

ΤΟΜΟΣ
ΣΗΜΕΙΟ

Τ.Ε.Ι - Πάτρας
Τμήμα: Ηλεκτρολογίας

Πτυχιακή Εργασία

Αριθμός 461

«Προστασία ανθρώπων έναντι κεραυνών όταν
εργάζονται σε υπαίθριες βιομηχανικές εγκαταστάσεις ή
εργοτάξια»

Εισηγητές:

Ι. Μαυρογένης

Ε. Πυργιώτη

Σπουδαστές:

Δαρδαμπούνης Νικόλαος

Τσουκάλης Γεώργιος

Πάτρα - Σ 99



ΕΙΣΑΓΩΓΗ 2960



Πρόλογος

Κεραυνοί αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο με επικίνδυνα αποτελέσματα για την ασφάλεια των ανθρώπων αλλά και των κτιρίων.

Ο πρώτος που άνοιξε το δρόμο προστασίας από τους κεραυνούς ήταν ο Βενιαμίν Φραγκλίνος που στα 1783 παρουσίασε το «αλεξικέραυνο» ή πιο σωστά τον κάθετο ιστό απαγωγής κεραυνών. Η εφεύρεσή του παρόλο που διαδόθηκε γρήγορα σε όλο τον κόσμο, δεν παρουσίασε καμία σημαντική εξέλιξη, γιατί ακριβώς δεν είχε κατορθωθεί η ερμηνεία του φαινομένου της εκκένωσης των κεραυνών.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία γίνεται μια εκτενή αναφορά στην προστασία ανθρώπων έναντι κεραυνών, όταν βρίσκονται ή εργάζονται σε υπαίθριες και υπόγειες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και εργοτάξια π.χ. διάνοιξη σηράγγων.

Η εργασία αυτή αποτελείται από επτά κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφουμε τα ηλεκτρικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα του κεραυνού και των σχετικών παραμέτρων του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ασχολούμαστε με τα κυκλώματα και τα ηλεκτρόδια γείωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε σε υπόγειες εγκαταστάσεις όπως ορυχεία και λατομεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται λόγος για την αντίσταση και επαγωγή πλεγμάτων γείωσης ανάλογα με την τροφοδότησή τους για τον ιονισμό του εδάφους και δίνονται διαγράμματα για την πληρέστερη μελέτη τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στην αντικεραυνική προστασία που αφορά προσωπικό που έχει αναλάβει πολιτικό και μηχανικό έργο κατά την διάρκεια κατασκευής αγωγών, που μεταφέρουν φυσικό αέριο σε πετρώδη τούνελ.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την προστασία ατόμων ανάλογα με το είδος του πλήγματος του κεραυνού, τις επιδράσεις και τα συμπτώματά του στο ανθρώπινο σώμα.

Τέλος στο έβδομο κεφάλαιο κάνουμε λόγο για τις προειδοποιητικές συσκευές που ασχολούνται με την πιθανότητα να συμβούν πλήγματα κεραυνών.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	1
Κεφάλαιο 1	6
Ηλεκτρικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα	6
1.1 Ηλεκτρική κατάσταση της γης	6
1.2 Ηλεκτρική συμπεριφορά του σύννεφου	7
1.3 Ορισμοί σχετικοί με τα μεγέθη του κεραυνού	11
1.4 Είδη κεραυνών	12
1.5 Φυσικά χαρακτηριστικά του κεραυνού	15
1.6 Έναρξη της εκκένωσης του κεραυνού	18
1.7 Η φάση του οχετού επιστροφής	20
1.8 Συνδετικός οχετός, απόσταση διάσπασης, αρχή λειτουργίας των αλεξικέραυνων	22
1.9 Ρεύμα του κεραυνού και σχετικοί παράμετροι	26
1.10 Συχνότητα με την οποία συμβαίνουν κεραυνοί	33
Κεφάλαιο 2	38
Το κύκλωμα γείωσης	38
2.1 Γενικά	38
2.2 Τα ηλεκτρόδια γείωσης	44
Κεφάλαιο 3	56
Υπόγειες εγκαταστάσεις	56
3.1 Εγκαταστάσεις κάτω από το έδαφος	56
3.2 Ορυχεία και λατομεία	58

Κεφάλαιο 4	67
Αντίσταση γειώσεων	67
4.1 Σύμβολα	67
4.2 Εισαγωγή	68
4.3 Περιοχή επίδρασης των ηλεκτρικών δικτύων	70
4.4 Εμπειρική φόρμουλα για την ακτίνα δράσης και τους κρουστικούς συντελεστές	72
4.5 Πειραματικές μελέτες	78
4.6 Επίδραση του τροφοδοτούμενου σημείου στην σύνθετη κρουστική αντίσταση	79
4.7 Επίδραση του ιονισμού εδάφους στην σύνθετη κρουστική αντίσταση	80
4.8 Επαγωγή τετραγώνων πλεγμάτων γειώσεις	84
Κεφάλαιο 5	87
Αντικεραυνική προστασία που αφορά προσωπικό που έχει αναλάβει πολιτικό και μηχανικό έργο κατά την διάρκεια κατασκευής αγωγών που μεταφέρουν (φυσικό αέριο) σε πετρώδη τούνελ	87
5.1 Εισαγωγή	87
5.2 Περιγραφή για την τοποθέτηση και τα έργα που πρέπει να γίνουν	88
5.3 Πλήγμα κεραυνού σε βράχο πάνω από το τούνελ	90
5.4 Πλήγμα κεραυνού σε έδαφος κοντά σε αγωγούς θαμμένους έξω από το τούνελ	92
5.5 Επιδράσεις του ρεύματος κεραυνού στο ανθρώπινο σώμα	95
5.6 Υπολογισμός του κινδύνου από την τάση επαφής και την βηματική τάση	96
5.7 Μέθοδος για τη μείωση των κινδύνων	102

5.8 Υπολογισμός του παραμένουτος κινδύνου	104
5.9 Συμπεράσματα	107
Κεφάλαιο 6	108
Προστασία ατόμων	108
6.1 Επιδράσεις ρευμάτων κεραυνού	108
Κεφάλαιο 7	123
Προειδοποιητικές συσκευές	123
Βιβλιογραφία	127

Κεφάλαιο 1

Ηλεκτρικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα

1.1 Ηλεκτρική κατάσταση της γης

Η γη εμφανίζεται μόνιμα φορτισμένη με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο της τάξης των 5×10^5 [C]. Το φορτίο αυτό προκαλεί στην επιφάνεια της γης, υπό συνθήκες καλοκαιρίας, ηλεκτρικό πεδίο με την κατεύθυνση από την ατμόσφαιρα προς την γη με ένταση περίπου 0,13 [kV/m]. Ισοδύναμη ποσότητα θετικού φορτίου παραμένει κατανεμημένη στην ατμόσφαιρα με μεγαλύτερη πυκνότητα στα χαμηλότερα στρώματα. Η παρουσία του κατανεμημένου θετικού φορτίου έχει σαν αποτέλεσμα την προοδευτική μείωση του πεδίου η γη βρίσκεται συνεχώς σε τάση 300 [kV]. Εξαιτίας αυτού του κατακόρυφου πεδίου η γη βρίσκεται συνεχώς σε τάση 300 [kV] σε σχέση με τα ανώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας.

Είναι γνωστό πως ιονισμένα σωματίδια και των δύο προσήμων που παράγονται από κοσμική ακτινοβολία, γήινη ραδιενέργεια και από άλλες αιτίες προσδίδουν στον αέρα ορισμένη αγωγιμότητα. Εξαιτίας αυτής της αγωγιμότητας και του ηλεκτρικού πεδίου της

ατμόσφαιρας, ιόντα και των δυο προσήμων κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα την εξομάλυνση του γήινου πεδίου και κατά συνέπεια την εκφόρτιση της γης. Το γεγονός ότι αυτό δεν συμβαίνει οφείλεται στο ότι η γη δέχεται ταυτόχρονα αρνητικό φορτίο ισοδύναμο μ' αυτό του ρεύματος των θετικών ιόντων. Πιστεύεται πως η κύρια αιτία (πηγή) που τροφοδοτεί τη γη με αρνητικό φορτίο είναι τα ηλεκτρικά σύννεφα και οι κεραυνοί.

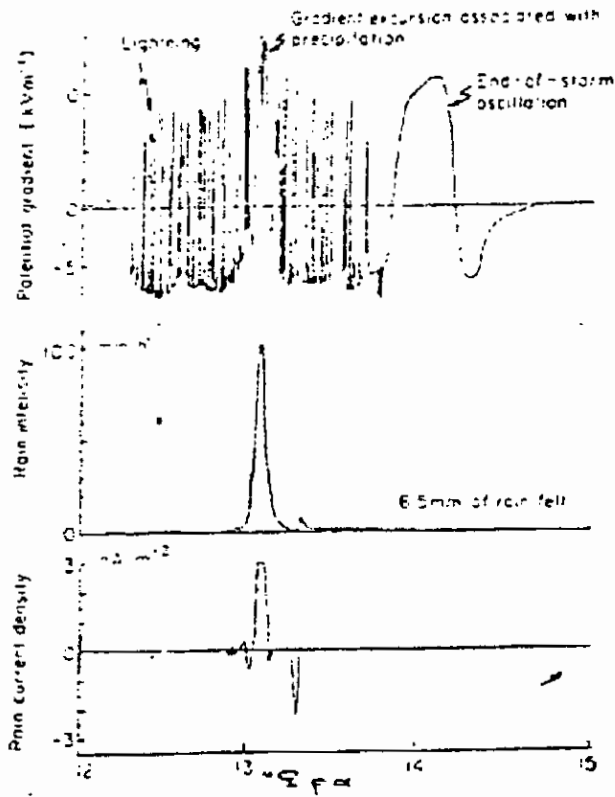
1.2 Ηλεκτρική συμπεριφορά του σύννεφου

Η πιο συνηθισμένη ηλεκτρική εικόνα ενός σύννεφου, είναι ένα ηλεκτρικό δίπολο με θετικό φορτίο στην κορυφή του και αρνητικό στην προς την γη πλευρά του, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί γενικό κανόνα.

Για τον τρόπο συγκέντρωσης του ηλεκτρικού φορτίου στα σύννεφα έχουν διατυπωθεί διάφορες θεωρίες, χωρίς όμως καμία να είναι γενικά παραδεκτή. Οι θεωρίες αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτές που βασίζονται στη φόρτιση σταγονιδίων του νέφους που συμβαίνει μόλις αρχίσει η πτώση τους προς τη γη, και σε αυτές που βασίζονται στη μεταφορά φορτίων σε ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, με ανοδικά ρεύματα που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές.

Το ηλεκτρικό πεδίο ενός σύννεφου με την ηλεκτρική εικόνα που περιγράφηκε, διαταράσσει το ομαλό πεδίο καλοκαιρίας με αποτέλεσμα να προκαλεί την αναστροφή του, έτσι αναστρέφεται και η φορά του ρεύματος καλοκαιρίας που ρέει προς τη γη. Η σταθερά χρόνου αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου ενός σύννεφου είναι περίπου 2 λεπτά, που σημαίνει πως το σύννεφο περνά από την ουδέτερη στην ηλεκτρισμένη κατάσταση σε λίγα μόνο λεπτά.

Με το σχηματισμό ενός ηλεκτρισμένου νέφους το ηλεκτρικό πεδίο καλοκαιρίας, αφού πρώτα αναστραφεί αποκτά με την κατεύθυνση της κακοκαιρίας (από τη γη προς την ατμόσφαιρα), τιμές που φθάνουν τα 10 [kV/m]. Το πεδίο αυτό διαταράσσεται στιγμιαία με κάθε εκκένωση κεραυνού ή εσωτερική του νέφους, στη συνέχεια όμως αποκαθίσταται πάλι στην προηγούμενη τιμή του. Το σχήμα 1 δείχνει ένα τυπικό παλμογράφημα του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της γης κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας.



Σχήμα 1. Τυπικό πλάμογράφημα του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της γης κατά την διάρκεια ηλεκτρικής καταιγίδας. Οι θετικές τιμές του πεδίου αντιστοιχούν στην κατεύθυνση του πεδίου καλοκαιρίας

Όταν το πεδίο που προκαλείται στην επιφάνεια της γης, από την παρουσία ενός ηλεκτρισμένου σύννεφου γίνει αρκετά μεγάλο (μεγαλύτερο από 1,5 έως 2 [kV/m]) αρχίζει ιονισμός από κρούσεις σε αιχμηρές προεξοχές του εδάφους, όπως πολύ ψηλά κτίρια, απαγωγείς κεραυνών κλπ., και θετικά ιόντα μεταφέρονται από τη

γη δια μέσου του αγωγού, στην ατμόσφαιρα. Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται ονομάζεται ρεύμα ιονισμού της προεξοχής (point-discharge current). Αυτό το ρεύμα όπως και τα φορτία χώρου που δημιουργούνται παίζουν σημαντικό ρόλο στην εκκένωση του κεραυνού, ιδιαίτερα στα τελευταία στάδια εξέλιξής του, όπως θα δούμε στα παρακάτω κεφάλαια.

Πάντως πρέπει να σημειώσουμε πως η ταχύτητα αυτών των ιόντων είναι μικρή, συγκρινόμενη με αυτή του ανέμου, κατά την διάρκεια της καταιγίδας και έτσι η κίνησή τους καθορίζεται κύρια από την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε πολλά από τα ιόντα αυτά να διασκορπίζονται στην ατμόσφαιρα. Επομένως η τιμή του ρεύματος είναι συνάρτηση του μεγέθους του ηλεκτρικού πεδίου, του ύψους του αγωγού (αγωγίμου επιφανείας, ενός βρεγμένου κτιρίου, δένδρου κλπ.) από το οποίο παράγεται και από την ταχύτητα του ανέμου. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως για αγωγούς ύψους μερικών δεκάδων μέτρων η τιμή του είναι λίγα [μA], ενώ σε ορεινές περιοχές όπου τα σύννεφα είναι πιο πυκνά μερικά [mA].

Από το σχήμα 1 μπορούμε να δούμε επίσης πως εκκενώσεις στο σύννεφο και προς τη γη μπορούν να παρατηρηθούν, όταν η ένταση του πεδίου στην επιφάνεια της γης αποκτά τιμές της τάξης των 3 [kV/m] και πάνω. Πρέπει εδώ να σημειώσουμε πως όλα τα σύννεφα δεν προκαλούν ηλεκτρικές εκκενώσεις, έστω και αν παρουσιάζουν συνθήκες φόρτισης.

1.3 Ορισμοί σχετικοί με τα μεγέθη του κεραυνού

Πιο κάτω δίνονται μερικοί ορισμοί για τις διάφορες παραμέτρους του κεραυνού που συμφωνούν με αυτούς που έχουν υιοθετηθεί από τον K. Berger.

Πολικότητα κεραυνού. Η εκκένωση ενός «αρνητικού νέφους» προς την γη γίνεται με ένα «αρνητικό κεραυνό» και ενός «θετικού νέφους» με ένα «θετικό κεραυνό».

Πολικότητα του ρεύματος του κεραυνού. Κατά την εκκένωση ενός «αρνητικού νέφους» ρέει προς την γη ένα «αρνητικό ρεύμα» και αντίθετα.

Κατεύθυνση οχετού προεκκένωσης. Ένας «κατερχόμενος οχετός προεκκένωσης» (που συχνά ονομάζεται και «οδηγός οχετός») προχωρεί από το σύννεφο προς το έδαφος, ένας «ανερχόμενος οχετός προεκκένωσης» προχωρεί από το έδαφος προς το σύννεφο. Ένας «ανερχόμενος οχετός σύνδεσης» είναι μια εκκένωση που ξεκινά από το έδαφος και συναντά, σε μία ενδιάμεση θέση μεταξύ σύννεφα και εδάφους ένα κατερχόμενο οχετό.

Πολικότητα του οχετού προεκκένωσης. Η πολικότητα ενός οχετού προεκκένωσης ταυτίζεται με την πολικότητα του φορτίου της θέσης από την οποία ξεκινά. Έτσι, από ένα θετικό σύννεφο, ξεκινά ένας «θετικός οχετός προεκκένωσης» και αντίθετα. Από μία

προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο ξεκινά ένας «αρνητικός οχετός προεκκένωσης».

Πολικότητα του ηλεκτρικού πεδίου. Το ηλεκτρικό πεδίο κάτω από ένα «αρνητικό σύννεφο» ορίζεται σαν «αρνητικό» και το αντίθετο. Σύμφωνα μ' αυτό τον ορισμό, το πεδίο καλοκαιρίας του εδάφους έχει «θετική κατεύθυνση».

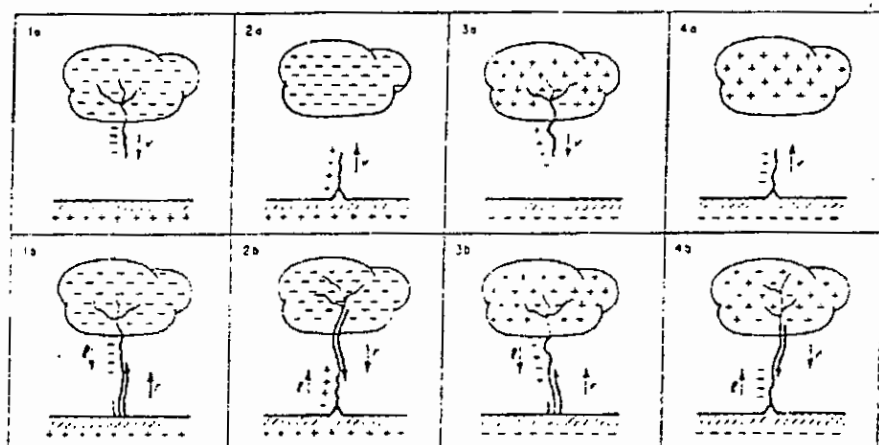
1.4 Είδη κεραυνών

Ο κεραυνός ξεκινά από σημεία υψηλής πεδιακής έντασης. Δύο ετερόσημα φορτία μέσα στο ίδιο σύννεφο ή δύο γειτονικά σύννεφα δημιουργούν στο διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ τους υψηλές πεδιακές εντάσεις που μπορούν να προκαλέσουν μια εκκένωση εσωτερική του νέφους, ή ανάμεσα σε δύο σύννεφα. Συγκέντρωση φορτίου ενός προσήμου σε μία θέση του νέφους και το φορτίο αντίθετου προσήμου, που επάγεται εξαιτίας του, στο έδαφος μια ζώνη αυξημένων πεδιακών εντάσεων. Οι υψηλότερες εντάσεις μέσα στη ζώνη αυτή μπορεί να αναπτύσσονται είτε κοντά στο νέφος είτε -σε περίπτωση που το έδαφος παρουσιάζει μια σημαντική προεξοχή- στην πλευρά του εδάφους. Στην πρώτη περίπτωση, η ενδεχόμενη εκκένωση που θα επακολουθήσει θα αρχίσει από το νέφος (με ένα κατερχόμενο οχετό προεκκένωσης) ενώ στη δεύτερη από το έδαφος (με ένα ανερχόμενο οχετό προεκκένωσης).

Σύμφωνα μ' αυτά οι ακόλουθες τέσσερις περιπτώσεις διακρίνονται για την έναρξη του οχετού προεκκένωσης του κεραυνού που εικονίζονται στο επάνω μέρος του σχήματος 2.

- «Κατερχόμενος αρνητικός οχετός» προεκκένωσης που αρχίζει από ένα αρνητικό σύννεφο (περίπτωση 1α)
- «Ανερχόμενος θετικός οχετός» προεκκένωσης που αρχίζει από μία προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα αρνητικό σύννεφο (περίπτωση 2α).
- «Κατερχόμενος θετικός οχετός» προεκκένωσης που αρχίζει από ένα θετικό σύννεφο (περίπτωση 3α).
- «Ανερχόμενος αρνητικός οχετός» προεκκένωσης που αρχίζει από μία προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο (περίπτωση 4α).

Αν ο οχετός προεκκένωσης που αναπτύσσεται με ένα από τους τέσσερις πιο πάνω τρόπους γεφυρώσει ολόκληρο το διάκενο σύννεφο-γη, επακολουθεί ο οχετός επιστροφής και έτσι ολοκληρώνεται ένας από τους τέσσερις τύπους κεραυνού που εικονίζονται στο κατώτερο μέρος του σχήματος 2 στους οποίους δίνονται οι πιο κάτω ορισμοί.



Σχήμα 2. Είδη κεραυνών α: ανάπτυξη οχετού προεκκένωσης, β: συμπλήρωση του αντίστοιχου είδους κεραυνού με οχετό επιστροφής, γ: οχετός προεκκένωσης, δ: οχετός επιστροφής, ε: κατεύθυνση μετάδοσης

- Περίπτωση 1β: «Κατερχόμενη αρνητική εκκένωση» πηγάζει από ένα αρνητικό σύννεφο με ένα κατερχόμενο οχετό προεκκένωσης και αποτελεί τον πιο συνηθισμένο τύπο κεραυνού που παρατηρείται στα 90% περίπου των περιπτώσεων.
- Περίπτωση 2β: «Ανερχόμενος θετικός οχετός/αρνητική εκκένωση» πηγάζει από μία προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα αρνητικό σύννεφο.
- Περίπτωση 3β: «Κατερχόμενη θετική εκκένωση» πηγάζει από ένα θετικό σύννεφο (πολύ σπάνια περίπτωση).

- Περίπτωση 4β: «Ανερχόμενος αρνητικός οχετός/θετική εκκένωση» πηγάζει από μία προεξοχή του εδάφους κάτω από ένα θετικό σύννεφο.

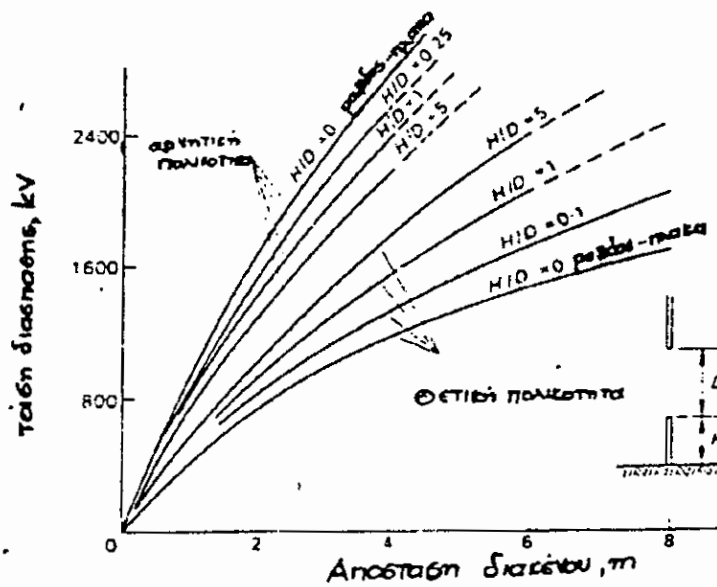
Από τους πιο πάνω τύπους, ο 4β που πρωτοπαρατηρήθηκε στο σταθμό του San Salvatore και μελετήθηκε από τον K. Berger, αποτελεί τον ισχυρότερο τύπο κεραυνού που συνοδεύεται από τις μεγαλύτερες εντάσεις ρεύματος που έχουν καταγραφεί. Φαίνεται πως σε όλες τις υπερυψώσεις του εδάφους ο τύπος 4β αντικαθιστά το 3β και γι' αυτό ο τύπος 3β είναι γενικά σπάνιος. Κατά τον K. Berger οι κεραυνοί αυτοί εμφανίζονται μία μόνο φορά στο τέλος της καταιγίδας.

Η πιο πάνω εικόνα των κεραυνών είναι απλοποιημένη. Στην πραγματικότητα, πριν ο οχετός προεκκένωσης συναντήσει το έδαφος (ή το νέφος) ένας αντίθετος οχετός αναπτύσσεται από την αντίθετη πλευρά που έρχεται να προϋπαντήσει τον κύριο οχετό προεκκένωσης.

1.5 Φυσικά χαρακτηριστικά του κεραυνού

Η εκκένωση του κεραυνού παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με την εκκένωση μεγάλων διακένων που παράγονται σήμερα στο εργαστήριο. Το σχήμα 3 προέρχεται από πειραματικά αποτελέσματα (Anderson και Tangen, 1968), και δείχνει τη

μεταβολή της τάσης διάσπασης, σε σχέση με το μήκος του διακένου, έχοντας σαν παράμετρο το λόγο H/D του ύψους του γειωμένου ηλεκτροδίου προς το μήκος του διακένου.



Σχήμα 3. Κρουστική τάση διάσπασης σε χειρισμούς διακένων ράβδου-ράβδου και ράβδου-πλάκας

Από το σχήμα αυτό μπορούμε να βγάλουμε μερικά συμπεράσματα τα οποία είναι χρήσιμα για τη μελέτη των βημάτων που προχωρεί η εκκένωση του κεραυνού.

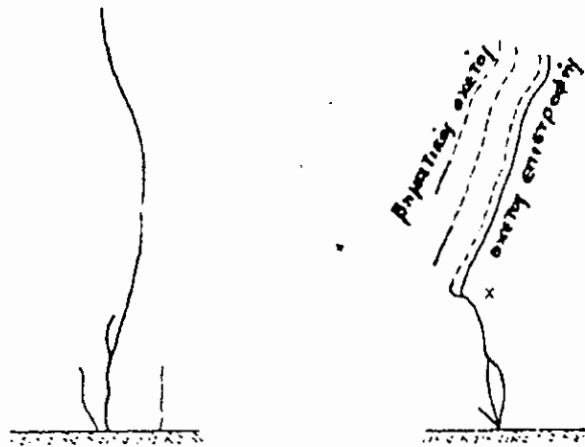
Έτσι μπορούμε πρώτα να δούμε πως η τάσης διάσπασης για αρνητική πολικότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή για θετική

πολικότητα, επομένως οι καταπονήσεις, που προέρχονται από θετικές διασπάσεις (θετικούς κεραυνούς) είναι πιο δυσμενείς όπως αναφέρθηκε και προηγούμενα. Επί πλέον παρατηρούμε πως για σταθερό μήκος διακένου, η τάση διάσπασης μικραίνει, για αρνητική πολικότητα και αυξάνεται για θετική, όσο το γειωμένο ηλεκτρόδιο γίνεται ψηλότερο. Επομένως για εγκαταστάσεις αρκετά μεγάλου ύψους συγκρινόμενου με την Απόσταση Διάσπασης η τάση διάσπασης θα είναι μικρότερη και επομένως το διάκενο εγκατάστασης-σύννεφου θα έχει μικρότερη αντοχή.

