

**Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΑΣ**

**Τμήμα ηλεκτρολογίας**

**Πτυχιακή Εργασία**

**Αριθμός 382**

**Θέμα:** «Τεχνική εκκένωση κεραυνού και πιθανή της  
χρήση σε αντικεραυνική προστασία»

**Εισηγητής:**  
Πυργιώτη Ελευθερία

**Σπουδαστές:**  
Πετσάβας Κωνσταντίνος  
Χάλαρης Αλέξανδρος

Πάτρα - Σ 97



10MOZ  
CIZAGOMZ

2954

γ



## Πρόλογος

Η σύγχρονη τεχνολογία είναι προϊόν της εφαρμογής της επιστήμης. Στην πορεία ανάπτυξης της Τεχνολογίας βιομηχανία και επιστήμη πορεύτηκαν και αναπτύχθηκαν χέρι-χέρι. Όπως έχει διατυπωθεί από τον κοινωνιολόγο Κοντ «επιστήμη άρα πρόβλεψη· πρόβλεψη άρα δράση».

Η μελέτη ενός φυσικού φαινομένου όπως η αστραπή μέσα στα πλαίσια αυτά δεν μπορεί να αφηθεί στην τύχη ή στην αυθαίρετη εκτίμηση. Γι' αυτό το λόγο υπήρξαν αρκετές προσπάθειες κατά καιρούς από εργαστήρια διαφόρων χωρών για την πειραματική πρόκληση τεχνικής διέγερσης αστραπής.

Η εργασία αυτή αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται η πρώτη προσπάθεια που έγινε στον πειραματικό σταθμό του Massif Central στη Γαλλία το 1973 μέσω της τεχνικής του καλωδίου (σύρματος) και της ρουκέτας από τον M.M. Newman.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια αναφορά στα πειράματα που διεξήχθησαν στην Ιαπωνία κατά τη χρονική περίοδο '86-'87 στον πυλώνα και στη γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η τελευταία πειραματική προσπάθεια που βασίζεται πάνω στη πειραματική μέθοδο πρόκλησης τεχνητής διέγερσης αστραπής με λέιζερ.

Τέλος στο κεφάλαιο 4 γίνεται μια ενημέρωση για τη συζήτηση που πραγματοποιήθηκε στο 22<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο στην Ιαπωνία τόσο για την προστασία από την αστραπή όσο και για την προστασία από την τεχνητή διέγερση αστραπής. Στη χρονική αυτή περίοδο διατυπώθηκαν 3 μέθοδοι τεχνητής διέγερσης αστραπής καθώς και τα αποτελέσματά τους.

## Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος</b>	<b>1</b>
<b>Περιεχόμενα</b>	<b>3</b>
<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>6</b>
<b>Έρευνα πάνω στην τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή στη Γαλλία 6</b>	
Εισαγωγή - Γενικές πληροφορίες	6
1. Αντικειμενικοί σκοποί από τα συμμετέχοντα σώματα	7
2. Περιγραφή του πειραματικού σταθμού του Saint Privat D' Aller	9
2.1 Τοποθεσία και σχεδιασμός του εξοπλισμού	9
2.2 Μέτρηση εξοπλισμού	11
3. Τεχνική εκτόξευσης και τεχνική μέθοδος πυροδότησης	14
3.1 Τεχνική εκτόξευσης	14
3.2 Μέθοδος πυροδότησης κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας	15
4. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά από τα πλήγματα πυροδοτούμενης αστραπής	16
4.1 Γενικά αποτελέσματα	16
4.2 Οπτικές παρατηρήσεις	18
4.3 Ηλεκτρικές μετρήσεις	22
4.4 Ανώμαλα χτυπήματα	33
5. Σύγκριση με φυσική αστραπή-συζήτηση	37
6. Σχεδιάγραμμα έρευνας	40
6.1 Αποτελέσματα από γήινες συνδέσεις και από πυλώνες	40
6.2 Μέτρηση τάσεων που παράχθηκαν κατά μήκος γραμμών	41
6.3 Προστασία από τις αστραπές	42
6.4 Έρευνα για την ευαισθησία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων	43
6.5 Ευαισθησία των εκρηκτικών στην αστραπή	43
7. Συμπεράσματα	44

<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>47</b>
- <b>Πειράματα τεχνητής πυροδοτούμενης αστραπής σε μια</b>	
<b>ΕΗV γραμμή μεταφοράς</b>	<b>47</b>
Περίληψη	47
Εισαγωγή	48
1. Πειράματα	49
1.1 Τοποθέτηση και διευθετήσεις	49
1.2 Μέθοδος πυροδότησης και εξοπλισμός	50
2. Δεδομένα και αποτελέσματα	56
2.1 Γενικά	56
2.2 Ασραπές το 1986	58
2.3 Ασραπές το 1987	60
3. Συζητήσεις	66
3.1 Ανακατασκευή του καναλιού αστραπής	66
3.2 Streak φωτογραφία	67
4. Συμπεράσματα	69
5. Επίλογος	71
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>73</b>
<b>Εκφορτίσεις με λέιζερ σε μεγάλα κενά</b>	<b>73</b>
Περίληψη	73
Εισαγωγή	74
1. Πειραματικός εξοπλισμός	75
1.1 UHV αίθουσα ομίχλης	75
1.2 Γεννήτρια ωθήσεων	76
1.3 Σύστημα λέιζερ	80
2. Πειραματική μέθοδος	81
3. Αποτελέσματα και συζήτηση	82
3.1 50% τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης κατά μήκους του κενού	82
3.2 Χαρακτηριστικά εκφόρτισης που παράχθηκε από λέιζερ σε ομίχλη	90
3.3 Χαρακτηριστικά εκφόρτισης που παράχθησαν με λέιζερ σε βροχή	93
4. Συμπεράσματα	98

<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>99</b>
<b>22 Διεθνές συνέδριο για την προστασία από την αστραπή. Συζήτηση για την προστασία από την τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή</b>	<b>99</b>
Περίληψη	99
Εισαγωγή	100
1. Μέθοδοι τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής	101
1.1 Πυροδοτούμενη αστραπή με ρουκέτα	101
1.2 Πυροδοτούμενη αστραπή με λέιζερ	106
1.3 Πυροδοτούμενη αστραπή με νεροπίδακα	109
2. Συζήτηση	111
3. Συμπεράσματα	114
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>116</b>

## Κεφάλαιο 1

### Έρευνα πάνω στην τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή στη Γαλλία

#### Εισαγωγή - Γενικές πληροφορίες

Ένας πειραματικός σταθμός για την μελέτη της αστραπής στήθηκε το 1973 στο Massif Central (Γαλλία). Η κύρια πρωτοτυπία του είναι μια πειραματική εφαρμογή τεχνητής πυροδότησης αστραπής με τεχνικά μέσα σύρματος και ρουκέτας η οποία είχε προηγουμένως φανεί έγκυρη από τον καθηγητή M.M. Newman [1,2].

- Ο σταθμός περιγράφεται συντόμως και εξηγείται η διαδικασία πυροδότησης
- Αναλύονται τα φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των πυροδοτούμενων λάμπων αστραπής.

Από το 1973 αυτός ο σταθμός διοικείται από κοινού από το σταθμό ηλεκτρισμού της Γαλλίας EDF και την επιτροπή ατομικής ενέργειας (CEA-κέντρο του Grenoble και του Saclay) με τα οποία το εργαστήριο ανίχνευσης και γεωφυσικής (LDG, Bruyeres le Chatel) συνεργαζόταν από το 1974, όπως και το Εθνικό Κέντρο Μελετών Τηλεπικοινωνιών (CNET Lannion) από το 1975. Η



συνεργασία εδραιώθηκε για να επωφεληθεί από την πιθανότητα δημιουργίας χτυπημάτων αστραπής σε επιλεγμένο τόπο και χρόνο.

## **1. Αντικειμενικοί σκοποί από τα συμμετέχοντα σώματα**

Είναι γνωστό με τη θεωρία του EDF ότι μόνο η τεχνική χρησιμοποίησης του σύρματος γης (γείωσης) είναι ακόμη ανεπαρκής για να δώσει αρκετή προστασία σε μια γραμμή. Όταν το ρεύμα αστραπής μεταφέρεται μέσω της γείωσης περνά στην γη διαμέσου του Πύργου (πυλώνα) και του συστήματος γείωσης, η ύψωση του δυναμικού στην κορυφή του Πύργου μπορεί να παράγει σπινθήρα της αλυσίδας μονωτήρων γνωστό ως αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση. Η έρευνα λανθάνει σε σχέση με το edf σε μικρής κλίμακας μοντέλα. Έτσι λαμβάνονται τα αποτελέσματα αλλά πρέπει εντούτοις ακόμα να επιβεβαιωθούν από δοκιμές πλήρους κλίμακος. Έτσι ώστε ένας ικανοποιητικός βαθμός εμπιστοσύνης να δοθεί σε αυτούς και αν είναι δυνατόν, να χρησιμοποιηθεί πραγματική αστραπή τουλάχιστον σε κεντρικό ειδικό γήινο εξοπλισμό.

Το EDF ενδιαφέρεται επιπλέον στη μελέτη της ανάπτυξης της διέγερσης του χτυπήματος της αστραπής έτσι ώστε να πει κανείς σε πιο βαθμό το μάκρος του σπινθήρα που παράγεται στο εργαστήριο μπορεί να ληφθεί υπόψη στην εξομοίωση της αστραπής.

Το CEA πρόγραμμα είχε πρωτοξεκινήσει με την ελπίδα της διευκόλυνσης της παρατήρησης της εκκένωσης της αστραπής.

Αυτή η ιδέα εμπνεύστηκε από στατιστικές που δημοσιεύτηκαν από το WD RAYLE σύμφωνα με τις οποίες η μπάλα της αστραπής, παρατηρείται κατά 40% ως προς τις μαρτυρίες από κοντινά χτυπήματα αστραπών. Το πρόγραμμα είχε αργότερα επανακατευθυνθεί προς τη μελέτη της εκφόρτισης και τη γενική ιδιότητα του χτυπήματος της αστραπής, όπως ακριβώς και η μελέτη της καταστρεπτικότητας της αστραπής πάνω σε διάφορους εξοπλισμούς.. Τα κέντρα CEA/LDG και CNET συνέχισαν την έρευνα πάνω στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και πάνω στην φωτεινή λάμψη σε σχέση με την εκφόρτιση μέσα σε μια καταιγίδα.

Ο βασικός σκοπός του LDG είναι να λαμβάνει πληροφορίες πάνω σε σήματα δίπλα στην πηγή και να προσδιορίζει πως η διάδοση επιδρά στις μορφές κύματος σε περιόδους σε απόσταση από την παρατήρηση.

Η προηγούμενη γνώση των γεωγραφικών συντεταγμένων της πηγής και η ερμηνεία των βασικών χαρακτηριστικών της με άμεσες μετρήσεις έχουν εξασφαλίσει τη δυνατότητα τροποποίησης του εξοπλισμού, ο οποίος προσδιορίζει μέρος του αυτόματου μηχανισμού ανίχνευσης και εντοπισμού καταιγίδων (ηλεκτρική και οπτική λήψη εικόνας, γωνιόμετρα).

Λαμβάνοντας υπόψη το CNET αυτές οι μελέτες πρέπει να διασφαλίσουν τη βελτίωση του ορισμού των ηλεκτρικών ρευμάτων στα οποία τα τηλεφωνικά συστήματα και κυκλώματα υπάγονται, βελτιώνοντας τη γνώση μας για τα φαινόμενα που γενικεύουν τα ρεύματα, και να αποπειραθούν για μια προσέγγιση σε μεθόδους εξομοιωτικής σειράς και στη χρησιμοποίηση των προστατευτικών συστημάτων με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο.

## 2. Περιγραφή του πειραματικού σταθμού του Saint Privat D' Aller

### 2.1 Τοποθεσία και σχεδιασμός του εξοπλισμού

Η θέση ήταν επιλεγμένη για να ικανοποιήσει τις ακόλουθες προϋποθέσεις: Σε περιοχή όπου η φυσική αστραπή να είναι συχνή, συμπεριλαμβάνοντας τη διαθέσιμη έγκριση των τοπικών αρχών και λαμβάνοντας υπόψη την υποχρέωση να κτιστεί ο σταθμός σε απόσταση 500 [m] από κάθε κατοικία ή δρόμο ή ηλεκτρικές και τηλεφωνικές γραμμές.

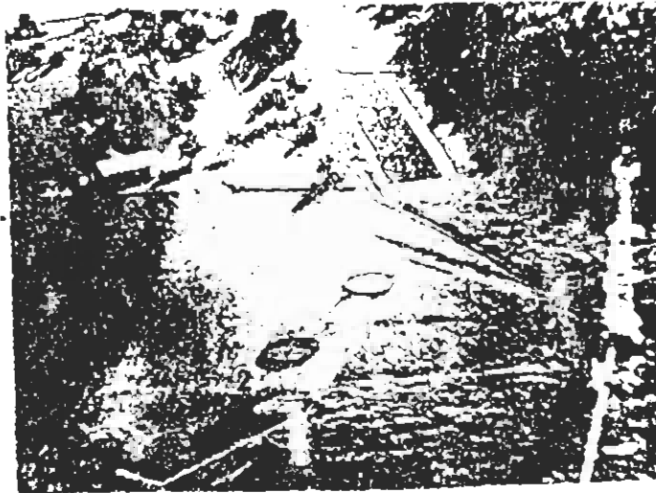
Μια κατάλληλη θέση βρέθηκε στην κοινότητα του SPDA (Haute-Loire) περίπου 20 [km] από το LE PUY. Ο πειραματικός σταθμός ήταν συνεπώς εγκαταστημένος σε υψόμετρο περίπου 1100 [m] σε ένα οροπέδιο όπου το τοπικό επίπεδο κεραυνών είναι περισσότερο από 30, i.e. μια από τις περιοχές της Γαλλίας που υπάρχει μεγαλύτερη συχνότητα κεραυνών.

Ο σταθμός βασικά περιλαμβάνει:

- Ένα πύργο, με πλατφόρμα εκτόξευσης ρουκέτας σε κάθε κορυφή.
- Ένα επίπεδο εδάφους εκτοξευτικής ακτίνας.
- Ένα σκέπαστρο για έλεγχο και φωτογραφία, όπου αυτό είναι διπλά περιφραγμένο για προστασία του προσωπικού.

- Ένας CIGRE μετρητής της εκκένωσης του κεραυνού και όργανα για μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της γης: Ανιχνευτήρας ηλεκτρομετρήσεως ραδιοενέργειας κοντινών πεδίων.
- Δύο φωτογραφικούς σταθμούς σε 2,7 [km] και 3 [km] από τον πύργο.
- Τέσσερις απομακρυσμένους σταθμούς για μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ραδιοενέργειας που υπήρχε από το 1975.

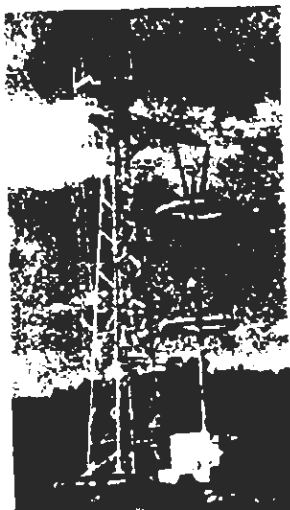
Το σχέδιο από τις κύριες εγκαταστάσεις φαίνεται στην φωτογραφία 1.



