπήρχαν μεγαλύτερες αναλογικά φλόγες έως και 3 φορές το ύψος της φυλλωσιάς, ενώ όσο γίνονταν ψηλότερα τα δέντρα η αναλογία αυτή ελαττωνόταν. Στα ψηλότερα δέντρα το ύψος της φλόγας υπολογιζόταν περίπου 1,5 φορές το ύψος της φυλλωσιάς. Από τον πίνακα III-1

φαίνεται ότι η μορφή δέντρου για την οποία το ύψος φλόγας πλησιάζει πολύ κοντά σ' αυτό των πειραματικών αποτελεσμάτων, είναι πρώτα η κυβική και στη συνέχεια η κυλινδρική μορφή.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αν πάνω από το δέντρο που καίγεται, διέρχεται γραμμική διανομής χαμηλής τάσης η οποία βρίσκεται στα 8m, είναι πιθανόν να δεχθεί έντονη θερμική καταπόνηση από τη φλόγα του δέντρου, λόγω αγωγής, ακτινοβολίας και μεταφοράς, σε τέτοιο βαθμό ώστε να υπάρχει πιθανότητα ακόμα και να κοπεί κάποιος από τους αγωγούς αλουμινίου, αφού η θερμοκρασία τήξης του αλουμινίου είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία της φλόγας.



# Βιβλιογραφία

Η παρακάτω βιβλιογραφική ανασκόπηση ακολουθεί χρονολογική σειρά. Σημειώνεται ότι η βιβλιογραφία 56 έως 99 δεν ακολουθεί την προηγούμενη αλλά δική της χρονολογική σειρά. Αυτό έχει γίνει επειδή η βιβλιογραφία αυτή αναφέρεται σε ένα πολύ ειδικό θέμα και γι' αυτό επιλέχθηκε να μην ενσωματωθεί στην υπόλοιπη.

- [1] Ramanujan S., 'Modular Equations and Approximations to  $\pi$ ' Quart. J. Pure. Appl. Math. 45, 1913-1914
- [2] Ranz W. & Marshall W., 'Evaporation from drops'. Chem. Eng. Prog., 48 ,1952, pp.141-146
- [3] AEG, 'Hilfsbuch für elektrische Licht und Kraft-Anlagen', Verlag W. Girardet, Essen, 1957
- [4] Lesch G., Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1959
- [5] Thomas PH, 'The Size of Flames from Nature Fires'. 9<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1962, pp. 844-859
- [6] Marshall R., Pellett L., Saunders A. R., 'An Experimental Study of the Drag Coefficient of Burning Aluminum Droplets', Langley Research Center, National Aeronautics and Space Administration, Hampton, Virginia, Third ICRPG Combustion Conference, 1966, Kennedy Space Center, Florida
- [7] Philippow E., Taschenbuch Elektrotechnik, Band II, Grundlagen, VEB Verlag Technik, Berlin 1966.
- [8] ΦΕΚ 608/Β/6.10.1967, 'Περί εγκρίσεως Κανονισμών δια την εγκατάστασιν και συντήρησιν Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας', 1967
- [9] Θεοχάρης Π., 'Πειραματική αντοχή των υλικών', Αθήνα, 1975
- [10] Achenbach, E, 'Heat Transfer from Spheres up to  $Re = 6 \times 10^6$ ', in Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 5, Hemisphere Publishing, Washington, D.C., 1978

- [11] Hosemann – Boeck, 'Grundlagen der elektrischen Energietechnik', Springer Verlag, 1983
- [12] Δ.Ε.Η., 'Τυποποιημένες Κατασκευές Διανομής', Τόμος 2, 3η έκδοση, 1984
- [13] PPC, 'Handbook of Standard Distribution Structures', Std. CS-2, 1985, 1st Edition
- [14] Τσανάκας Δ., 'Συμμετρικές Συνιστώσες και Ανάλυση Σφαλμάτων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας' Ξάνθη, 1985
- [15] ΔΕΗ, 'Κανονισμός ΟΔ-22/ΔΕΔ-ΤΤΕ Δ-4/4-7-88', 1988
- [16] Σελλούντος, Β., Παπαϊωάννου, Γ., Πέρδιος, Στ., Χουσιανάκος, Κ. 'Πυρασφάλεια, Εφαρμογές πυροπροστασίας και στοιχεία πυρόσβεσης', Εκδόσεις Φοίβος, Αθήνα, 1988
- [17] Serway R., 'Physics for Scientists & Engineers: Τόμος III, Θερμοδυναμική–Κυματική–Οπτική' 3rd edition, Saunders Golden Sunburst Series, Saunders College Publishing, 1990
- [18] VDI-Warmeatlas, 'Berechnungsblätter für den Wärmeübergang', 1991, Sechste erweiterte Auflage
- [19] Ντοκόπουλος Π., Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις καταναλωτών μέσης και χαμηλής τάσης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1992
- [20] Grainger J., Stevenson W., 'Power System Analysis', McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1994, pp. 127-140.
- [21] Γ. Αντωνόπουλος, 'Μαθήματα Πυροσβεστικής Τέχνης', 1994
- [22] Arvind A., 'Convection Heat Transfer', 'SFPE Handbook of Fire Protection Engineering' (National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 1995, 2nd Edition, pp. 1-60
- [23] Hamins A. et al., 'Characteristics of pool fire burning', Fire Resistance of Industrial Fluids, Indianapolis 1996