Μία τρίτη παρατήρηση είναι ότι η κλίση των καμπύλων φαίνεται να πλησιάζει σε κάποιο ανώτατο όριο όσο το μήκος του διακένου μεγαλώνει. Πάντως η μέση μεταβολή της τάσης, ορίζεται σαν ο λόγος της τάσης διάσπασης, προς την απόσταση διάσπασης και επομένως η «κρίσιμη τάση διάσπασης» είναι περίπου 5 [kV/cm] για αρνητική πολικότητα και 3 [kV/cm] για θετική.

Για τον κατερχόμενο αρνητικό οχετός, ο μηχανισμός που παρατηρείται στο εργαστήριο μοιάζει με αυτό που παρατηρείται σε διάφορες φωτογραφίες κεραυνών. Η βηματική πρόοδος του οχετού του κεραυνού συμπίπτει με τις αναλαμπές που παρουσιάζει ο οχετός προεκκένωσης με το τέλος του μετασχηματισμού κάθε φωτεινού στελέχους, σε ενδοδιάκενο οχετό προεκκένωσης. Από παρατηρήσεις στο Ελβετικό σταθμό παρατήρησης κεραυνών του San Salvatore, διαπιστώθηκε πως τα βήματα επιμήκυνσης του κατερχόμενου αρνητικού οχετού

προεκκένωσης ποικίλουν από 3 μέχρι 50 [m]. Στον ίδιο σταθμό παρατηρήθηκε πως ο θετικός οχετός (κατερχόμενος ή ανερχόμενος) δεν παρουσιάζει ευδιάκριτα βήματα και ότι προχωρεί με ταχύτητα 240 [cm/μs].



Σχήμα 4. Σχηματική παράσταση ενός κεραυνού, όπου φαίνεται το σημείο σύνδεσης του αρνητικού κατερχόμενου οχετού προεκκένωσης και του συνδετικού οχετού. Διακρίνονται οι πολλαπλοί ανερχόμενοι οχετοί

1.6 Έναρξη της εκκένωσης του κεραυνού

Στις παρυφές περιοχών του νέφους με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι ψηλές αυτές εντάσεις συνδυαζόμενες με την μικρή πυκνότητα του αέρα (λόγω του ύψους) και μερικούς άλλους

παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης. Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός ενός οχετού ο οποίος ακολουθεί (με μεγάλες όμως αποκλίσεις) τις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως η εικόνα που δόθηκε για το σύννεφο είναι πολύ γενική, το ίδιο σύννεφο μπορεί να περιέχει θύλακες ετεροσήμων φορτίων έτσι είναι δυνατόν η περιοχή μεγίστων εντάσεων του ηλεκτρικού πεδίου να κατευθύνεται προς κάποιο άλλο θύλακα ετεροσήμου φορτίου ή ακόμα και προς κάποια περιοχή ενός γειτονικού νέφους με επίσης ετερόσημο φορτίο. Ένας οχετός ακολουθώντας αυτή την κατεύθυνση θα προκαλέσει ηλεκτρική σύνδεση και αλληλοεξουδετέρωση των δυο ετεροσήμων φορτίων. Η εξουδετέρωση αυτή συνοδεύεται από έντονη λάμψη (αστραπή) και δυνατό θόρυβο (βροντή) οι συνέπειες της όμως στο έδαφος περιορίζονται σε μία παροδική διαταραχή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που μπορεί να γίνει αισθητή σε δέκτες ραδιοφώνου, τηλεοράσεως, τηλεπικοινωνίες κλπ.

Αν οι γραμμές μέγιστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος ο οχετός θα κατευθυνθεί προς αυτό. Ο μηχανισμός με τον οποίο προχωρεί ο οχετός αυτός που ονομάζεται «οχετός

προεκκένωσης» έχει διερευνηθεί αρκετά καλά τόσο από άμεσες παρατηρήσεις κεραυνών όσο και στο εργαστήριο. Η πρόοδος του πραγματοποιείται όπως ειπώθηκε με διαδοχικά πηδήματα, με μήκος το καθένα μερικά μέτρα ή δεκάδες μέτρα. Η μέση ταχύτητα πρόοδου του οχετού προεκκένωσης είναι περί τα 0,15 [m/μs] (μέτρα ανά μικροδευτερόλαπτα). Η ταχύτητα αυτή όσον και αν φαίνεται τεράστια είναι μικρή σε σύγκριση με την ταχύτητα μεταδόσεως ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (και του φωτός) στο κενό του είναι περί τα 300 [m/μs].

1.7 Η φάση του οχετού επιστροφής

Η διαμήκης πτώση τάσης κατά μήκος του οχετού προεκκένωσης πριν αυτός συναντήσει το έδαφος ποικίλει στις διάφορες θέσεις του (μικρότερη προς το σημείο ενάρξεως του οχετού) η μέση τιμή της όμως είναι μικρότερη από 0,1 [kV/cm]. Έτσι ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται, περίπου σαν μία μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο προς το έδαφος άκρο του είναι μεγάλη και υπερβαίνει κατά πολύ την πεδιακή ένταση που απαιτείται για ιονισμό από κρούσεις (30 [kV/cm]). Γι' αυτό το λόγο, ο οχετός περιβάλλεται διαρκώς από ένα μανδύα κορόνα που επεκτείνεται μερικά μέτρα γύρω από αυτόν. Το πάχος του μανδύα

αυτού είναι μεγαλύτερο στο προς το έδαφος άκρο του οχετού και αυξάνει, όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει το έδαφος. Όταν η κεφαλή του οχετού φτάσει σε μία απόσταση από το έδαφος τέτοια που η μέση πεδιακή ένταση να είναι περί τα 5 [kV/cm], το τελευταίο αυτό μήκος γεφυρώνεται ολόκληρο από κορόνα και μετατρέπεται ταχύτατα (20-30 [μ s]) επίσης σε οχετό. Μ' αυτό το τελευταίο βήμα, που ορίζεται σαν το «τελευταίο πήδημα», το φορτίο της περιοχής του νέφους από όπου άρχισε ο οχετός προεκκένωσης βρίσκεται, μέσω του οχετού προεκκένωσης, ημιαγώγιμα συνδεδεμένο με το έδαφος. Μέσα από την ημιαγώγιμη αυτή σύνδεση εκκενώνεται το φορτίο του νέφους προς το έδαφος με ένα μεγάλο ρεύμα (πολλές δεκάδες ή εκατοντάδες [kA]). Από το ρεύμα αυτό ο οχετός προεκκένωσης θερμαίνεται και αποκτά πολύ μεγαλύτερη λαμπρότητα.

Η θέρμανση του οχετού προεκκένωσης αρχίζει από το άκρο που αυτός συναντά το έδαφος και προχωρεί προς το σημείο εκκινήσεώς του με ταχύτητα μερικά δέκατα της ταχύτητας του φωτός, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από αυτή με την οποία προχωρεί ο οχετός προεκκένωσης. Η φάση αυτή με την οποία συμπληρώνεται η εκκένωση ονομάζεται «οχετός επιστροφής», και η εκκένωση του σύννεφου προς τη γη «κεραυνός».

1.8 Συνδεδειγμένος οχετός, απόσταση διάσπασης, αρχή λειτουργίας των αλεξικέραυνων

Η πιο πάνω περιγραφή του κεραυνού είναι εξιδανικευμένη και αφορά την περίπτωση που ένα σύννεφο βρίσκεται πάνω από ένα απόλυτα επίπεδο έδαφος ή μια επιφάνεια ήρεμου ύδατος. Αν ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο βρεθεί πάνω από μία πολύ υψηλή και σχετικά αιχμηρή προεξοχή του εδάφους (πάνω από 100 ή 150 μέτρα) η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο της προεξοχής αυτής μπορεί να γίνει, εξ απαγωγής, τόσο μεγάλη ώστε ο οχετός προεκκένωσης να αρχίσει από το άκρο της προεξοχής και να κατευθυνθεί προς το σύννεφο. Προκύπτει έτσι ένας «ανερχόμενος» οχετός προεκκένωσης.

Αν οι προεξοχές του εδάφους έχουν σχετικά μικρό ύψος, μερικά μέτρα ή δεκάδες μέτρα, η ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου στο άκρο τους που προκαλείται από την απλή παρουσία του νέφους από το έδαφος, δεν είναι αρκετή για να αρχίσει οχετός προεκκένωσης απ' αυτές. Ο κατερχόμενος όμως οχετός προεκκένωσης, καθώς πλησιάζει το έδαφος, επάγει ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η ένταση του επαγόμενου πεδίου είναι μεγαλύτερη σε προεξοχές του εδάφους. Όταν στο άκρο μιας απ' αυτές τις προεξοχές η ένταση ενισχυθεί αρκετά, θα αρχίσει απ' αυτή ένας ανερχόμενος οχετός προεκκένωσης (συνδεδειγμένος οχετός) που θα κατευθυνθεί προς την κεφαλή του κατερχόμενου

οχετού προεκκένωσης. Με την συνάντηση των δύο οχετών συμπληρώνεται η ημιαγώγιμη σύνδεση νέφους-εδάφους και εξακολουθεί ο οχετός επιστροφής με τον οποίο συμπληρούται ο κεραυνός. Μια τέτοια λοιπόν προεξοχή δημιουργεί ένα «σημείο προτίμησης» για την περάτωση του οχετού προεκκένωσης. Σ' αυτήν ακριβώς την αρχή στηρίζεται η προστασία μιας περιοχής με την γειωμένη μεταλλική ράβδο του αλεξικεραύνου του Franklin.

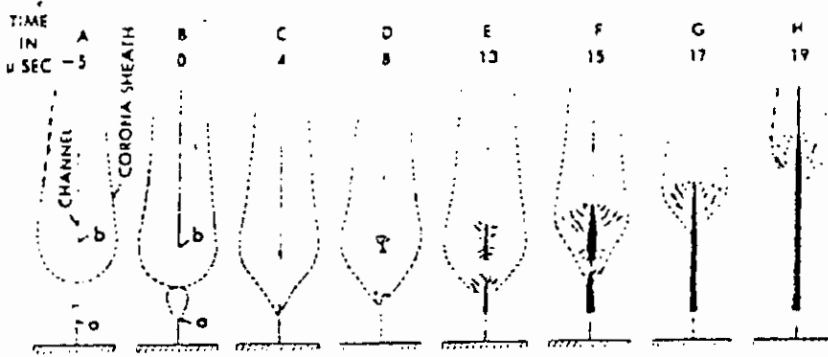
Από τα πιο πάνω γίνεται φανερό πως το «σημείο προτίμησης» για την περάτωση του κεραυνού αποφασίζεται μόνο την τελευταία στιγμή, όταν δηλαδή ο οχετός προεκκένωσης πλησιάζει σε τέτοια απόσταση από το έδαφος ώστε να υπάρξουν συνθήκες συνδέσεως του κατερχόμενου οχετού με κάποιο σημείο του εδάφους. Οι συνθήκες συνδέσεως πληρούνται όταν η μέση πεδιακή ένταση ανάμεσα στη κεφαλή του κατερχόμενου οχετού και του «σημείου προτίμησης» πέσει στα 5 [kV/cm] (με την προϋπόθεση πως ο οχετός προεκκένωσης ξεκινά από περιοχή αρνητικού φορτίου). Η απόσταση στην οποία η πεδιακή ένταση πέφτει στην πιο πάνω τιμή ονομάζεται «απόσταση διασπάσεως» (Α.Δ.) (striking distance) και προφανώς εξαρτάται από την τάση που παρουσιάζει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού προεκκένωσης προς το έδαφος. Η τάση αυτή εξαρτάται με τη σειρά της από το μέγεθος του φορτίου του θύλακα του νέφους από τον οποίο ξεκινά ο οχετός προεκκένωσης. Όσο μεγαλύτερο το φορτίο αυτό τόσο μεγαλύτερη η απόσταση διάσπασης. Οι

συνήθεις τιμές της αποστάσεως διάσπασης ποικίλουν από μερικές δεκάδες μέχρι 150 ή και 200 μέτρα. Η Α.Δ. συνδέεται με το ρεύμα σύμφωνα με τη σχέση:

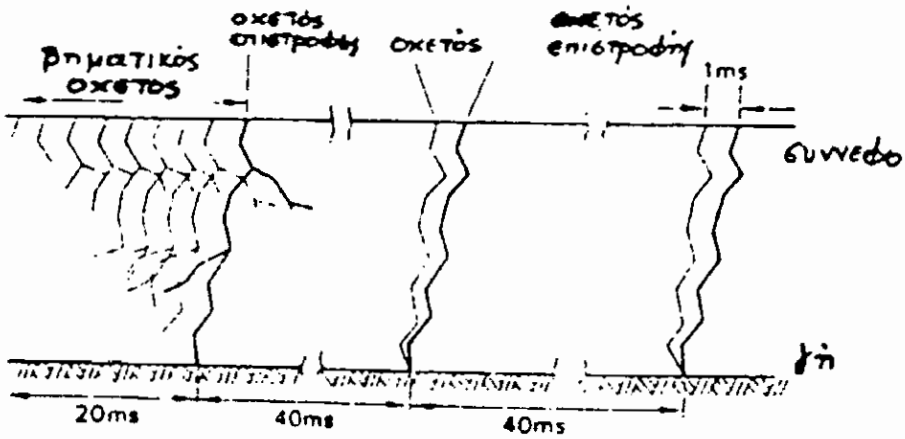
$$r_s = 6,7 \cdot I_0^{0,8}$$

Αυτό το σημείο μας αποκαλύπτει και την αρχή της λειτουργίας των συστημάτων προστασίας από τους κεραυνούς. Έτσι σύμφωνα με τους πιο πάνω συλλογισμούς, αν ένα κτίσμα είναι εφοδιασμένο με μεταλλικές γειωμένες προεξοχές για τις οποίες η απόσταση διαστάσεως προκύπτει πριν από οποιαδήποτε άλλο σημείο του κτίσματος, οι κεραυνοί θα περατούνται κατά προτίμηση στις προεξοχές αυτές και θα διοχετεύονται στο έδαφος χωρίς να προξενούν ζημιά.

Η αρχική εκκένωση του κεραυνού ακολουθείται από επόμενες εκκενώσεις όπως φαίνεται και στο σχήμα 5. Οι εκκενώσεις αυτές διαδέχονται ή μια την άλλη σε μικρά χρονικά διαστήματα και η κάθε μια περιλαμβάνει δικό της συνδετικό οχετό επιστροφής. Συνήθως οι διαδοχικές αυτές εκκενώσεις ακολουθούν την ίδια όδευση που χαράζει η αρχική εκκένωση χωρίς όμως να αποκλείεται και το αντίθετο. Έχει γενικά παρατηρηθεί πως πολλαπλές εκκενώσεις παρουσιάζουν συνήθως οι κατερχόμενοι αρνητικοί κεραυνοί που αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό των κεραυνών, ενώ πολλαπλοί θετικοί κεραυνοί είναι σπανιότατοι.



Σχήμα 5. Δημιουργία ενός κεραυνού (πολλαπλού), όπως φαίνεται από μια φωτογραφική μηχανή κινούμενη προς τα δεξιά



Σχήμα 6. Τα βήματα σχηματισμού του οχετού επιστροφής. Διακρίνεται το κανάλι του οχετού προεκκένωσης και ο σχηματισμός κορόνα γύρω από αυτό

1.9 Ρεύμα του κεραυνού και σχετικοί παράμετροι

Όταν ένα αντικείμενο, όπως ένα κτίριο, μία γραμμή σε ένα υπόγειο τούνελ ή ένα αεροπλάνο που πετά, κτυπηθεί από ένα κεραυνό, το μέγεθος της κατανόησης που θα υποστεί εξαρτάται από το ρεύμα που εκφορτίζεται μέσω αυτού. Έτσι από την άποψη της προστασίας από τους κεραυνούς, το ρεύμα αυτό αντιπροσωπεύει την πιο σημαντική παράμετρο της εκκένωσης του κεραυνού.

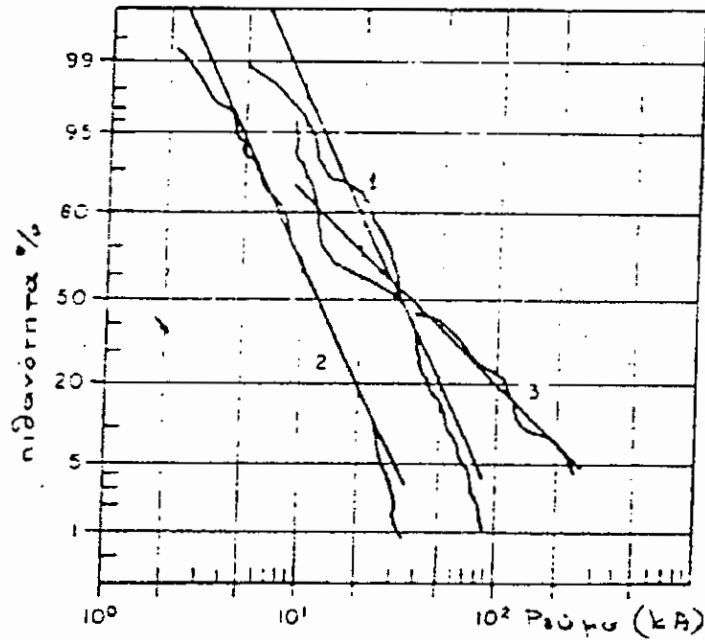
Το κύριο ρεύμα που συνοδεύει μία εκκένωση κεραυνού, οφείλεται στον οχετό επιστροφής. Κατ' αυτόν το ηλεκτρικό φορτίο του κατερχόμενου οχετού εξουδετερώνεται από το αντίστοιχο ετερόσημο φορτίο της γης. Το φορτίο αυτό ρέει μέσα από τον αγωγό προεκκένωσης που έχει συνδέσει προηγουμένως το σύννεφο με τη γη. Το μέγεθος του ρεύματος που αναπτύσσεται κατά τη ροή του φορτίου αυτού εξαρτάται κατ' αρχήν από το μέγεθος του φορτίου του νέφους αλλά επίσης και από την ταχύτητα με την οποία προχωρεί ο οχετός επιστροφής, από τον ήδη ιονισμένο δρόμο που χάραξε ο οχετός προεκκένωσης.

Για την μέτρηση αυτού του ρεύματος όπως και για την απόκτηση μιας αντίληψης για τη μορφή του, τα οποία θα μας βοηθήσουν να βρούμε και τις άλλες σχετικές παράμετρους του κεραυνού όπως διάρκεια ροής κλπ., έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι. Οι παλιότερες στηρίζονται σε μία εκτίμηση του ρεύματος που γινόταν

από τα θερμικά ή μηχανικά αποτελέσματα που προκαλεί το πλήγμα του κεραυνού. Έτσι από την τήξη λεπτών μετάλλων ή τα ίχνη πάνω σε λεπτές μεταλλικές επιφάνειες, γινόταν εκτίμηση της συνολικής ενέργειας του κεραυνού, επίσης εκτίμηση του εύρους του ρεύματος γινόταν από την σύσφιξη που προκαλεί η ροή του ρεύματος για μέσου ενός σωλήνα.

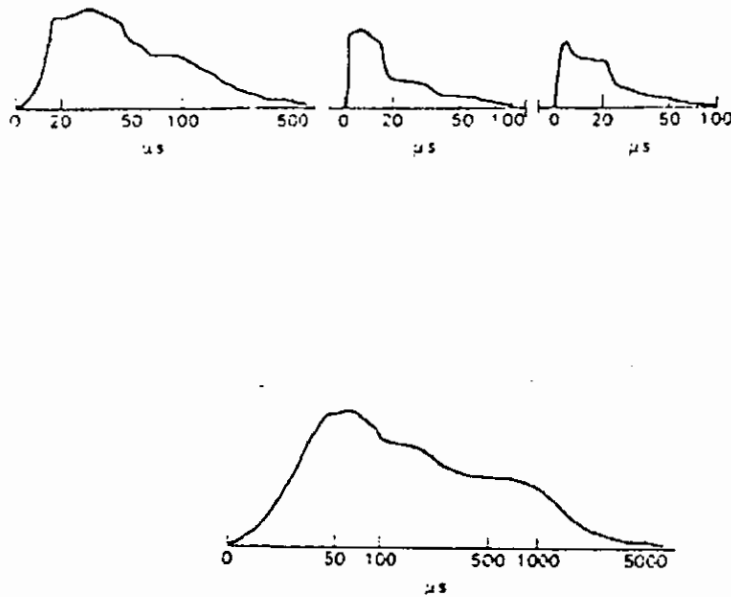
Ένας άλλος τρόπος μέτρησης είναι η μέθοδος της μαγνητικής ζεύξης. Η μέθοδος στηρίζεται στο ότι όταν το ρεύμα του κεραυνού διαρρέει ένα αγωγό, σχηματίζεται γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Αν τοποθετήσουμε κοντά στον αγωγό ένα μαγνητικό υλικό, αυτό θα μαγνητιστεί με την μέγιστη τιμή του πεδίου η οποία εξαρτάται από το μέγιστο ρεύμα που διέρρευσε τον αγωγό. Αν το υλικό παρουσιάζει μεγάλη υστέρηση μπορεί να μεταφερθεί στο εργαστήριο και να παρθούν οι σχετικές μετρήσεις. Τέτοια μαγνητιζόμενα υλικά (magnetic links) τοποθετούνται συνήθως σε επαφή με τα σκέλη μεταλλικών πύργων γραμμών μεταφοράς.

Η ακρίβεια όμως όλων αυτών των μεθόδων είναι πολύ μέτρια γιατί πρώτον δεν μπορούν να μετρήσουν όλες τις περιοχές που εκτείνεται το ρεύμα του κεραυνού, όπως φαίνεται στο σχήμα 7 και δεύτερο γιατί μετρώντας μόνο τη μέγιστη τιμή, δεν γίνεται διάκριση ανάμεσα στο ρεύμα διαφόρων εκκενώσεων ενός πολλαπλού κεραυνού. Γι' αυτό ο πλέον σύγχρονος τρόπος μέτρησης που χρησιμοποιείται, είναι μέσω του παλμογράφου.



Σχήμα 7. Κατανομή ρεύματος κεραυνών κατά Berger. Καμπύλη 1. Πρώτη εκκένωση αρνητικών κεραυνών. Καμπύλη 2. Επόμενες εκκενώσεις αρνητικών κεραυνών. Καμπύλη 3. Θετικοί κεραυνοί

Το βασικό πρόβλημα που υπάρχει με τον παλμογράφο, είναι, το ότι το φαινόμενο είναι σπάνιο και επομένως είναι δύσκολο να παρθούν παλμογραφήματα και συγχρόνως είναι αρκετά ακριβή μέθοδος. Στο σχήμα 8 φαίνονται τα παλμογραφήματα του ρεύματος από ένα πολλαπλό αρνητικό κεραυνό και από ένα θετικό.



Σχήμα 8. Παλμογραφήματα του ρεύματος ενός πολλαπλού αρνητικού κεραυνού (α), και ενός θετικού κεραυνού (β)

Από τα σχήματα 8α, 8β, μπορούμε να βγάλουμε μερικά συμπεράσματα έτσι από το σχήμα 8α βλέπουμε ότι το ρεύμα της πρώτης εκκένωσης αυξάνει γρήγορα και φθάνει στη μέγιστη τιμή κορυφής σε 10-15 [μs]. Κατόπιν το ρεύμα παύει να αυξάνει και αρχίζει να μειώνεται είτε αμέσως είτε μετά από μία πλατιά κορυφή. Η διάρκεια της ουράς του ρεύματος όπου και το ρεύμα μειώνεται, είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να φθάνει τα 20% της τιμής κορυφής σε 200-300 [μs]. Σε πολλαπλούς κεραυνούς, οι ακόλουθες εκκενώσεις έχουν πολύ συντομότερο μέτωπο από την πρώτη

εκκένωση, φτάνοντας στη τιμή κορυφής σε 1 ή 2 [μs]. Η ουρά του σχήματος του ρεύματος των ακολούθων εκκενώσεων είναι παρόμοια με αυτή της πρώτης εκκένωσης. Οι μέγιστοι τιμές του ρεύματος των ακόλουθων εκκενώσεων είναι κατά κανόνα μικρότερες της τιμής της πρώτης.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 7 οι θετικοί κεραυνοί παρουσιάζουν συχνά ψηλότερες τιμές ρεύματος από τους αντίστοιχους αρνητικούς. Από το σχήμα 8 (β) βλέπουμε πως το μέτωπο του ρεύματος των θετικών κεραυνών διαρκεί περισσότερο από αυτό του αρνητικού ρεύματος και φθάνει τιμές 20-50 [μs]. Η ουρά του επίσης είναι μακρύτερη και φθάνει τα 50% της τιμής κορυφής σε 1000 [μs] περίπου.

Από τα σχήματα φαίνεται πως μια ενδιαφέρουσα παράμετρος εκτός από τη μέγιστη τιμή του ρεύματος, είναι και η διάρκεια ροής μιας ορισμένης έντασης ρεύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η διάρκεια τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που συσσωρεύεται μέσα στην αντίσταση που διαρρέει και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη η ελκυόμενη θερμότητα, αφού είναι ανάλογη του

$$\int i^2 dt$$

Για το λόγο αυτό κεραυνοί με μεγάλη διάρκεια ρεύματος, έστω και αν η μέγιστη τιμή του ρεύματος δεν είναι πολύ ψηλή ονομάζονται θερμοί σε αντίθεση με άλλους που μπορεί να αναπτύσσουν

μεγάλα ρεύματα μικρής διάρκειας. Οι θερμοί κεραυνοί είναι πιο επικίνδυνοι μόνο όταν προκύπτει θέμα πυρκαγιάς ή έκρηξης ενώ για τα ηλεκτρικά συστήματα πιο επικίνδυνοι είναι οι κεραυνοί με μεγάλες εντάσεις.

Ο πίνακας 1 συνοψίζει μερικές από αυτές τις παραμέτρους.