Φωτ. 1 Γενική όψη από τον πειραματικό σταθμό στο St. Privat d' Allier: 1. Πύργος, 2. Πεδίο βολής 3. Πύργος ελέγχου

## 2.2 Μέτρηση εξοπλισμού

Ο πύργος (ομαλή χρησιμοποίηση για 90 [KV] γραμμής) είναι 24 [m] ψηλός. Η πλατφόρμα εκτόξευσης ρουκέτας σε κάθε κορυφή της είναι προσαρμοσμένη με έξι εκτοξευτικές ράμπες, τοποθετημένες εξαγωνικά χωρισμένες με περίφραξη που να αντέχει στη φωτιά. Οι ρουκέτες είναι προστατευμένες απέναντι στα κτυπήματα των κεραυνών με ένα σετ από μεταλλικές αψίδες. Τα τέσσερα πόδια του πύργου είναι απομονωμένα από το έδαφος. (Φωτογραφία 2)



Φωτ. 2 Πύργος: 1. Πλατφόρμα εκτόξευσης, 2. Κάθετος διαιρέτης, 3. Κλουβί Faraday

Από το 1973 έως το 1975 το σύστημα γείωσης αποτελούνταν από τέσσερις θαμμένους, οριζόντιους, χάλκινους αγωγούς, σε σχήμα αστέρα.

Η κάθε DC αντίσταση ήταν 9 [Ωμ]. Αυτό το σύστημα γείωσης αντικαταστάθηκε το 1976 από μεταλλικά ημισφαίρια, διαμέτρου δύο μέτρων, για να παρέχει θεωρητικά ιδανική γείωση της ίδιας DC αντίστασης.

Ένα ομοαξονικό παράλληλο κύκλωμα παρεμβάλλεται ανάμεσα στη βάση του πύργου και στο κάτω καλώδιο του συστήματος γείωσης προκειμένου να μετρά το ρεύμα της αστραπής. Το παράλληλο κύκλωμα έχει μια ονομαστική αντίσταση 5 [ΜΩ] και σχεδιάστηκε για παλμούς ρεύματος μεγαλύτερους από 100 [KA]. Αυτό έχει χρόνο ανταπόκρισης των  $86 \cdot 10^{-9}$  sec. Η μέτρηση της συνιστώσας επαγωγικής τάσης που διαπερνά τον πύργο επηρεάζεται από έναν κάθετο ανθεκτικό διαιρέτη κρεμασμένο από τον βραχίονα του πύργου.

Μετρώντας την ύψωση του δυναμικού στη βάση του πύργου σε σχέση με τα απομακρυσμένα σημεία επηρεάζεται από έναν οριζόντιο ανθεκτικό διαιρέτη, 60 [m] μακρός· ο διαιρέτης είναι συνδεδεμένος με τη γη στο άλλο άκρο.

Ένα κλουβί Faraday συνδέθηκε στο πόδι του πύργου και απομονώθηκε από τη γη, παρέχοντας επομένως σκέπαστρο και ηλεκτροστατική προστασία για το παλμοσκόπιο και την μαγνητική ταινία καταγραφής.

Το ρεύμα της αστραπής είχε αρχικά υπολογιστεί πάνω σε εκτοξευτικά σημεία του εδάφους μέσω των μαγνητικών συνδέσεων. Το ρεύμα ήταν μετρημένο αργότερα μέσα από την ερμηνεία των γρήγορων μαγνητικών σημάτων. Αρκετοί τύποι μαγνητικής καταγραφής χρησιμοποιήθηκαν στην τοποθεσία-παραδοσιακές αυτογραφικές μηχανές με ζώνη διέλευσης από 0-

10 [KHz]· εμπορική περιστρεφόμενη κεφαλή καταγραφών (video-recorders) έχει 3 [MHz] ζώνη διέλευσης, και η οποία ήταν προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις μας [7]. Εκτιμώντας την μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αυτό είχε πραγματοποιηθεί σε τέσσερις σταθμούς το 1975, σε αντίστοιχες αποστάσεις 200 μέτρα (STF σταθμός), 3 χιλιόμετρα (RGC), 12 χιλιόμετρα (SJL) και 55 χιλιόμετρα (LRI), από την τοποθεσία εκτόξευσης· οι δύο τελευταίοι σταθμοί ήταν εγκαταστημένοι σε ερτζιανούς πύργους, πάνω στα ψηλά σημεία εντός οπτικής ακτίνας από την τοποθεσία εκτόξευσης. Μόνο οι δύο πλησιέστεροι σταθμοί χρησιμοποιούνται το 1976.

Το ηλεκτρικό πεδίο λήψεως είναι διευθετημένο από μια διπολική κεραία ακολουθούμενη από ένα διαιρέτη χωρητικότητας και από έναν ευρέως ζώνης ενισχυτή με συμμετρική είσοδο (1 [KHz]-10 [MHz]). Τα μαγνητικά πεδία λήψεως είναι ειδικά σχεδιασμένα από το CNET-CRPE \*(που δημοσιεύθηκε στο «Annales des Telecommunications» την 1<sup>η</sup> Ιουνίου του 77) συνδεδεμένο από ένα πηνίο τυλιγμένο σε ράβδο από φερίτη ενωμένο με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Αυτά παρέχουν ένα σήμα ανάλογο προς την επαγωγή B (ζώνη εύρους: 150 [Hz]-20 [MHz]).

Η τυπική καταγραφή συστήματος περιλαμβάνει μια αλυσίδα μετρήσεων για κάθε λήψη, συνδεδεμένα από μερικά παλμοσκόπια και από μαγνητικές μηχανές. Τα παλμοσκόπια φωτογραφήθηκαν από streak κάμερα (20 [M/sec]) και από κάμερες τύπου polaroid.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο χρόνος αύξησης υπολογίστηκε με μεγάλη ακρίβεια στα 50 [nsec]. Ο σταθμός SJL ήταν προσαρμοσμένος το 1975 με αυτόματο γωνιόμετρο συνδεδεμένο

από δύο ορθογώνια θωρακισμένα κλειστά κυκλώματα κεραίας, συνδεδεμένα σε έναν ανάλογο υπολογιστή ο οποίος ενίσχυε την κατεύθυνση της αστραπής.

Κάθε σταθμός ήταν εξοπλισμένος με ένα ηλεκτρονικό ρολόι, που καθοριζόταν καθημερινά από ένα δέκτη χρόνου για σύγκριση των σημάτων. Όλοι οι σταθμοί ήταν σε διαρκή επικοινωνία μέσα από το δίκτυο των VHF.

### **3. Τεχνική εκτόξευσης και τεχνική μέθοδος πυροδότησης**

#### **3.1 Τεχνική εκτόξευσης**

Συνεχίζουμε την τεχνική η οποία είχε αναπτυχθεί από τον Newman [1,2] που αποτελείται από τη χρήση μιας μικρής ρουκέτας όπου έλκει ένα λεπτό μεταλλικό σύρμα προς τα σύννεφα καταιγίδας. Οι δοκιμές κατά τη διάρκεια, του 1972 μας επέτρεψαν να τελειοποιήσουμε τα διάφορα στοιχεία του συστήματος διέγερσης και να τα προσαρμόσουμε στο διαθέσιμο εξοπλισμό της Γαλλίας. Η ρουκέτα είναι από αντιχαλαζικό τύπο (φτιαγμένο από πλαστικό) διαμέτρου 70 [mm], μάκρος 847 [mm], βάρος 2,4 [kg] στην εκτόξευση. Η ρουκέτα είναι αυτοκαταστρεφόμενη κατά τη διάρκεια εκρηκτικής φόρτισης, στο τέλος κάθε τροχιάς για αποφυγή επικίνδυνης αιώρησης ραδιενεργού νέφους. Πρόωρες εκρήξεις κατά τη διάρκεια της πτήσης, έχοντας μια ηλεκτροστατική προέλευση, οι οποίες είχαν



καταγραφεί στην αρχή των πειραμάτων. Αυτά τα ατυχήματα είχαν εξουδετερωθεί από την τοποθέτηση αγώγιμου επικαλύμματος στο σώμα της ρουκέτας. Το μεταλλικό σύρμα είναι από ατσάλι με διάμετρο 0,2 [mm], και ξετυλίγεται από ένα καρούλι που του επιτρέπει μια μεγάλη ταχύτητα των 180 [m/s]. Η ρουκέτα είναι φρεναρισμένη από το σύρμα και φτάνει ένα υψόμετρο των 700 [m] σε 5 [sec] αυτή τότε εκρήγνυται. Το σύρμα είναι συνδεδεμένο με την ρουκέτα από ένα άφλεκτο στερέωμα που παίζει το ρόλο του αποσβεστήρα. Οι ρουκέτες εκτοξεύονται από απλές ράμπες συνδεδεμένες από U-γωνία σιδήρου οι οποίες σχηματίζουν κάθετες μετατοπίσεις.

### **3.2 Μέθοδος πυροδότησης κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας**

Ο πειραματικός σταθμός διατηρείται μόνιμα σε λειτουργία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η ρουκέτα μπορεί να πυροδοτηθεί λίγα λεπτά μετά την ανίχνευση της καταιγίδας.

Η προσέγγιση ή ο σχηματισμός του σύννεφου μιας καταιγίδας ανακοινώνεται από τον CIGRE μετρητή λάμψης της αστραπής και από ένα ραδιενεργό ηλεκτρομετρικό ανιχνευτή και αυτό αντιστοιχεί με μια επικείμενη προειδοποίηση.

Το ηλεκτρόμετρο διεγείρει ένα ηχητικό συναγερμό αμέσως μόλις το ηλεκτροστατικό πεδίο στο έδαφος υπερβεί περίπου τα 500 [V/m]. Αυτή η προειδοποίηση είναι το σήμα για την προετοιμασία ενεργοποίησης. Τα παλμοσκόπια και οι κάμερες είναι προετοιμασμένα, η χειριστήρια ρουκέτα είναι ακλειδωτή και το πεδίο επεξεργασίας ξεκινά. Η ένδειξη δίνεται από τον τελικό

καθορισμό της συγκεκριμένης στιγμής για πυροδότηση της ρουκέτας, το ηλεκτροστατικό πεδίο είναι τότε περίπου 33 [KV/m]. Πρέπει να τονίσουμε εδώ ότι τα απομακρυσμένα τηλεχειριστήρια λειτουργούν με συμπιεσμένο αέρα, διαμέσου ενός συστήματος από πλαστικά λάστιχα τα οποία συνδέουν όλα τα εξωτερικά όργανα στο υπόστεγο ελέγχου. Αυτή η μέθοδος εγγυάται ότι όλα τα στοιχεία είναι τελείως χωρισμένα ηλεκτρικά και παρέχουν προστασία στο προσωπικό.

Μια καινούργια ρουκέτα μπορεί να πυροδοτηθεί δύο λεπτά μετά την τελευταία. Δέκα ρουκέτες μπορούν να πυροδοτηθούν διαδοχικά χωρίς να χρειάζεται προσέγγιση στο πεδίο βολής. (Έξι από τον πυλώνα και τέσσερις από το έδαφος).

## **4. Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά από τα πλήγματα πυροδοτούμενης αστραπής**

### **4.1 Γενικά αποτελέσματα**

111 ρουκέτες είχαν πυροδοτηθεί κατά τη διάρκεια 32 καταιγίδων. Στη διάρκεια τεσσάρων χρόνων λειτουργίας του σταθμού: 89 ρουκέτες είχαν πυροδοτηθεί σωστά, 62 λάμπεις αστραπής ήταν διεγερμένες (12 το 1973, 8 το 1974, 25 το 1975, 17 το 1976). Ελλιπείς εκτοξεύσεις 20% είχαν προκληθεί από σπάσιμο του σύρματος ή του στερεώματος του, πρόωρες εκρήξεις ή λανθασμένη τροχιά των ρουκετών, ή πυροδότηση όταν το

ηλεκτροστατικό πεδίο στην επιφάνεια της γης ήταν χαμηλό: 70% από σωστές τεχνικές εκτοξεύσεις διέγερσης χτυπημάτων αστραπής.

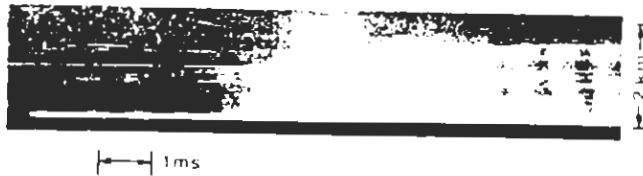
Το μεγαλύτερο μέρος των αποτυχιών εξηγείται από φυσικά χτυπήματα αστραπής που έγιναν πριν την διέγερση. Οκτώ χτυπήματα αστραπής (1 το 1974, 5 το 1975, 2 το 1976) δεν ακούμπησαν τα αναμενόμενα σημεία κρούσεως. 23 συνεχόμενες εκφορτίσεις ρεύματος χαμηλού πλάτους και 39 υβριδικές λάμπες (συνεχόμενο ρεύμα + χωριστά χτυπήματα) είχαν παρατηρηθεί μεταξύ 62 λάμπων. Το ηλεκτροστατικό πεδίο πάνω στη γη πρέπει να είναι της τάξης από 3 έως 5 [KV/m] με αρνητική πολικότητα (αρνητικό σύννεφο, θετική γη) για μια επιτυχή εκτόξευση και το πεδίο πρέπει να είναι υψηλότερο όταν η πολικότητα είναι θετική. Το ύψος που εκτείνεται από το σύρμα σύμφωνα με τις μετρήσεις που έγιναν σε 48 χτυπήματα, κυμάνθηκε μεταξύ 50 και 530 [m]. Σε 50% από τις περιπτώσεις εκτείνεται από 50 έως 200 [m] και στα 80% των περιπτώσεων από 50 έως 320 [m]. Το ύψος που εκτείνεται από το σύρμα είναι γενικά λιγότερο από 250 [m] όταν η λάμψη των αστραπών περιλαμβάνει ωθήσεις από υψηλό πλάτος ρεύματος.

Εκτιμώντας την μπάλα της αστραπής δεν είχε παρατηρηθεί καμιά ειδική περίπτωση. Μερικά φωτεινά φαινόμενα που μπορεί να έχουν σχέση με αυτή τη ερώτηση ορισμένα εμφανίζονται ακόμα αναμφίβολα και σε κινηματογραφικές φωτογραφίες. Αυτά συζητήθηκαν στο [8].

## 4.2 Οπτικές παρατηρήσεις

Μια μελέτη φωτογραφιών και κινηματογράφων, δείχνει ότι γενικά τα συμβάντα ακολουθούν την παρακάτω χρονολόγηση.

1. Αμέσως μόλις η ρουκέτα φτάσει το ύψος διέγερσης, μια (και μερικές φορές παραπάνω από μια) αρχική ύψωση για msec, η τιμή για κάθε ταχύτητα υπολογίστηκε της τάξεως των 2 έως  $10 \cdot 10^4$  ( $10^5$  [m/s] κατά τη φωτογραφία 3) όταν ήταν δυνατό να γίνει έτσι.