- [24] Clark T., Jenkins M., Coen J., Packham D., ‘A Coupled Atmosphere-Fire Model: Convective Feedback on Fire Line Dynamics’, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 35, No. 6, June 1996, pp. 875-901
- [25] Μπούρκας Π., ‘Εφαρμογές Υψηλών Τάσεων, Εκδόσεις’, ΕΜΠ, 1996
- [26] Heskestad G, ‘Flame Heights of Fuel Arrays With Combustion in Depth’. *Proceedings of the Fifth International Symposium of Fire Safety Science*, International Association of Fire Safety Science, 1997, pp. 427-438
- [27] Machowski J., Bialek J., Bumby J., ‘Power System Dynamics and Stability’, John Wiley & Sons Ltd, England, 1997, pp. 115-140.
- [28] Quintiere JG, ‘Principles of Fire Behavior’, Delmar Publishers, 1998
- [29] Tse D. & Fernandez-Pello A., ‘On the Flight Paths of Metal Particles and Embers Generated by Power Lines in High Winds: A Potential Source of Wildland Fires’, *Fire Safety Journal* 30, 1998, pp. 333-356
- [30] Anderson P., ‘Power System Protection’, IEEE Press Power Engineering Series, New York, 1999, pp. 147-172.
- [31] Kreith F, Boehm R.F, et. al. ‘Heat and Mass Transfer’, *Mechanical Engineering Handbook*, Frank Kreith, Boca Raton, CRC Press LLC, 1999
- [32] K & K Associates, ‘Thermal Network Modeling Handbook’, K & K Associates, 2000
- [33] ASHRAE, ‘Handbook – Fundamentals’, Atlanta, 2001, SI Edition
- [34] Cengel Y, ‘Heat Transfer: A Practical Approach’, 2002
- [35] Μπούσουλας Ι., ‘Πυρκαγιές δασών’, εργασία στο τμήμα Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ, Αθήνα, 2002
- [36] Babrauskas, V., ‘Fires due to Electric Arcing: Can “Cause” Beads Be Distinguished from “Victim” Beads by Physical or Chemical Testing’ pp. 189-201, *Fire and Materials*, Interscience Communications Ltd., London, 2003

- [37] Bejan A., Kraus A., 'A Heat transfer Handbook', John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2003
- [38] Chen WF, and Richard Liew JY: 'The Civil Engineering Handbook', CRC Press, 2003, 2nd Edition
- [39] Dupuy J., Marechal J., Morvan D., 'Fires from a cylindrical forest fuel burner: combustion dynamics and flame properties', Combustion and Flame 135, 2003, pp. 65–76
- [40] Lienhard J. IV, Lienhard J. V, 'A Heat transfer Textbook' 3rd edition, Cambridge, Phlogiston Press, 2003
- [41] ΔΕΗ, 'Προγραμματισμός και παρακολούθηση των εργασιών συντήρησης των εγκαταστάσεων διανομής', Οδηγία διανομής Νο 9, Διεύθυνση Κατασκευών και Συντηρήσεων Δικτύων (ΔΚΣΔ-ΤΕΣΔ) Έκδοση 3<sup>η</sup>, 1-7-2003, 2003
- [42] Μπούρκας Π., Καραγιαννόπουλος Κ., 'Βιομηχανικές ηλεκτρικές διατάξεις και υλικά', Εκδόσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείου 2003.
- [43] Evans D., et al., 'Physics-Based Modeling for WUI Fire Spread – Simplified Model Algorithm for Ignition of Structures by Burning Vegetation', U.S. Department of Commerce and U.S. Department of Agriculture, 2004
- [44] Fire Dynamics Tools (FDTs), Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program', 2004, Final Report
- [45] Μπούρκας Π., 'Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων', ΕΜΠ, 2004
- [46] 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
- [47] Πολυκράτη Α., 'Συμπεριφορά Στατικών Ηλεκτρικών Συνδέσμων υπό Ταχέως Μεταβαλλόμενες Ηλεκτρικές Καταπονήσεις', Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2005