Πίνακας 1: Παράμετροι κεραυνού που αρχίζει με κατερχόμενο οχέτό

Number	Parameter	Unit	Percentage exceeding tabulated value		
			95%	50%	5%
<i>Current amplitude (crest) exceeding 2 kA</i>					
101	Negative first strokes and flashes	kA	14	30	80
135	Negative subsequent strokes	kA	4.6	12	30
26	Positive flashes	kA	4.6	35	250
<i>Charge</i>					
93	Negative first strokes	C	1.1	5.2	24
122	Negative subsequent strokes	C	0.2	1.4	11
94	Negative flashes	C	1.3	7.5	40
26	Positive flashes	C	20	80	350
<i>Impulse charge</i>					
90	Negative first strokes	C	1.1	4.5	20
117	Negative subsequent strokes	C	0.22	0.95	4.0
25	Positive flashes	C	2.0	16	150
<i>Time to crest</i>					
89	Negative first strokes	μs	1.8	5.5	14
118	Negative subsequent strokes	μs	0.22	1.1	4.5
19	Positive flashes	μs	3.5	22	200
<i>Maximum di/dt</i>					
92	Negative first strokes	kA μs ⁻¹	5.5	12	32
122	Negative subsequent strokes	kA μs ⁻¹	12	40	120
21	Positive flashes	kA μs ⁻¹	0.2	2.4	32
<i>Time to half-value</i>					
90	Negative first strokes	μs	30	75	200
115	Negative subsequent strokes	μs	6.5	32	140
16	Positive flashes	μs	25	230	2,000
<i>Action integral</i>					
91	Negative first strokes and flashes	A ² s	6.0 × 10 ³	5.5 × 10 ⁴	5.5 × 10 ⁵
88	Negative subsequent strokes	A ² s	5.5 × 10 ²	6.0 × 10 ³	5.2 × 10 ⁴
26	Positive flashes	A ² s	2.5 × 10 ¹	6.5 × 10 ²	1.5 × 10 ³

1.10 Συχνότητα με την οποία συμβαίνουν κεραυνοί

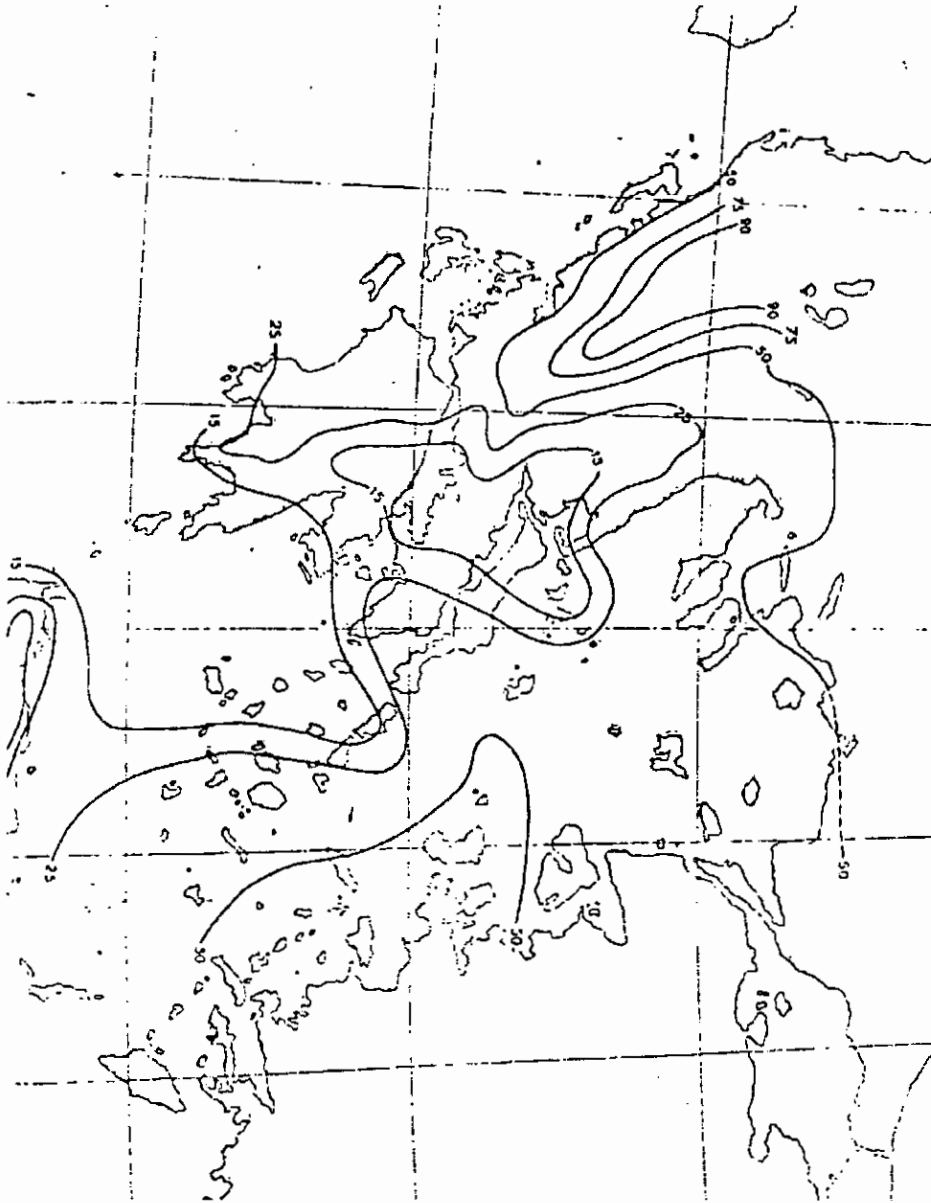
Για την εκτίμηση του κινδύνου που αποτελεί ο κεραυνός για μία περιοχή και συνεπώς για την κατασκευή ενός αποτελεσματικού συστήματος προστασίας, είναι αναγκαία η γνώση του αριθμού N_g , των κεραυνών που πλήττουν μία περιοχή (π.χ. 1 [Km²]), στη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου (1 έτους). Επειδή για τη μέτρηση αυτού του αριθμού απαιτείται εγκατάσταση ειδικών συσκευών (και έχει αρχίσει η κατασκευή μιας σειράς τέτοιων στο Πανεπιστήμιο της Πάτρας), η πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη παρά για περιορισμένες μόνο περιοχές. Αντίθετα η πληροφορία που είναι συνήθως διαθέσιμη από γενικές μετεωρολογικές παρατηρήσεις είναι ο αριθμός T των ημερών καταιγίδας. Το T διαφέρει σημαντικά από περιοχή σε περιοχή και σαν κανόνα μπορούμε να πούμε πως η συχνότητα καταιγίδων συνοδευόμενη από κεραυνούς, είναι μεγαλύτερη στον ισημερινό και μικρότερη στους πόλους. Στο σχήμα 9 δείχνεται χάρτης ισοκεραυνικών καμπύλων της Ελλάδας. Σαν ισοκεραυνικές καμπύλες ονομάζουμε τις περιοχές του ίδιου T .

Πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για να συσχετισθούν ο αριθμός N_g με τον αριθμό T , έχουν διατυπωθεί έτσι διάφοροι πίνακες αναλογίας όπως οι πίνακες 2 και 3.

Για την περίπτωση που έχουμε συνολικό αριθμό εκκενώσεων (σύνεφο-σύνεφο, σύνεφο-γη), ο διαχωρισμός του συνολικού αριθμού N_t των εκκενώσεων, σε εκκενώσεις σύνεφου-σύνεφου N_c και σύνεφου-γης N_g εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος λ και το κλίμα. Έχουν διατυπωθεί δε γι' αυτό το λόγο διάφορες σχέσεις όπως:

$$\frac{N_c}{N_g} = 1,0 + 0,63 T \text{ για } (10 < T < 84)$$

$$\frac{N_c}{N_g} = 4,11 + 2,11 \cos 3\lambda$$



Σχήμα 9. Χάρτης ισοθεραυτικών καμπύλων, οι ημέρες καταιγίδων κατά έτος για την Ελλάδα

Πίνακας 2. Παρατηρηθείσα σχέση ανάμεσα στον αριθμό κεραυνών και τον αριθμό καταιγίδων κατά έτος.

Χωρα	N_g (km^2 ε̄τος)	Πηγή
India	0.17	Aiya (1968)
Rhodesia	0.147	Anderson and Jenner (1954)
Sweden	0.0047*	Müller-Hillebrand (1954)
	(approx.)	
U.K.	aT*	Stringfellow (1974) {a = 2.6 ± 0.2) × 10 ⁻² ; b = 1.9 ± 0.1}
U.S.A. (North)	0.117	Horn and Ramsey (1951)
U.S.A. (South)	0.177	Horn and Ramsey (1951)
U.S.A.	0.17	Anderson <i>et al.</i> (1968)
U.S.A.	0.157	Brown and Whitehead (1969)
U.S.S.R.	0.0367 ^{1,3}	Kolokolov and Pavlova (1972)
	0.17 ^{1,3*}	Kolokoiov and Pavlova (1972)
World (temperate climate)	0.197	Brooks (1950)
World (temperate climate)	0.157	Goldz (1953)
World (tropical climate)	0.137	Brooks (1950)
World	0.257*	Pierce (1966)

Σημείωση: Οι αριθμοί με αστερίσκο αναφέρονται στο συνολικό αριθμό εκκενώσεων, N_t , που περιλαμβάνει τον αριθμό εκκενώσεων προς τη γη N_g και επί πλέον τις εκκενώσεις ανάμεσα σε σύννεφα ή δύο θέσεις του ίδιου σύννεφου. Τέλος οι Anderson και Eriksson (Electra No 69, Μάρτιος 1980) συνιστούν τη σχέση:

$$N_g = 0,023 T^{1,3}$$

Πίνακας 3. Σχέση ανάμεσα στον αριθμό καταιγίδων κατά έτος T και τον συνολικό αριθμό εκκενώσεων N_t .

	Μηνιαία					Ετήσια				
No. of thunderdays	2	5	10	15	20	10	25	50	80	100
Total flash density (km^{-2})	0.2	1	3	6	10	1	4	10	30	50

Πίνακας 4. Σχέση ανάμεσα σε εκκενώσεις νέφος-νέφος προς νέφος γη (N_c/N_g)

Κλίμα	N_c/N_g	
Εύκρατο	1,5	Pierce (1955)
Υποτροπικό	3	Mackerras (1976)
Υποτροπικό	4	Horner (1965)
Τροπικό	9	Aiya and Sonmde (1963)
Τροπικό	6	Horner (1965)
Ξηρό	4	Viemeister (1972)

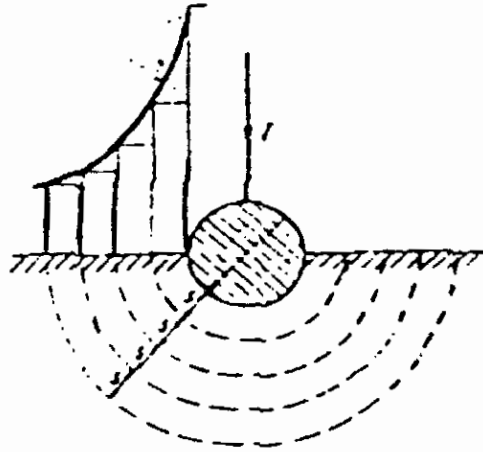
Πάντως όπως μπορούμε να καταλάβουμε οι υπολογισμοί αυτοί κρύβουν μεγάλες στατιστικές προσεγγίσεις, γι' αυτό και κύρια κατεύθυνση σήμερα είναι η προσπάθεια να επιτύχουμε απ' ευθείας μέτρηση του αριθμού N_g .

Κεφάλαιο 2

Το κύκλωμα γείωσης

2.1 Γενικά

Ο σκοπός της γείωσης είναι να κάνει δυνατή την εκφόρτιση του ρεύματος ενός πλήγματος κεραυνού, μέσα στη γη, διαμέσου ενός μεταλλικού μέρους, του ηλεκτροδίου γείωσης, το οποίο είναι θαμμένο στο έδαφος. Η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου αυτού, για ένα δοσμένο ρεύμα εκκένωσης κεραυνού, είναι ο λόγος της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ενός σημείου του ηλεκτροδίου και ενός σημείου του ηλεκτροδίου και ενός σημείου του εδάφους, σε [Volts] προς το ρεύμα εκκένωσης σε [amperes]. Η αντίσταση γείωσης επομένως, είναι η ωμική αντίσταση του περιβάλλοντος το ηλεκτρόδιο, εδάφους και όχι κάποια επιφανειακή αντίσταση του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 10. Η αρχή του υπολογισμού της αντίστασης γείωσης

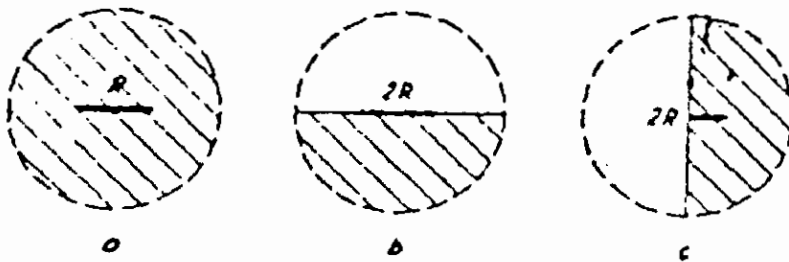
Στο σχήμα 10 το ηλεκτρόδιο είναι μια σφαίρα, η οποία είναι βαλμένη η μισή μέσα στο έδαφος. Το έδαφος χωρίζεται σε φανταστικές ισόπαχες, ομοκεντρικές σφαίρες. Υποθέτοντας ότι το έδαφος είναι ομογενές και έχει ειδική αντίσταση ρ , η διαφορά δυναμικού σε κάθε σφαίρα, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Το άθροισμα τους είναι πεπερασμένο, αν και ο αριθμός τους μπορεί να γίνει άπειρος. Με αυτόν το τρόπο βγαίνει ότι η αντίσταση γείωσης του ηλεκτροδίου είναι:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Η ειδική αντίσταση του εδάφους ρ , δίνει την αντίσταση σε $[\Omega]$, ενός κύβου εδάφους ακμής 1[m] μετρημένη σε δύο αντίθετες πλευρές του κύβου. Επομένως η αντίσταση γείωσης ενός σφαιρικού ηλεκτροδίου είναι ανάλογη της ειδικής αντίστασης του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας αυτού.

Τα σφαιρικά ηλεκτρόδια δεν χρησιμοποιούνται πολύ στην πράξη και χρησιμοποιήθηκαν παραπάνω μόνο για να φανεί η πορεία των υπολογισμών. Η αντίσταση γείωσης, σε ομογενή εδάφη για διαφόρων μορφών ηλεκτρόδια έχει υπολογιστεί, τουλάχιστον προσεγγιστικά. Τα αποτελέσματα δείχνονται στον πίνακα 1 του παραρτήματος 3 (Pesonen, 1960). Στον πίνακα 2 του ίδιου παραρτήματος δείχνονται οι τιμές του ρ για διάφορες μορφές εδάφους, όπως και για το νερό. Από τον πίνακα 1 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η τιμή της αντίστασης γείωσης εξαρτάται κυρίως από την έκταση που απλώνονται τα ηλεκτρόδια και λιγότερα από την επιφάνειά τους. Γι' αυτό το λόγο οι δίσκοι γείωσης, οι οποίοι είναι αντισοικονομικοί, έχουν αντικατασταθεί από τις κάθετα τοποθετημένες ράβδους ή τα οριζόντια τοποθετημένα ηλεκτρόδια, όπως π.χ. ηλεκτρόδια σε μορφή ταινίας.

Το σχήμα 11 δείχνει δύο απλές περιπτώσεις που αφορούν την αντίσταση γείωσης των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 11. Σχηματική παράσταση διαφόρων ηλεκτροδίων. (α) Ταινία τοποθετημένη μέσα στο έδαφος. (β) Ταινία στην επιφάνεια του εδάφους. (γ) Κάθετη ράβδος

Το σχήμα 11 (α) δείχνει ένα αγωγό θαμμένο σε μία μεγάλη, ομογενούς εδάφους, σφαίρα. Η αντίσταση μεταξύ του ηλεκτροδίου και της σφαίρας ας υποθέσουμε ότι είναι R . Αν διαιρέσουμε τη σφαίρα στα δύο, η αντίσταση αυξάνει στα $2R$. Το σχήμα 11 (β) δείχνει πως η αντίσταση του ηλεκτροδίου που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους, είναι διπλάσια της αντίστασης του ίδιου αγωγού, όταν αυτός είναι θαμμένος βαθιά στο έδαφος. Το σχήμα 11 (γ) δείχνει πως η αντίσταση μιας κάθετης ράβδου είναι η ίδια με αυτή της ταινίας του σχήματος 11 (β), παρότι έχει το μισό μήκος της.

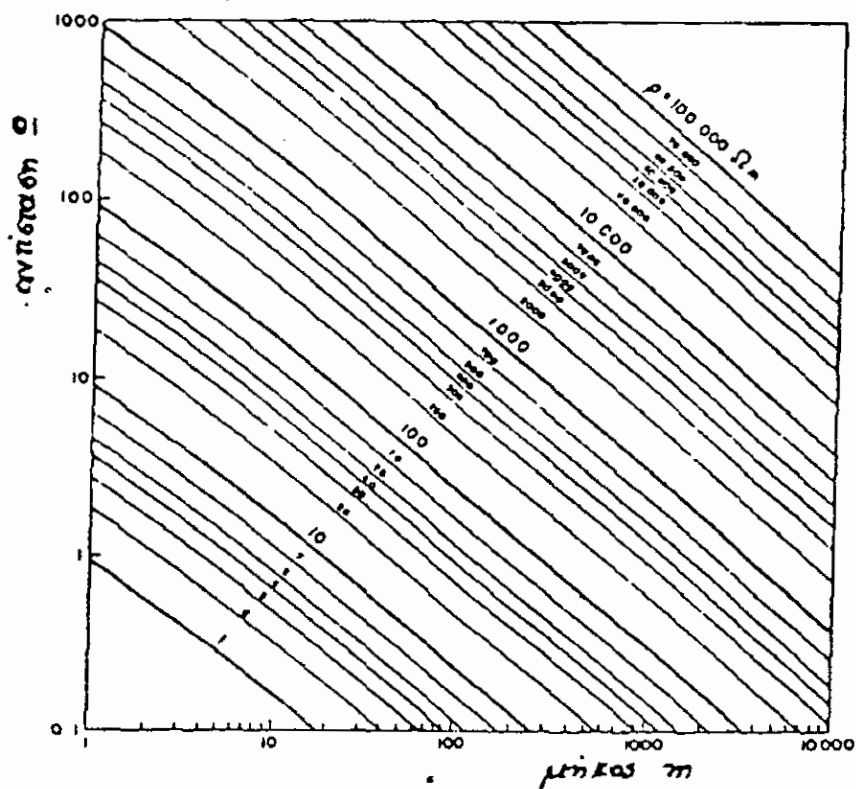
Για να απλοποιηθεί η σχεδίαση ενός οριζόντιου ηλεκτροδίου, το σχήμα 12 δίνει την αντίσταση γείωσης ενός ηλεκτροδίου, κυκλικής διατομής $16 \text{ [mm}^2\text{]}$ τοποθετημένου σε βάθος $0,7 \text{ [m]}$, σαν

συνάρτηση του μήκους και της ειδικής αντίστασης του εδάφους. Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως η αντίσταση γείωσης αλλάζει με την μεταβολή της επιφάνειας που περικλείει το ηλεκτρόδιο, έτσι το σφάλμα που θα προέλθει από την χρησιμοποίηση ενός ηλεκτροδίου διαφορετικής διατομής είναι αμελητέο. Το σχήμα 12 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για ράβδους τοποθετημένους κάθετα μέσα στο έδαφος. Σε αυτή την περίπτωση όπως τα μήκη που δίνονται στο διάγραμμα πρέπει να υποδιπλασιαστούν.

Στο παράρτημα 4 δίνονται και οι μέθοδοι, με την βοήθεια των οποίων υπολογίζονται οι αντιστάσεις γείωσης και για συγκεκριμένα αλλά και για κατανεμημένα ηλεκτρόδια, όπως επίσης και οι μέθοδοι για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης των διαφόρων εδάφων.

Τελειώνοντας αυτή τη παράγραφο πρέπει να σημειώσουμε πως οι τιμές της αντίστασης γείωσης που πρέπει να παρουσιάζουν τα κυκλώματα γείωσης διαφέρουν στους διαφόρους κανονισμούς. Έτσι στους Ολλανδικούς κανονισμούς δίνεται η τιμή των 2,5 [Ω] για την συνολική αντίσταση γείωσης, ενώ στους κανονισμούς της Ν. Αφρικής, η τιμή των 30 [Ω]. Οι Βρετανικοί κανονισμοί προτείνουν την τιμή των 10 [Ω]. Οι διαφορές αυτές δείχνουν την ισχυρή επίδραση, στο καθορισμό της αντίστασης γείωσης, του είδους του εδάφους που κυριαρχεί σε κάθε χώρα. Πάντως οι ενδείξεις αυτές, μας κατατοπίζουν για την περιοχή των τιμών της αντίστασης γείωσης που επιβάλλεται να επιτύχουμε, σε ένα

σύστημα προστασίας. Για την Ελλάδα καλό είναι η τιμή αυτή να μην υπερβαίνει τα 10 [Ω].



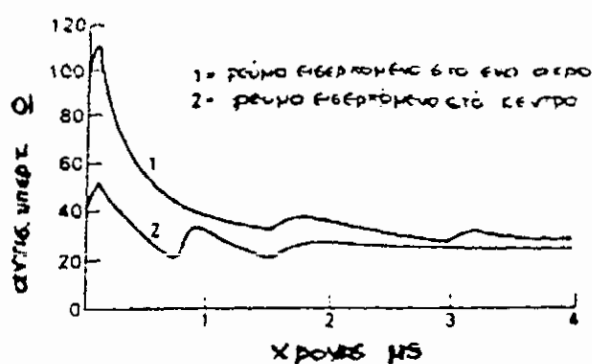
Σχήμα 12. Η αντίσταση γείωσης μιας ταινίας, διατομής (κυκλική) 16 [mm²] τοποθετημένης σε βάθος 0,7 [m]

2.2 Τα ηλεκτρόδια γείωσης

Τα διάφορα βιβλία και οι κανονισμοί που αναφέρονται στις γειώσεις των ηλεκτρικών συστημάτων μας δίνουν αρκετές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων γείωσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για το κύκλωμα γείωσης ενός συστήματος προστασίας από τους κεραυνούς. Εν τούτοις το ηλεκτρόδιο γείωσης, ενός συστήματος προστασίας, πρέπει επιπλέον να εκφορτίσει κρουστικής μορφής ρεύμα και αυτό πρέπει να προσεχτεί ιδιαίτερα.

Το έδαφος συμπεριφέρεται σαν μονωτικό με ανοιχτή σε διάσταση μεταξύ 2 και 5 [kV/cm]. Εάν λοιπόν εκφορτιστεί ένα κρουστικό ρεύμα, διαμέσου ενός συγκεντρωμένου ηλεκτροδίου γείωσης π.χ. μιας κοντής κάθετης ράβδου, είναι δυνατό να προκληθεί διάσπαση του εδάφους. Όταν το έδαφος που περιβάλλει το ηλεκτρόδιο, διασπαστεί, η αντίσταση γείωσής του μειώνεται κάτω από την τιμή της μόνιμης κατάστασης και θα υπάρχουν διασπάσεις με κοντινά μεταλλικά αντικείμενα όπως θα πούμε παρακάτω. Εν τούτοις για τους σκοπούς της προστασίας είναι προτιμότερο, να υποθέσουμε ότι η αντίσταση γείωσης ενός κοντού ηλεκτροδίου, δίνεται από την τιμή της μόνιμης κατάστασης, που μπορεί να μετρηθεί με τις μεθόδους που δείχνονται στο παράρτημα 4.

Από την άλλη όμως, αν το ρεύμα εκφορτιστεί σ' ένα κατανεμημένο αγωγό (δηλαδή αγωγό που απλώνεται σε ορισμένη έκταση), τότε ανεξάρτητα αν είναι τοποθετημένος στην γη ή έξω από αυτή, είτε είναι κάθετος τοποθετημένος είτε οριζόντια, το ηλεκτρόδιο δεν επιδρά με την ωμική του αντίσταση, αλλά με την αντίσταση υπερτάσεων $Z=L/C$, όπου L είναι η επαγωγική και C η χωρητική αντίσταση του αγωγού. Έτσι ένας οριζόντια τοποθετημένος αγωγός, παρουσιάζει ενεργό αντίσταση $150 \text{ } [\Omega]$, εάν το ρεύμα εισέρχεται στο ένα άκρο του. Καθώς το μέτωπο του ρεύματος προχωρά κατά μήκος του αγωγού, εκφορτίζεται σταδιακά στο έδαφος που τον περιβάλλει με αποτέλεσμα η ενεργός αντίσταση να μειώνεται μέχρις ότου μετά από διαδοχικές ανακλάσεις, να φτάσει την τιμή της μόνιμης κατάστασης. Το σχήμα 13 δείχνει την μεταβολή της σύνθετης αντίστασης υπερτάσης, σε σχέση με το χρόνο, ενός αγωγού με ακτίνα $0,5 \text{ } [\text{cm}]$ και μήκος $100 \text{ } [\text{cm}]$ είναι τοποθετημένος σε βάθος $30 \text{ } [\text{cm}]$.



Σχήμα 13. Μεταβολή της αντίστασης υπερτάσης, με το χρόνο, μιας ταινίας

Αν δημιουργηθούν περισσότεροι δρόμοι εκφόρτισης του ρεύματος, π.χ. με κύκλωμα σε σχήμα αγωγού, η αρχική ενεργός αντίσταση μειώνεται δραστικά.

Η αντίσταση μόνιμης κατάστασης ενός ηλεκτροδίου, υφίσταται εποχιακές διακυμάνσεις. Πρέπει λοιπόν να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο είδος του εδάφους που πρόκειται να τοποθετηθεί, όπως επίσης και στις μετακινήσεις που μπορεί να υποστεί π.χ. όργωμα, και που μπορούν να μεγαλώσουν την αντίσταση μόνιμης κατάστασης. Έχουν γίνει προσπάθειες να μειωθεί αυτή η αντίσταση με διάφορα χημικά μέσα, όμως η χρήση τέτοιων μέσων είναι και αντιοικονομική και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διάβρωση που μπορεί να υποστούν τα ηλεκτρόδια.

Η εκλογή του καλύτερου τύπου ηλεκτροδίου, για ένα δοσμένο κτίριο, καθορίζεται κυρίως από την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά του εδάφους που πρόκειται να τοποθετηθεί, όπως είναι η ομογένεια του, η ειδική του αντίσταση, η αγωγιμότητα των διαφόρων επιπέδων του, η επιφάνεια όπου βρίσκεται νερό κλπ. Γι' αυτό το σωστότερο είναι να μετριέται από πριν η ειδική αντίσταση του εδάφους και μετά να αποφασίζεται η μορφή που πρέπει να έχει το ηλεκτρόδιο. Για συνηθισμένα κτίρια, χρησιμοποιείται ένας δακτύλιος από ταινία που περιβάλλει το κτίριο. Για ειδικές εγκαταστάσεις (π.χ. γερανός κλπ.) αποφασίζεται όπως ειπώθηκε η μορφή του ηλεκτροδίου.

Στο σχήμα 14 φαίνονται οι διάφορες μορφές που μπορεί να έχει ένα κύκλωμα γείωσης. Στο σχήμα βλέπουμε πως, ανάλογα τη φύση του εδάφους, μπορούν να χρησιμοποιήσουμε απλές ή πολλαπλές ράβδους ή ηλεκτροδία ταινίας τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν είτε απλά, είτε σε πλέγμα όπως φαίνεται στο σχήμα 14 (β).