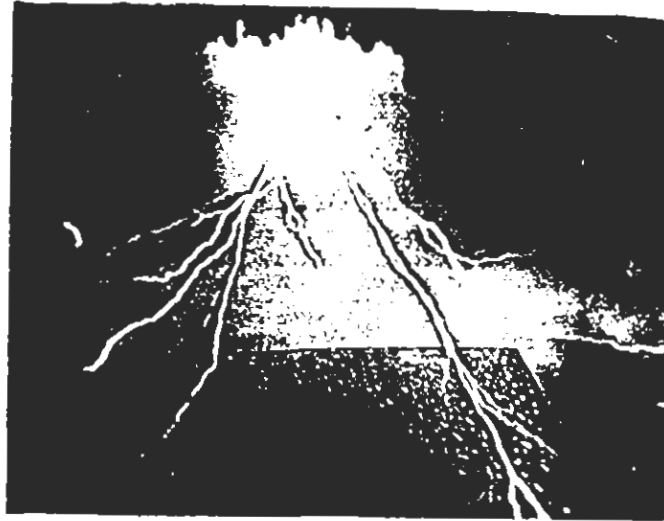
Φωτ. 3 Streak φωτογραφία από μια ανοδική πορεία. Φαίνεται από απόσταση 2,7 km του σταθμού

2. Το αρχικό ρεύμα υπερθερμαίνει το σύρμα και του προκαλεί σπάσιμο στο σημείο που αφήνει το καρούλι. Ένα τόξο δημιουργείται ανάμεσα σ' αυτό το σημείο και στο κατώτερο άκρο από το σύρμα το οποίο συνεχίζει να είναι ενωμένο με τη ρουκέτα. Αυτή η περιοχή, που είναι απελευθερωμένη στη φωτογραφία 4' το αρχικό ρεύμα λιώνει το σύρμα σε μερικά δέκατα του msec αργότερα.



*Φωτ. 4: Στιγμαία φωτογραφία με λάμψη από πυροδοτούμενη αστραπή φαίνεται από τον πύργο ελέγχου*

3. Το αρχικό ρεύμα συνεχίζει να προχωρά και φτάνει τα σύννεφα. Η εκφόρτιση δημιουργήθηκε κατά μήκος της ιονισμένης διαδρομής καθώς είναι παρατεινόμενη για λίγα δέκατα του sec και σποραδικά εμφανίζονται διακυμάνσεις ευρείας φωτεινότητας.
4. Αυτή η εκφόρτιση μόνο αντιστοιχεί για να επιβεβαιώσει τις ορατές διακλαδώσεις ορατές στην φωτογραφία 5. Αυτή η φωτογραφία πάρθηκε από τη θέση εγκατάστασης στα 2,7 [km] από το σταθμό με το φακό ανοιχτό για μερικά sec την στιγμή της πυροδότησης. Στο χαμηλότερο σημείο της φωτογραφίας, η περιοχή υψηλής φωτεινότητας αντιστοιχεί στον τομέα που καταλαμβάνεται από το σύρμα και εξηγείται από την παρουσία μεταλλικών υδρατμών.



*Φωτ. 5: Στιγμαία φωτογραφία με λάμψη από μια πυροδοτούμενη αστραπή που φαίνεται σε απόσταση 2,7 km από το σταθμό*

5. Γρήγορα χτυπήματα συμβαίνουν στις δύο περιπτώσεις από τις τρεις: -Αυτοί παράγουν σύντομο και έντονο φωτισμό. Οι διάφορες διακλαδώσεις δεν είναι ταυτόχρονα φωτεινές αλλά διαδοχικά και συχνά αρκετές φορές. Η πρώτη από αυτές τις επαναφωτίσεις δεν αντιστοιχεί στην κανονική διεργασία «Αρχικό ρίξιμο-επιστρεφόμενο χτύπημα» (Φωτογραφία 6α). Οι διαδικασίες έχουν αναλυθεί.



Φωτ. 6: Streak φωτογραφία από δύο ξεχωριστά χτυπήματα. α) Αρχικό ριζίμο επιστρεφόμενο χτύπημα από την αρχική ώθηση, β) Αρχικό ριζίμο επιστρεφόμενο χτύπημα από την τελική ώθηση

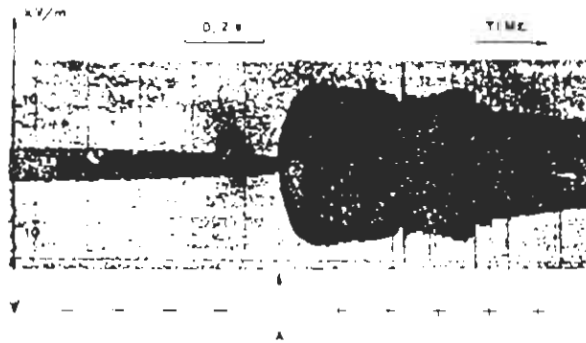
6. Απ' την άλλη πλευρά οι επόμενες επαναφωτίσεις διαμορφώνονται ως προς την συνηθισμένη περιγραφή (φωτογραφία 6β) με την εξαίρεση ότι το τέλος του σύρματος αντικαθιστά τη γη. Η ταχύτητα εκτόξευσης διάδοσης του αρχικού ριζίματος κυμαίνεται μεταξύ 2 και  $10 \cdot 10^6$  [m/sec]
7. Η συνολική διάρκεια του φαινομένου μπορεί να επιτευχθεί σε ένα sec και η φωτογραφία 5 δείχνει ότι το ορατό σημείο του χτυπήματος φτάνει ένα ύψος των 2 έως 2,5 [km] όταν κάθε πλάγια προέκταση μπορεί να φτάσει 4 έως 5 [km]. Η δενδροειδής μορφή είναι τυπική μιας ανοδικής λάμψης αστραπής.

### 4.3 Ηλεκτρικές μετρήσεις

#### 4.3.1 Ανάπτυξη της λάμψης της αστραπής

Ένα ανακατεμένο πεδίο περιγράφεται με λεπτομέρεια στο [6], παρέχει τα μέσα καταγραφής και μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου στη γη, κατά την διάρκεια πυροδότησης σε μια μαγνητική ταινία.

Μια τυπική καταγραφή πάρθηκε από απόσταση 100 [m] από το πυροδοτικό σημείο, και φαίνεται στην φωτογραφία 7: η κλίμακα δείχνει στα 1000 [Hz] την μορφή του σήματος.



Φωτ. 7: Σήμα ανακατεμένου πεδίου σε τυπική περίπτωση

Το πεδίο που είναι στην αρχή αρνητικό (i.e. κατευθύνεται προς τα πάνω σύμφωνα με την συνηθισμένη συνθήκη) φθείρεται περίπου 50% κατά τη διάρκεια ύψωσης της ρουκέτας. Τότε η μείωση επιτάχυνσης στο A, στην αρχή των φωτεινών φαινομένων, το πεδίο αντιστρέφεται και αυξάνει για να επιτευχθεί μια θετική τιμή ίση σε διάφορους χρόνους με αρχική ένταση σε απόλυτη τιμή.

Αυτή η περίοδος απλής μεταβολής αντιστοιχεί στην αρχή της συνεχόμενης εκφόρτισης. Τότε το πεδίο είναι υφιστάμενο της



ταχύτητας και πολύπλοκων μεταβολών όταν συμβαίνει χτύπημα. Το πεδίο μειώνεται όταν η λάμψη σβήνει και γενικά αναστρέφεται ξανά για να επιστρέψει σε αρνητική τιμή, έχοντας την ίδια σημαντική σειρά όπως στο πεδίο πριν την πυροδότηση, λίγα δέκατα στο τέλος του δευτερολέπτου. Η ελάττωση κατά τη διάρκεια ύψωσης της ρουκέτας μπορεί να εξηγηθεί από την εκπομπή κορόνας του σύρματος, και πιθανότατα από τις ηλεκτρικές φορτίσεις που μπορούν να παραχθούν από τη φλόγα της ρουκέτας. Πρέπει να τονιστεί ότι το γήινο πεδίο είναι θετικό, κατά τη διάρκεια του μεγαλύτερου μέρους της συνεχής εκφόρτισης και τη στιγμή των χτυπημάτων, ενώ το ρεύμα είναι αρνητικό σύμφωνα με την ίδια συνθήκη.

#### **4.3.2 Ανάλυση των ωθήσεων ρευμάτων**

Εκτιμώντας τις 35 κανονικές διεγέρσεις λάμψεων που εμφανίζονται μία ή περισσότερες μορφές ρεύματος μεγαλύτερες από 1 [KA], το μέγιστο πλάτος ήταν 42 [KA]· ο συνολικός χρόνος της λάμψης διαφέρει από 220 έως 940 [msec]. Ο πίνακας παρακάτω δείχνει το ποσοστό χτυπημάτων που υπερβαίνει την τιμή για πλάτος (IM) και για διάρκεια (T) .

<b>%</b>	<b>Im [KA]</b>	<b>T [msec]</b>
90%	2	250
50%	8	400
10%	18	700

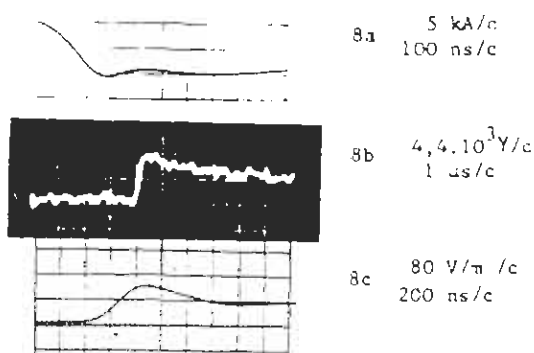
Αναφέροντας τον αριθμό των ωθήσεων σε μια λάμψη και αν μόνο αυτά τα χτυπήματα παρατηρηθούν με κατάλληλα μηχανήματα λαμβάνουμε υπ' όψιν (1975 και 1976), 19 περιπτώσεις που μπορεί να διατηρηθούν στις οποίες έχει δοθεί αύξηση στον πίνακα που ακολουθεί: Ο αριθμός των χτυπημάτων  $N_s$  όταν  $I \geq 1$  [KA] συγκρίνεται με αυτά τα αποσπάσματα σε διάφορα δεδομένα.

	Τωρινά παραδείγματα	Ντοκουμέντα
$N_s$ φυσιολογικό	11,6	3-4 [9]
$N_s > 10$	27%	8,5% [10]

Ο αριθμός των ωθήσεων δείχνει ότι το ρεύμα που έχει καταγραφεί σε πολλές περιπτώσεις επιβεβαιώνεται από φωτογραφίες παρμένες από Streak κάμερα. Αυτές οι λάμπες αστραπής χαρακτηρίζονται από μεγάλο ποσοστό ωθήσεων όπου ο χρόνος αύξησης είναι λιγότερος από 0,5 [μsec], ένα ποσοστό όπου είναι πολύ μεγαλύτερο από το κανονικό δηλώνεται στη βιβλιογραφία. Βρήκαμε ότι με 63 ωθήσεις όταν  $I \geq 2$  [KA], πιο πριν πραγματικός χρόνος (0,1-0,9) είναι  $T_F < 10^8$  [sec] σε 70% των περιπτώσεων, και αυτό το ποσοστό φτάνει το 92% στην περίπτωση όπου καλύπτει 35 ωθήσεις με  $I \geq 5$  [KA]

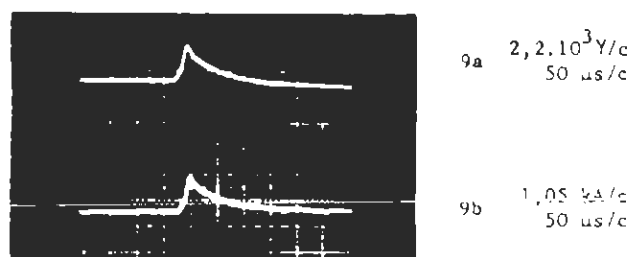
Ο βαθμός εμπιστοσύνης όπου αυτά τα αποτελέσματα αξίζουν ενισχύεται από το γεγονός, ότι σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που είχαν γίνει ταυτόχρονα με άλλες μεθόδους μετρήσεων βασίζονται σε διαφορετικές αρχές.

Ένα παράδειγμα δίνεται στην εικόνα 8, όπου παρουσιάζεται μια ίδια ώθηση με ανοδική μπροστινή καταγραφή στους ακροδέκτες του παράλληλου κύκλωματος του πυλώνα (8a), στην παραγωγή της κεραίας από φερρίτη που είχε τοποθετηθεί σε απόσταση 100 [m] (8b), και μαζί με ένα ηλεκτρικό διπολικό πεδίο που τοποθετήθηκε σε απόσταση 3 [km] (8c).



*Εικ. 8: Καταγραφή απότομης μπροστινής ώθησης. α) Από το ομοαξονικό παράλληλο κύκλωμα, β) από την κεραία φερρίτη στα 100 [m], γ) από την διπολική κεραία στα 3 [km]*

Άλλο παράδειγμα που συμφωνούν εμφανίζεται στην εικόνα 9 όπου δείχνει μια μικρή αργή ώθηση, που λαμβάνεται με την κεραία από φερρίτη στα 100 [m] (9a), με παράλληλο κύκλωμα (9b).



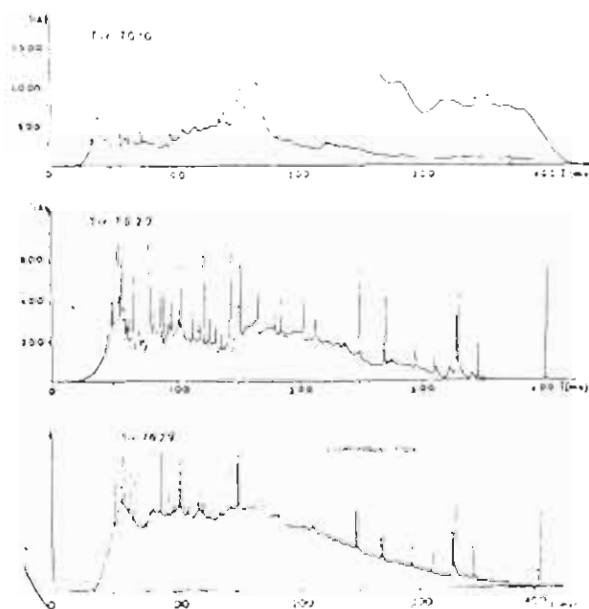
*Εικ. 9 Καταγραφή αργής μπροστινής ώθησης. α) από την κεραία φερρίτη στα 100 [m], β) από το ομοαξονικό παράλληλο κύκλωμα*

### 4.3.3 Ανάλυση μιας συνεχής συνιστώσας

Οι φωτογραφίες που παίρνονται στην αρχή από όλες τις διεγέρσεις των λάμπων αστραπών δείχνουν μια έντονη φωτεινότητα όπου διαφέρει αργά από την μια εικόνα στην άλλη.

Οι περισσότερες ακριβείς μετρήσεις που έγιναν στα 1976 όπου μια μαγνητική ταινία καταγραφής συνδέθηκε στο παράλληλο κύκλωμα τοποθετήθηκε στη βάση του πυλώνα.

Η ζώνη διέλευσης καταγραφής εκτείνεται από 0 έως 5 [KHz] η οποία είναι επαρκής για μια συνεχή συνιστώσα. Γρήγορες ωθήσεις παραμορφώνονται αλλά αυτό δεν είναι ενοχλητικό επειδή έχουν καταγραφεί αλλού.



Εικ. 10: Συνεχόμενη συνιστώσα με λάμψη από πυροδοτούμενη αστραπή α) και β) αστραπή No 7616 και No 7629: καταγραφόμενα ρεύματα από ομοαξονικό παράλληλο κύκλωμα, γ) αστραπή No 7629: καταγραφόμενη φωτεινή ροή

- Τέσσερις καταγραφές που έγιναν το 1976 δίνουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Χωρίς λάμψη αστραπής	7616	7618	7625	7629
Αρχικός $\frac{dl}{dt}$ ( $\text{A}\chi\text{S}\alpha^{-1}$ )	$7 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^3$	$3.7 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^2$
Δαπάνη (Cb)	100	4	20	55

Η καταγραφή της εκφόρτισης 7616 και 7629 αναπαράγεται στην εικόνα 10α,β. Η εκφόρτιση 7616 μόνο περιέχει μια συνεχή συνιστώσα. Η εκφόρτιση 7629 επίσης περιέχει έναν αριθμό μικρών ωθήσεων. Συνεχή ρεύματα ήταν μικρότερα από το όριο ευαισθησίας ( $I < 1$  [A]) πριν το τελευταίο χτύπημα. Μεγάλη ομοιότητα υπάρχει ανάμεσα στη απόκλιση του ρεύματος και στην απόκλιση των φωτεινών εκπομπών μέτρησης όπως παρακάτω: κατάλληλα όργανα σκόπευσης με στοιχεία πυριτίου είναι τοποθετημένα σε 200 [m] πριν από το σημείο κρούσης και σκοπεύουν στο κάτω μέρος του χτυπήματος με άνοιγμα γωνία  $6^\circ$  η ζώνη διέλευσης της συσκευής είναι 0-100 [KHz].