- [48] Latif M. Jiji, 'Heat Convection', Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [49] Koufakis E., Karagiannopoulos C., Bourkas P. 'Thermal coefficient measurements of the insulation in distribution transformers of a 20 kV network', Measurement, Vol.41, Issue 1, 2008, pp.10-19
- [50] Κατσούλου Α. 'Έλεγχος Συνθήκης Ουδετέρωσης σε Δίκτυα Διανομής Χαμηλής Τάσης', ΕΜΠ, Αθήνα, 2008
- [51] Κουφάκης Ε, 'Μία προσέγγιση της διάρκειας ζωής εξοπλισμού των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με παράδειγμα τους μετασχηματιστές διανομής', Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2008
- [52] Μπούρκας Π., 'Ασκήσεις Κτηριακών - Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων (Υποσταθμός Μέσης Τάσης, Βραχυκύκλωμα – Γειώσεις)', ΕΜΠ, Αθήνα, 2008
- [53] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ)., 'Κώδικας Διαχείρισης Δικτύου' Αθήνα, 2008
- [54] Σιμιτζής Α., 'Προσδιορισμός της θερμικής καταπόνησης των γυμνών αγωγών και των συνεστραμμένων καλωδίων του δικτύου χαμηλής τάσης κατά το βραχυκύκλωμα', ΕΜΠ, Αθήνα, 2008
- [55] Wolfram Mathworld, '<http://mathworld.wolfram.com>', Wolfram Research with Mathematica Technology, 2009
- [56] Shaw, C. E., 'Fire Marshals on Duty', NFPA J. 59, 1965, pp. 26-27, pp. 96-97
- [57] Takaki, A., 'On the effect of Thermal Histories upon the Metallographic Structure of Electric Wires', Reports of the National Research Institute of Police Science-Research on Forensic Science 24:2, 1971, pp. 48-56
- [58] Levinson, D. W., 'Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires', Fire Technology 13, 1977, pp. 211-222
- [59] Ettling, B. V., 'Electrical Wiring in Building Fires', Fire Technology 14, 1978, pp. 317-325
- [60] 'Did the Short Cause the Fire or Did the Fire Cause the Short?' Fire & Arson Investigator 30:1, 1979, pp. 57-58

- [61] MacCleary, R. C., and Thaman, R. N., 'Method for Use in Fire Investigation', US Patent 4,182,959, 1980
- [62] Oba, K., 'Identification of Melting Marks of Electric Wires (unpublished report)', Yamagata Prefecture Police Headquarters, Criminal Scientific Laboratory, Japan, 1980
- [63] Gray, D. A., Drysdale, D. D., and Lewis, F. A. S., 'Identification of Electrical Sources of Ignition in Fires', *Fire Safety J.* 6, 1983, pp. 147-150
- [64] Erlandsson, R., and Strand, G., 'An Investigation of Physical Characteristics Indicating Primary or Secondary Electrical Damage', *Fire Safety J.* 8, 1984/85, pp. 97-103
- [65] Singh, R. P. 'Scanning Electron Microscopy of Burnt Electric Wires', *Scanning Microscopy* 1:4, 1987, pp. 1539-1544
- [66] Robertsson, A., Karlsson, S. E., Strand, G., and Nilsson, G., 'Smaltskador pa elektriska ledare [Melt Damages on Electric Wires] (Rapport 20)', Centrum for Forensisk Vetenskap, Linkoping, Sweden, 1988
- [67] Anderson, R. N., 'Surface Analysis of Electrical Arc Residues in Fire', *Investigation, J. Forensic Sciences* 34, 1989, pp. 633-637
- [68] Ishibashi, Y., and Kishida, J., 'Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires' Annual Mtg. Japan Assn. for Fire Science and Engrg., 1990, pp. 83-90
- [69] Massalski, T. B., ed., 'Binary Alloy Phase Diagrams', 2nd ed., ASM International, Materials Park OH, 1990
- [70] Anderson, R. N., 'Scientific Examination of Electrical Arc Residues to Determinate Fire Cause', *Fire and Arson Investigator* 42:3, 1992, pp. 58-59
- [71] Masui, M., 'Possibility of Carbon Inclusion in the Molten Mark of Polyvinyl Chloride Insulated Cords due to a Fire', *Trans. IEE Japan* 112A:1, 1992, pp. 78-79