Η χρήση των ηλεκτροδίων ράβδου, προτείνεται από πολλούς κανονισμούς. Η αντίσταση γείωσης τους R δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\log_e \frac{4l}{\alpha} - 1 \right) \quad [\Omega]$$

όπου: ρ = ειδική αντίσταση του εδάφους σε $[\Omega \cdot \text{m}]$

l = μήκος της ράβδου σε $[\text{m}]$

α = ακτίνα της ράβδου σε $[\text{m}]$

Η μεταβολή της αντίστασης γείωσης μιας ράβδου, η οποία είναι τοποθετημένη μέσα σε ομοιογενές έδαφος με ειδική αντίσταση $100 [\Omega \cdot \text{m}]$, σε σχέση με το μήκος της δείχνεται στο διάγραμμα 15. Όπως φαίνεται από αυτό δεν υπάρχει σημαντικό κέρδος που να αφορά την μείωση της αντίστασης γείωσης, με τη χρήση ράβδων μεγαλύτερων από 2 ή 3 $[\text{m}]$, ούτε με την αύξηση της διαμέτρου των πάνω από 1,25 $[\text{cm}]$. Αν τώρα χρησιμοποιήσουμε δύο ή περισσότερες ράβδους, σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους,

(μεγάλη συγκρινόμενη με το μήκος τους), η συνολική αντίσταση θα είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού τους.

Οι ράβδοι κυρίως χρησιμοποιούνται σε εδάφη που παρουσιάζουν χαμηλή αντίσταση, σε αντίθεση με τις ταινίες οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εδάφη που παρουσιάζουν μεγάλη αντίσταση.

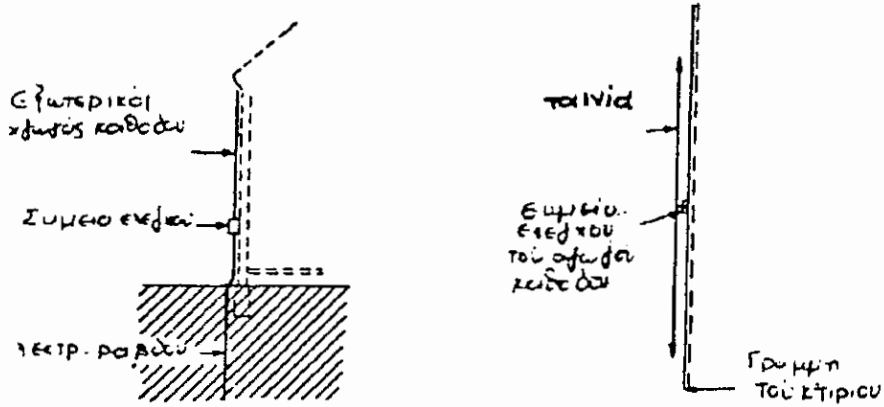
Τα τελευταία πάντως μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με ράβδους όπως γίνεται σε εγκαταστάσεις προστασίας κτιρίων. Η αντίσταση γείωσης για αυτές στην μόνιμη κατάσταση δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left(\log_e \frac{2l}{\sqrt{\alpha \cdot d}} - 1 \right) [\Omega]$$

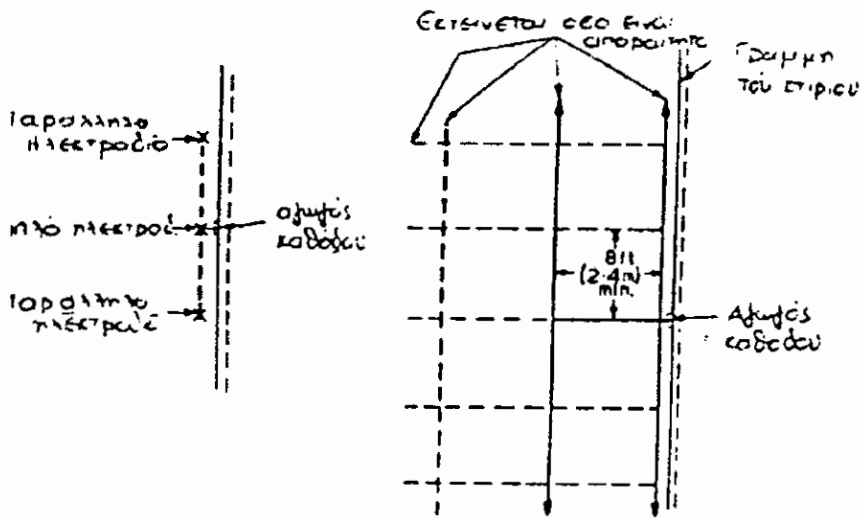
όπου: l = μήκος της ταινίας σε [m]

α = ακτίνα του αγωγού σε [m]

d = βάθος τοποθέτησης σε [m]

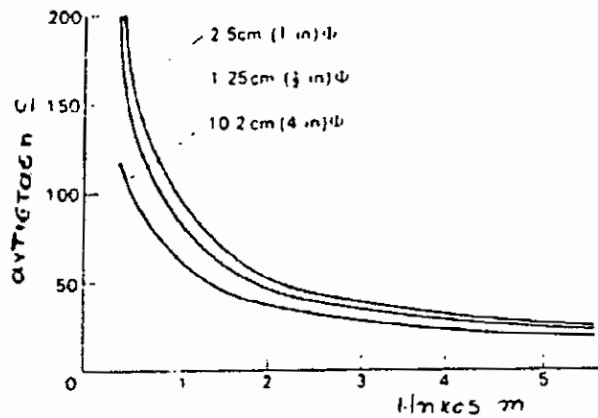


Σκέτες οπλού πλετροδίου ζωής



Σκέτες παράλληλο γα. ζω. ζα. κελύ (ραμμή) ή πλεζματος (όσο λέγονται)

Σχήμα 14. Διάφορες μορφές και σχηματισμοί των ηλεκτροδίων και του κυκλώματος γείωσης



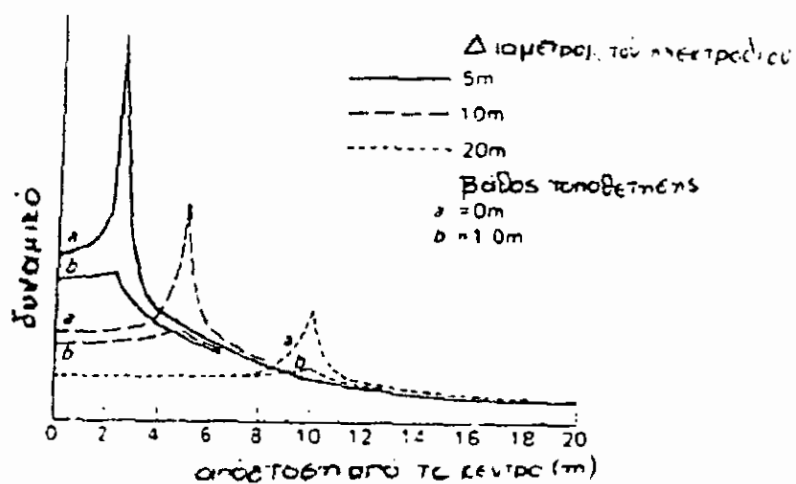
Σχήμα 15 Μεταβολή της αντίστασης γείωσης, για ένα ηλεκτρόδιο ράβδου, σε σχέση με το μήκος του

Το διάγραμμα 17 δείχνεται η μεταβολή της αντίστασης γείωσης για ένα τέτοιο ηλεκτρόδιο, τοποθετημένο σε βάθος 30 [cm], για διαφορετικές τιμές της ειδικής αντίστασης του εδάφους, σε σχέση με το μήκος του ηλεκτροδίου.

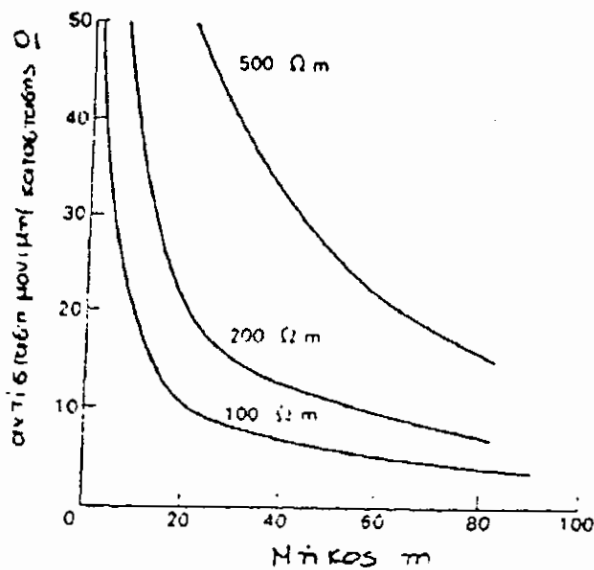
Από το σχήμα φαίνεται ότι πέρα από ένα ορισμένο μήκος δεν υπάρχει σημαντική μείωση της αντίστασης γείωσης.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των ηλεκτροδίων αυτής της μορφής, είναι το ότι μας δίνουν την δυνατότητα, να περιβάλουμε το κτίριο με αυτό, μειώνοντας έτσι τις διαφορές δυναμικού που παρουσιάζεται κατά την εκφόρτιση του ρεύματος ενός κεραυνού, και επομένως μειώνοντας και τους κινδύνους.

Το σχήμα 16 μας δίνει την κατανομή του δυναμικού για ένα τέτοιο ηλεκτρόδιο, σε συνάρτηση με τη διάμετρο της ταινίας και το βάθος που έχει τοποθετηθεί.



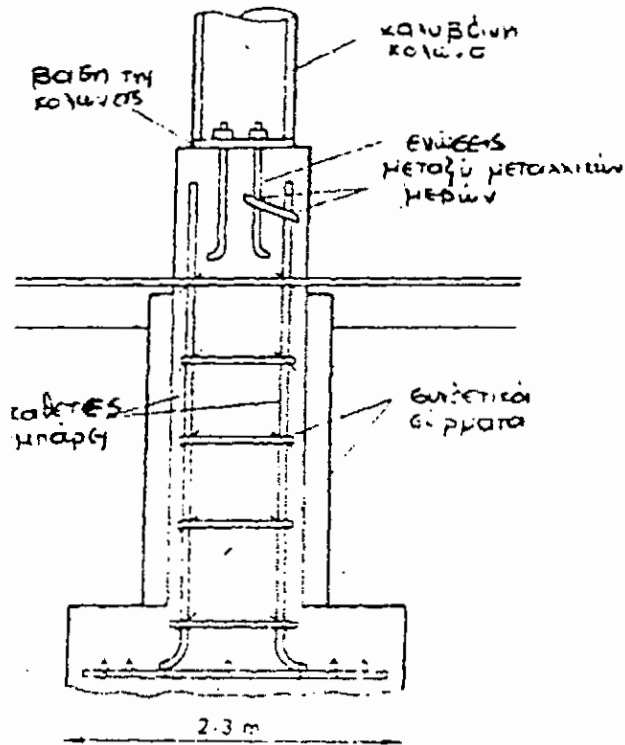
Σχήμα 16. Κατανομή των τάσεων μέσα και έξω από μία ταινία, που περιβάλλει την κατασκευή (ring electrode) για διαφορετικές διαμέτρους και βάθος τοποθέτησης



Σχήμα 17. Μεταβολή της αντίστασης μόνιμης κατάστασης μιας ταινίας σαν συνάρτηση του μήκους της, για διαφορετικές ειδικές αντιστάσεις του εδάφους

Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει η χρήση του σπλισμένου σκυροδέματος, σαν ηλεκτροδίου γείωσης. Το ξερό σκυρόδεμα παρουσιάζει εξαιρετικά μεγάλη αντίσταση, όταν όμως τοποθετηθεί μέσα στο έδαφος, η υγρασία αυτού το διαπερνάει και έτσι η αντίσταση του γίνεται ίδια με αυτή του εδάφους, ακολουθώντας μάλιστα τις εποχιακές διακυμάνσεις. Αυτό αποδεικνύει αυτό που είπαμε προηγουμένως, πως δηλαδή η αντίσταση του εδάφους καθορίζεται από το νερό που υπάρχει μέσα σ' αυτό. Για αυτούς τους λόγους, οι σιδερένιες μπάρες του σκυροδέματος μπορούν να αντικαταστήσουν τα ηλεκτρόδια γείωσης, όπου είναι δυνατό. Για τον σκοπό αυτό πρέπει οι μπάρες να ενώνονται ηλεκτρικά, πριν

μπει το σκυρόδεμα, όπως δείχνεται και στο σχήμα 18. Οι γερμανικοί κανονισμοί επιπλέον, προτείνουν την τοποθέτηση στον πυθμένα, μιας χαλύβδινης ζώνης. Η ζώνη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ηλεκτρόδιο γείωσης για τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, αντικαθιστώντας την χρήση των σωλήνων του νερού που τελευταία αλλάζονται με πλαστικούς.



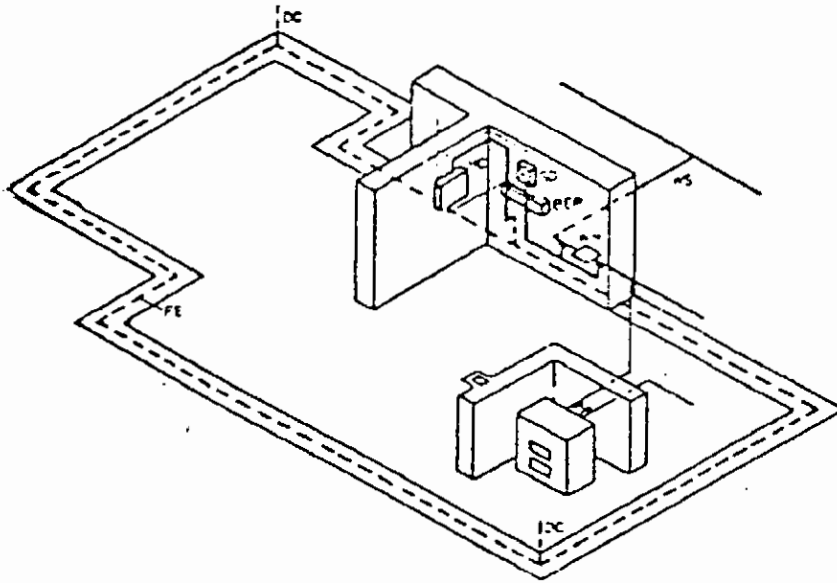
Σχήμα 18. Βάση από οπλισμένο σκυρόδεμα, μιας χαλύβδινης κολώνας

Ένα άλλο σημείο που πρέπει να αναφερθεί αφορά τα μεταλλικά αντικείμενα που βρίσκονται στην περιοχή της γείωσης. Όπως είπαμε το έδαφος συμπεριφέρεται σαν μονωτικό με πεδιακή ένταση διάσπασης 2 έως 5 [kV/cm]. Επομένως αν εκφορτιστεί κάποιο ρεύμα κεραυνού 100 [kA], στο έδαφος όπου υπάρχουν έστω δύο ηλεκτρόδια γείωσης αντίστασης 10 [Ω], τότε η απόσταση που πρέπει να χωρίζει τα ηλεκτρόδια, από άλλα μεταλλικά αντικείμενα για να μην συμβεί διάσπαση, θα πρέπει να είναι, για το έδαφος με αντοχή σε διάσπαση 2 [kV/cm], περίπου 5 [m].

Γι' αυτό το λόγο προτείνεται σύνδεση των μεταλλικών αυτών μερών με το κύκλωμα γείωσης.

Εδώ πρέπει να πούμε πως ακόμη και αν σε ένα κτίριο δεν έχει εγκατασταθεί σύστημα προστασίας από κεραυνούς, είναι καλό να υπάρχει κύκλωμα γείωσης. Αυτό γιατί θα μπορέσει να μας προστατέψει από πιθανούς κινδύνους που μπορεί να δημιουργηθούν, από την εκφόρτιση του ρεύματος ενός κεραυνού, σε κάποιο μεταλλικό μέρος του κτιρίου.

Τελειώνοντας την παράγραφο αυτή δίνουμε το σχήμα 18, όπου φαίνεται η μορφή ενός συνολικού κυκλώματος γείωσης μαζί με την εξίσωση των δυναμικών.



Σχήμα 19. Κύκλωμα γείωσης και εξόσωσης δυναμικών, FE κύκλωμα γείωσης ΔC αγωγός καθόδου, BEP μπάρα για εξίσωση δυναμικών, VS τροφοδοσία νερού, WM μετρητής νερού, HC Συνδέσεις ηλεκτρικού, SD surge diodes

Κεφάλαιο 3

ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

3.1 Εγκαταστάσεις κάτω από το έδαφος

Εργοστάσια που διατρέχουν μεγάλο κίνδυνο από εκρήξεις εγκαθίστανται υπόγεια. Τέτοιες εγκαταστάσεις μπορούν να είναι τελείως προστατευμένες από κεραυνούς, φροντίζοντας όλοι οι αγωγοί παροχής που οδηγούνται στο εργοστάσιο να είναι υπόγειοι και οι σωλήνες εξαγωγής να κατασκευάζονται από μη μεταλλικά υλικά και να εφοδιάζονται με φλογοπαγίδες.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι απαραίτητο όλη η εγκατάσταση να προστατεύεται από τα επικίνδυνα υπόγεια ρεύματα που υπάρχει περίπτωση να ρέουν σ' αυτή. Αυτό μπορεί να γίνει μ' ένα γειωμένο εναέριο κύκλωμα που θα καλύπτει όλη, την επιφάνεια της εγκατάστασης και σε αρκετή απόσταση μακριά από αυτή. Μία απόσταση 10 [m] ανάμεσα στους αγωγούς του εναερίου δικτύου θα είναι επαρκής, και μια απόσταση 5 [m], σύμφωνα με τους κανονισμούς της Δανίας, απαιτείται για πολύ επικίνδυνες υπόγειες εγκαταστάσεις.

Αν ένα τέτοιο εναέριο κύκλωμα γειωθεί σε αρκετό βάθος, η ενεργός του ωμική αντίσταση γείωσης είναι απίθανο να ξεπεράσει κλάσμα του ενός $0,1\Omega$, έτσι ακόμα κι αν ένα εξαιρετικά υψηλό ρεύμα κεραυνού, 400 [A], εκφορτιστεί σ' αυτό, το δυναμικό του σχετικά με τη γη δεν θα ξεπεράσει τις μερικές δεκάδες [kV]. Όπως είπαμε η διηλεκτρική αντοχή σε κρουστική τάση του έδαφους κυμαίνεται μεταξύ 2 και 5 [kV/cm]. Ένα διάκενο λιγότερο από ένα μέτρο μεταξύ του γειωμένου εναερίου συστήματος και οποιουδήποτε τμήματος της εγκατάστασης είναι επαρκές για να αποτρέψει τον κίνδυνο «εσωτερικής» διάσπασης.

Για να είναι το σύστημα προστασίας αποτελεσματικό, οι συνηθισμένοι κανόνες για σύνδεση οποιασδήποτε συσκευής που βρίσκεται μέσα ή πάνω στη εγκατάσταση με το σύστημα προστασίας, πρέπει να παραληφθούν. Αντ' αυτού ολόκληρη η υπόγεια εγκατάσταση, συμπεριλαμβανομένων όλων των μεταλλικών συστημάτων παροχής πρέπει να κρατούνται σε επαρκή απόσταση από το σύστημα προστασίας για να αποφευχθεί διάσπαση κάτω από το έδαφος. Συνδέσεις μέσα σε μία τέτοια κατασκευή πρέπει να γίνονται με τις συνηθισμένες προφυλάξεις για να αποφευχθεί στατικός ηλεκτρισμός.

Μερικές υπόγειες εγκαταστάσεις μπορούν να προστατευθούν μ' ένα εναέριο δίκτυο ανηρτημένο σε ακίδες. Όμως είναι πιθανό να αποδειχθεί περισσότερο δαπανηρό από ένα γειωμένο εναέριο κύκλωμα. Για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις ένα ανηρτημένο εναέριο

δίκτυο δεν είναι ικανοποιητικό διότι το ρεύμα κεραυνού θα έπρεπε να εκφορτισθεί μέσα στο έδαφος, πάνω από την εγκατάσταση που προστατεύεται.

Η προστασία εγκαταστάσεων κάτω από το έδαφος καλύπτεται από τους Κανονισμούς που εκδόθηκαν στην Αυστραλία, Αυστρία, Βρετανία, Ολλανδία, Ελβετία και Η.Π.Α. Σύμφωνα με τους Αυστριακούς Κανονισμούς δεν χρειάζεται καμιά προστασία αν η οροφή της υπόγειας εγκατάστασης καλύπτεται από 2,5 [m] τουλάχιστον εδάφους και αν η αντίστασή του δεν ξεπερνάει τα 200 [Ω m] ακόμα και κάτω από παρατεινόμενη ξηρασία.

3.2 Ορυχεία και λατομεία

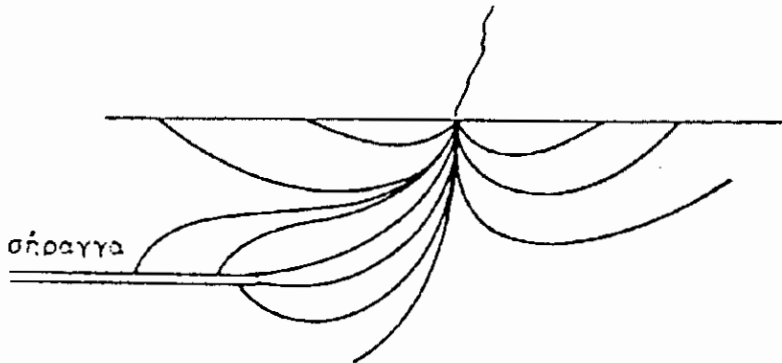
Σοβαρές εκρήξεις και ανθρώπινες απώλειες έχουν συμβεί σε ορυχεία και σήραγγες σε περίπτωση καταιγίδας. Έχοντας υπ' όψη τη πιθανότητα παρουσίας μιγμάτων εκρηκτικών αερίων ή σκόνης, η προστασία από κεραυνούς τέτοιων εγκαταστάσεων είναι ίδια μ' εκείνη των άλλων επικίνδυνων κατασκευών. Οι εργασίες όμως στα λατομεία περικλείουν τον επιπρόσθετο κίνδυνο μιας πρόωρης ανάφλεξης του ηλεκτρικού πυροδότη, είτε από τα ρεύματα των κεραυνών ή από ηλεκτροστατιστικές φορτίσεις, λόγω του πεδίου της καταιγίδας, και αυτές οι πρόωρες αναφλέξεις είναι υπεύθυνες για πολλά θανατηφόρα ατυχήματα.

Όταν ένας κεραυνός πλήξει το έδαφος, το ρεύμα του εκφορτίζεται στη μάζα της γης, όπως φαίνεται στα δεξιά του σχήματος 20. Η τελική κατανομή του ρεύματος εξαρτάται κατά πολύ από την ανομοιογένεια του εδάφους, επειδή το ρεύμα θα ρέει όπου είναι πιο εύκολο δηλαδή κατά μήκος αγώγιμων κοιτασμάτων ή γεωλογικών σφαλμάτων που είναι διάχυτα σε έδαφος με μικρή αγωγιμότητα.

Εξ αιτίας αυτού του γεγονότος, όταν υπάρχει μια σήραγγα μεγάλου μήκους, οι μεταλλικές τροχιές και σωλήνες εξαερισμού και τροφοδότησης θα βραχυκυκλώσουν τμήμα του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στο έδαφος από πλήγμα κεραυνού, με το ίδιο τρόπο όπως ένας απαγωγέας κεραυνών βραχυκυκλώνει τμήμα του ηλεκτρικού πεδίου στον αέρα κάτω από ένα οχετό κεραυνού που πλησιάζει. Όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 20 το ρεύμα του κεραυνού συγκεντρώνεται στην επιφάνεια της σήραγγας. Το βάθος διείσδυσης του ρεύματος κεραυνού είναι κυρίως συνάρτηση της επικρατούσας ειδικής αντίστασης του εδάφους.

Για εδάφη με χαμηλή ειδική αντίσταση το βάθος διείσδυσης φτάνει το πολύ μερικές δεκάδες μέτρα, αλλά για εδάφη ψηλής ειδικής αντίστασης πολύ επικίνδυνα μεγέθη ρεύματος μπορούν να εισχωρήσουν σε βάθη μερικών χιλιομέτρων. Η εμπειρία δείχνει ότι κίνδυνοι από κεραυνούς είναι μεγαλύτεροι σε ορεινές περιοχές αλλά πρακτικά είναι ανύπαρκτοι σε εδάφη μεγάλη αγωγιμότητα ή

σε βιομηχανικές περιοχές όπου μεταλλικές τροχιές και γειωμένοι σωλήνες βοηθούν το ρεύμα κεραυνού να εκφορτιστεί κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 20. Κατανομή των ρευμάτων γης στην επιφάνεια μιας μεγάλης σήραγγας σε έδαφος κακής αγωγιμότητας όταν πληγεί από κεραυνό

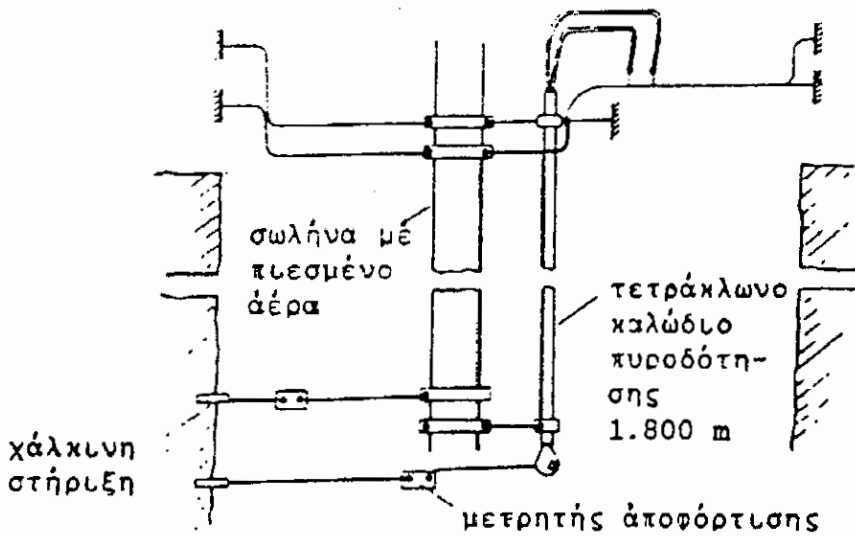
Για την πυροδότηση σ' ένα ορυχείο οι ηλεκτρικοί πυροδοτές συνδέονται σε σειρά, αν τα άκρα τους είναι γυμνά και δεν έχουν ακόμα συνδεθεί με σύρματα εξόρυξης.