Η εικόνα (10γ) δείχνει την καταγραφή της λάμψης 7629 που αποκτήθηκε με αυτό τον τρόπο.

#### 4.3.4 Μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Όλοι οι σταθμοί παρέχουν μια αλυσίδα μετρήσεων για ένα κατακόρυφο ηλεκτρικό πεδίο: Οι STF, RGC και SJL σταθμοί μας παρέχουν επίσης μια αλυσίδα μετρήσεων για το οριζόντιο μαγνητικό πεδίο. Η αρχική διέγερση ήταν  $\pm 200$  [V/m],  $\pm 20$  [V/m],  $\pm 8$  [V/m] και  $\pm 2$  [V/m] αντίστοιχα για εγκαταστημένους σταθμούς αυξημένης απόστασης από τη ζώνη της πυροδότησης. Το παραπάνω υποδηλώνει ότι σε εκείνο ήταν μόνο δυνατό να καταγραφούν υψηλές εντάσεις εκφόρτισης ενώ η μικρότερη αρχική διέγερση μπορεί να υπολογιστεί για τους τέσσερις σταθμούς όπως 2, 3, 4 και 5 [KA]. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται κατά τη διάρκεια 10 καταιγίδων από 20 πολλαπλές διεγέρσεις χτυπημάτων αστραπής που συμπεριλαμβάνουν ένα σύνολο από 97 εκφορτίσεις: η μέση τιμή είναι αθροισμένη στον ακόλουθο πίνακα:

d	N	S	B	S	TF	S	
200 m *	23	7200	-	8000	-	<5 $\mu$ s*	-
3 Km	40	92	33	250	85	0,45	0,17
12 Km	48	26	10	100	42	1,7	0,7
55 Km	13	5,8	2,4	-	-	3,3	1,6
200 m	41	5500	-	8200	-	<5 $\mu$ s	
3 Km	50	55	41	210	128	0,35	0,18

\*: «αβέβαιη» εξαιτίας των παρεμβάσεων

d: Απόσταση από το σταθμό

N: Αριθμός εκφορτίσεων (συνολικός)

E: Ηλεκτροστατικό πεδίο (V/M)

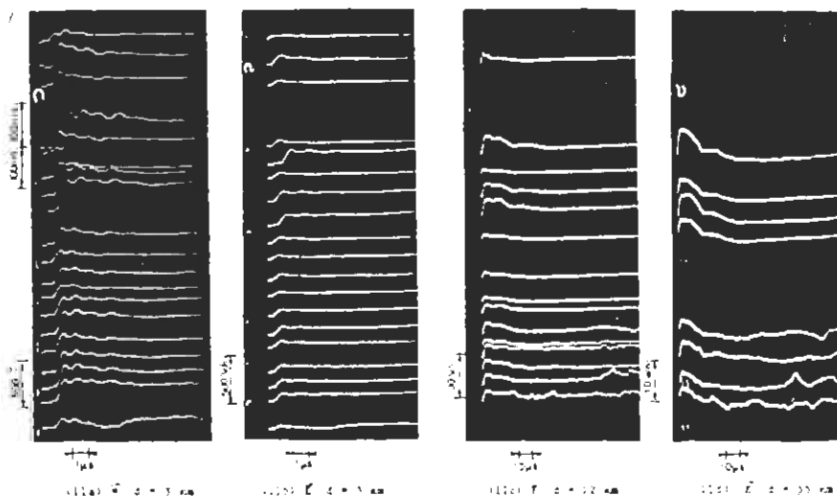
B: Μαγνητική επαγωγή ( $\gamma=10^{-9}\text{T}$ )

TF: Αρχικός χρόνος σε msec

S: Βασική παρέκκλιση

Εμείς πρέπει επίσης να αναφέρουμε τον μέσο χρόνο μεταξύ κενού ωθήσεων ( $I > 3\text{KA}$ ) όπου κυμαίνεται από 25-45 [msec] (Προϋπολογισμός βασισμένος σε 75 χτυπήματα)

Παραδείγματα από μορφές κύματος ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, που καταγράφηκαν στους τέσσερις σταθμούς φαίνονται στην εικόνα 11. Αυτά είναι σε όλες τις περιπτώσεις χτυπήματα συννέφου-γης αντίστοιχα της κλασικής διαδικασίας του «χτυπήματα της επιστροφής». Η μεγαλύτερη τιμή για πεδία που παίρνεται στους τρεις πιο μακρινούς σταθμούς είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την απόσταση.



Εικ. 11: Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από διαφορετικές αποστάσεις-  
(εκτόξευση 7534)

Αυτοί αναφέρουν, ωστόσο, ρεύματα που είναι σχετικά χαμηλά όταν συγκρίνονται με τη βιβλιογραφία πάνω στο θέμα. Η αρχική αναλογία  $E/B$  σε αυτούς τους σταθμούς μένει κοντά στο  $C$ , και αυτό εκφράζει ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που εκπέμπει λάμψη μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει διαμορφωθεί αμέσως μόλις η απόσταση φτάσει στα 3 [Km].

Επίσης είχε παρατηρηθεί ότι σ' αυτή την απόσταση ο λόγος  $E_v/E_h$  και  $B_v/B_h$  είναι μεγαλύτερος από 10. Όταν εμείς κατέχουμε δυο διευθύνσεις μετρήσεως του ρεύματος χτυπήματος αστραπής και καταγραφούν σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, είναι πιθανό να υπολογιστεί η προηγούμενη ταχύτητα του χτυπήματος [11].

Ταχύτητες που εκτείνονται από  $0,9 \cdot 10^8$  ως  $1,5 \cdot 10^8$  [m/s] βρέθηκαν στο ίδιο σύστημα μεγέθους καθώς αυτό δίνεται από άλλα πειράματα [12]. Αν μια μέση τιμή ταχύτητας  $1,2 \cdot 10^8$  [m/s] είναι αποδεκτή, το ρεύμα του χτυπήματος το οποίο δεν έχει μετρηθεί άμεσα μπορεί να υπολογιστεί έτσι:

Εκτόξευση	7520	7534	7609	7617	7621	7623	7631
I (KA)	15	20	40	9	>30	20	8

Αυτές οι τιμές συμφωνούν με εκείνες που δίνονται από μετρήσεις κοντινών μαγνητικών πεδίων, εξαιρείται η περίπτωση No 7631.

Οι καταγραφές οι οποίες γίνονται σε μια απόσταση 3 [km] δηλώνουν σήμα με χρόνο αύξησης όπου είναι πολύ συχνά μικρότερος 1 μικροδευτερολέπτου· σε πολλές περιπτώσεις αυτές είναι μικρότερες από 300 [ns], κάτι που επιβεβαιώνει τα



αποτελέσματα των άμεσων ή κοντινών μετρήσεων. Είναι πιθανόν ότι τέτοια αποτελέσματα δεν μπορεί να είχαν ληφθεί χωρίς ένα γρήγορο ηλεκτρονικό εξοπλισμό και με παρατηρήσεις μεγαλύτερων αποστάσεων. Όντως μπορεί να σημειωθεί στην εικόνα 11 ότι η μείωση των προηγούμενων ενδείξεων που καταγράφηκαν αμβλύνονται αρκετά γρήγορα όταν η απόσταση παρατήρησης αυξάνει. Άλλες πρόσφατες μετρήσεις (UMAN ιδιωτική επικοινωνία) μεταβαίνουν στα ίδια αποτελέσματα.

#### **4.3.5 Ακουστικές μετρήσεις- Προκαταρκτικά αποτελέσματα**

Αυτά πραγματοποιούνται σε δύο αποστάσεις από το σημείο κρούσης της γης: στα 0,6 [m] (σημείο A) και στα 140 [m] (σημείο B). Στο A, η χρήση είχε γίνει από μια πιεζοηλεκτρική ανιχνευτική συσκευή 3 [m] σε ψηλότερο επίπεδο από το έδαφος, έχοντας τα ακόλουθα χαρακτηριστικά-εμβέλεια μετρήσεως 0-60 [b], ευαισθησίας  $147 \cdot 10^{-12}$  [Cb/b], ζώνη διέλευσης 1 [Hz]-300 [KHz].

Αυτή η ανιχνευτική συσκευή είναι συνδεδεμένη με έναν ενισχυτή, μια ψηφιακή μνήμη και είναι τοποθετημένη σε μεταλλική ασπίδα. Στο B, η ανιχνευτική συσκευή είναι τοποθετημένη στα 6 [m] πάνω από τη γη, και είναι ένα μικρόφωνο χωρητικότητας με χαρακτηριστικά: 0-5 [mb], 0,2 [mV/mb] και 2 [mV/mb], 0,1 [Hz]-20 [KHz].

**Αποτελέσματα στο σημείο A:** Τρεις μετρήσεις είχαν ληφθεί το 1976, μια από αυτές κατά τη διάρκεια μιας αφύσικης διέγερσης (No 7623, κρουστική στα 60 [m] από την ανιχνευτική συσκευή): υπερπίεσης κορυφής  $\Delta p$  ήταν μετρημένη κάθε στιγμή και έδειχνε

πολύ απότομη ύψωση  $T_F$ . Υπάρχει πιθανότητα οι αιχμές να ακολουθούνται από μια υποπίεση αλλά η τεχνική μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε δεν μας επέτρεψε να εξετάσουμε αυτή τη πτώση. Προσπαθήσαμε να συμπεράνουμε την τιμή της ενέργειας που δαπανήθηκε από τη θεωρία του LIN [13], που δίνει για ένα δυνατό κυλινδρικό απότομο χτύπημα κύματος:

$$\Delta p = \frac{0,2 W}{R^2}$$

όπου  $W$ = Δαπανώμενη ενέργεια για μονάδα του μήκους

$R$ = απόσταση από τη παρατήρηση

Τα αποτελέσματα είναι τέτοια όπως τα παρακάτω:

Εκτοξευτήρας	$\Delta P$ [mb]	$T_F$ [ $\mu s$ ]	$W$ [KJ/m]
7617	180	10	32,5
7621	1250	20	224
7623	400	20	-

**Αποτελέσματα στο Β:** Μερικές από τις διεγερμένες λάμπες δεν έκαναν διάδοση μεγάλου ακουστικού κρότου. Αυτό είχε ήδη σημειωθεί από τους παρατηρητές που δεν είχαν ακούσει εν συνεχεία τον κρότο του κεραυνού παρόλο την λαμπερή λάμψη. Σε 16 από τις 17 εκτοξεύσεις υπολογίστηκαν σωστά αποτελέσματα μετρήσεων. Στον εκτοξευτήρα No 7609 (υπολογίζοντας 1:40 [KA]) παράχθηκε η μεγαλύτερη πίεση: 365 [mb]. Μια σύγκριση ανάμεσα ακουστικών ηλεκτρομαγνητικών και φωτεινών σημάτων όπου καταγράφηκαν ταυτόχρονα στην ίδια ταινία δείχνουν καθαρά ότι μόνο με απότομα χτυπήματα σε

προηγούμενα αποτελέσματα παράχθηκαν σήματα από παραδοσιακές ηλεκτρικές εκκενώσεις κυμάτων, (θετικό  $\Delta P$  ακολουθούμενο από μια υποπίεση): ένα βασικό σήμα, του οποίου ο ολικός χρόνος είναι 2 με 3 [msec], ακολουθείται συχνά από μερικά σήματα του ίδιου τύπου, αυτό το φαινόμενο συνεπώς μπορεί να είναι το επακόλουθο της ανάπτυξης της εκφόρτισης και της πορείας της αστραπής, ή αντανάκλασεις των ηλεκτρικών εκκενώσεων κύματος, πάνω στη γη (το σύρμα είναι συχνά επικλινές) και οι αντανάκλασεις από τα διπλανά εμπόδια.

Η θεωρία του LIN, ακόμα και όταν επεκτείνεται από τον Jones [14] σε εξασθένιση της ηλεκτρικής εκκένωσης να κυματιστεί, φαίνεται ότι δεν είναι εφαρμοσμένη εδώ.

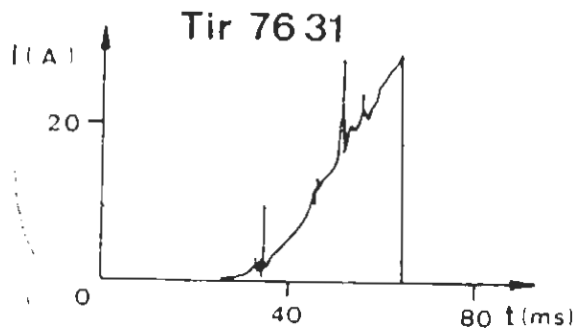
#### 4.4 Ανώμαλα χτυπήματα

Στην περίπτωση 8 λάμπων μεταξύ 62 χτυπημάτων η αστραπή χτύπησε τη γη ή ένα αντικείμενο κοντά στη θέση του παρακάτω κανονικού σύρματος [15]. Μερικά στοιχεία σ' αυτές τις 8 περιπτώσεις δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

No	h [m]	D [m]	$\Delta t$ [ms]	T [s]	n	$I_{max}$ [kA]
7412	260	90	74	0,65	>20	?
7503	160	7	48	0,38	16	16
7520	340	145	80	0,43	10	15
7534	290	18	62	0,93	52	20
7535	335	56	42	0,61	10	>10
7539	390	120	42	0,2	7	11
7623	360	70	32	0,64	24	20
7631	120	175	39	0,36	6	12

**Σύμβολα του πίνακα**

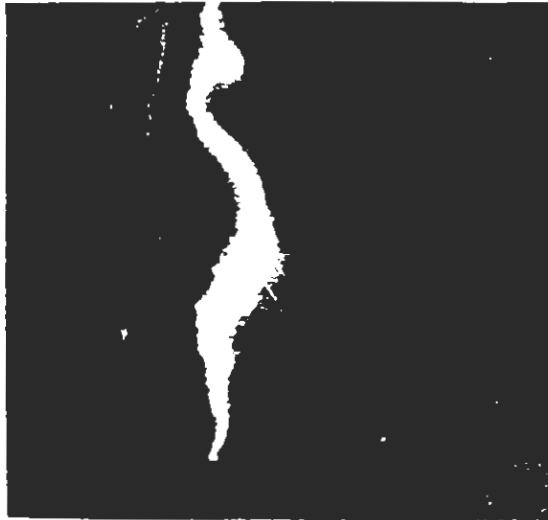
- h: Μήκος του σύρματος
- D: Οριζόντια απόσταση μεταξύ καρουλιού και σημείου πτώσης.
- $\Delta t$ : Χρόνος ανάμεσα στο πρώτο φωτεινό φαινόμενο και στο χτύπημα αστραπής
- T: Συνολική διάρκεια λάμψης της αστραπής
- n: Αριθμός των χτυπημάτων
- $I_{max}$ : Μέγιστη ένταση ρεύματος



Σχ. 12: Ρεύμα σύρματος στην αρχή μιας ανώμαλης πυροδότησης

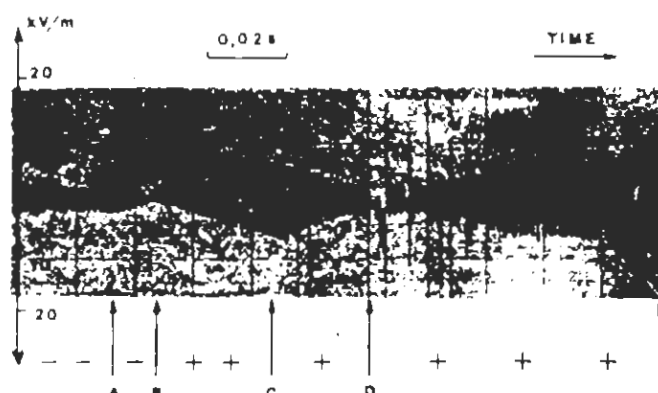
Τα διαθέσιμα στοιχεία μας επιτρέπουν να θεωρήσουμε τη διαδικασία ανάπτυξης, αρχικά για ένα κανονικό χτύπημα. Αυτό φαίνεται, σε μια περίπτωση που δείχνεται στο σχήμα 12 ότι το ρεύμα του σύρματος ξαφνικά πέφτει έχοντας φτάσει το A σε 40 [ms]. Η φόρτιση που εμφανίζεται τότε είναι 0,4 [Cb]. Έπειτα ένα ισχυρό καθοδικό χτύπημα φωτίζει την ιονισμένη πορεία, από πάνω έως κάτω στο ανώτερο άκρο από το σύρμα το οποίο είναι ήδη εξατμισμένο. Αυτό κατευθύνεται στη γη, από αυτό το σημείο,

χωρίς να ακολουθεί τη γραμμή του σύρματος το οποίο δεν είναι μακριά από το προτεινόμενο μέρος.