- [72] Anderson, R. N., Brosz, H. G., Posey, E., and Schefelbein, B., 'Recent Advances in Auger Analysis of Electrical Arc Residues', in 13th Meeting, Intl. Assn. of Forensic Sciences, 1993, pp. 162-166
- [73] Anderson, R. N., 'Letter to the Editor', Fire and Arson Investigator 45:2, 44-45, 1994
- [74] Beland, B., 'Examination of Arc Beads', Fire and Arson Investigator 44:4, 1994, pp. 20-22
- [75] Metson, J. B., and Hobbs, C. M., 'The Use of Auger Electron Spectroscopy in Fire Investigations', Chemistry in New Zealand 1994, pp.7-9
- [76] Mitsuhashi, N., 'Discrimination between Primary and Secondary Arc Marks on Electric Wires by Microvoid Distribution', Reports of the National Research Institute of Police Science 48:1, 1995, pp. 20-26
- [77] Anderson, R. N., 'Which Came First...The Arcing or the Fire? Review of Auger Analysis of Electrical Arc Residues', Fire and Arson Investigator 46:3, 1996, pp. 38-40
- [78] Satoh, K., Sugisaki, M., Kakizaki, S., Itoh, C., Saitoh, K., and Iwaki, M., 'Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) and Auger Electron Spectroscopy (AES) Applied to the Fire Investigation for Short Circuit', in Proc. 1996 Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg., 1996, pp. 282-285
- [79] Beland, B., 'Further Comments on Arc Bead Examination', The Fire Place [Washington State IAAI Chapter newsletter], 1997, pp. 24-28
- [80] Ettl, B. V., 'Problems with Surface Analysis of Copper Beads Applied to the Time of Arcing', The Fire Place [Washington State IAAI Chapter newsletter], 1997, pp. 21-24
- [81] Howitt, D. G., 'The Surface Analysis of Copper Arc Beads-A Critical Review', J Forensic Science 42, 1997, pp. 608-609
- [82] Henderson, R., Manning, C., and Barnhill, S., 'Questions Concerning the Use of Carbon Content to Identify "Cause" vs. "Result" Beads in Fire Investigations', Fire and Arson Investigator 48:3, 1998, pp. 26-27

- [83] Hirt, D., 'Letter to the Editor: At Best 'Junk Science' and at Worst Deliberately Misleading', *Fire and Arson Investigator* 48: 4, 5, 63, 1998
- [84] Howitt, D. G., 'The Chemical Composition of Copper Arc Beads-A Red Herring for the Fire Investigator', *Fire and Arson Investigator* 48:3, 1998, pp. 34-39
- [85] Reese, N. D., 'Letter to the Editor: Arc Beads, *Fire and Arson Investigator*' 48:4, 1998, pp. 63-64
- [86] Satoh, K., Fukushima, H., Sigeru, S., and Iwaki, M., 'Verification SIMS Applied to the Fire Investigation for Short Circuit', in *Proc.1998 Annual Mtg. of Japan Assn. for Fire Science and Engrg.*, 1998, pp. 336-336
- [87] Lee, E.-P., et al., 'Discrimination between Primary and Secondary on Electric Wires by DAS', *J. Applied Fire Science* 9, 1999/2000, pp. 361-379
- [88] Lee, E., Ohtani, H., Marsubara, Y., Seki, T., Hasegawa, H., and Imada, S., 'Study on Primary and Secondary Molten Marks', in *Proc. 1st Conf. Assn. Korean Japanese Safety Engineering Society, Korean Institute for Industrial Safety*, 1999, pp. 209-212
- [89] Miyoshi, S., 'Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads', presented at 15th Mtg. Intl. Assn. of Forensic Sciences, Los Angeles, 1999
- [90] *VFW Posts & Commercial Union Insurance vs. Western States Construction, Inc.*, Case No. 95L15808, 12th Judicial Circuit, Will County, Illinois, 1999
- [91] Miyoshi, S., 'Internal Cavity Analysis of Electrical Arc Beads', in *Proc. 4th Asia-Oceania Symp. on Fire Science & Technology, Asia-Oceania Assn. for Fire Science and Technology/Japan Assn. for Fire Science & Engineering*, Tokyo, 2000, pp. 653-656
- [92] Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S., and Isao, Y., 'Determination between Primary and Secondary Molten Marks on Electric Wires by DAS', *National Institute of Testing and Evaluation, Kiryu, Gunma, Japan*, 2000
- [93] Anderson R. N., 'What Came First? The Arc Bead or the Fire?', *EC&N* 100, 2001, pp.20-21



- [94] Fitz, M.M., MDE Engineers, private communication, 2001
- [95] Guide for Fire and Explosion Investigations (NFPA 921), Natl. Fire Protection Assn., Quincy MA, 2001
- [96] Kattner, U. R., NIST, private communication, 2001
- [97] Kitamura, Y., and Satoh, K., 'Progress of the Study on Electrical Beads (No. 2)', Japanese J. Science and Technology for Identification 6, Suppl., 105, 2001
- [98] Lee, E.-P., Ohtani, H., Marsubara, Y., Seki, T., Hasegawa, H., Imada, S., and Yashiro, I., 'Study on Discrimination between Primary and Secondary Molten Marks Using Carbonized Residue', Fire Safety J. 37, 2002, pp. 353-368
- [99] Tokyo Fire Department, 'Investigation Section, Research on First and Second Fused Mark Discrimination of Electric Wires', J. Japan Assn. for Fire Science