Ας υποθέσουμε ότι το ένα γυμνό άκρο του συστήματος ασφαλείας είναι σε τυχαία αγωγή με μια μεταλλική σιδηροτροχιά και το άλλο άκρο με την επιφάνεια του βράχου πάνω από τη σήραγγα, μια διαφορά δυναμικού ασκείται κατά μήκος αυτού του κυκλώματος και το ρεύμα που θα ρέει μέσω των ασφαλειών των πυροδοτών, μπορεί να πυροδοτήσει τα εκρηκτικά φορτία. Εναλλακτικά το ένα ή και τα δύο άκρα του συστήματος ασφαλείας μπορούν να

συνδεθούν (ηλεκτρικά) με μια από τις σιδηροτροχιές ή με το μεταλλικό πλαίσιο του βαγονιού εξόρυξης που εφάπτεται στην επιφάνεια της σήραγγας. Η διαφορά δυναμικού τότε, μεταξύ των γειωμένων σιδηροτροχιών και του βράχου μπορεί να γίνει αρκετά ψηλή για να προκαλέσει διάσπαση στη μόνωση του πυροδότη, έτσι αυτός υπόκειται πάλι σε επικίνδυνο τμήμα του ρεύματος που διαχέεται στην επιφάνεια του βράχου. Τρίτον ο κεραυνός μπορεί να πλήξει μία από τις σιδηροτροχιές ή τους σωλήνες εξαερισμού και τροφοδότησης ή να πλήξει τη γειτονική επιφάνεια του βράχου. Τότε αυτά τα μεταλλικά τμήματα μπορούν να αποκτήσουν ψηλό δυναμικό σχετικά με την επιφάνεια της γης και πιθανόν να διαφέρει αισθητά από το δυναμικό που ασκείται ταυτόχρονα στην επιφάνεια της σήραγγας και τα μεταλλικά κουτιά των πυροδοτών που είναι τοποθετημένα σ' αυτή. Αν ένα από τα σύρματα του πυροδότη τύχει να είναι σε επαφή με ένα γειωμένο μεταλλικό στοιχείο, ένα επικίνδυνο ρεύμα μπορεί να εκφορτισθεί δια μέσου του κυκλώματος του πυροδότη. Η ύπαρξη διαφοράς δυναμικού μεταξύ γειωμένων μεταλλικών αγωγών και βράχου σ' ένα κάθετο άξονα έχει διαβεβαιωθεί με προσωπικές μαρτυρίες και έχει επεξηγηθεί πειστικά με μετρητές εκφόρτισης συνδεδεμένους όπως φαίνεται στο σχήμα 21.

Μερικά καταστρεπτικά ατυχήματα που εξετάστηκαν προσεκτικά τα τελευταία 25 χρόνια, μπορούν να εξηγηθούν με ένα από τους παραπάνω μηχανισμούς και είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι

ενώ συνέβηκαν σε διαφορετικά μέρη του κόσμου, είχαν ένα κοινό σημείο, συνέβηκαν σε εδάφη με μεγάλη ειδική αντίσταση. Ένα τέτοιο ατύχημα, που είχε σαν συνέπεια το θάνατο τεσσάρων εργατών, έγινε στα Highlands της Σκοτίας που χαρακτηρίζεται για τη μεγάλη ειδική αντίσταση του εδάφους.



Σχήμα 21. Περιγραφή διαφορών δυναμικού μεταξύ γειωμένου μετάλλου και βράχου σ' ένα βαθύ πηγάδι εξόρυξης

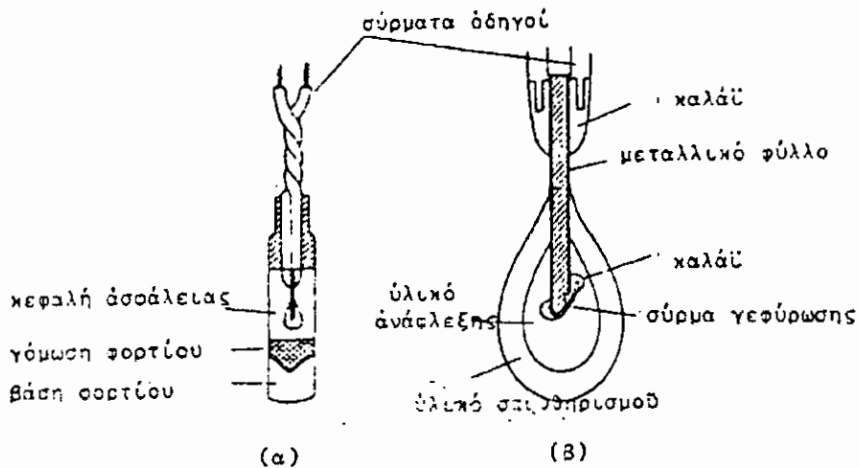
Ένα πλήθος από προστατευτικά μέτρα έχουν εξετασθεί που να εμποδίζουν τη πρόωρη έναυση του πυροδότη, αλλά μερικά ενώ θεωρητικά είναι σωστά, δεν είναι πραγματοποιήσιμα κάτω από τις συνθήκες εργασίας που γίνονται σε εγκαταστάσεις των σηράγγων. Μέτρα που είναι εφαρμόσιμα αναφέρονται στους Κανονισμούς της

Αυστραλίας, Αυστρίας, Ροδεσίας και Νοτίου Αφρικής οι οποίοι καλύπτουν εγκαταστάσεις ορυχείων και λατομείων. Το πιο αποτελεσματικό από αυτά τα μέτρα είναι η αντικατάσταση των προηγούμενων πυροδοτών που ενεργοποιούνται με μερικά [mWs] (milewatt-second) με πολύ λιγότερο ευαίσθητα στοιχεία που χρειάζονται ενέργεια πάνω από 1 [W.S] για να τεθούν σε λειτουργία. Το 1 [W.S] είναι επαρκές για να αποτρέψει ατυχήματα.

Στη προσπάθεια να περιορίσουμε τον κίνδυνο ηλεκτρικής διάσπασης μεταξύ των στοιχείων ή των οδηγών και του κουτιού του πυροδότη, η κεφαλή της ασφάλειας συνδέεται ηλεκτρικά με το κουτί του πυροδότη. Τέτοιοι πυροδότες πρέπει να εφοδιάζονται μ' ένα εξωτερικό μονωτικό περίβλημα αν οι επί μέρους πυροδότες πρέπει να τεθούν σε λειτουργία σε σειρά σύνδεση. Ένας τυπικός πυροδότης φαίνεται στο σχήμα 22.

Πρόωρη ανάφλεξη μπορεί να οφείλεται και σε φορητούς πυροδότες, σε συνθήκες καταιγίδας. Ένας άνθρωπος που φοράει πλαστικές μπότες μπορεί να φορτισθεί σε δυναμικό μερικών [kilovolts] σε ηλεκτροστατικό φορτίο κάτω από ένα φορτισμένο σύννεφο. Όταν αγγίζει ένα γειωμένο πυροδότη, ο παραγόμενος σπινθήρας είναι αρκετός να προκαλέσει ανάφλεξη της ασφάλειας, αλλά αυτός ο κίνδυνος ξεπερνιέται με το σχεδιασμό νέων πυροδοτών, οι οποίοι, σύμφωνα με τους αυστριακούς κανονισμούς, δεν λειτουργούν όταν ένας πυκνωτής 300 [pF]

φορτισμένος σε 20 [kV] συνδεθεί μεταξύ των συρμάτων πυροδότησης και του κουτιού του πυροδότη.



Σχήμα 22. Ηλεκτρικός πυροδότης (α) και λεπτομέρειες της κεφαλής της ασφάλειας (β)

Εκρήξεις ανάλογες μ' εκείνες που οφείλονται σε ρεύματα εξαιτίας των γεωλογικών σφαλμάτων συμβαίνουν και εξαιτίας σφαλμάτων κεραυνού πάνω σε γραμμές μεταφοράς που τροφοδοτούν μία πόλη. Λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση των μεγεθών των ρευμάτων ισχύος που οφείλονται σε σφάλματα ως προς τη γη, εφοδιάζοντας τις γραμμές μεταφοράς με σύρματα γείωσης και αντισταθμητές και μειώνοντας τη διάρκεια ροής του ρεύματος με διακόπτες ταχείας επαναλειτουργίας. Στην Ελβετία καθορίζονται αυστηρά οι συνθήκες κάτω από τις οποίες επιτρέπεται ηλεκτρική

πυροδότηση κοντά σε ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς ή σιδηροτροχιές. Όπου οι συνθήκες αυτές δεν πληρούνται η ηλεκτρική πυροδότηση απαγορεύεται και πρέπει να αντικατασταθεί με μια μη ηλεκτρική μέθοδο.

Σε μερικούς κανονισμούς συνιστάται να ανασταλούν οι εργασίες εξόρυξης και αν ο χρόνος το επιτρέπει να απομακρυνθούν οι πυροδότες κάτω από συνθήκες καταιγίδας. Για το τι απόφαση θα παρθεί μεγάλη ευθύνη έχει ο επικεφαλής του συνεργείου και υποτίθεται ότι πρέπει να υπάρχει τρόπος για να ειδοποιηθούν γρήγορα οι εργάτες σ' όλο το μήκος της σήραγγας. Ο χρόνος έχει μεγάλη σημασία και για να ειδοποιηθούν έγκαιρα χρησιμοποιούνται προειδοποιητικές συσκευές.

Σε πολλά ορυχεία υπάρχει επικίνδυνη ατμόσφαιρα και έτσι ένας σπινθήρας μπορεί να προκαλέσει έκρηξη. Λόγω των σπινθήρων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια εξόρυξης οι άνθρωποι που δουλεύουν κάτω από το έδαφος μπορεί να υποστούν ισχυρά ηλεκτρικά σοκ.

Σπινθηρισμοί πρέπει να αποφευχθούν οπωσδήποτε και σε ορυχεία και σε σήραγγες. Αυτό πρέπει να επιτευχθεί με μια σύνδεση ουσιαστικής γείωσης κοντά ή πάνω στην επιφάνεια του εδάφους και με υπόγειες συνδέσεις.

Η αντιστήριξη ενός ορυχείου που είναι κατασκευασμένη από μέταλλο ή από οπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να γειωθεί. Αν η αντιστήριξη είναι κατασκευασμένη από ξύλινα δοκάρια τότε

πρέπει να εφοδιαστεί μ' ένα πλήρες σύστημα προστασίας από κεραυνούς έτσι ώστε να διασκορπιστεί το μεγαλύτερο δυνατό ρεύμα του κεραυνού μακριά από τα μεταλλικά στοιχεία που υποστηρίζοντας από την αντιστήριξη και τα οποία εφάπτονται στο άξονα του ορυχείου. Όλα αυτά τα μεταλλικά στοιχεία π.χ. σιδηροτροχιές, σκάλες, αεραγωγοί και μηχανισμοί έλξεως πρέπει να συνδεθούν στο σύστημα γείωσης της αντιστήριξης στη στάθμη του εδάφους. Επίσης οι θωρακίσεις των καλωδίων ισχύος πρέπει να μην έλθουν σε επαφή με το σύστημα γείωσης των δικτύων τροφοδοσίας, για να μη μεταφερθούν ρεύματα από σφάλμα ως προς τη γη στο άξονα του ορυχείου. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας στο ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ των γραμμών μεταφοράς και του συστήματος τροφοδοσίας του ορυχείου, καλώδια χωρίς θωράκιση, όπως συνιστούν οι αυστραλιανοί κανονισμοί.

Μέσα σε ορυχεία, λατομεία ή σήραγγες όλες οι μεταλλικές θωρακίσεις των καλωδίων, αεραγωγοί, συστήματα έλξεως και οποιαδήποτε άλλα μεταλλικά εξαρτήματα μεγάλου μήκους, πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους σε τακτά διαστήματα π.χ. κάθε 50 [m]. Από τα παραπάνω πρέπει να αποκλειστούν οι αγωγοί που τροφοδοτούν τους πυροδότες που πρέπει να μονωθούν πολύ καλά και να περιελιφθούν μαζί για να μην αναπτυχθούν επαγώμενες ηλεκτρομαγνητικές τάσεις.

Κεφάλαιο 4

Αντίσταση γειώσεων

4.1 Σύμβολα

G: Ολική κατανεμημένη αγωγιμότητα πλεγμάτων γείωσης.

L: Ολική κατανεμημένη επαγωγή ηλεκτροδίων, πλεγμάτων γείωσης [H]

R: Αντίσταση γείωσης, πλέγματος γείωσης για εναλλασσόμενη τάση 50 [Hz]

ρ : Ειδική αντίσταση εδάφους [Ohm·m]

T: Χρόνος μετώπου του κρουστικού κύματος

A: Κρουστικός συντελεστής

r: Ακτίνα μιας κυκλικής επιφάνειας που έχει την ίδια επιφάνεια που πιάνει το δίκτυο [m]

r_e : Ακτίνα κύκλου που έχει την ίδια επιφάνεια με την ενεργή περιοχή του δικτύου [m].

S: Απόσταση μεταξύ των αγωγών του δικτύου [m]

t: Χρόνος [μ ·sec]

4.2 Εισαγωγή

Η συμπεριφορά των συστημάτων γείωσης υπό συνθήκες εκφόρτισης κεραυνού, ρυθμίζουν, το βαθμό προστασίας που παρέχεται από τα συστήματα γείωσης.

Όταν ένα απότομο ρεύμα τροφοδοτείται σε ένα σύστημα γείωσης η σύνθετη αντίσταση του ορίζεται ως η αναλογία της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται στο τροφοδοτούμενο σημείο ως προς το μέγιστο ρεύμα. Η αναλογία της σύνθετης αντίστασης ως προς την αντίσταση την ωμική αναφέρεται ως κρουστικός συντελεστής. Η σύνθετη αντίσταση των γειωμένων δικτύων εξαρτάται από το μέγεθος και τη μορφή του δικτύου, την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, το σημείο εισόδου του ρεύματος, το μέγεθος και την μορφή κυμάτωσης του ρεύματος και από χαρακτηριστικά του εδάφους.

Όπως και σε άλλες μορφές, η κρουστική αντίσταση του πλέγματος καθορίζεται από την επαγωγή του πλέγματος. Μία εμπειρική φόρμουλα για τον υπολογισμό της επαγωγής τετραγώνων δικτύων τροφοδοτούμενα από το κέντρο ή από μια από τις γωνίες του, παρουσιάζεται. Στην βάση των αναλυτικών ερευνών εμπειρική φόρμουλα έχει αναπτυχθεί για την ενεργή ακτίνα, για τον κρουστικό συντελεστή και την κρουστική αντίσταση. Η αυθεντικότητα από αυτές τις θεωρητικές υποθέσεις έχουν

επαληθευτεί από πειραματικές έρευνες σε μοντέλα, χρησιμοποιώντας ηλεκτρολυτική δεξαμενή.

Μια συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων επιβεβαιώνουν την ορθότητα των θεωρητικών προσεγγίσεων.

Ένα πλέγμα γείωσης μπορεί να απεικονιστεί από την συνηθισμένη μεταβίβαση του κύκλωματος γραμμής από την εκροή κατανεμημένης αγωγιμότητας, επαγωγής, χωρητικότητας και αντίστασης. Η επίδραση της ακολουθούμενης αντίστασης και χωρητικότητας μπορεί να αγνοηθεί. Εάν ένα ενωμένο ρεύμα εφαρμοστεί σ' αυτό το κύκλωμα, η τάση στο σημείο εισόδου δίνεται από:

$$\rho(t) = \frac{I}{G} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n^2 \pi^2 t / GL} \right) \quad (1)$$

Το κρουστικό ρεύμα παρουσιάζεται από ένα κυματισμό έχοντας ένα συνημίτονο μπροστά και μια εκθετική ουρά. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν γίνει σε υπολογιστή IBM 1620.

Η συχνότητα ισχύος της αντίστασης γείωσης του ηλεκτρικού δικτύου έχει θεωρηθεί ίση με την αντίσταση γείωσης μιας κυκλικής επιφάνειας, η οποία δίδεται από την εξίσωση:

$$R = \frac{\rho}{4r} \quad (2)$$

Η επαγωγή των πλεγμάτων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο που παρουσιάζεται στα περιεχόμενα.

Η τάση που αναπτύσσεται στο σημείο εισόδου και εκ τούτου η σύνθετη αντίσταση έχει ορισθεί για την ακόλουθη σειρά των μεταβλητών. Η σειρά των μεταβλητών που αναφέρονται καλύπτουν τις περισσότερες πρακτικές υποθέσεις.

Ειδική αντίσταση εδάφους: 50, 100, 500, 1000 [Ohm·m]

Χρόνος μετώπου κρουστικού κύματος: 1/40, 3/40, 4/10, 4/40, 5/40, 9/40 [μsec]

Μέγεθος πλέγματος: 2X2 [m], 4X4 [m], 5X5 [m], 6X6 [m].

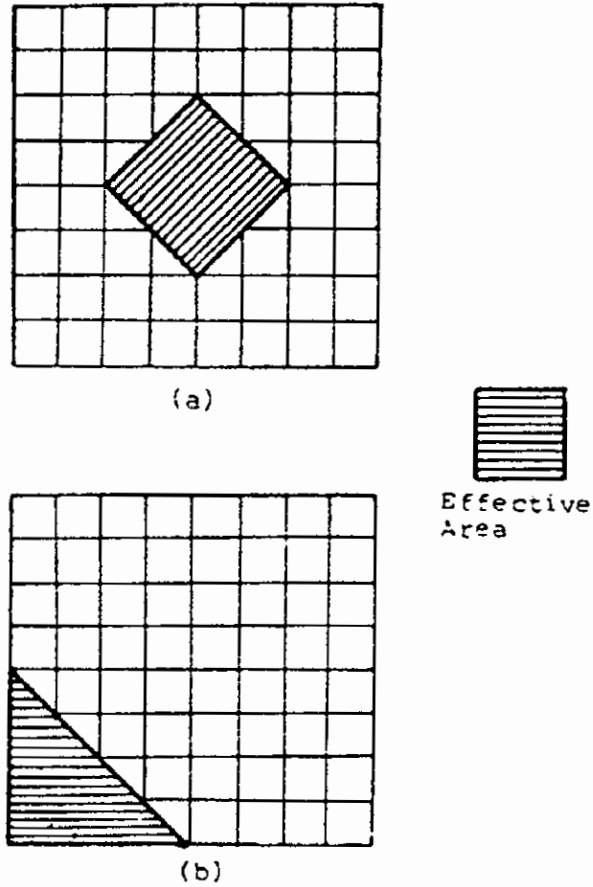
Είναι γνωστό ότι το μέγεθος του αγωγού δεν έχει μεγάλη επίδραση στην κρουστική σύνθετη αντίσταση.

4.3 Περιοχή επίδρασης των ηλεκτρικών δικτύων

Αποτελέσματα δείχνουν ότι καθώς το μέγεθος του πλέγματος αυξάνει η κρουστική αντίσταση μειώνεται έως ότου φτάσει μια περιοχή. Αύξηση του πλέγματος πάνω από αυτή την τιμή έχει ως αποτέλεσμα μια αισθητή διαφορά της κρουστικής αντίστασης. Φαίνεται ότι όταν η κρουστική αντίσταση, έχει μειωθεί σε μια τιμή

3% της τελικής τιμής η αναλογία της μείωσης της αντίστασης, με την αύξηση της περιοχής γίνεται πολύ αργή και ως εκ τούτου αυτή η τιμή θεωρείται τελική τιμή της αντίστασης. Η περιοχή του πλέγματος που ανταποκρίνεται σ' αυτή την τιμή της αντίστασης ορίζεται ως περιοχή επίδρασης.

Λόγω του πεπερασμένου αριθμού των πλεγμάτων η μορφή της περιοχής δράσης ενός μεγάλου πλέγματος κεντρικής τροφοδότησης θα είναι πάντα ένα τετράγωνο και ενός μεγάλου πλέγματος γωνιακής τροφοδότησης ένα τρίγωνο. Αυτές οι περιοχές φαίνονται στο σχήμα 23. Η περιοχή δράσης μπορεί να παρασταθεί από ένα ισότιμο κύκλο που η περιοχή του είναι ίση με την περιοχή δράσης.



Σχήμα 23. Περιοχή δράσης γειωμένων δικτύων (α) τροφοδότηση στο κέντρο
(β) τροφοδότηση στη γωνία

4.4 Εμπειρική φόρμουλα για την ακτίνα δράσης και τους κρουστικούς συντελεστές

Τα σχήματα 24 και 25 δείχνουν τις μεταβολές της κρουστικής αντίστασης σε σχέση με την ακτίνα ενός πλέγματος κεντρικής

τροφοδότησης. Τα σχήμα 26 και 27 δείχνουν τις μεταβολές γωνιακής τροφοδότησης. Αυτά τα σχήμα είναι για πλέγματα μεγέθους 5X5 [m].

Τα δεδομένα στοιχεία που έχουν ληφθεί από Η/Υ δείχνουν ότι η ακτίνα δράσης και ο κρουστικός συντελεστής μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας την παρακάτω εμπειρική φόρμουλα:

$$t_e = K(\rho \cdot T)^{0,5} \quad (3)$$

όπου: $K = (1,45-0,05 \text{ [s]})$ για κεντρική τροφοδότηση πλεγμάτων γείωσης.

$K = (0,6-0,25 \text{ [s]})$ για γωνιακή τροφοδότηση πλεγμάτων γείωσης.

Για

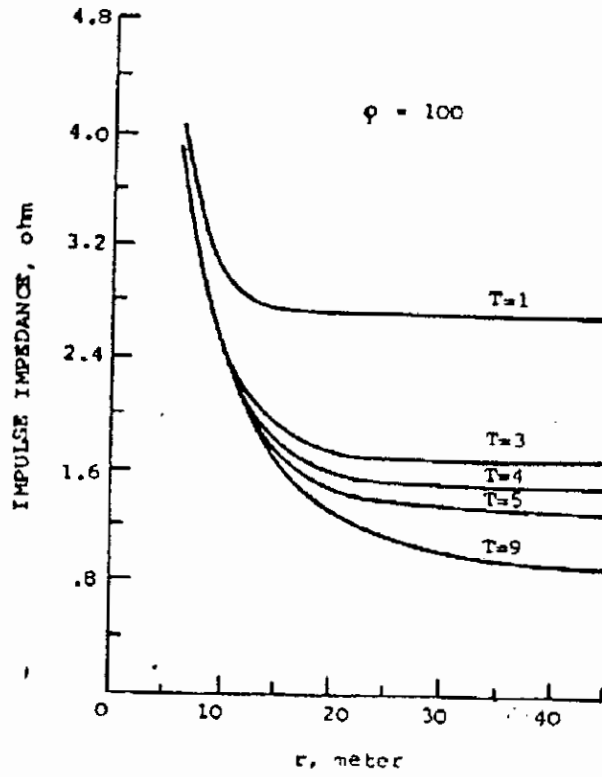
$$r \leq r_e, A = E^{0,333} \left(\frac{r}{r_e} \right)^{2,3} \quad (4)$$

Κρουστική σύνθετη αντίσταση= $A \times R$

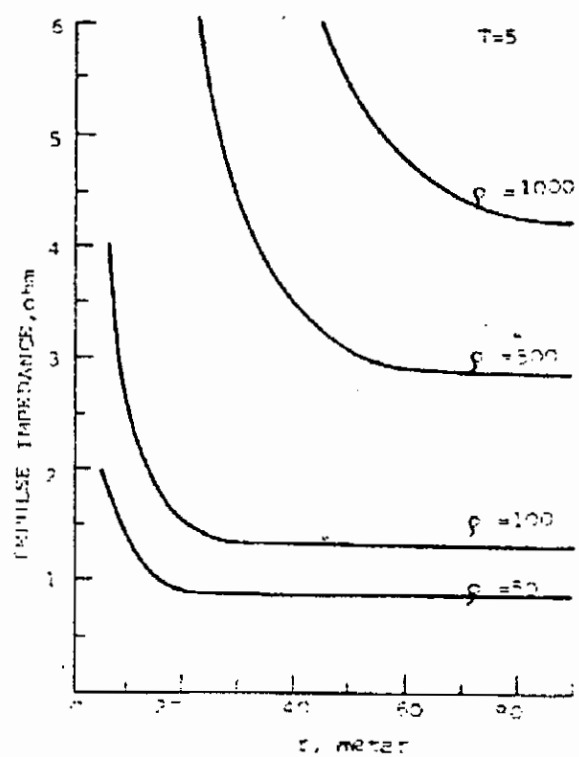
Για

$$r \leq r_e$$

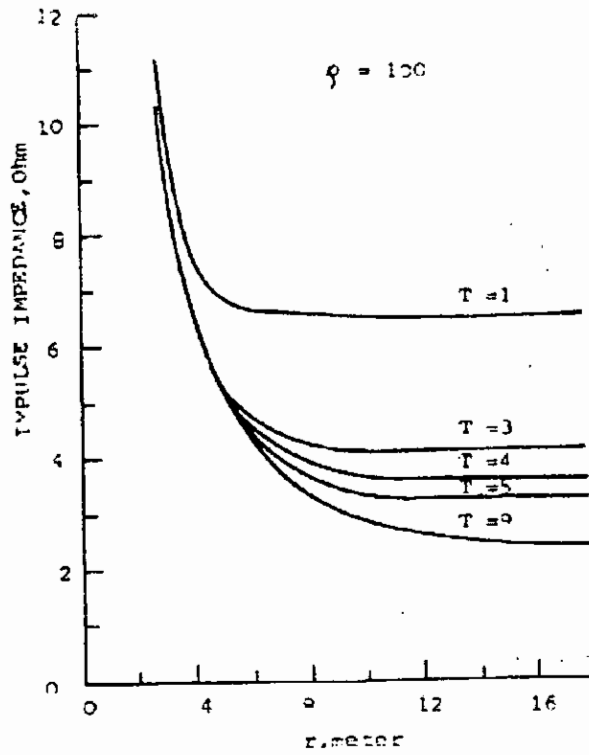
η κρουστική σύνθετη αντίσταση είναι ίδια όπως εκείνη για ακτίνα r_e .