*Εικ. 13 Πρώτη φωτογραφία που πάρθηκε με μια 150 i/s κινούμενη κάμερα από μια αφύσικη αστραπή*

Η εικόνα 13 δίνει το πρώτο πλαίσιο του χτυπήματος 7534 που πετυχαίνεται σε μια απόσταση των 100 [m] από μια 150 [i/s] φωτογραφική μηχανή (κάμερα). Μπορούμε να δούμε, στενόμακρες λουρίδες κατευθυνόμενες προς το κάτω μέρος, επειδή όμως το πάνω μέρος της φωτογραφίας, πάρθηκε στα 2,7 [km], δείχνει διακλαδώσεις κατευθυνόμενες προς το πάνω μέρος. Το σύρμα το οποίο βλέπουμε σε μια ευθεία γραμμή, σαν καπνός στο αριστερό της ρουκέτας, μπορεί να διακριθεί στην αριστερή πλευρά του σχήματος 13.



Εικ. 14: Σήμα ανακατεμένου πεδίου κατά την διάρκεια αφύσικης αστραπής

Η εικόνα 14 δείχνει το σήμα που εκπέμπεται από το πεδίο να καταλήγει με αργή διαδικασία σε μια τυπική περίπτωση. Το σημείο A αντιστοιχεί στο πρώτο φωτεινό φαινόμενο, το B σε αντιστροφή του πεδίου, το C σε διακοπή του ρεύματος στο σύρμα και το D στο πρώτο χτύπημα. Μια σύγκριση του σχήματος 7 και 14 δείχνει πως οτιδήποτε συμβαίνει για ένα κανονικό χτύπημα\* ανάγεται στο σημείο C. Μια επανατοποθέτηση του φορτίου συμβαίνει σε ένα σύννεφο κατά τη διάρκεια της περιόδου ανάμεσα στο C και το D χωρίς οποιαδήποτε εκφόρτιση να παίρνεται στο μέρος της γης. Στο D, το νέο χτύπημα ακολουθεί το προηγούμενο στάδιο στο οποίο είχε διατηρηθεί επαρκής αγωγιμότητα για να αποτελέσει προνομιακή τροχιά, με εξαίρεση του τομέα μόλυνσης εξαιτίας αναθυμιάσης μετάλλου που επιταχύνει το χάσιμο αγωγιμότητας.

Θα ήταν ενδιαφέρον να χρησιμοποιήσουμε το γεγονός εκείνο όπου τα ανώμαλα χτυπήματα σε γειτονικό πυλώνα, θα πρέπει να

παίζουν το ρόλο αγώγιμης αστραπής, ώστε να γίνει μια σύγκριση με τη πρόγνωση της προστατευτικής ακτίνας. Αν το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο [16] είναι αποδεκτό και είναι ερμηνευμένο από έναν από εμάς σύμφωνα με τη προτεινόμενη μέθοδο [17] μόνο η περίπτωση 7534 θεμελιώθηκε για να αποτελέσει μια συγερή παράβαση επειδή ο υπολογισμός δίνει μια προστατευτική ακτίνα των 55 [m], με δεδομένο ότι το χτύπημα πέφτει στα 18 [m].

Η πιθανότητα της ανώμαλης διέγερσης πρέπει να ληφθεί υπόψη για τους κανονισμούς που αφορούν την ασφάλεια γύρω από την εκτοξευτική ζώνη.

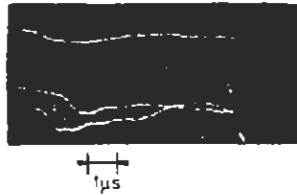
## **5. Σύγκριση με φυσική αστραπή-συζήτηση**

Η διέγερση αστραπής είναι ίδια με τη φυσική αστραπή όπου χτυπά προεξέχοντα αντικείμενα μετάλλων παίρνοντας όφελος από την προκαταρκτική ύψωση οδήγησης και τη συνεχόμενη συνιστώσα που υπάρχει αρχικά σε όλες τις περιπτώσεις. (Cf: Παρατηρήσεις από το Empire state building [18] και από τους πυλώνες του Monte San Salvatore [19]). Τα χαρακτηριστικά που έχουμε εμείς προσδιορίσει σε σχέση με την απότομη κλίση της μπροστινής ώθησης και του αριθμού των χτυπημάτων, είναι παρόλα αυτά διαφορετικά εκείνων που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία του θέματος.

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι, σε σχέση με την μπροστινή απότομη κλίση το ρεύμα ώθησης παίρνει ένα μέρος που έχει ήδη ιονιστεί

με τις συνεχείς εκφορτίσεις και ότι αυτές μπορεί κατά συνέπεια να συγκριθούν με τα επακόλουθα χτυπήματα της φυσικής αστραπής. Αυτό το σημείο προοπτικής φαίνεται επιβεβαιωμένο από τις καταγραφές που παίρνονται από ανώμαλες διεγέρσεις αστραπής. Σε αυτή την περίπτωση αρχικά η διάρκεια της πρώτης ώθησης θυμίζει το πρώτο χτύπημα της φυσικής αστραπής από τότε που εμείς έχουμε βρει ότι  $TF=5-7-2$  και  $5 \cdot 10^{-6}$  [sec] αντίστοιχα και στις τέσσερις περιπτώσεις στις οποίες αυτό έχει γίνει δυνατό να μετρηθεί. Από την άλλη πλευρά, τα επόμενα χτυπήματα της ανώμαλης διέγερσης λάμπων αστραπής αποτελούν μια καλή αναλογία της απότομης κλίσης στο μπροστινό μέρος. Αυτή η τελευταία παρατήρηση δίνει σε μας τη δυνατότητα μηδενισμού της υπόθεσης σύμφωνα με την οποία τα απότομα μπροστινά μέρη τα οποία εμείς παρατηρούμε μπορούν να συγκριθούν από ειδική ιδιότητα κατεχόμενη από την πορεία τμήματος η οποία μολύνεται από την εξάτμιση του σύρματος. Αυτό παραμένει ακόμα αδύνατο να επιβεβαιωθεί δίνοντας την παρούσα κατάσταση των πειραμάτων, παρόλα αυτά τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά επειδή η διέγερση αστραπής έχει ιδιότητες διαφορετικές από κείνες της φυσικής, ή ότι νέες ιδιότητες έχουν εκδηλωθεί επειδή τα όργανα μέτρησής μας δεν κατέχουν προηγούμενες ιδιότητες. Η δεύτερη υπόθεση ενισχύεται από αρκετά χτυπήματα φυσικής αστραπής τα οποία έχουν καταγραφεί τυχαία και εμφανίζουν ένα υψηλό ποσοστό της ώθησης με απότομη κλίση στο μπροστινό μέρος. (σχ.15)





Σχ. 15: Μαγνητικό σήμα από φυσική αστραπή (σε άγνωστη απόσταση ίσως μεγαλύτερη από 10 [km])

Η ποιότητα του παράλληλου ωμικού κυκλώματος δεν μπορεί να αμφισβητηθεί διότι το παράλληλο χρησιμοποιούμενο κύκλωμα είχε υποβληθεί σε προσεκτικά εργαστηριακά τεστ. Είναι επίσης γνωστό το γεγονός ότι όταν το σύρμα ενός ομοαξονικού παράλληλου κυκλώματος είναι διαταρασσόμενο από υπερβολική δράση ενέργειας, το λάθος οδηγεί σε ενίσχυση του χρόνου ανόδου [20]. Πρέπει τελικά να επισημάνουμε ότι αυτή είναι πιθανότατα η πρώτη φορά, όπου αυξήσεις με τόσο ψηλή ζώνη εύρους είχαν τοποθετηθεί κοντά στην πορεία της αστραπής.

Εκτιμώντας τον αριθμό των χτυπημάτων θα πρέπει να τονιστεί η μεγάλη υπεροχή της απλής διόδου της streak cameras και της καταγραφής της βιντεοταινίας. Αυτά τα δύο όργανα είναι τα μοναδικά στις γνώσεις μας που παρέχουν ένα μέσο ανάλυσης πολλαπλών χτυπημάτων με πλήρη αποτελεσματικότητα 100% και χωρίς αμφιβολία. Αυτός ήταν ο εξοπλισμός που μας έδωσε τη δυνατότητα να καταγράψουμε τον αριθμό των ενδείξεων από 53 χτυπήματα στην περίπτωση του εκτοξευτήρα No 7534.

## 6. Σχεδιάγραμμα έρευνας

Το πρόγραμμα της εργασίας στο SPDA αντικατοπτρίζει την απασχόληση των διαφόρων ομάδων που συμμετέχουν. Όμως είναι ολοφάνερο ότι η χρήση της διέγερσης αστραπής μπορεί να εφαρμόζεται σε ένα πολύ ευρύτερο πεδίο με την συμμετοχή ειδικών από άλλους επιστημονικούς κλάδους. Ο οργανισμός του σταθμού διεγέρσεως αστραπής μπορεί τότε να θεωρηθεί ότι χρησιμοποιεί τα πειράματα που έχουν γίνει πάνω σε επιταχυντές σωματιδίων σαν ένα πρότυπο μοντέλο. Εκτιμώντας την θεμελιώδη έρευνα σε ηλεκτρικές εκφορτίσεις, η διέγερση αστραπής επιτρέπει για πρώτη φορά, να εδραιωθεί η ελπίδα μιας ζεύξης ανάμεσα στις μακριές λάμπες που παράχθηκαν και μελετήθηκαν μέσα σε εργαστήριο [4] και στις φυσικές λάμπες που εκτείνονται πάνω σε αρκετά χιλιόμετρα. Άλλες εφαρμογές περισσότερο τεχνικές και περισσότερο άμεσα χρησιμοποιήσιμες, μπορούν να μελετηθούν. Η ακόλουθη εργασία επομένως είχε προγραμματιστεί για το καλοκαίρι του 1977.

### 6.1 Αποτελέσματα από γήινες συνδέσεις και από πυλώνες

Οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα έχουν διασφαλίσει σπουδαία αποτελέσματα όταν η ώθηση του μπροστινού ρεύματος ήταν της τάξεως, ή μεγαλύτερη του ενός μικροδευτερολέπτου. Αυτές δείχνουν ότι:

- Οι γήινες συνδέσεις οι οποίες απαρτίζονταν από τέσσερα οριζόντια θαμμένα καλώδια είχαν πρακτικά συμπεριφορά

αντίστασης. Η μετρήσεις του παράγοντα υπέρτασης ήταν 1,1 έως 1,2.

- Οι ημισφαιρικές γήινες ενώσεις είχαν τις ιδιότητες μιας ιδανικής αντίστασης, ίσης με τη μετρούμενη αντίσταση σε χαμηλή τάση και χαμηλή συχνότητα [21].
- Ο πυλώνας μπορεί να παρασταθεί σαν μια επαγωγή της τάξεως των 0,3 [μH] ανά M. ύψος [22]
- Όταν η μπροστινή ώθηση του ρεύματος ήταν ευδιάκριτα περισσότερο απότομη ( $<0,5$  [μs]), τα αποτελέσματα δεν ήταν πλέον σπουδαία. Η αλυσίδα μετρήσεων για δυναμικό που αυξάνεται πάνω στο έδαφος και πάνω στον πυλώνα (κυριότερα οι διαιρέτες) είχε ουσιαστικά σχεδιαστεί σε περιόδους από τις πληροφορίες που είχαν δοθεί θεωρητικά γύρω από το αντικείμενο και εμείς εκπλαγήκαμε με την απότομη πτώση της καταγραφής των ρευμάτων.

Η σειρά μετρήσεων συνεπώς τείνει να τροποποιηθεί προσδοκώντας να έχουν σωστές προβλέψεις σε χρόνο της τάξης μικρότερο των 150 [nsec] στην καμπάνια μετρήσεων του 1977.

## **6.2 Μέτρηση τάσεων που παράχθηκαν κατά μήκος γραμμών**

Η μελέτη πάνω σε υπερτάσεις που παράχθηκαν από αστραπή κοντά σε ηλεκτρικές και τηλεφωνικές μεταφορικές γραμμές πρόκειται να αναπτυχθεί κατά την διάρκεια του 1977.

Δύο γραμμές θα τοποθετούνται κοντά στην πυροδοτική περιοχή για αυτό το σκοπό:

- Μια ηλεκτρική μεταφορική γραμμή μήκους 200 [m] με τα άκρα τους σε απόσταση 50 [m] και 205 [m] από το πυλώνα.
- Μια τηλεφωνική γραμμή μήκους 2200 [m], με τα άκρα σε αποστάσεις των 1500 [m] και 2700 [m] από το πυλώνα.

Οι γραμμές θα είναι κλειστές στα άκρα τους, και στις δύο περιπτώσεις, με δικές τους χαρακτηριστικές εντάσεις γραμμής και υπερτάσεις που παράγονται θα καταγράφονται στο πιο μακρινό άκρο.

Έτσι εμείς ελπίζουμε να συσχετίσουμε τις παραμέτρους του χτυπήματος της αστραπής (ρεύμα, ηλεκτρομαγνητικό κύμα) με παρατηρούμενη ένταση στις γραμμές λαμβάνοντας υπόψη τη συνέχεια των γραμμών.

### 6.3 Προστασία από τις αστραπές

Το CEA προτείνει να βαθμολογηθεί ένα όργανο σχεδιασμένο έτσι ώστε να προειδοποιεί το σχηματισμό καταιγίδων, είτε μετρώντας το ηλεκτροστατικό πεδίο στο έδαφος ή με ανίχνευση της ηλεκτρομαγνητικής παρέμβασης παραγόμενη από χτύπημα. Αυτό το όργανο θα πρέπει για παράδειγμα να παρέχει ένα μέσο αυτόματης μεταγωγής στην εφεδρική παροχή ενέργειας για ασφαλείς εγκαταστάσεις ή να παράγει προειδοποίηση ήχου για διακοπή επικίνδυνων εργασιών (εκρηκτικά, υδρογονάνθρακες).