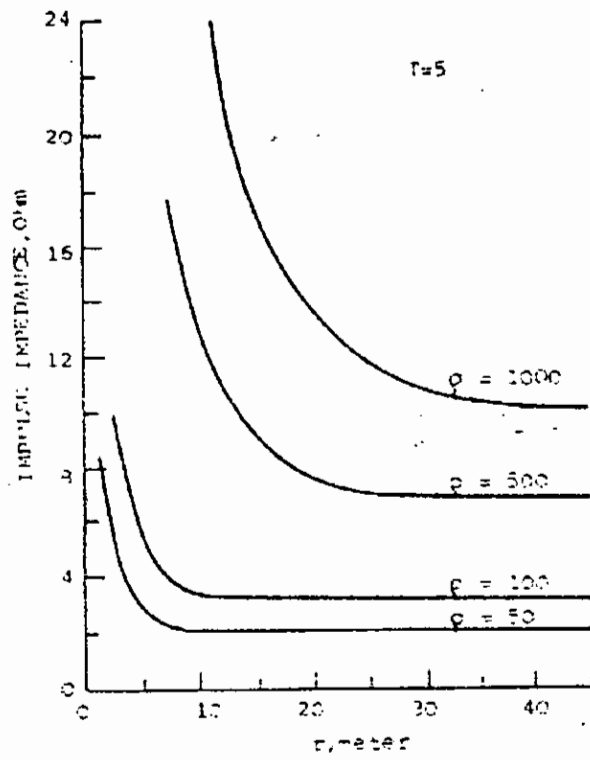
Σχήμα 24. Κρουστική αντίσταση γειωμένου δικτύου τροφοδοτούμενα στο κέντρο για διαφορετικές τιμές κύματος στο χρόνο.



Σχήμα 25. Κρουστική αντίσταση γειωμένου δικτύου τροφοδοτούμενα στο κέντρο για διαφορετικές τιμές αντιστάσεων εδάφους.



Σχήμα 26. Κρουστική αντίσταση γειωμένου δικτύου τροφοδοτούμενα στη γωνία για διαφορετικές τιμές κύματος στο χρόνο.



Σχήμα 27. Κρουστική αντίσταση γειωμένου δικτύου τροφοδοτούμενα στη γωνία για διαφορετικές τιμές αντιστάσεων εδάφους.

4.5 Πειραματικές μελέτες

Μια μελέτη με μοντέλο οδήγησε σε μια έξι μέτρα (διάμετρο) ημισφαιρική ηλεκτρολυτική δεξαμενή για να επαληθεύσει πειραματικά την ορθότητα της μεθόδου των αναλυτικών υπολογισμών. 16 πλέγματα ενός 1 [m²] και 4 [m²] φτιαγμένα από 14 SWG καλώδια χαλκού, χρησιμοποιήθηκαν. Η διαδικασία για αυτές τις έρευνες ήταν η ίδια όπως στην περίπτωση ενός οριζόντιου ηλεκτροδίου. Και η κεντρική και η γωνιακή τροφοδότηση έχουν ληφθεί υπόψιν.

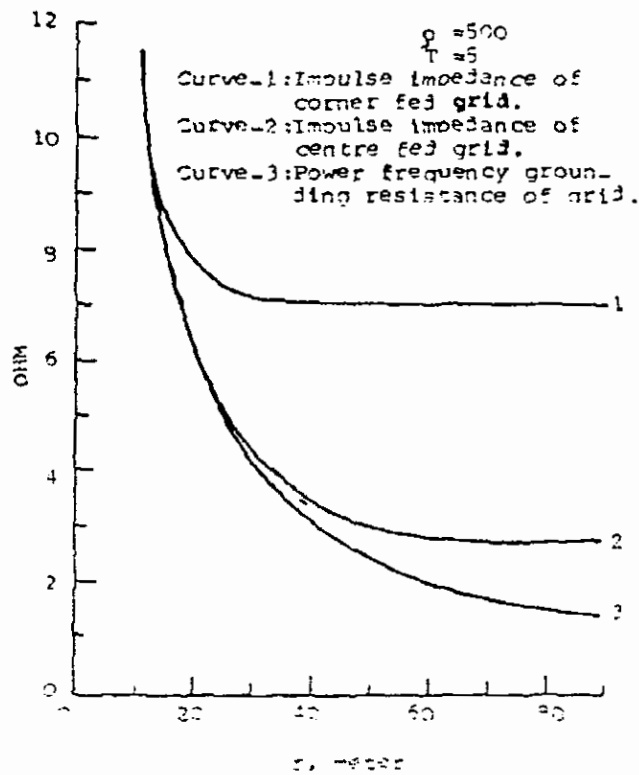
Η θεωρητική αξία της κρουστικής σύνθετης αντίστασης και του κρουστικού συντελεστή έχουν υπολογιστεί. Τα πειραματικά και αναλυτικά αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Σύγκριση αναλυτικών και πειραματικών αποτελεσμάτων

Μέγεθος μοντέλου	Ανθεκτότης του ηλεκτρολύτη	Σημείο τροφοδότησης	Συχνότητα ισχύος αντίστασης	Κρουστική σύνθετη αντίσταση	Κρουστικός συντελεστής	Κρουστική σύνθετη αντίσταση	Κρουστικός συντελεστής
1X1 [m]	19 [Ωm]	Κεντρική	9,5 [Ωs]	9,55 [Ωs]	1,006	10,3[Ωs]	1,08
1X1 [m]	19 [Ωm]	Γωνιακή	9,5 [Ωs]	10,2 [Ωs]	1,074	10,9[Ωs]	1,15
2X2 [m]	19 [Ωm]	Κεντρική	4,8 [Ωs]	5,0 [Ωs]	1,04	5,4[Ωs]	1,12
2X2 [m]	19 [Ωm]	Γωνιακή	4,8 [Ωs]	6,9 [Ωs]	1,42	7,3[Ωs]	1,52
1X1 [m]	7,2 [Ωm]	Κεντρική	3,7 [Ωs]	3,79 [Ωs]	1,025	4,15[Ωs]	1,12
1X1 [m]	7,2 [Ωm]	Γωνιακή	3,7 [Ωs]	4,6 [Ωs]	1,246	5,1[Ωs]	1,38
2X2 [m]	7,2 [Ωm]	Κεντρική	1,9 [Ωs]	2,15 [Ωs]	1,13	2,3[Ωs]	1,21
2X2 [m]	7,2 [Ωm]	Γωνιακή	1,9 [Ωs]	3,32 [Ωs]	1,75	3,5[Ωs]	1,84

4.6 Επίδραση του τροφοδοτούμενου σημείου στην σύνθετη κρουστική αντίσταση

Φαίνεται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα περιεχόμενα ότι η γωνιακή τροφοδότηση γειωμένου πλέγματος έχει μεγαλύτερη επαγωγή απ' ό τι η κεντρική. Σαν αποτέλεσμα η περιοχή δράσης ενός πλέγματος τροφοδοτούμενου γωνιακά είναι μικρότερη από την κεντρική τροφοδότηση. Το σχήμα 28 δείχνει την μεταβολή της σύνθετης κρουστικής αντίστασης με την ακτίνα του πλέγματος, για κεντρική και γωνιακή τροφοδότηση. Η συχνότητα ισχύος της αντίστασης γείωσης δεν επηρεάζεται από το τροφοδοτούμενο σημείο. Φαίνεται ότι η μια κεντρική τροφοδότηση πλέγματος παρουσιάζει πολύ λιγότερη σύνθετη κρουστική αντίσταση συγκρινόμενη με την γωνιακή.



Σχήμα 28. Κρουστική σύνθετη αντίσταση δικτύου τροφοδοτούμενη στο κέντρο και στη γωνία

4.7 Επίδραση του ιονισμού εδάφους στην σύνθετη κρουστική αντίσταση

Η επίδραση του ιονισμού του εδάφους είναι πολύ έντονη στα σημεία ηλεκτροδίων και των υπόλοιπων ράβδων. Σε μακριά οριζόντια ηλεκτρόδια το ρεύμα διασκορπισμού ανά μονάδα μήκους δεν είναι τόσο μεγάλο, ώστε έτσι ο ιονισμός παίζει μικρό

ρόλο στην επίδραση της σύνθετης κρουστικής αντίστασης. Σε γειωμένα πλέγματα για υποσταθμούς υψηλής τάσης, το ολικό μήκος των γειωμένων αγωγών είναι πολύ μεγάλο. Σαν αποτέλεσμα το ρεύμα διασκορπισμού ανά μονάδα μήκους είναι πολύ μικρό και συνεπώς η επίδραση του ιονισμού εδάφους είναι σχεδόν αμελητέα.

Ο Vainer και ο Giudice έχουν αναφέρει μερικά αποτελέσματα πειραμάτων ώστε να ερευνήσουν την κρουστική συμπεριφορά των πλεγμάτων γείωσης. Σε μερικά από τα αποτελέσματα ο κρουστικός συντελεστής είναι μικρότερος από την μονάδα κάτι που δείχνει ότι παρουσιάζεται ιονισμός στο έδαφος. Όμως μια λεπτομερή εξέταση των αποτελεσμάτων αυτών δείχνει αυτό να συμβαίνει μόνο στην περίπτωση μικρών πλεγμάτων γείωσης τοποθετημένα σε εδάφη με πολύ μεγάλη αντίσταση. Για εδάφη με $100 [\Omega \cdot \text{m}]$ ειδική αντίσταση εδάφους, η πραγματική περιοχή ενός πλέγματος μπορεί να είναι περίπου $2.000 [\text{m}^2]$.

Η μεγαλύτερη περιοχή δράσης για ένα χρόνο μετώπου του κρουστικού κύματος $4 [\mu/\text{s}]$ είναι $1800 [\text{m}^2]$. Η κατανομή του κρουστικού ρεύματος θα είναι έτσι γενικώς ανομοιόμορφος.

Η μέγιστη τάση αιχμής που μπορεί να φτάσει ένας υποσταθμός, μέσω μιας γραμμής μεταφοράς ορίζεται σε 1,2 φορές της κρουστικής τάσης διάσπασης της μόνωσης της γραμμής. Έτσι για ένα σύστημα $220 [\text{kV}]$ η μέγιστη τάση αιχμής θα είναι $1700 [\text{kV}]$. Για τις συνηθισμένες γραμμές μεταφοράς τα χαρακτηριστικά της

αντίστασης και της εκφόρτισης ενός αλεξικέραυνου, το μέγιστο ρεύμα που προκαλεί αυτή η αιχμή θα ξεπεράσει τα 10 [kA].

Λαμβάνουμε υπόψιν ένα τετράγωνο πλέγμα γείωσης με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Ειδική αντίσταση εδάφους: 100 [Ohm·m]

Περιοχή γείωσης: 2000 [m²]

Ακτίνα γείωσης: 1 [cm]

Μέγεθος πλέγματος: 5X5 [m].

Ακόμη και για την ακραία περίπτωση ενός αλεξικέραυνου συνδεδεμένου στη μια γωνία του πλέγματος, η μέγιστη τιμή τάσης στην επιφάνεια του πλέγματος δεν είναι επιθυμητό να ξεπεράσει τα 5 [kV/cm]. Για άλλες τοποθετήσεις αλεξικέραυνου η τιμή πρέπει να είναι ακόμα λιγότερη.

Η περιοχή δράσης, ενός πλέγματος αλλάζει με την ίδια αναλογία όπως και η ειδική αντίσταση (του εδάφους). Το ολικό μήκος των πλεγμάτων γείωσης, επίσης αλλάζει περισσότερο ή λιγότερο με την ίδια αναλογία. Σαν αποτέλεσμα η πεδιακή τιμή της τάσης στην επιφάνεια του αγωγού για άλλες αντίστασης εδάφους είναι επίσης επιθυμητό να είναι ίδια. Αφού η κρίσιμη πεδιακή ένταση διάσπασης E είναι 10-20 [kV/cm], ο ιονισμός του εδάφους δεν είναι πιθανός να συμβεί.

Το μέγιστο κρουστικό ρεύμα το οποίο μπορεί να συμβεί από ένα απευθείας χτύπημα κεραυνού στον υποσταθμό θα είναι πολύ υψηλότερο (περίπου 100 [kA]). Έτσι ένα χτύπημα κεραυνού που προσκρούει στο κέντρο του παραπάνω πλέγματος γείωσης θα προκαλέσει μια μέγιστη τάση κλίσης εδάφους 8 [kV/cm]. Εάν το χτύπημα προσκρούσει σε άλλο μέρος είναι απίθανο να φτάσει την κρίσιμη τιμή.

Είναι γεγονός ότι ένα απευθείας χτύπημα κεραυνού στον υποσταθμό είναι πιθανόν να συμβεί μόνο στα εναέρια γειωμένα καλώδια, του υποσταθμού. Τα καλώδια αυτά συνδέονται στη θεμελιακή γείωση (κατασκευή) του υποσταθμού. Έτσι σχεδόν όλο το πλέγμα γείωσης θα είναι υπό την επίδραση τέτοιων χτυπημάτων.

Από την παραπάνω αναλυτική εξέταση, μπορεί να βγει το συμπέρασμα ότι ο ιονισμός εδάφους δεν είναι δυνατόν να συμβεί σε πραγματικά πλέγματα γείωσης για τα συνηθισμένα μεγέθη των ρευμάτων κεραυνών.

Συμπεράσματα

1. Προτείνεται μια εμπειρική φόρμουλα για να υπολογίσουμε την επαγωγή των τετραγώνων πλεγμάτων.
2. Μόνο περιορισμένη περιοχή του πλέγματος γείωσης γύρω από το σημείο τροφοδότησης έχει επίδραση στον έλεγχο της

κρουστικής σύνθετης αντίστασης. Η περιοχή επίδρασης ενός τετραγώνου πλέγματος εκτείνεται όταν $RT/L = 0,65$.

3. Ο κρουστικός συντελεστής και εκ τούτου η κρουστική σύνθετη αντίσταση πλέγματος γείωσης μπορεί να οριστεί με την εξίσωση (4)
4. Μια τροφοδότηση στο κέντρο του γειωμένου πλέγματος έχει πολύ λιγότερη κρουστική σύνθετη αντίσταση απ' ό,τι η γωνιακή τροφοδότηση.
5. Η επίδραση του ιονισμού εδάφους σε γειωμένο πλέγμα είναι πολύ μικρή και μπορεί έτσι να αγνοηθεί.
6. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σ' αυτό το κείμενο προσφέρουν μια απλή και χρήσιμη μέθοδο, ώστε να οριστεί η περιοχή δράσης, ο κρουστικός συντελεστής και η κρουστική σύνθετη αντίσταση τετράγωνου γειωμένου πλέγματος.

4.8 Επαγωγή τετραγώνων πλεγμάτων γειώσεις

Η επαγωγή τετραγώνων πλεγμάτων έχει οριστεί με τις παρακάτω προϋποθέσεις.

1. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι υψηλότερο όπου το ρεύμα συγκεντρώνεται περισσότερο π.χ. γύρω από τον αγωγό. Έτσι η επαγωγή δίνεται κυρίως από την κατανομή του ρεύματος

στους αγωγούς που αποτελέσουν το πλέγμα. Η επίδραση του ρεύματος στο έδαφος είναι αμελητέα.

2. Η διαρροή του ρεύματος θεωρείται αμελητέα. Όλο το ρεύμα που εισέρχεται στο τροφοδοτημένο σημείο, είναι συγκεντρωμένο στα ξεχωριστά απομακρυσμένα σημεία του πλέγματος.
3. Μεταβολή της ακτίνας του αγωγού που αποτελείται το πλέγμα γείωσης έχει αμελητέα επίδραση στην επαγωγή του πλέγματος. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για έναν αριθμό γειώσεων με διαφορετικό αριθμό πλεγμάτων και διαφορετικών αποστάσεων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επαγωγή της γείωσης κυρίως εξαρτάται από: α) Το μήκος των στοιχείων των πλεγμάτων, β) τον αριθμό των πλεγμάτων, γ) το σημείο τροφοδότησης του ρεύματος.

Μια μελέτη των αποτελεσμάτων 2 και 3 δείχνει ότι η επαγωγή ενός τετραγώνου πλέγματος γείωσης μπορεί να βρεθεί από την εμπειρική εξίσωση:

Επαγωγή πλέγματος = (Επαγωγή ενός στοιχείου) x D

όπου D: Μια εμπειρική σταθερά, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τον αριθμό των πλεγμάτων και του σημείου τροφοδότησης του ρεύματος στη γείωση. Οι τιμές του D δίνονται στον πίνακα 2.

Έχει βρεθεί ότι η επαγωγή της γείωσης με δεδομένες διαστάσεις μειώνεται καθώς αυξάνει ο αριθμός των πλεγμάτων. Η μείωση

της επαγωγής είναι γρήγορη όταν ο αριθμός είναι κάτω από 16 και αμελητέα για πάνω από 64 πλέγματα. Για τον υπολογισμό της επαγωγής μιας γείωσης με αριθμό πλεγμάτων πάνω από 64 η γείωση μπορεί να θεωρηθεί ότι μόνο 64 πλέγματα.

Πίνακας 2. Τιμές συντελεστή

Αριθμός πλεγμάτων	Σημείο τροφοδότησης από κέντρο	Σημείο τροφοδότησης από γωνία
4	0,326	2,04
16	0,570	3,75
36	0,570	5,28
64	1,05	7,15

Κεφάλαιο 5

Αντικεραυνική προστασία που αφορά προσωπικό που έχει αναλάβει πολιτικό και μηχανικό έργο κατά την διάρκεια κατασκευής αγωγών που μεταφέρουν (φυσικό αέριο) σε πετρώδη τούνελ

5.1 Εισαγωγή

Κίνδυνος από καταστροφές σε προσωπικό που εργάζεται σε βραχώδη τούνελ και στην παρουσία αγωγών που μεταφέρουν φυσικό αέριο σε μεγάλη απόσταση, μπορεί να παρουσιαστεί όταν ο κεραυνός χτυπήσει στην κορυφή του βουνού πάνω από το τούνελ και επίσης από κεραυνό ο οποίος έχει χτυπήσει τον αγωγό που μεταφέρει φυσικό αέριο έξω από το τούνελ. Κατά τις επισκευές το ρίσκο να πάθουν σοκ οι άνθρωποι είναι πολύ μεγάλο, και γνωρίζουμε ότι σε μερικές περιπτώσεις ο κίνδυνος καταστροφών σε φυσιολογικές συνθήκες μπορεί να ξεπεράσει τα όρια που έχουν δοθεί από τα σάνταρς. Κάποια μέτρα

προστασίας πρέπει να τροποποιηθούν αλλάζοντας τα είδη υπάρχοντα μέτρα που έχουν οριστεί και οριοθετώντας τη μεγαλύτερη τάση, που μπορεί να προστατέψει κατά μήκος τους αγωγούς που μεταφέρουν φυσικό αέριο μέσα στο τούνελ.

Η εξάπλωση του φυσικού αερίου λόγω αυξημένης χρήσης του για θέρμανση ή ηλεκτρική ενέργεια από τους ανθρώπους, οδηγεί στην ανάγκη να αυξηθούν οι αγωγοί που (μεταφέρουν) ή εισάγουν φυσικό αέριο.

Αρκετοί αγωγοί φυσικού αερίου περνούν από τις Άλπεις και μερικοί απ' αυτούς μπορεί να χρειαστεί να αυξηθεί, στο μέλλον, η διάμετρος του από 0.8 [μ.] σε 1,2 [μ.]

5.2 Περιγραφή για την τοποθέτηση και τα έργα που πρέπει να γίνουν

Έξω από τα βραχώδη τούνελ οι αγωγοί που μεταφέρουν φυσικό αέριο, με την δική τους εξωτερική κάλυψη από πίσσα, είναι θαμμένοι στο έδαφος περίπου σε 1 [μ.] βάθος, και είναι προστατευμένοι ενάντια στη διάβρωση (των σωλήνων) με καθοδική προστασία.

Τα τούνελ, στα βραχώδη όρη μπορούν να ανασκάψουν μηχανικά ή να ανατιναχθούν με εκρηκτικά. Εδώ μας ενδιαφέρουν τα τούνελς μεταξύ 2 και 6 [km].

Βασιζόμενος στην μηχανική συμπεριφορά του βράχου, η βραχώδης επιφάνεια μπορεί να απογυμνωθεί ή να ενισχυθεί από ένα σιδερένιο πλέγμα και μια δεσμίδα συγκολλητικής επένδυσης ή περιστασιακά από ένα λεπτό ενισχυμένο τοίχο από μπετό, αν και το δάπεδο είναι πάντα σκεπασμένο από ένα λείο στρώμα από μπετόν.

Μέσα στα τούνελ, οι ασάλινοι αγωγοί είναι βαμμένοι και κατασκευασμένοι γύρω-γύρω με μονωτική υποστήριξη από ένα στρώμα νεοπρενίου ή κατασκευασμένοι περιφερειακά με περιμετρική υποστήριξη.

Τα τμήματα που διασταυρώνονται μέσα στα τούνελ είναι αρκετά μεγάλα ώστε να επιτρέπουν την τοποθέτηση και την συγκόλληση των αγωγών, τόσο καλά όσο το προσωπικό που επιθεωρεί και συντηρεί να περπατά στη μια πλευρά των ασάλινων αγωγών μεταφέροντας λεπτά τμήματα αγωγών.

Στις ημέρες μας οι αγωγοί έχουν 0,8 [m] διάμετρο, όμως στο μέλλον κάθε ένας θα έχει διάμετρο 1,2 [m].

Τα πολιτικά έργα θα επιβλέπουν την διάνοιξη των τμημάτων που διασταυρώνονται τα τούνελ, για να επιτρέπουν την τοποθέτηση μεγαλύτερων αγωγών και για την επανακατασκευή όλων των επενδεδυμένων και ενισχυμένων τοίχων με μπετόν.

Κατά το τέλος των πολιτικών έργων όλα τα βοηθητικά έργα και οι τοποθετήσεις όπως ο φωτισμός, τα ηλεκτρικά βύσματα, ο

συμπιεσμένος αέρας και οι τηλεφωνικές και τηλεπικοινωνιακές γραμμές θα αντικατασταθούν.

Τα μηχανικά έργα θα είναι η αποψίλωση των υπαρχόντων αγωγών και υποστηριγμάτων και θα ακολουθήσει η τοποθέτηση νέων υποστηριγμάτων και αγωγών.

5.3 Πλήγμα κεραυνού σε βράχο πάνω από το τούνελ

Όταν ένα κεραυνός χτυπά στο έδαφος, το ρεύμα θα ακολουθήσει τις μικρότερης αντίστασης κατευθύνσεις. Οι ισοδύναμες επιφάνειες των οποίων, το αποτέλεσμα, από το έδαφος, κατά το χτύπημα του κεραυνού στο βουνό, επεμβαίνουν με την έκταση των αγωγών, σχετικά με τα αποτελέσματα στην διαφορά ηλεκτρικής τάσης μεταξύ των μεταλλικών τμημάτων, μπορεί να επικίνδυνο για τους ανθρώπους που βρίσκονται μέσα στο τούνελ.

Λαμβάνοντας υπόψιν ένα ομοιογενές και ομοιόμορφα ανθεκτικό έδαφος, το μεγάλης πυκνότητας ρεύμα στο σημείο του χτυπήματος ζώνης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος και την ανθεκτικότητα του εδάφους. Για ένα βραχώδες έδαφος ($\rho \cong 1 \div 3$ [k Ω m]) η ζώνη επέκτασης γίνεται απότομα 10 [m].

Πέρα από την ζώνη ιονισμού, το ρεύμα κατανομής μπορεί να χαρακτηριστεί σαν απότομα ομοιογενές, καθορισμένο ημισφαιρικά

σε ισοδύναμες επιφάνειες. Η πιθανότητα σε μια επιφάνεια για την απόσταση r δίνεται από τον τύπο:

$$U(r) = \rho l / 2\pi r$$

Η παρουσία ενός μεγάλου αγωγού, που είναι θαμμένος ελάχιστα εξαιτίας μεγάλης παραμόρφωσης, σε ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια προνομιακή κατεύθυνση για το ρεύμα.

Σε χαμηλής ανθεκτικότητας εδάφη όλα τα φαινόμενα γίνονται αμελητέα σε μερικά δέκατα του μέτρου, ενώ σε βραχώδη εδάφη με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα ($\rho \cong 1 \div 3$ [kΩm]) γίνονται πιο σημαντικά.

Λαμβάνοντας υπόψιν ένα αγωγό φυσικού αερίου θαμμένο με την δική του επενδυτική μόνωση, για ένα σημείο που δίνεται η απόσταση r , στο σημείο σύγκρουσης του πλάτους της τάσης, εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ του σημείου σύγκρουσης και του πιο γειωμένου σημείου του αγωγού r_2

$$U(r) = \left(\frac{\rho l}{2\pi} \right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Όταν ο κεραυνός χτυπήσει το βουνό πάνω από το τούνελ σε βράχο με μεγάλο πάχος πρέπει να υπολογίσουμε την εισχώρηση βάθους Δ προσεγγίζοντας το ρεύμα με την επιφανειακή ενέργεια

$$\Delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{4\pi^2 F}{P}}}$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι F είναι η συχνότητα της διακύμανσης του ρεύματος, μπορούμε να υποθέσουμε 7,5 [kHz] σαν ωφέλιμο (κεραυνό) και 45 [kHz] από το πρώτο χτύπημα σαν αρνητικό, επιτυχημένη αξία από 150÷200 [m] για θετικό και 350÷400 [m] για αρνητικό (κεραυνό).

5.4 Πλήγμα κεραυνού σε έδαφος κοντά σε αγωγούς θαμμένους έξω από το τούνελ

Όταν ο κεραυνός πλήξει το έδαφος έξω από το τούνελ, συμπεριλαμβάνει τους αγωγούς, που είναι θαμμένοι με μονωτική επένδυση, συντρίβει την ηλεκτρική εκκένωση στο έδαφος, όταν συμβαίνει, και έτσι το ρεύμα του κεραυνού εισχωρεί κατευθείαν στον αγωγό.

Η μεγαλύτερη τάση που γενικεύεται από την σύγκρουση, ταξιδεύει κατά μήκος του αγωγού μέσα στο τούνελ, δίνοντας γι' αυτό αύξηση σε μια πιθανότητα επικίνδυνης κατάστασης.

Η απότομη επαφή προστατεύει τους μονωτικούς αρμούς και τα καθοδικής προστασίας μηχανήματα, μπορούν να προσαρμοστούν στο διασκορπισμό του εδάφους εξαιτίας του ρεύματος.

Η μεγαλύτερη απόσταση L_y , ανάμεσα στους άξονες του αγωγού που είναι θαμμένος στο βάθος p , και η κατεύθυνση του κεραυνού, κατά την οποία διαλύεται η ηλεκτρική εκκένωση μπορεί να συμβεί όταν:

$$L_y = \sqrt{(r_\alpha^2 - p^2)}$$

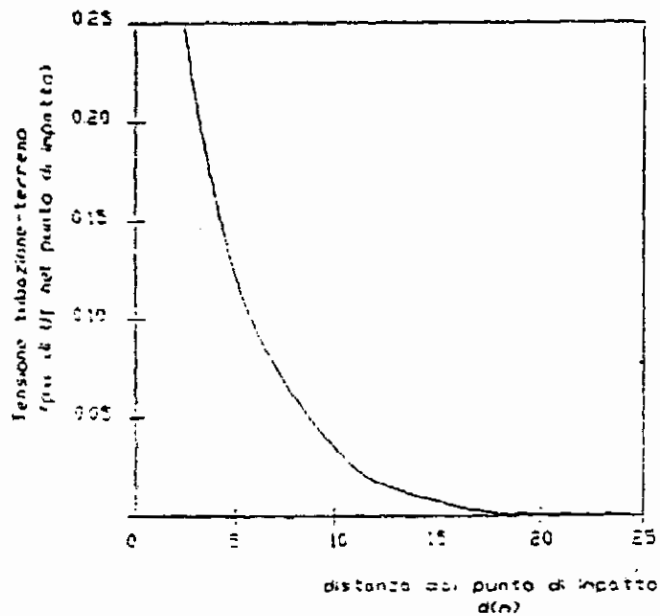
όπου r_α είναι η απόσταση ανάμεσα στον αγωγό και στο σημείο σύγκρουσης και μπορεί να εμφανιστεί με τον παρακάτω τύπο:

$$r_\alpha = 0,054 \sqrt{(pl)}$$

Εκτιμώντας την πιθανότητα διαφοράς ανάμεσα στον αγωγό και το περιβάλλοντα έδαφος, οι αριθμητικοί συντελεστές που είναι προσαρμοσμένοι να ορίζουν την εξασθένηση της καμπής φαίνονται στο σχήμα 29, για την υπερβολική τάση μέσα στους θαμμένους αγωγούς στο σημείο της σύγκρουσης εμείς βρίσκουμε:

$$U_r = \left(\frac{Z}{2}\right) \times I$$

με διάμετρο του αγωγού 0,8 [m], μονωτικοί αρμοί κάθε 5 [km] και χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση Z σε 8,6 [Ω]



Σχήμα 29. Υπερβολική τάση κατά μήκος του αγωγού σε συνάρτηση, με την απόσταση d προς το σημείο σύγκρουσης

Οι υπολογισμένες αξίες μπορούν να υπολογίσουν και αρνητικά και θετικά πλήγματα.

Από την άλλη η διάδοση της παροδικής υπερβολικής τάσης κατά μήκος των αγωγών, δεν μειώνεται σημαντικά μέσα στο τούνελ κατά τη τοποθέτηση μόνωσης και την απόσταση από τα τοιχώματα.

5.5 Επιδράσεις του ρεύματος κεραυνού στο ανθρώπινο σώμα

Στα χρόνια από την δεκαετία 1930 έως 1960, πολλές αναλύσεις είχαν λανθασμένα αποτελέσματα, στην έρευνα για την γρήγορη ανάφλεξη των εκρηκτικών κατά την εκσκαφή των βραχωδών τούνελ.

Λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους από την επαφή και την βηματική τάση, για το ανθρώπινο σώμα, ή ισοδύναμη χέρι με χέρι ή χέρι με πόδι, αντίσταση μπορεί να είναι 1 [kΩ], έτσι η μεγαλύτερη ανεκτή ενέργεια W και τάση U , υποθέτουμε ότι είναι:

Πολικότητα κεραυνού	Ενέργεια W_i	Τάση U_i
Αρνητική	7,0	11
Θετική	5,5	5

5.6 Υπολογισμός του κινδύνου από την τάση επαφής και την βηματική τάση

Για να εκτιμηθούν οι κίνδυνοι καταβολής (θάνατος ή τραυματισμός) των ανθρώπων κατά τη διάρκεια καταιγίδων (με κεραυνούς) απαιτείται ο υπολογισμός των υπάρχοντων πιθανοτήτων για επικίνδυνα γεγονότα με τη σπουδαιότητα των κινδύνων.

Λαμβάνοντας υπόψιν και τα θετικά και τα αρνητικά πλήγματα για την Ευρώπη υπολογίζεται ότι η πιθανότητα για έναν κεραυνό που δίνεται σαν θετικό πλήγμα ($P_{θετ}$), είναι περίπου 1 δέκατο σε σύγκριση με την πιθανότητα να είναι αρνητικό ($P_{αρν.}$) και έτσι:

$$P_{tot} = 0,1P_{pos} + 0,9P_{neg}$$

Παράμετροι	Αρνητικό	Θετικό
Μέση εκτίμηση του πλάτους από το πρώτο χτύπημα [kA]	34	43
Κριτήριο απόκλισης σ του πλάτους από το πρώτο χτύπημα	0,247	0,409
Χρόνος της μισής εκτίμησης από το πρώτο χτύπημα [μ s]	73	300
Μέση εκτίμηση του πλάτους από τα επόμενα χτυπήματα [kA]	13,4	-
σ από το πλάτος από τα επόμενα χτυπήματα [μ s]	0,247	-
Χρόνος από τη μισή εκτίμηση από τα επόμενα χτυπήματα	31	-
Μέση εκτίμηση του αριθμού των επόμενων χτυπημάτων	2	-

Τώρα εμείς υποθέτουμε δύο διαφορετικές καταστάσεις. Χτύπημα κεραυνού στο βουνό πάνω από το τούνελ, και χτύπημα κεραυνού στο έδαφος, κοντά στους θαμμένους αγωγούς έξω από το τούνελ. Για χτύπημα κεραυνού στο βουνό πάνω από το τούνελ, οι αριθμοί των περιστατικών, που μπορεί να εμφανιστεί ο κίνδυνος εξαρτάται από την περιοχή, με βραχώδη εδάφη, στην οποία το ρεύμα του κεραυνού μπορεί να παράγει περιοδικά μεγάλη και όχι υποφερτή τάση στο ανθρώπινο σώμα.

Για την εκτίμηση της έντασης κάθε κεραυνού, η κριτική πλευρική απόσταση Ly_1 , μπορεί να εκφραστεί με τον τύπο:

$$Ly_1 = \sqrt{(r_1^2 - p^2)}$$

Όπου r_1 είναι η οριακή απόσταση ανάμεσα στον αγωγό και το σημείο πτώσης (του κεραυνού) και μπορεί να εκφραστεί με τον τύπο:

$$V_1 = \frac{(pl)}{(2\pi U_1)}$$

όπου U_1 είναι η μεγαλύτερη υποφερτή τάση.

Είναι τώρα δυνατό να αξιολογήσουμε, για κάθε πολικότητα την ισοδύναμη πλευρική απόσταση Ly_e , λαμβάνοντας υπόψιν την υπάρχουσα πολικότητα για κάθε (αξία του) βαθμίδα του ρεύματος.

$$Ly_e = \int Ly_1 \times p(l) \times dl$$

Ο ολικός αριθμός των επικίνδυνων περιστατικών N_p μπορεί να εκφραστεί με τον τύπο:

$$N_p = N_i \times L \times 2 \times L y_e$$

Όπου L είναι το μήκος του τούνελ και ο συντελεστής 2 είναι σχετικός με τις επεκτάσεις της ζώνης (συχνότητας) του εδάφους που μας ενδιαφέρει και από τις δύο πλευρές του άξονα του τούνελ.

Λαμβάνοντας υπόψιν μόνο τις πιο γενικές περιπτώσεις, υποθέτουμε ότι 1 κεραυνός/ Km^2 x χρόνος ($N_i=1$), το πλάτος του τούνελ σε 1 [km] ($L=1$) και ένα πετρώδες έδαφος ($\rho \approx 3$ [KOhm]).

Στις γενικές υποθέσεις έχουμε 3,5 περιστατικά ανά χρόνο για αρνητική πολικότητα και 12,4 για θετική.

Στις υποθέσεις που βρίσκονται κάτω από εξέταση, είναι μεταβαλλόμενα το N_i και L , οι τιμές του N_p είχαν ανάμεσα από 10 και 100.

Ο κίνδυνος R_g σχετικά με το χτύπημα του κεραυνού στο βουνό πάνω από το τούνελ καθορίζεται από τον τύπο:

$$R_g = N_p \times \rho \times \delta$$

Όπου ρ είναι η πιθανότητα του κινδύνου και δ είναι το μέγεθος του κινδύνου και καθορίζεται από τον τύπο:

$$\delta = \frac{(n_p \times t)}{(n \times 8760)}$$

Όπου n_p είναι ο αριθμός των ανθρώπων σε συνδυασμό με τους αγωγούς, t είναι ο χρόνος, διάρκειας της επαφής και n είναι ο ολικός αριθμός των ανθρώπων μέσα στο τούνελ. Η πιθανότητα p μπορεί να καθοριστεί από τον τύπο:

$$P = \frac{(N_p \times L_p)}{L}$$

όπου L_p είναι το ισοδύναμο πλάτος επαφή σχετικά με κάθε ένα ανθρώπινο ον.

Στις υποθέσεις που βρίσκονται υπό εξέταση, οι τιμές του p είναι περίπου 10^{-3} και του δ είναι περίπου 0,08 και δίνουν τιμές για το R_g περίπου 10^{-2}

Αν ο κεραυνός χτυπήσει το έδαφος κοντά στους θαμμένους αγωγούς, ο αριθμός των περιστατικών που μπορεί να προκύψουν καταστροφές εξαρτάται από την ισοδύναμη συγκεντρωτική περιοχή Am .

$$Am = \int Lx \times Ly \times p(l) \times dl$$

όπου L_x είναι το συγκριτικό πλάτος κατά μήκος των αγωγών και L_y η πλευρική απόσταση κατά την οποία η διαρρηκτική πλευρική εκκένωση μπορεί να συμβεί, έτσι ο αριθμός των επικίνδυνων περιστατικών N_{pm} μπορεί να εκφραστεί με τον τύπο:

$$N_{pm} = 4 \times N_t \times A_m$$

όπου ο συντελεστής 4 είναι σχετικός με τις επεκτάσεις στη ζώνη συχνότητας του εδάφους που μας ενδιαφέρει για κάθε μέγεθος του άξονα των αγωγών και η παρουσία στις δύο εξόδους για κάθε τούνελ.

Στις περιπτώσεις που βρίσκονται υπό εξέταση N_{pm} είναι περίπου 2. Ο κίνδυνος R_m σχετικά με τον κεραυνό κοντά στους θαμμένους αγωγούς προκύπτει από τον τύπο:

$$R_m = N_{pm} \times p \times \delta$$

Στις περιπτώσεις που βρίσκονται υπό εξέταση τα αποτελέσματα R_m είναι περίπου 0,17.

Ο (ολοκληρωτικός) ολικός κίνδυνος καταστροφών σχετικά με πλήγμα κεραυνού στο βουνό πάνω από το τούνελ και (με πλήγμα κεραυνού) στο έδαφος κοντά στους θαμμένους αγωγούς έξω από το τούνελ είναι φανερό ότι: (προκύπτει από τον τύπο)

$$R_{tot} = R_g + R_m$$

Στις περιπτώσεις που εξετάζονται οι τιμές του κινδύνου R_{tot} έχει βρεθεί περίπου 0,2 πιο πέρα από 10^{-5} όπως έχουν τεθεί από τα διεθνή κριτήρια.

5.7 Μέθοδος για τη μείωση των κινδύνων

Στόχος είναι να μειωθεί ο κίνδυνος για ατυχήματα των ανθρώπων σχετικά με επικίνδυνη επαφή και με βηματική τάση περίπου 10^{-6} , οι τιμές είναι μικρότερες από 10^{-5} που έχουν τεθεί από τα διεθνή κριτήρια για την φανερή αβεβαιότητα στον υπολογισμό του κινδύνου.

Ο πιο απλός και προφανώς ο πιο φτηνός τρόπος για να μειωθεί ο κίνδυνος για τους ανθρώπους είναι η διακοπή των πολιτικών και μηχανικών έργων όταν πλησιάζει καταιγίδα στο τούνελ, και το υπόλοιπο προσωπικό να βρίσκεται σε ασφαλές μέρος. Αυτό δεν είναι πρακτικά εφαρμόσιμο, αναφορικά με τον μικρό χρόνο που χρειάζεται για την περάτωση του προβλεπόμενου έργου με αντικείμενο τους αγωγούς, το οποίο θα γίνει σε 2 βάρδιες, κατά την θερινή περίοδο.

Οι πιο πολύτιμοι, προστατευτικοί μηχανισμοί είναι η αύξηση της ισοδύναμης σύνδεσης όλων των υπαρχόντων και μελλοντικών

μεταλλικών έργων ή βοηθητικών ηλεκτρικών εγκαταστάσεων μέσα στο τούνελ και ο περιορισμός της τάσης που υπάρχει κατά μήκος των αγωγών.

Είναι χρήσιμο να θυμόμαστε ότι για μηχανικούς λόγους η βραχώδης επιφάνεια είναι αρκετά ενισχυμένη με μια ασφάλινη σύνδεση με δεσμίδα συγκολλημένης επένδυσης ή από ένα λεπτής ενίσχυσης τοίχο από μπετό όταν το δάπεδο είναι πάντα καλυμμένο από ένα λείο στρώμα από μπετό.

Ο πιο απλός τρόπος για να πετύχουμε μια ισοδύναμη σύνδεση είναι η εγκατάσταση τουλάχιστον τεσσάρων γαλβανισμένων ασάλινων επιπέδων αγωγών στην οροφή και στους δυο πλευρικούς τοίχους, και στους διαδρόμους του τούνελ.

Αυτοί οι αγωγοί, δεν είναι αγωγοί που τερματίζουν στο έδαφος αλλά μόνο ισοδυναμικές συνδέσεις, έτσι δεν χρειάζεται να είναι θαμμένοι, αλλά αρκεί να τους βιδώσουμε σε λεπτό βράχο (ή μπετό) ανά 0,5 [m] περίπου.

Οι συνδεδεμένοι αγωγοί πρέπει να είναι συνδεδεμένοι με ασάλινη σύνδεση με το μπετόν, ακόμη πρέπει να συνεχίζεται η σύνδεση για να καλύψει όλο το πλάτος του τούνελ και πρέπει να συνδέεται με τα συστήματα που τερματίζουν στο έδαφος και στις δύο εξόδους του τούνελ.

Οι υπάρχουσες μεταλλικές (κατασκευές) εγκαταστάσεις όπως είναι φτιαγμένα οι αγωγοί ή κυλινδρικά υποστηρίγματα, φωτιστικά

και βοηθητικά βύσματα ή σωλήνες συμπιεσμένου αέρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αγωγοί συνδέσεως.

Για να πετύχουμε την αποτελεσματική σύνδεση ακόμα και για απότομη παροχή ρεύματος, οι συνδεδεμένοι αγωγοί και όλες οι μεταλλικές εγκαταστάσεις πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους με συγκεκριμένους δαχτυλικούς αγωγούς το λιγότερο κάθε 100 [m].

Οι αγωγοί πρέπει να συνδέονται με τους δαχτυλικούς αγωγούς με υψωμένα προστατευτικά μηχανήματα τουλάχιστον κάθε 200 [m].

5.8 Υπολογισμός του παραμένουτος κινδύνου

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ένας από τους συνδεδεμένους αγωγούς μπορεί να διακόπτεται κατά την διάρκεια των έργων, ο υπολογισμός του κινδύνου έχει προσαρμοστεί παίρνοντας σαν λογαριασμό μόνο (3) τρεις συνδεδεμένους αγωγούς.

Έχει βρεθεί ότι, για ένα βράχο που βρίσκεται πάνω από το τούνελ και το πάχος του είναι περισσότερο από 190 [m], ο κίνδυνος δεν υπερβαίνει τον στόχο.

Αν το πάχος του βράχου είναι μικρότερο από 190 [m], ο κίνδυνος μπορεί να μικρύνει αυξάνοντας τον αριθμό των συνδεδεμένων αγωγών, αλλά αν το πάχος του βράχου είναι πολύ μικρό είναι πιο σωστό να εγκαταστήσουμε μια συνεχής ατσάλινη σύνδεση στον λεπτό βράχο.

Αυτή η προσέγγιση είναι αποτελεσματική όχι μόνο για την μείωση της επαφής και για την βηματική τάση, κατά τον κεραυνό στο βουνό πάνω από το τούνελ, αλλά και στο έδαφος κοντά στους θαμμένους αγωγούς έξω από το τούνελ.

Η διασύνδεση των συνδεδεμένων αγωγών ή η αποθηκευμένη σύνδεση, ενεργεί σαν «screen» περιβάλλοντας τους αγωγούς. Έτσι η πιθανότητα διαφοράς ανάμεσα στους αγωγούς και τους συνδεδεμένους αγωγούς είναι στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μέσα στο screen.

$$U_{cs} = -\frac{d\Phi}{dt} = L_{con} \times \frac{di}{dt}$$

όπου L_{con} είναι η εγκατάσταση του πηνίου που καθορίζεται από τον αγωγό και τον σωλήνα. Υποθέτουμε ότι 20 [Ω] είναι η ορμή της σύνθετης αντίστασης για κάθε αγωγό, ο χρόνος που παράγεται από το ρεύμα είναι:

$$\frac{di}{dt} = \frac{\left(\frac{U_0}{Z_c}\right)}{T_{cr}}$$

όπου T_{cr} είναι ο χρόνος της κορυφής στην κύμανση του ρεύματος. Ο αριθμός N για κριτικά περιστατικά κάθε χρόνο καθορίζεται από τον τύπο:

$$N = Nt \times Ae_m \times Ru \int i_u(t^2) dt$$

όπου

$$Ru \int i_u(t^2) dt$$

είναι η μεγαλύτερη ανεκτή ενέργεια για τον άνθρωπο όταν προσβάλλεται από το ρεύμα που καθορίζεται από τον τύπο:

$$i_u(t) = \frac{Ucs(t)}{Ru}$$

Υποθέτοντας μια τυπική εγκατάσταση L_{con} για κάθε αγωγό σε 1 [μH/m] ο κίνδυνος του σοκ μέσα στο τούνελ, όταν ο κεραυνός χτυπήσει το έδαφος κοντά στους θαμμένους αγωγούς είναι κάτω από την μέγιστη αποδεκτή τιμή.

5.9 Συμπεράσματα

Η λύση που προτείνεται, χαρακτηρίζεται από ένα αποδεκτό κόστος/όφελος, ισορροπία η οποία μειώνει τον κίνδυνο από την επαφή με την τάση όταν ο κεραυνός πέσει στο βουνό πάνω από το τούνελ και το έδαφος κοντά στους θαμμένους αγωγούς έξω από το τούνελ.

Ο κίνδυνος μπορεί να μειωθεί πολύ κάτω από τις τιμές που δίνονται από τα standards και για τα δυο προβλεπόμενα κατασκευαστικά έργα ή για έργα μελλοντική εκμετάλλευσης και συντήρησης.

Κεφάλαιο 6

Προστασία ατόμων

6.1 Επιδράσεις ρευμάτων κεραυνού

Οι επιδράσεις βιομηχανικών ηλεκτρικών ρευμάτων σε ανθρώπους και ζώα έχουν μελετηθεί ευρέως από γιατρούς και από ηλεκτρολόγους μηχανικούς. Όμως, σύμφωνα με τον Dalziel (1961), ένας από τους μεγαλύτερους ειδικούς στο θέμα, ο μηχανισμός του θανάτου από κεραυνό παραμένει «ολοκληρωτικά υποθετικός». Με αυτούς τους σπουδαίους περιορισμούς στο μυαλό μας, μια προσπάθεια δημιουργείται σ' αυτό το κεφάλαιο να συνοψίσει τις διαθέσιμες πληροφορίες.

Ο άνθρωπος μπορεί να υπόκεινται σε ένα απ' ευθείας χτύπημα κεραυνού, σε ένα πλάγιο χτύπημα ή σε μια βηματική τάση. Οι περισσότερες θανατηφόρες περιπτώσεις οφείλονται σε απ' ευθείας χτυπήματα ή σε πλάγια χτυπήματα στο κεφάλι. Σ' αυτές τις περιπτώσεις μέρος του ρεύματος μπορεί να εκφορτιστεί μέσω του εγκεφάλου και συγκεκριμένα μέσω του αναπνευστικού κέντρου, το οποίο βρίσκεται κοντά στο πάνω πίσω μέρος του λαιμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σταμάτημα της αναπνοής.

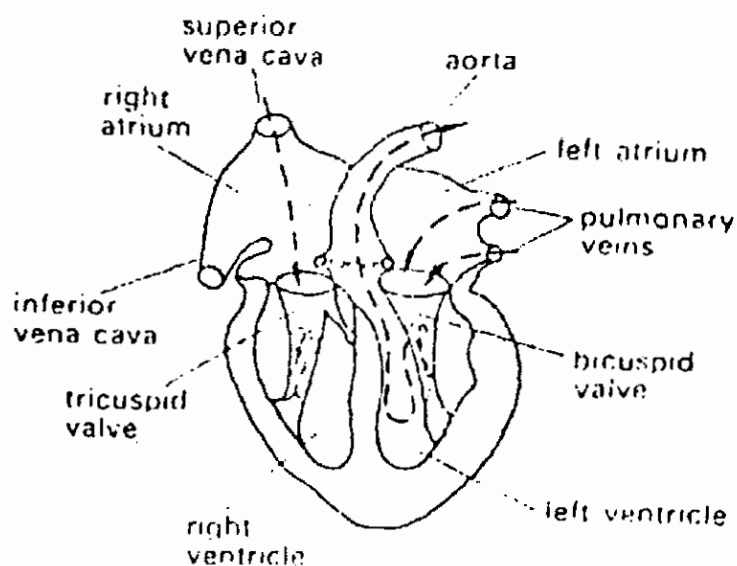
Εναλλακτικώς, μέρος του ρεύματος μπορεί να εκφορτιστεί μέσω της καρδιάς και αυτό μπορεί να προκαλέσει κολπικό ινιδισμό ή ασφυξία όροι που θα εξηγηθούν παρακάτω στο κεφάλαιο αυτό. Άνθρωποι που έχουν επιζήσει από χτύπημα κεραυνού, έχουν στη μεγαλύτερη πλειοψηφία, βρεθεί υπό υψηλή βηματική τάση, και λιγότερο συχνά σε απ' ευθείας χτυπήματα ή πλάγια χτυπήματα. Μια ξεκάθαρη διάκριση πρέπει όμως να γίνει μεταξύ αυτών των περιπτώσεων και επιδράσεων.

Η επίδραση της A.C. και D.C. εκφόρτισης ρεύματος μέσω του αναπνευστικού κέντρου έχει ερευνηθεί σε κουνέλια, και έχουν βγει συμπεράσματα για τον άνθρωπο. Όμως μη ποσοτικά στοιχεία (δεδομένα) που φαίνονται να είναι διαθέσιμα, μπορούν να δηλώσουν ότι παράγεται ένα νευρικό μπλοκάρισμα με το οποίο οι ρυθμικοί παλμοί μεταξύ του αναπνευστικού κέντρου και των αναπνευστικών μυών σταματούν. Ως αποτέλεσμα έχει η διακοπή της αναπνοής παρόλο που η καρδιά μπορεί να συνεχίσει να χτυπά, και πιθανώς θάνατος να επακολουθηθεί εκτός αν τεχνητές αναπνοές εφαρμοστούν αμέσως. Φαίνεται ότι εκφορτίσεις ρεύματος μέσω του νωτιαίου μυελού μπορούν να παράγουν όμοια αποτελέσματα.

Έχουν αναφερθεί υποθέσεις, όπου ένα άτομο έδωσε πραγματική μαρτυρία, ενός απ' ευθείας χτυπήματος κεραυνού και του οποίου η αναπνοή έχει σταματήσει, καθώς ένας σφυγμός υπήρχε, επανήλθε πλήρως μετά από μια παρατεταμένη νεκράνάσταση.

Πρέπει όμως να συμπεράνουμε ότι το ρεύμα που περνά μέσω του αναπνευστικού κέντρου ως αποτέλεσμα ενός απ' ευθείας χτύπημα κερανού είναι ικανό να προκαλέσει σταμάτημα της αναπνοής χωρίς μόνιμως να σταματά και η καρδιά.

Τα αποτελέσματα της επίδρασης ηλεκτρικών ρευμάτων στην καρδιά έχει ερευνηθεί εκτεταμένα. Προς όφελος του αναγνώστη, που δεν έχει ιατρικές γνώσεις, δείχνουμε ένα διάγραμμα της καρδιάς (σχήμα 30). Φαίνεται ότι αποτελείται από τέσσερα μέρη.

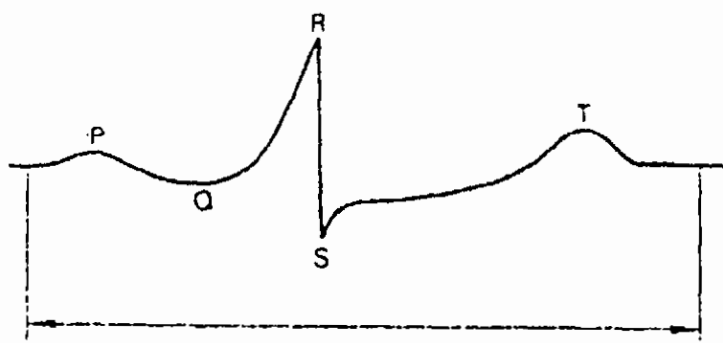


Σχήμα 30. Διαγραμματικό σχήμα της ανθρώπινης καρδιάς

Ο δεξιός κόλπος παίρνει αίμα από τα ανώτερα τμήματα του σώματος, μέσω της άνω κοίλης φλέβας και από τα κατώτερα

τμήματα από την κάτω κοίλη φλέβα. Το αίμα τότε περνά την τριγλώχινια βαλβίδα, στην δεξιά κοιλία, η οποία μέσω της πνευμονικής αρτηρίας, διώχνει το αίμα στους πνεύμονες, όπου το μη οξυγονωμένο αίμα παίρνει οξυγόνο, και αφήνει διοξείδιο του άνθρακα. Το φρέσκο οξυγονωμένο αίμα επιστρέφει στον αριστερό κόλπο από όπου περνά στην αριστερή κοιλία και φεύγει υπό καθορισμένη πίεση μέσα στην αορτή και στα αγγεία. Τραυματισμός ή ερεθισμός αυτής της διαδρομής, μπορεί να προκαλέσει ανακοπή της καρδιάς ή κοιλιακή μαρμαρυγή. Όταν η καρδιά είτε σταματά, είτε παθαίνει ινιδισμό, ο χτύπος σταματά, η κυκλοφορία του αίματος σταματά και το μυαλό, στερημένο της τροφοδοσίας οξυγονωμένου αίματος, θα νεκρώσει εντός λίγων λεπτών. Αυτός είναι ο λόγος που η επαναφορά στη ζωή πρέπει να αρχίσει αμέσως, ώστε να οξυγονωθεί το αίμα με τεχνητές αναπνοές και να κυκλοφορήσει μέσω εξωτερικής συμπίεσης της καρδιάς.