Μπορούμε να επισημάνουμε την πιθανότητα της συνεχόμενης ή της ολοκληρωμένης εργασίας πάνω σε διάτρητες μεταλλικές πλάκες, από τη στιγμή που τα ρεύματα αστραπής που έχουν

καταχωρηθεί στο SPDA κατέχουν ένα υψηλό S<sup>2</sup>idt εξαιτίας της δική τους συνεχόμενης συνιστώσας και το μεγάλο αριθμό των χτυπημάτων.

#### **6.4 Έρευνα για την ευαισθησία των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων**

Το CEA προτείνει να διεξαχθεί έρευνα για την συμπεριφορά των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και συνδέσεων κατά την διάρκεια της αστραπής για λογαριασμό ενός αριθμού οργανώσεων. Τα ευαίσθητα εξαρτήματα μπορεί ή να τοποθετηθούν κοντά στο σημείο επαφής ή το ρεύμα αστραπής μπορεί ακόμα να διοχετεύεται μέσω των κουτιών τα οποία περιέχουν τα εξαρτήματα.

#### **6.5 Ευαισθησία των εκρηκτικών στην αστραπή**

Μερικά τεστ έχουν ήδη γίνει γι' αυτό το σκοπό ηλεκτρικοί αναφλεκτήρες ή πυροκροτητές συνδεδεμένοι σ' ένα κλειστό κύκλωμα, έχουν τοποθετηθεί κοντά στο σημείο επαφής. Το επίπεδο του κλειστού κυκλώματος είναι τοποθετημένο κάθετως ή παράλληλα στο επαγωγικό πεδίο.

Τα εκρηκτικά τίθονται σε ενέργεια από τα χτυπήματα κεραυνού σε αρκετές περιπτώσεις αλλά μόνο όταν το κλειστό κύκλωμα είναι κάθετος στο μαγνητικό επαγωγικό πεδίο, δηλ. μόνο όταν συμβάλλει σε μαγνητική ροή.

Τα τεστ θα διεξαχθούν το 1977· διπολικά κυκλώματα θα χρησιμοποιηθούν επιπλέον μαζί με τα κλειστά κυκλώματα.

## 7. Συμπεράσματα

1. Τα πειράματα αποδεικνύουν για πρώτη φορά ότι τα χτυπήματα αστραπής μπορεί να πυροδοτηθούν πάνω από το έδαφος χρησιμοποιώντας τη τεχνική του σύρματος και της ρουκέτας η οποία έχει αναπτυχθεί πιο πριν από τον Newman. Το κριτήριο για την επιτυχή πυροδότηση είναι η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο της γης μετρημένη με ένα επεξεργαστή πεδίου.
2. Τα χτυπήματα αστραπής που έχουν παραχθεί τεχνικώς έχουν πολλές ομοιότητες με τα φυσικά χτυπήματα τα οποία προέρχονται από προεξέχοντα μεταλλικά αντικείμενα.. Χαρακτηρίζονται από ένα κοινό κορμό στη βάση και από πολλαπλές διακλαδώσεις που αναπτύσσονται στην κατεύθυνση από τα σύννεφα των καταιγίδων.
3. Οι κορυφαίες τιμές του ρεύματος οι οποίες έχουν καταγραφεί μέχρι τώρα είναι κατά μέσο όρο χαμηλότερες από αυτές που έχουν καταγραφεί κατά τη διάρκεια άλλων πειραμάτων πάνω στη φυσική αστραπή. Τα χαρακτηριστικά που παρατηρήθηκαν είναι πολύ πιο κοντά στα επόμενα χτυπήματα φυσικής αστραπής αλλά παρατηρήσαμε μια πλειονότητα ωθήσεων οι οποίες είχαν χρόνο κρούσης μικρότερο από 0,5 [msec].
4. Μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επαληθεύουν τους θεωρητικούς υπολογισμούς που αφορούν την επιρροή του εδάφους στη διάδοση του επιφανειακών κυμάτων. Αντιστρόφως αυτό επιβεβαιώνει τη μέθοδο υπολογισμού των

ρευμάτων φυσικής αστραπής από μετρήσεις που πάρθηκαν από απόσταση.

5. Εκτιμώντας τις πρωταρχικές έρευνες στις ηλεκτρικές εκφορτίσεις τα χτυπήματα που πυροδοτήθηκαν αποτελούν μια ελπίδα να γίνει μια πειραματική σύγκριση με εργαστηριακές λάμπες.
6. Τα χαρακτηριστικά των τεχνικών χτυπημάτων αστραπής επιτρέπουν πλήθος εφαρμογών στο πεδίο της ηλεκτρομηχανικής έρευνας. Πάντως αυτή η μέθοδος δεν ανταποκρίνεται στα προβλήματα που σχετίζονται με τις ιδιότητες του πρώτου χτυπήματος (π.χ. χτύπημα από απόσταση).
7. Εκτιμώντας την συμπεριφορά των γήινων συνδέσεων οι πρώτες μετρήσεις έδειξαν ότι η επαγωγική δράση ειδικότερα αναφερόμενη σε σχέση με την αντίστροφη αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση δεν είναι στην πραγματικότητα αρκετά ευδιάκριτη με την προϋπόθεση ότι η διάταξη των γήινων συνδέσεων είναι σωστά σχεδιασμένη. Ένα σύστημα τεσσάρων καλωδίων τοποθετημένα σε μορφή αστέρα κατέχει ένα συντελεστή υπέρτασης μεταξύ 1,1 και 1,2 για ωθήσεις χρόνου ύψωσης περίπου  $T_F \approx 1$  [μsec]
8. Τα αποτελέσματα που είναι παρατέθηκαν σ' αυτό το φυλλάδιο δικαιώνουν τη συσχέτιση των πειραμάτων που γίνονται με την τεχνητή αστραπή.

Αυτή η τεχνική ανοίγει το δρόμο για έναν αριθμό νέων πειραμάτων και για έρευνα σε σχέση με την επίδραση της

αστραπής. Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν για την προστασία των διαφόρων μερών του εξοπλισμού είναι τυπικά παραδείγματα πρακτικής εφαρμογής. Επιπλέον η μελέτη των υπερτάσεων οι οποίες οφείλονται σε σειρές από πλάγια χτυπήματα αστραπής είναι δυνατόν να ερμηνευτεί.



## Κεφάλαιο 2

### Πειράματα τεχνητής πυροδοτούμενης αστραπής σε μια ΕHV γραμμή μεταφοράς

#### Περίληψη

Στο πείραμα τεχνητής αστραπής κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκε μια ρουκέτα η οποία είχε μεταφερθεί σε ένα χιονισμένο βουνό στην Ιαπωνία. 13 χτυπήματα είχαν ληφθεί για τις δύο εποχές του 1986 και του 1987. Η αστραπή που έλαβε χώρα στον αγωγό και στον πυλώνα των 275 [KV] γραμμής μεταφοράς, στο έδαφος κτλ. Αυτό το φυλλάδιο αναφέρει τη μέθοδο πυροδότησης, τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν για τις ηλεκτρικές και οπτικές παρατηρήσεις και τη σχετική συζήτηση με αυτά.

Ρουκέτα, τεχνητή αστραπή, βουνό, χειμωνιάτικα σύννεφα καταιγίδας, σημείο στεφάνης εκφόρτισης ρεύματος, ΕHV γραμμή μεταφοράς, ρεύμα αστραπής, ακουστική μέτρηση του κεραυνού, ανασυγκρότηση του καναλιού εκφόρτισης, φωτογραφία λωρίδας αστραπής.

## Εισαγωγή

Τα πειράματα για την τεχνητώς πυροδοτούμενη αστραπή στην Ιαπωνία, χρησιμοποιώντας μια ρουκέτα έχουν πραγματοποιηθεί για τα σύννεφα θύελλης από το 1977. Στην παράκτια αξιοποιημένη γη της Kahokugata, σε DM πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. 71 επιτυχείς αστραπές έχουν συσσωρευτεί μέχρι το 1985, συμπεριλαμβανόμενου των απ' ευθείας χτυπημάτων στο έδαφος και κάποιου εξοπλισμού (π.χ. ανθρώπινα ομοιώματα, αυτοκίνητο, Μ/Σ μετατροπείς ισχύος, γραμμές διανομής και λωρίδες αστραπής).

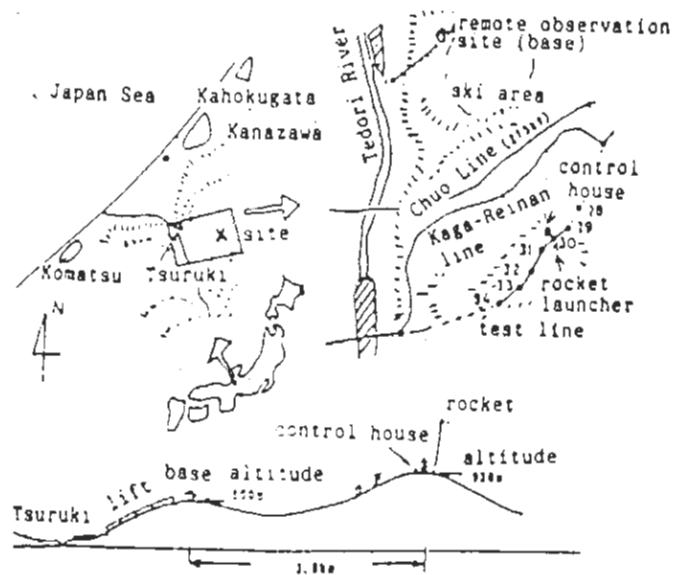
Το 1986 η τοποθεσία του τεστ μεταφέρθηκε στο Okushishiku High-land το οποίο βρίσκεται περίπου 30 [km] νότια της Kanazawa, όπου το υψόμετρο είναι περίπου 1000 [m]. Τα κύρια θέματα του πειράματος είναι (1) να καθιερώσει τις τεχνητές μεθόδους αστραπής σε γραμμές ή πυλώνες μεταφοράς, (2) να μελετήσει το φαινόμενο εκφόρτισης της αστραπής (3) την αμυντική επίδραση της αστραπής του γήινου σύρματος στον αγωγό και την απόσταση του χτυπήματος από τον πυλώνα μεταφοράς, (4) να μελετήσει τα αντιστεκόμενα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού εξοπλισμού (π.χ. συλλέκτης υπέρτασης, γήινο καλώδιο) κατά τη διάρκεια των πειραμάτων εκφόρτισης της αστραπής.

Το 1986 και 1987 τα πειράματα επικεντρώνονται κυρίως στους δύο προηγούμενους σκοπούς του (1) και του (2). Η μέθοδος της πυροδοτούμενης ρουκέτας οι μετρήσεις ρεύματος στην εκφόρτιση του σημείου της στεφάνης για να εκτιμηθεί η ένταση του πεδίου

στο έδαφος, ηλεκτρικές και ακουστικές μετρήσεις και οπτικές παρατηρήσεις της τεχνητής αστραπής, έρευνες των φαινομένων εκφόρτισης που άρχισαν στην περιοχή του βουνού η οποία είναι περικυκλωμένη με σύννεφα θυέλλης περιγράφονται και συζητούνται σε αυτό το φυλλάδιο.

## 1. Πειράματα

### 1.1 Τοποθέτηση και διευθετήσεις



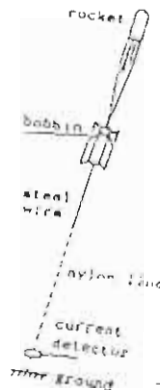
Εικ. 1: Γεωγραφική τοποθεσία από το Okushishiku

Ο τόπος του πειράματος βρίσκεται στην κορυφή του Mt. Okushishiku, 930 [m] υψόμετρο, κοντά στην κύρια κοιή του ποταμού Todoriki. Η γραμμή μεταφοράς στο Okushishiku, όπως

περιγράφεται στην εικόνα 1, είχε αρχικά κατασκευαστεί για χρήση 275 [kV] και αργότερα μετακινήθηκε εν μέρει και αποσυνδέθηκε από τη ζωντανή γραμμή σέρβις του Kaga-Reinan. Η δοκιμαστική γραμμή είναι εξοπλισμένη με 6 αγωγούς και ένα γήινο σύρμα συμπεριλαμβανόμενου οπτικά καλώδια από πεπιεσμένο χαρτί (OPGW). Η απόσταση είναι 2103 [m] μεταξύ των πύργων #28 και #34. Ένα κέντρο ελέγχου και αρκετοί εκτοξευτήρες ρουκετών τοποθετήθηκαν κοντά στον πύργο #30 (59,5 [m] ύψος).. Ένας εξ' αποστάσεως τόπος παρατήρησης κανονίσθηκε σε μια γωνία της πίστας σκι του Shishiku, (600 [m] υψόμετρο), που είναι 3,6 [km] βόρεια του κέντρου ελέγχου. Δύο κάμερες, ένας LLS (σύστημα θέσης αστραπής), ένα σύστημα μέτρησης ρεύματος χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της κεραίας σε σχήμα βρόχου και ένα σύστημα μέτρησης ρεύματος εκφόρτισης στεφάνης είχαν προετοιμαστεί.

## 1.2 Μέθοδος πυροδότησης και εξοπλισμός

Για να εξασφαλιστεί το χτύπημα επιστροφής όπως και στη φυσική αστραπή, η τεχνητή μέθοδος έγινε όπως δείχνει η εικόνα 2.



Εικ. 2: Μέθοδος πυροδότησης

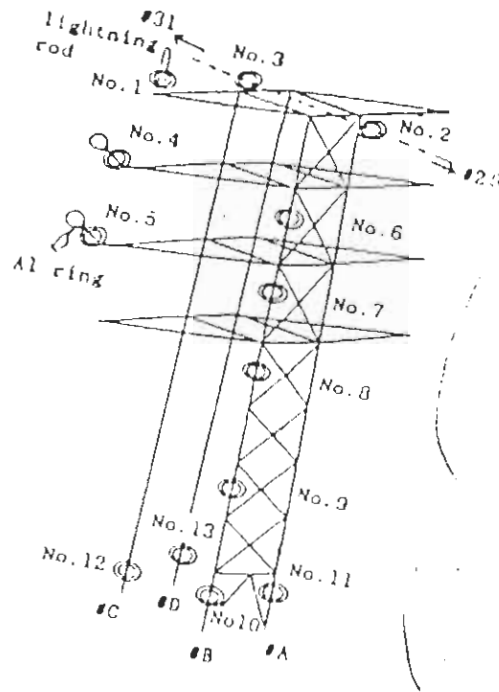
Η πρώτη αιωρούμενη γραμμή ήταν μια νάιλον γραμμή και η επόμενη ήταν πάνω στο ασάλινο σύρμα. Η ενωμένη ομάδα ΗΠΑ και Γαλλίας πραγματοποίησε τα πειράματα τεχνητής αστραπής στις ΗΠΑ και τώρα δραστήρια ενεργούν στη Φλόριντα. Αρκετές επιτυχίες έχουν σημειωθεί χρησιμοποιώντας παρόμοια ιχνηλατημένη με νάιλον μέθοδο στα 1988 και 1989.

Εξαιτίας του πολύ χιονιού και της χαμηλής θερμοκρασίας, μια μέθοδος εκφόρτισης ρεύματος σημείου στεφάνης χρησιμοποιήθηκε για να εκτιμηθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο έδαφος αντί ενός περιστρεφόμενου πεδίου. Είναι γνωστό ότι το ρεύμα σημείου στεφάνης αλλάζει σε αναλογία με την ένταση του πεδίου υψωμένη στο τετράγωνο ως  $I=b(E-c)E$  από τον Chalmers [6] όπου  $b$  και  $c$  είναι σταθερές. Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν νικελένιο σύρμα με 0,3 [mm] διάμετρο, στερεωμένο σ' ένα σωλήνα από σπάγκο του εγχυτήρα. Το άκρο ήταν ημισφαιρικά γυαλισμένο και προεξέχον στον αέρα 5 [m] από το έδαφος. Το ρεύμα στεφάνης ανιχνεύτηκε με μια αντίσταση των 10 [Kohms].

Τα ρεύματα εκφόρτισης αστραπής μέσω του πύργου και των αγωγών μετρήθηκαν εφαρμόζοντας ένα ομοαξονικό παράλληλο κύκλωμα αντίστασης ή πηνία Rogowski. Τα στοιχεία από το πηνίο Rogowski καταγράφηκαν από ένα εύχρηστο τύπο ψηφιακής μονάδας μνήμης ασφαλώς εγκαταστημένη στα πόδια του πύργου.

Οι προδιαγραφές του πηνίου Rogowski και της μονάδας μνήμης δίνονται στον πίνακα 1. Πέντε μονάδες ήταν εξοπλισμένες το

1986 και 13 τροποποιημένες μονάδες το 1987. Οι θέσεις που ήταν τοποθετημένες φαίνονται στην εικόνα 3.



Εικ. 3: Διάταξη μονάδων μέτρησης ρεύματος

Όπως φαίνεται στην εικόνα, δύο κύκλοι (600 [mm] dia) αλουμινίου (πάχους 9,5 [mm] dia) συνδέθηκαν και προεξείχαν από κάθε άκρη των ανώτερων και μεσαίων φάσεων του βραχίονα του πύργου για να ελέγχουν το λιώσιμο από την εκφόρτιση ρεύματος αστραπής. Οι μαγνητικές ζεύξεις τοποθετήθηκαν ξεχωριστά για να αξιολογήσουν την κορυφή του ρεύματος διαμέσου των τεσσάρων ποδιών του πύργου.

**Πίνακας 1:** Προδιαγραφές του συστήματος πηνίου Rogowski

Δειγματοληπτική αναλογία και χωρητικότητα μνήμης	4 [us]*8 [kW] και 40 [us]*4 [kW]
Συνολικός χρόνος καταγραφής	200 [ms]
A/D μετασχηματιστής	8 bits
Χρόνος ενσωμάτωσης σταθεράς πηνίου Rogowski	0,5 [s]

Ένας Μ/Σ ρεύματος τύπου through-hole χρησιμοποιώντας ένα μαγνητικό πυρήνα με ένα στοιχείο δράσης Hall τοποθετήθηκε στο έδαφος για να ελέγξει εάν το ρεύμα που είχε επιφορτιστεί διαρρέει τη νάιλον γραμμή.

Η ακουστική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για να αναπαραστήσει την δίοδο εκφόρτισης στην αόρατη περιοχή, ειδικά στο σύννεφο. Τρία μικρόφωνα (εδώ i,j,k) τοποθετήθηκαν ξεχωριστά σε μια απόσταση 10 [m]. Το εύρος της ζώνης ήταν από 1-500 [Hz], και η ακτίνα μέτρησης 55-20 [dB]. Ένας ηχητικός ανακλαστήρας και ένα κάλυμμα εγκαταστάθηκαν για να αποτρέψουν αντανάκλαση ήχου και θόρυβο από τον άνεμο. Ψηφιακή ανάλυση εφαρμόζοντας μια κανονική λειτουργία διασταυρωμένης συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε στο σκηνικό αναπαράστασης. Το σχεδιάγραμμα είναι όπως ακολουθεί.

(α). Ένας κανονικός παράγοντας διασταυρωμένης συσχέτισης  $R_{ij}(T_{ij})$  δίνεται γενικώς στην εξομοίωση (1) για τους δύο τύπους κύματος των i και j.

$$R_{ij}(T_{ij}) = \frac{\int_{t_0 - \frac{T_w}{2}}^{t_0 + \frac{T_w}{2}} f_i(t) f_j(t + T_{ij}) dt}{\int_{t_0 - \frac{T_w}{2}}^{t_0 + \frac{T_w}{2}} |f_i(t) f_j(t + T_{ij})| dt}$$

Όπου  $t_0$  = ξεπερασμένος χρόνος μετά την πραγματοποίηση μιας λάμψης αστραπής (=διαδομένος χρόνος του κεραυνού παρμένος από ένα σημείο στο διάστημα στο  $i$  μικρόφωνο),

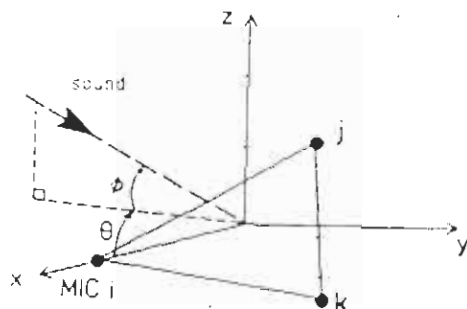
$T_w$  = παράθυρο χρόνου της ψηφιακής ανάλυσης

$T_{ij}$  = σχετικός χρόνος διαφοράς μεταξύ δύο χρονικών παραθύρων των κυμάτων  $i$  και  $j$ .

(β) Η μέγιστη τιμή του  $R_{ij}(T_{ij})$  αποκτιέται σε ένα αρμόζων σχετικό χρόνο διαφοράς του  $T_{ij}$ . Μετά ο άλλος σχετικός χρόνος διαφοράς  $T_{ik}$  για τα δύο είδη κύματος των  $i$  και  $k$  μπορεί να αποκτηθεί με παρόμοια διαδικασία.

(γ) Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα των  $T_{ij}$  και  $T_{ik}$  και της ταχύτητας ήχου  $v$  και της απόστασης μεταξύ των τριών μικρόφωνων  $L$  και λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρική σχέση όπως δείχνει η εικόνα 4, η τοποθεσία της πηγής ήχου λαμβάνεται από τις εξισώσεις (3), (4), (5).





Εικ. 4: Διάταξη των μικροφώνων

Απόσταση διάδοσης  $D$  από τη πηγή ήχου στο μικρόφωνο  $i$ :

$$D = v \cdot t_0$$

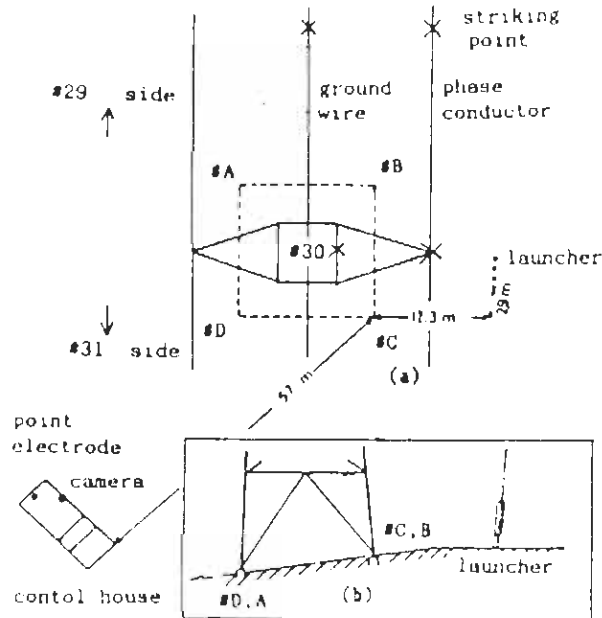
$$\text{Ανύψωση: } \varnothing = \text{συν} \cdot L \cdot \left\{ \left( \frac{v}{L} \right) \sqrt{\left( T_{ij} + T_{ik} \right) \frac{2}{3} + \left( T_{ij} - T_{ik} \right) 2} \right\} \quad (4)$$

$$\text{Αζιμούθιο: } \theta = \eta \mu^{-1} \left\{ \left( \frac{v}{L} \right) \left( \frac{T_{ij} - T_{ik}}{\text{συν} \theta} \right) \right\} \quad (5)$$

Παρόμοια ανάλυση συνεχίζεται για αρκετά άλλα χρονικά παράθυρα και οι αντίστοιχες τοποθεσίες πηγών ήχου εκτιμούνται και σχεδιοποιούνται.

Δύο σταθερές κάμερες, βίντεο κάμερες και μια streak κάμερα με ταχύτητα φιλμ 2,5 [m/s] χρησιμοποιήθηκαν για οπτικές παρατηρήσεις στο κέντρο ελέγχου. Επιπλέον, το δυναμικό στη γείωση του πυλώνα αυξάνεται στους σπόγγους του μονωτή του πυλώνα που μετρήθηκαν στο πείραμα. Η εικόνα 5 δείχνει τη διεύθυνση του κέντρου ελέγχου, τον πυλώνα #30, τις γραμμές

μεταφοράς και το σταθμό εκτόξευσης, μαζί με τα σημεία χτυπήματος που σημειώθηκαν στο πείραμα του 1986 και 1987.



Εικ. 5: Διατάξεις γύρω από τον τόπο του πειράματος

## 2. Δεδομένα και αποτελέσματα

### 2.1 Γενικά

Κατά τη διάρκεια του πειράματος που κράτησε σχεδόν ένα μήνα καταιγίδες υπήρξαν μόνο για 2 ή 3 ημέρες το 1986 και 5 μέρες το 1987. Δεκατρείς εκφορτίσεις πραγματοποιήθηκαν γι' αυτές τις 2 εποχές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 2.

**Πίνακας 2: Πειραματικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν σε δύο έτη**

Αριθμός πειραμάτων	Ημερομηνία Μήνας/ημέρα	Χρόνος εκτόξευσης	Χρόνος πυρίτις μετά την εκτόξευση	Σημείο στεφάνης ρεύματος	Μέτρηση αιχμής ρεύματος	Φορτίο	Σημείο χτυπήματος
1986-11	12/04	11 32 39	1 0 s	+30 $\mu$ A	>50 KA	>50 C	βραχίονες πύργου
-13	12/07	18 57 28	8 0	-0 8	-	-	έδαφος
1987-05	11/22	01 10 00	3 0	+0 7	+23 0	>53	κορυφή πύργου
-07	11/22	01 31 00	2 7	-0 5	-8 5	-	βραχίονες πύργου
-08	11/22	01 44 00	4 0	+1 4	-11 0	>100	σύρμα γείωσης
-10	11/23	00 10 00	3 7	-2 1	άγνωστο	-	εκτοξευτήρας
-16	12/01	13 41 28	1 7	+4 2	+9 0	>21	κράτηση
-17	12/01	13 54 23	1 3	-3 0	-1 0	-	κράτηση
-18	12/01	14 17 14	2 1	0 0	+14 0	-	βραχίονες πύργου
-19	12/03	09 37 05	1 5	-2 2	>-1 0	-	έδαφος
-21	12/03	10 50 27	4 9	+5 2	άγνωστο	-	φάση σιγαλού
-22	12/03	11 01 05	2 5	+8 0	(-5 5)	-	βραχίονες πύργου
-23	12/03	16 49 15	1 5	>+10 0	+47 5	>142	έδαφος

Όταν αρκετά μικρο-αμπέρ του ρεύματος εκφόρτισης στεφάνης καταγράφηκαν, η ρουκέτα εκτοξεύτηκε. Το ρεύμα στεφάνης των 1-2 [ $\mu$ A] ανταποκρίνεται στο ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος των 6-8 [KV/m] σε μέσο όρο [4]. Στον τόπο πειράματος στο Okushishiku, το ηλεκτρόδιο τοποθετήθηκε κάτω από τον πυλώνα και τις γραμμές· τότε το δίκτυο ηλεκτρικού πεδίου στο έδαφος μειώθηκε περίπου ένα τρίτο εξαιτίας της επίδρασης ασπίδας.

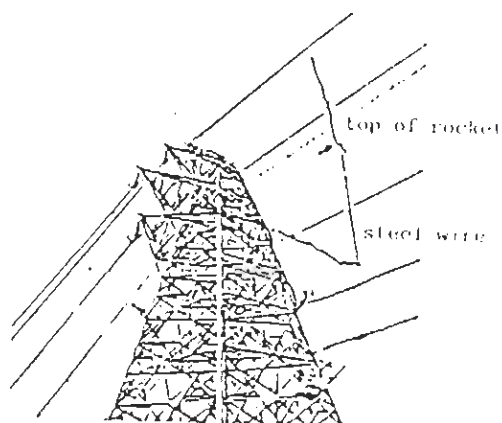
Τα υψόμετρα των συννέφων θυέλλης ήταν χαμηλότερα από 1 [km] στον πάτο και 3-5 [km] στην κορυφή, όπως συνήθως. Αφού ο πύργος και το κέντρο ελέγχου είναι συχνά περικυκλωμένα από σύννεφα θυέλλης με χιόνι να πέφτει, είναι δύσκολο να παρθούν καθαρές φωτογραφίες της εκφόρτισης αστραπής ακόμα και από μικρή απόσταση. Ευτυχώς, φωτογραφίες τεσσάρων

εκφορτίσεων, 1987 -05, -07, -08, -10 πάρθηκαν σε καθαρές συνθήκες.

## 2.2 Ασραπές το 1986

Στην εκφόρτιση Νο 1986-11, μια ρουκέτα εκτοξεύτηκε στα +3.0 [μΑ] του σημείου στεφάνης ρεύματος εκφόρτισης. Αυτό ανταποκρίνεται στο ηλεκτρικό πεδίο στο επίπεδο έδαφος των 10 [KV/m]. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την προστατευτική επίδραση το δίκτυο έντασης πεδίου θεωρείται ότι είναι 30 [KV/m].

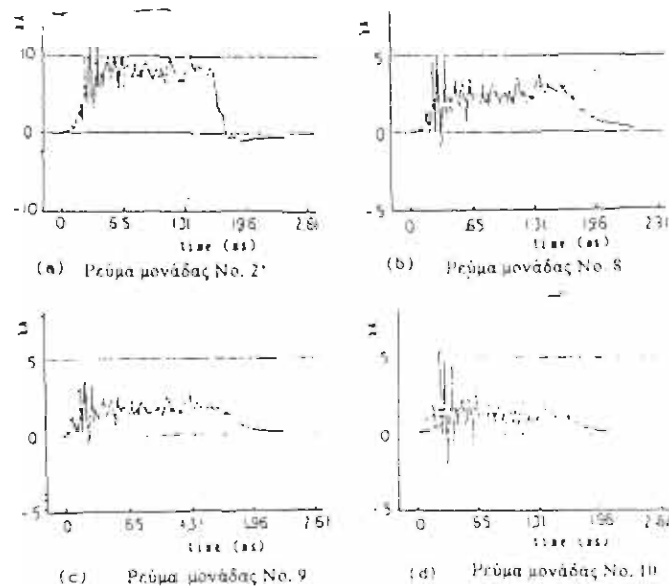
Η αστραπή χτύπησε έναν από τους υψηλότερους βραχίονες του πυλώνα. Η εικόνα 6 δείχνει ένα σχέδιο του χτυπήματος αστραπής.



Εικ. 6: Λάμψη αστραπής 1986-11 (σχέδιο)

Το χτύπημα σχηματίστηκε σε τρία κομμάτια. Τα υψηλότερα και χαμηλότερα μέρη ανταποκρίνονται στην «φυσική εκφόρτιση» στον αέρα προσανατολισμένα προς τα σύννεφα επάνω και προς τον βραχίονα κάτω, αντίστοιχα. Το ευθείο μέρος στη μέση ανταποκρίνεται στην έκρηξη του καλωδίου. Η νάιλον γραμμή είναι αόρατη. Σύμφωνα με την παρατήρηση με μια streak κάμερα η εκφόρτιση αστραπής συνεχίστηκε για περίπου 300 [ms]. Η απόσταση μεταξύ του κάτω μέρους του καλωδίου και του τέλους του βραχίονα, που ονομάζεται εδώ απόσταση χτυπήματος εκτιμήθηκε να είναι περίπου 23 [m] με τρισδιάστατη ανάλυση.