Οι ωθήσεις μέσω των οποίων, της καρδιάς οι χτύποι αρχίζουν παράγονται από βιοχημική αντίδραση εντός των κοιλίων. Αυτό οδηγεί στην παραγωγή μικρών ηλεκτρικών ρευμάτων από τα κύτταρα των καρδιακών μυών, το σύνολο των οποίων σ' ολόκληρη την καρδιά μπορεί να εξηγηθεί με την μορφή ενός ηλεκτροκαρδιογραφήματος όπως φαίνεται παρακάτω από ένα υγιή άτομο.



Σχήμα 31. Ηλεκτροκαρδιογράφημα

Μπορούμε να συμπεράνουμε τις επιδράσεις των ρευμάτων του κεραυνού στο σώμα, από τις ιατρικές εξετάσεις των ατυχημάτων, που μπορούν να ερευνηθούν έμμεσα, από εργαστηριακές εξετάσεις, όπου πειραματόζωα μελετούνται σε ηλεκτρικά ρεύματα διαφορετικού μεγέθους και διάρκειας.

Τα αποτελέσματα πολλών εξετάσεων έχουν δημοσιοποιηθεί σε ιατρικά άρθρα, θανατηφόρων περιπτώσεων κεραυνού και των ατομικών που είτε επέζησαν είτε επανήλθαν επιτυχώς. Όμως λίγες προσπάθειες έχουν γίνει να συστηματοποιήσουν την συσσώρευση πληροφοριών. Όταν ένα άτομο έχει επιζήσει από χτύπημα κεραυνού ή ακόμη όταν έχει επακολουθήσει ο θάνατος, δεν υπάρχει συνήθως, παθολογική ένδειξη τι του συνέβη, εκτός από συχνές παρατηρήσεις των κακώσεων της καρδιάς.

Από την άλλη πλευρά, οι πνεύμονες που έχουν μελετηθεί σε σημαντική πίεση, μπορεί να έχουν διογκωθεί σημαντικά, ή σαν

αποτέλεσμα της παύσης ή του ινιδισμού της καρδιάς, μπορεί να έχουν καταστραφεί από υγρό το οποίο έχει μπει βίαια σ' αυτούς από υψηλή πίεση στα πνευμονικά αιμοφόρα αγγεία. Τα πιο συχνά φυσιολογικά αποτελέσματα των κεραυνικών χτυπημάτων είναι, απώλεια συνείδησης, παροδική αμνησία, παράλυση και εγκαύματα.

Η απώλεια συνείδησης μπορεί να διαρκέσει από λίγα λεπτά ως ώρες και οι άνθρωποι που έχουν αναρρώσει συχνά υποτροπιάζουν ξαφνικά σε απώλεια συνείδησης. Η αμνησία είναι παροδική με την αίσθηση ότι το άτομο δεν μπορεί να ξαναθυμηθεί, ότι έχει συμβεί, παρόλο που μερικοί άνθρωποι νοιώθουν το έγκαυμα και την έντονη λάμψη. Εκτός από αυτή την άποψη η μνήμη συνήθως επανέρχεται πλήρως μετά από λίγες ώρες το αργότερο.

Η παράλυση είναι σπάνια ολοκληρωτική και συνήθως επηρεάζει τα πόδια και σε μικρότερη έκταση τα χέρια. Τα θύματα του κερανού παραπονιούνται για απουσία κάθε αίσθησης, από την μέση και κάτω, και όταν έχουν πλήρη αίσθηση είναι ανίκανα να κινήσουν τα κάτω άκρα. Η παράλυση σπάνια διαρκεί περισσότερο από μερικές ώρες ή πιθανώς μια μέρα, και σε καμιά περίπτωση δεν έχει αναφερθεί εμφάνιση μόνιμης παράλυσης.

Τα εγκαύματα είναι δύο ειδών. Στο σημείο εισόδου του ρεύματος στο σώμα, μπορεί να εμφανιστεί αποχρωματισμός στο δέρμα. Αυτό δεν είναι ένα αληθινό έγκαυμα και εξαφανίζεται

ολοκληρωτικά μετά από μερικές ώρες. Προκαλούνται από σπινθηρισμό στο δέρμα και είναι ένας τύπος που είναι γνωστός στη φυσική.

Τα αληθινά εγκαύματα συμβαίνουν είτε στο σημείο εισόδου του ρεύματος ή όπου το δέρμα ήταν σε επαφή με μικρά μεταλλικά αντικείμενα μιας μπότας τα οποία βρίσκονται σε υψηλή θερμοκρασία ή έχουν λιώσει από το ρεύμα του κεραυνού. Έτσι οι εγκεφαλικές βλάβες μερικών θυμάτων αναφέρονται ότι προκαλούνται από την θέρμανση. Από την άλλη πλευρά ένα περιδέραιο, ακόμα και αν καταστραφεί ολοκληρωτικά από την θέρμανση, μπορεί ακόμα και να σώσει την ζωή, ενός ανθρώπου εκτρέποντας ένα υπολογίσιμο μέρος του ρεύματος κεραυνού από την καρδιά του θύματος. Ο έντονος φωτισμός που παράγεται από την εκφόρτιση του κεραυνού, περιστασιακά οδηγεί στην απώλεια όρασης και σε σπάνιες περιπτώσεις σε ρήξη του ακουστικού τυμπάνου.

Ένα πιο συχνό αποτέλεσμα της πίεσης, είναι η εξάτμιση της επιφανειακής υγρασίας του σώματος της οποίας, ο ρουχισμός, περιλαμβανομένου των παπουτσιών μπορεί να αποδεχθεί, όπου ένα προγενέστερα υγιές άτομο, έχει υποφέρει μόνιμο τραυματισμό.

Σε αρκετές περιπτώσεις έγκυοι είχαν φυσιολογικούς τοκετούς μετά από χτύπημα κεραυνού.

Καμία από αυτές τις πληροφορίες δεν προσφέρεται στην ποσοτική γνώση μας, των επιδράσεων του ρεύματος του κεραυνού σε ανθρώπινα όντα. Αυτό οφείλεται τμηματικά στην έλλειψη γνώσης του εύρους και της μορφής του κύματος του κεραυνού που ευθύνεται για κάθε συγκεκριμένο ατύχημα και μερικώς στο γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι γνωστό αν ένα άτομο χτυπήθηκε απευθείας ή πλαγίως ή έχει προσβληθεί από μια υπερβολική βηματική τάση.

Σ' αυτές τις συνθήκες η καλύτερη πιθανή χρησιμοποίηση (των γνώσεων) πρέπει να γίνεται μέσω των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών εξετάσεων προτιμώντας είτε ανθρώπους εθελοντές είτε ζώα. Το μεγάλο μέγεθος αυτών των εξετάσεων έχει πραγματοποιηθεί, με υψηλόσυχνες τάσεις, ώστε να διευκρινήσει και να βοηθήσει στην προστασία οικιακών και βιομηχανικών βλαβών από ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Αν ένας άνθρωπος πειραματιστεί στο να σφίξει δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια, στα οποία εφαρμοστεί μια υψηλόσυχνη τάση οι μύς του συστέλλονται και όταν το ρεύμα που περνά από τα χέρια και το στήθος φτάσει περίπου τα 10 [mA], δεν μπορεί να «ξεκολλήσει» από τα ηλεκτρόδια. Όταν το ρεύμα αυξάνει από 40-60 [mA] προκαλείται ασφυξία ως αποτέλεσμα της παρατεταμένης συστολής των θωρακικών μυών.

Ταυτόχρονα η πίεση του αίματος αυξάνει σημαντικά. Τεστ με πλάτος ρεύματος 30 [mA] ή περισσότερο για προφανείς λόγους

δεν έχουν πραγματοποιηθεί σε ανθρώπους, αλλά εκτεταμένα τεστ έχουν γίνει σε ζώα.

Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, ο ινιδισμός είναι προτιμότερος εάν μια ηλεκτρική ώση, εφαρμοστεί στη διάρκεια της φάσης T, του φυσιολογικού καρδιακού κύκλου και υπάρχει 1% πιθανότητα ότι ο ινιδισμός θα συμβεί σε έναν ενήλικο εργάτη, ενώ το ρεύμα I που εφαρμόζεται μεταξύ των κυρίων άκρων ξεπεράσει:

$$I = \frac{116-185}{\sqrt{t}} [mA_{rms}] \quad (16)$$

όπου t: ο χρόνος εφαρμογής του ρεύματος σε sec

Αυτή η σχέση έχει οριστεί να εφαρμόζεται σε χρόνους από μισή περίοδο στα 60 [Hz] ως 5 [sec]. Η μισή περίοδος στα 60 [Hz] διαρκεί 8,3 [msec] και αυτό μπορεί να το δεχτούμε ως επαρκή αντιπροσωπευτικό δείγμα ενός τυπικού ρεύματος κεραυνού και να συμπεράνουμε ότι ο κολπικός ινιδισμός παράγεται, σε έναν άνθρωπο, όταν το ρεύμα μεταξύ των άκρων του σώματος φτάσει μεταξύ 1-8 [A peak]. Εάν το ρεύμα αυξάνεται περαιτέρω, η πιθανότητα να δημιουργηθεί κοιλιακός ινιδισμός αρχικά αυξάνει αλλά σε ένα εύρος από 5-10 [A] αρχίζει να μειώνεται. Όμως εάν η καρδιά δεν έχει καταστραφεί και το ρεύμα διακοπεί σε επαρκή χρόνο, η καρδιά μπορεί να ανακτήσει τον κανονικό της ρυθμό. Επίσης αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το σταμάτημα της

αναπνοής δεν προκαλείται μόνο από ένα κατευθείαν κτύπημα στο κεφάλι όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά επίσης ως το αποτέλεσμα εκφόρτισης ρεύματος μέσω της καρδιάς έτσι ώστε να θεωρείται ότι αποτελεί την κύρια αιτία θανάτου από κεραυνό.

Από την εξίσωση (16) φαίνεται ότι ο κίνδυνος να συμβεί ινιδισμός είναι μια συνάρτηση I^2t .

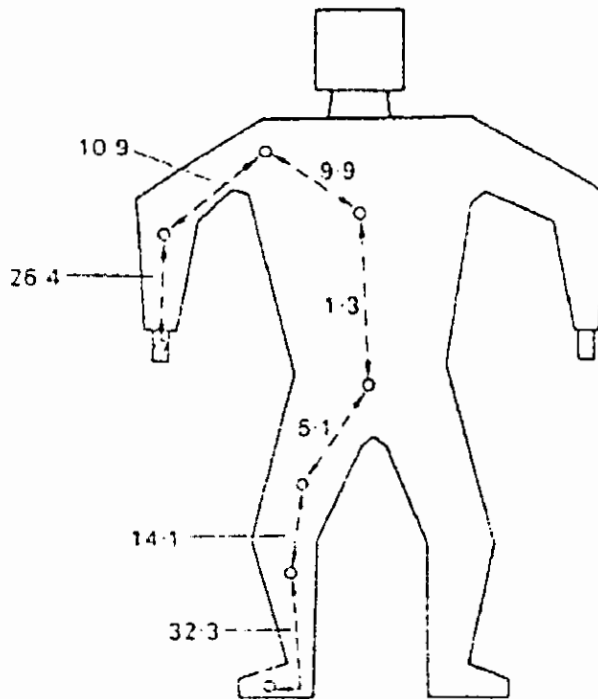
Σε αντίθεση ο Osyrka (1963) από εκτεταμένα τεστ σε ζώα είχε συμπεράνει ότι είναι μία συνάρτηση του I^2t . Τα αποτελέσματά του οδηγούν σε υψηλότερα επικίνδυνα ρεύματα από ότι πρότειναν ο Dalziel και Lee. Τουλάχιστον για ρεύματα που διαρρέουν το σώμα για λιγότερο από 10 [ms]. Όμως αυτό δεν επηρεάζει το συμπέρασμα ότι το σταμάτημα της αναπνοής και όχι ο ινιδισμός πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ως κύρια αίτια θανάτου από κεραυνό.

Τα περισσότερα πειράματα που αναλύσαμε διεξοδικά εκτελέστηκαν με εναλλασσόμενα ρεύματα, βιομηχανικών συχνοτήτων. Οι επιδράσεις των κρουστικών ρευμάτων έχει ερευνηθεί εξετάζοντας, τα αποτελέσματα, κυρίως μη θανατηφόρων ατυχημάτων που προκλήθηκαν σε χειριστές από εκφορτίσεις κρουστικών γεννητριών ή πυκνωτών υψηλής τάσης.

Τεστ σε σκυλιά, τεστ σε κουνέλια, από παλμικά ρεύματα, και τεστ που αποδεικνύουν τα χαρακτηριστικά του κολπικού απινιδισμού, τα οποία τώρα χρησιμοποιούνται σε νοσοκομεία για να σταματήσει τον ινιδισμό που συχνά προκαλούνται από αιτίες,

άλλες εκτός ηλεκτρικού χτυπήματος. Ο απινιδωτής χρησιμοποιεί ρεύμα DC, ενσωματωμένων πυκνωτών, από τους οποίους δίνεται μια ώθηση μερικών δεκάτων του sec, και έχουν μέγεθος μερικών δεκάδων amperes τα οποία εκφορτίζονται μέσω της καρδιάς του ασθενή. Το αποτέλεσμα της βίαιης συστολής των καρδιακών μυών σταματά τον ινιδισμό και η καρδιά ανακτά τον κανονικό της ρυθμό.

Από τα διάφορα μέρη του σώματος το αίμα έχει τη μικρότερη ειδική αντίσταση, σε σχέση με τους περισσότερους ιστούς. Έτσι το σώμα μπορεί να θεωρηθεί ότι δρα ουσιαστικά σαν ένας ανθρώπινος πυκνωτής χάρτου. Όταν ένας άνθρωπος χτυπηθεί από κεραυνό, η διαφορά δυναμικού κατά μήκος του σώματος, το δέρμα σκάζει και χάνει την ελαστικότητά του, στα σημεία εισόδου και εξόδου του ρεύματος. Υπό αυτές τις συνθήκες το σώμα συμπεριφέρεται ηλεκτρικά σαν μία ωμική αντίσταση της τάξεως των 700 [Ohm], το μεγαλύτερο μέρος της οποίας βρίσκεται στα άκρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 32.



Σχήμα 32. Εκατοστιαία κατανομή αντίστασης του ανθρώπινου σώματος

Σύμφωνα με τις υποθέσεις του Berger (1971), είχε προτείνει ένα μηχανισμό που εξηγεί το αποτέλεσμα του χτυπήματος του κεραυνού, στον άνθρωπο, και που υπολογίζει το ρεύμα που εκφορτίζεται στο ανθρώπινο σώμα. Υποθέτουμε ένα κτύπημα στο κεφάλι ενός ανθρώπου. Ένα μεγάλο κενό αέρος δημιουργείται από το ρεύμα του κεραυνού με έναν μέσο όρο σχετού 500 [kV/m]. Αν το άτομο είναι 1.80 [m] μπορεί να συμβεί μια εκκένωση νέφους στο σώμα του, όταν το δυναμικό φτάσει στα 900 [kV]. Αν η αντίσταση του σώματος είναι 700 [Ohm] το ρεύμα στο σώμα στιγμιαία φτάνει στα 1300 [A].

Όταν συμβεί μια εκκένωση νέφους, ένα ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται στον αέρα και έχει μια αξονική κλίση περίπου 2 [kV/m].

Η διαφορά δυναμικού κατά μήκος του σώματος έτσι πέφτει σε 3-6 [kV] και το ρεύμα γίνεται 5 [A], μια τιμή η οποία παραμένει μέχρι το ρεύμα εκφόρτισης κεραυνού να σταματήσει. Το ανθρώπινο σώμα θα υπόκειται έτσι σε ένα μικρό ρεύμα αιχμής φθάνοντας πάνω από 1000 [A], μέσα σε 10 [μs], ακολουθούμενο από ένα σταθερό ρεύμα 10 [A], διατηρούμενο ακόμα, για μερικά ms. Εάν το άτυχο άτομο χτυπηθεί από μια πολλαπλή εκφόρτιση κεραυνού, αυτή η διαδικασία μπορεί να επαληθευτεί μερικές φορές ακόμα με μόνη διαφορά, ότι το μετέπειτα ρεύμα θα συμβεί μετά από ένα κλάσμα ms.

Ο Berger συμφωνεί με την αριθμητική εκτίμηση της πιθανότητας του ινδισμού που προκαλείται στο θύμα, από ένα απευθείας χτύπημα κεραυνού στο ύπαιθρο ή πάνω σε βουνό. Όμως από προηγούμενη συζήτηση των πειραματικών δεδομένων, είναι φανερό ότι τα ρεύματα εκκενώσεις στο ανθρώπινο σώμα είναι αρκετά υψηλά, ώστε να δημιουργήσουν κίνδυνο αναπνευστικής και καρδιακής ανακοπής.

Υποθέσεις έχουν αναφερθεί ότι ένα γκρουπ από ανθρώπους που ήταν σκορπισμένοι μεταξύ τους, υπήρχε ταυτόχρονη επίδραση από σοκ και μερικής παράλυσης. Ακόμη και αν ένας από αυτούς κτυπήθηκε απ' ευθείας οι υπόλοιποι, πρέπει να ήταν θύματα

βηματικής τάσης, μεταξύ των ποδιών τους. Η βηματική τάση U μπορεί να οριστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$U = i \frac{\rho}{2\pi} \times \frac{s}{d(d+s)} [V] \quad (17)$$

όπου i = ρεύμα κεραυνού [A]

s = μήκος του βήματος [m]

ρ = αντίσταση εδάφους [$\Omega \cdot m$]

d = απόσταση μεταξύ του σημείου που χτυπά ο κεραυνός και του κοντινότερου ποδιού [m]

Θεωρώντας ένα ρεύμα κεραυνού 20 [kA], μια αντίσταση εδάφους 100 [$\Omega \cdot m$], απόσταση βήματος 0,5 [m] και την απόσταση $d= 10$ [m], η βηματική τάση U είναι 1,5 [kV]. Η εσωτερική αντίσταση της διόδου του ρεύματος, μέσου και των δύο ποδιών, χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνεται η καρδιά και το αναπνευστικό σύστημα, θα φτάσει περίπου 2 [A]. Παρόλο ότι το ρεύμα μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης d φαίνεται ότι, ειδικά για υψηλής αντίστασης εδάφη, τα ρεύματα που διοχετεύονται σε ένα γκρουπ ανθρώπων, όταν βρίσκονται κοντά στον οχετό προεκκένωσης μπορεί να είναι αρκετά υψηλά, ώστε να δημιουργήσουν εκτεταμένα ηλεκτρικά σοκ.

Έχοντας ήδη συζητήσει για τον κίνδυνο των ρευμάτων κεραυνών σε ανθρώπους, αναφορά πρέπει να κάνουμε και σε σπάνιες περιπτώσεις όπου άτομα προσβεβλημένα από ποικίλες ανικανότητες, θεραπεύτηκαν από χτύπημα κεραυνού. Έτσι ένας ιερέας, ο οποίος βρισκόταν στον οίκο του Δούκα του Κεντ, είχε πει ότι απαλλάχτηκε από την παράλυσή του έχοντας κτυπηθεί από κεραυνό το 1782. Αυτό και άλλα παρόμοια περιστατικά όμως, φαίνεται να μην είναι ορθά, ελπίζοντας ότι αυτοί μπορεί να θεραπεύτηκαν.

Κεφάλαιο 7

Προειδοποιητικές συσκευές

Επειδή οι μετεωρολογικοί σταθμοί δεν μπορούν να δώσουν συγκεκριμένες κατά τόπους πληροφορίες σχετικά με τον καιρό, η διακοπή ή όχι μιας τέτοιας εργασίας δεν μπορεί να βασιστεί σε αβέβαιες υποθέσεις, γιατί κάτι τέτοιο μπορεί να στοιχίσει την ζωή ανθρώπων.

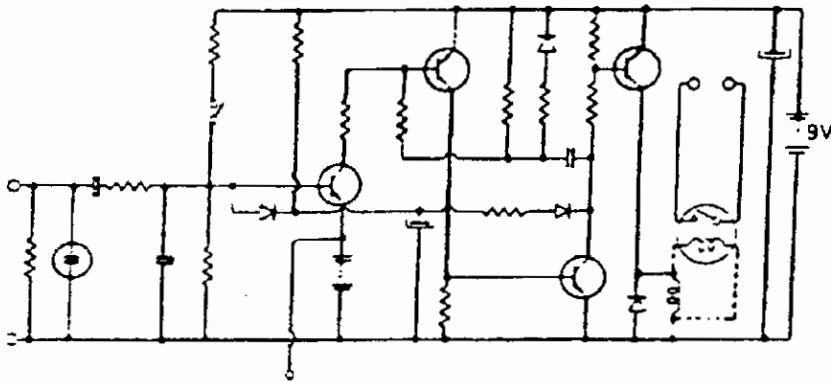
Γι' αυτό το λόγο υπάρχει ανάγκη ενός οργάνου που μπορεί να δείχνει την πιθανότητα να συμβούν πλήγματα κεραυνών.

Ένα τέτοιο όργανο θα έπρεπε να προειδοποιεί εγκαίρως, να μπορεί να τεθεί σε λειτουργία και να ερμηνευτεί η ένδειξή του από ένα μη ειδικό, και να μην είναι ακριβό.

Πρέπει να γίνει παραδεκτό ότι μια τέτοια ιδανική συσκευή δεν υπάρχει ακόμα και προς το παρόν είναι αδύνατο να προβλεφθεί που και πότε υπάρχει πιθανότητα να συμβεί πλήγμα κεραυνού σε δεδομένο χώρο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η σύνδεση δυο συσκευών ενός συστήματος οι οποίες αντίστοιχα καταχωρούν την ανάπτυξη ενός σύννεφου καταιγίδας και τις εκφορτίσεις κεραυνών φαίνεται να αποτελεί το καλύτερο διαθέσιμο τρόπο για την εξασφάλιση μιας ικανοποιητικής προειδοποίησης.

Η πρώτη συσκευή στην ουσία είναι ένας καταγραφέας τοπικών ιονισμών. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μικροαμπερόμετρο για να μετρηθεί το ρεύμα που ρέει από τη γη στην ατμόσφαιρα ή στην αντίθετη διεύθυνση, διαμέσου ενός αιχμηρού μεταλλικού άκρου που τοποθετείται στην κορυφή ενός γειωμένου ιστού. Το ηλεκτρικό πεδίο και επομένως η διεύθυνση ροής ρεύματος, αναστρέφεται κατά τη διάρκεια προσέγγισης ενός κινούμενου φορτισμένου σύννεφου ενώ η ανάπτυξη ενός στατικού σύννεφου καταιγίδας φανερώνεται από τη δημιουργία ενός αρνητικού ηλεκτρικού πεδίου. Ρυθμίζοντας το ρεύμα ιονισμού διαμέσου μιας ακίδας εγκατεστημένης σε δοθέν ύψος πάνω από το έδαφος και εξασφαλίζοντας ένα ακουστικό ή οπτικό σήμα προειδοποίησης η ανάπτυξη ή προσέγγιση ενός σύννεφου καταιγίδας μπορεί να εξακριβωθεί σε κάποιο πρώτο στάδιο. Το ρεύμα που καταγράφηκε μπορεί να ερμηνευτεί ανάλογα με την επικρατούσα ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Η δεύτερη συσκευή έχει δημιουργηθεί για να μετράει τον αριθμό των κεραυνών που πέφτουν σε συγκεκριμένη απόσταση από το σημείο που έχει εγκατασταθεί. Είναι ένα απλό όργανο που είναι εξ' ολοκλήρου ηλεκτρονικό και συνδέεται μεταξύ μιας κεραίας και της γης, το κύκλωμα δείχνεται στο σχήμα 33.



Σχήμα 33. Μετρητής κεραυνών

Η συσκευή ενεργοποιείται με την ξαφνική αλλαγή του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από πλήγμα κεραυνού, κάθε λειτουργία καταγράφεται από ένα μηχανικό καταμετρητή.

Αυτός ο μετρητής καταγράφει τους κεραυνούς και κάποια αναλογία από τις αστραπές και η μέση περιοχή καταμέτρησης έχει καθοριστεί για τις εύκρατες περιοχές, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τις τροπικές καταιγίδες δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμα.

Η χρήση αυτών των οργάνων σε συνδυασμό σαν προειδοποιητική συσκευή βασίζεται στα παρακάτω. Ο καταμετρητής αποφορτίσεων χρησιμοποιείται για να δώσει ένα αρχικό προειδοποιητικό σήμα για την προσέγγιση ή δημιουργία ενός φωτισμένου σύννεφου. Όταν δοθεί προειδοποιητικό σήμα

παρατηρείται ο μετρητής. Αν δεν έχουν σημειωθεί εκκενώσεις η απόφαση για την διακοπή των εργασιών θα βασιστεί στην απόλυτη τιμή της επικρατούσης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου. Εφόσον ένας κεραυνός μπορεί να αναμένεται ότι θα συμβεί από την δημιουργία ενός υπερκείμενου σύννεφου όταν η ένταση φτάσει μια κρίσιμη τιμή. Στην ύπαιθρο αυτή η τιμή μπορεί να ληφθεί σαν 500 [V/m].

Στην περίπτωση μιας μακρινής καταιγίδας ο ρυθμός μέτρησης του μετρητή κεραυνών δίνουν μια ένδειξη του αν το σύννεφο καταιγίδας θα περάσει από την περιοχή σε μια ασφαλή απόσταση ή αν θα πλησιάσει περισσότερο.

Στην τελευταία περίπτωση, οι εργασίες πρέπει να σταματήσουν όταν ο ρυθμός των αστραπών πλησιάσει μια καθορισμένη στάθμη π.χ. τρεις μετρήσεις κάθε πέντε λεπτά.

Βιβλιογραφία

1. B.R. Gupta and B. Thopar, «Impulse of Grounding Systems»
IEEE PAS Paper A 78563-9, Summer Meeting, 1978
2. B.R. Gupta and B. Thopar, «Inductance of Square Grids»
Journal of Institution of Engineers (India), Vol. 58, Part EL-6
June 1978 p 320
3. B. Thapar and B.R. Gupta, «Behaviour of Grounding Systems
under Impulse and High Frequency Current Part I» Research
Scheme of Power, Technical Report No. 16, Central Board of
Irrigation and Power, Govt. Of India, March 1978.
4. Golde: «Lightning Protection» E. Arnold (1973).
5. Golde: «Lightning Vol.2-Lightning Protection» Academic
Press, (1977).
6. Ε. Πυργιώτη και Π. Κουκος «Προστασία κατασκευών από
κεραυνούς», 1984.