Η εικόνα 7 δείχνει τέσσερις τύπους κύματος ρεύματος που εφαρμόστηκαν στο σύστημα πηνίου του Rogowski για τη λάμψη της αστραπής 1986-11 θετικής πολικότητας.



Εικ. 7: Ρεύμα δια μέσω υπερθερμανόμενου σύρματος γείωσης και μια βάση πύργου #B

Το ρεύμα Α ανταποκρίνεται στην μονάδα Νο 2 στο εναέριο γήινο καλώδιο. Ένα τραπεζοειδή ρεύμα ρέει για περίπου 2 [msec] με ένα κορυφαίο ρυθμό των 10 [KA]. Το συνολικό φορτίο του ρεύματος ήταν 12,2 [C]. Τα άλλα τρία εξαρτήματα (b), (c) και (d) είναι τα ρεύματα διαμέσω του διαφορετικού τμήματος του ποδιού του πυλώνα #B. Το μέγεθος των τραπεζοειδών εξαρτημάτων έγινε σταδιακά μικρότερο στα χαμηλότερα τμήματα του Νο8, Νο9 και Νο10. Οι κορυφαίες τιμές ρευμάτων τους ήταν 5,0 [KA], 3,6 [KA], 5,6 [KA] και τα συνολικά φορτία ήταν 4,2 [C], 3,0 [C], 2,1 [C] αντίστοιχα. Στον κάθε μαγνητικό σύννεφο των τεσσάρων ποδιών του πυλώνα τα ρεύματα των 4,7 [KA] (#A), 5,8 [KA] (#B), 8,1 [KA] (#C) και 3,4 [KA] (#D) αντίστοιχα ανιχνεύτηκαν. Το συνολικό φορτίο διαμέσου του πυλώνα εκτιμήθηκε να είναι 15 [C] θεωρώντας μια γραμμική σχέση μεταξύ της κορυφαίας τιμής ρεύματος και του φορτίου ( $=4,2 \cdot 19,8/5,6 = 14,85$ ). Στο πυλώνα #30 υπήρχαν τρία καλώδια γείωσης από τα οποία το ένα χρησιμοποιείται για δοκιμή και τα δύο ήταν στην κορυφή του πυλώνα, ώστε τρεις φορές από 10 [KA] και 12,2 [C] μπορούσαν να ληφθούν υπόψη. Έτσι η κορυφαία τιμή ρεύματος και το φορτίο εκτιμήθηκαν να είναι περισσότερο από 50 [KA] και 50 [C] αντίστοιχα. Κανένα ρεύμα προφόρτισης δεν μετρήθηκε κατά μήκος της νάιλον γραμμής στο έδαφος.

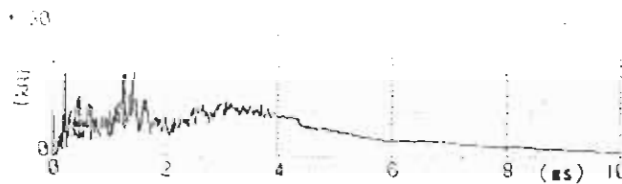
### **2.3 Ασραπές το 1987**

Η Νο 1987-05 αστραπή χτύπησε τη ράβδο της αστραπής στην κορυφή του πυλώνα, όπως δείχνει στην εικόνα 8.



*Εικ. 8: Λάμψη αστραπής 1987-05*

Το ρεύμα διαμέσου της ράβδου φαίνεται στην εικόνα 9, μετρημένο από την μονάδα πηνίου Rogowski No1.



*Εικ. 9: Ρεύμα δια μέσω της ράβδου στην κορυφή του πύργου (1987-05)*

Η θετική πολικότητα του ρεύματος συνεχίστηκε για περισσότερο από 10 [μsec] περιλαμβάνοντας πολλούς παλμούς από τους οποίους ο κορυφαίος ήταν περισσότερο από +18 [kA] και το συνολικό φορτίο ήταν περισσότερο από 53 [C].

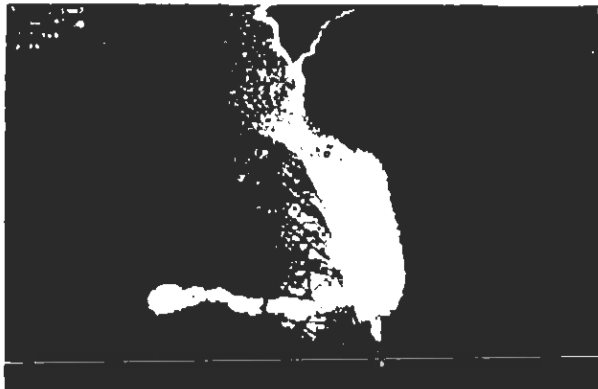
Η No 1987-07 αστραπή χτύπησε την άκρη του ψηλότερου βραχίονα του πυλώνα. Η ακινητοποιημένη φωτογραφία φαίνεται

στην εικόνα 10. Η κορυφαία τιμή ρεύματος με αρνητική πολικότητα ήταν  $-8,5$  [KA] και η διάρκεια της εκφόρτισης ήταν  $1$  [msec]. Μια ενδιαφέρων λωρίδα αστραπής φαίνεται αργότερα.



*Εικ. 10: Λάμψη αστραπής 1987-07*

Η Νο 1987-08 αστραπή χτύπησε το καλώδιο γείωσης περίπου  $25$  [m] μακριά από τον πυλώνα, όπως φαίνεται στην εικόνα 11.



*Εικ. 11: Λάμψη αστραπής 1987-08*



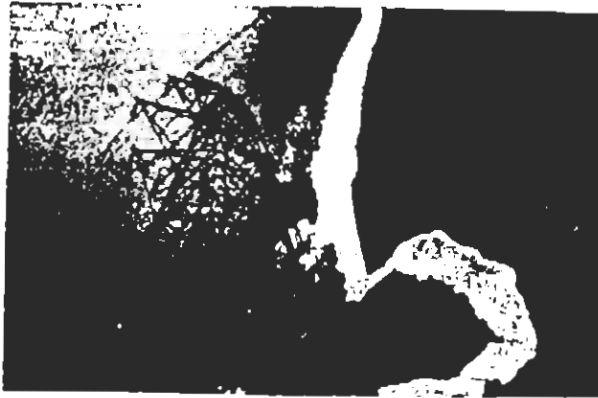
Το ρεύμα διαμέσου μιας πλευράς του καλωδίου που μετρήθηκε από τη μονάδα Νο 2 φαίνεται στην εικόνα 12.



Εικ. 12: Ρεύμα δια μέσω του σύρματος γείωσης (1987-08)

Η πολικότητα του ρεύματος ήταν αρνητική. Περισσότερα από -100 [C] συνολικό φορτίο συνεχιζόμενο για περισσότερο από 25 [msec] ανιχνεύτηκε. Συνεπώς περισσότερο από -200 [C] του συνολικού φορτίου υπολογίστηκε γι' αυτή την εκφόρτιση αστραπής, μετά αρκετοί αγωγοί του συνεστραμένου καλωδίου γείωσης έπαθαν ζημιά και έσπασαν.

Η αστραπή Νο 1987-10 χτύπησε απ' ευθείας έναν από τους τρεις καθελκυστήρες χωρίς να χτυπήσει τον πυλώνα. Σε μια στιγμή, δύο ρουκέτες σε άλλους καθελκυστήρες ξαφνικά αναφλέχθηκαν και πυροδοτήθηκαν αλλά δεν προκλήθηκε επιπλέον εκφόρτιση αστραπής κατά μήκος των καλωδίων της ρουκέτας. Η φωτογραφία στην εικόνα 13 δείχνει μια αστραπή και τρία ίχνη της φωτιάς της ρουκέτας. Τρεις ξεχωριστές ρίγες φαίνονται στο κανάλι εκφόρτισης αστραπής. Αυτές οι ρίγες δεν σημαίνουν ότι υπήρχαν πολλαπλές διαλείποντες λάμπες, αλλά υπήρχε κίνηση στο κανάλι που προερχόταν από τη δύναμη του ανέμου κατά τη διάρκεια του συνεχόμενου ρεύματος.

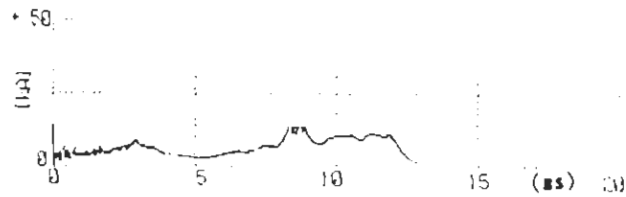


*Εικ. 13: Λάμψη αστραπής 1987-10*

Η αστραπή Νο 1987-18 χτύπησε στο άκρο του ψηλότερου βραχίονα του πυλώνα όπως δείχνει η εικόνα 14. Η εικόνα δεν είναι καθαρή. Το ρεύμα της θετικής πολικότητας που μετρήθηκε από την Νο4 φαίνεται στην εικόνα 15.



*Εικ. 14: Λάμψη αστραπής 1987-18*



*Εικ. 15: Ρεύμα δια μέσω της άκρης του βραχίονα*

Το συνολικό φορτίο δίνει 87 [C]. Η αστραπή Νο 1987-22 χτύπησε στο άκρο του ψηλότερου βραχίονα του πυλώνα. Οι τρεις πολλαπλές λάμπες φαίνονται στην εικόνα 16.

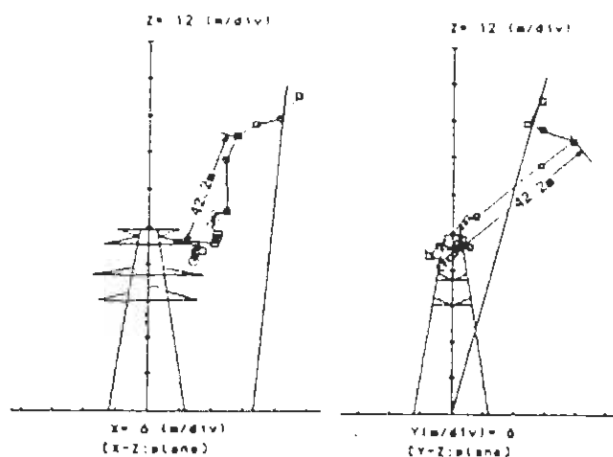


*Εικ. 16: Λάμψη αστραπής 1987-22*

Τρεις εκφορτίσεις αστραπών των 1987-07, -18 και -22 χτύπησαν τον δακτύλιο αλουμινίου που προεξείχε από το άκρο του βραχίονα. Μόνο μερικά μικρά λιωμένα ίχνη βρέθηκαν στην επιφάνεια.

### 3. Συζητήσεις

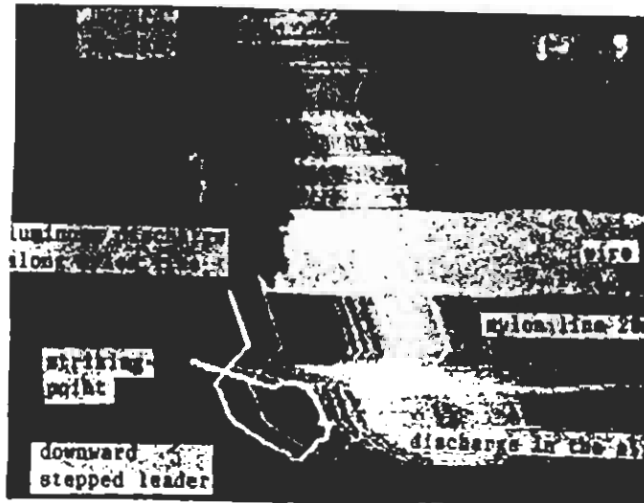
#### 3.1 Ανακατασκευή του καναλιού αστραπής



Εικ. 17: Ανακατασκευή της λάμπης αστραπής 1987-22

Η εικόνα 17 δείχνει το κανάλι εκφόρτισης για την αστραπή No 1987-22 που αποκτήθηκε από την ανάλυση αναστήλωσης θεατή από δύο κατευθύνσεις. Η γραμμή του νάιλον και το καλώδιο μεγεθύνεται στα σχεδιαγράμματα της αναστήλωσης υπολογίζονται την τροχιά της ρουκέτας. Η γραμμή νάιλον είναι 100 [m] μακριά. Το αναστηλωμένο κανάλι τερματίζει στο άκρο του ψηλότερου βραχίονα του πυλώνα #30 και η σύνθεσή του προσαρμόζεται καλά με την λάμψη στη φωτογραφία της εικόνας 16. Από το σχήμα η απόσταση χτυπήματος εκτιμήθηκε ότι είναι 42,2 [m].

### 3.2 Streak φωτογραφία



Εικ. 18: Streak φωτογραφία της λάμψης αστραπής 1987-07

Πολλές streak φωτογραφίες πάρθηκαν. Η εικόνα 18 της αστραπής No 1987-07 δείχνει μια ενδιαφέρουσα διάρθρωση εκφόρτισης. Η πρώτη φωτεινή εκφόρτιση εμφανίζεται κατά μήκος της νάιλον γραμμής περίπου 10 [m] κάτω από τη σύνδεση του ασφάλινου σύρματος. Μετά από 0,2 [ms] γίνεται η δεύτερη εκφόρτιση και η φωτεινή γραμμή εκτείνεται προς τα κάτω άλλα 10 [m] κατά μήκος της νάιλον γραμμής.. Ο κλιμακωτός οδηγός αρχίζει μέσα σε 0,9 [ms] μετά τη δεύτερη εκφόρτιση και διαδίδεται προς τα κάτω στον πυλώνα. Ο κλιμακωτός οδηγός διαρκεί για 0,2 [ms] και η απόσταση ταξιδιού του εκτιμάται στα 40 [m] περίπου. Η μέση ταχύτητα του επάνω οδηγού είναι  $2 \cdot 10^4$  [m/s].

Από τη μέτρηση αλλαγής πεδίου, η πολικότητα του κάτω οδηγού ήταν αρνητική.

Όταν ο κάτω κλιμακωτός οδηγός πλησιάζει τον πυλώνα, μια λαμπερή φωτεινότητα υπάρχει. Αυτό οφείλεται σε ένα «χτύπημα επιστροφής» το οποίο γρήγορα διαδίδεται από τον βραχίονα του πυλώνα για να συναντήσει τον κλιμακωτό οδηγό. Αλλά το σημείο της ένωσης δεν είναι καθαρό. Αυτό το χτύπημα επιστροφής δεν είναι, σαν την περίπτωση της φυσικής αστραπής, να ταξιδέψει στο κέντρο του σύννεφου σε μια παύλα αλλά διακόπτεται απ' αυτό ακυρώνοντας τη φόρτιση που έμεινε πίσω από τον κλιμακωτό οδηγό λίγο πριν. Μετά το χτύπημα σταματά περίπου 30 [m] πάνω από τη ρουκέτα. Το ρεύμα υποτίθεται ότι είναι τόσο μικρό ώστε το καλώδιο δεν λιώνει. Μέσα σε 0,4 [ms] μερικό λιώσιμο του καλωδίου αρχίζει με πολλές οριζόντιες φωτεινές ρίζες και ο πάνω οδηγός εμφανίζεται την ίδια στιγμή. Αργότερα ο πάνω οδηγός συνεχίζει να πηγαίνει προς τα πάνω μέσα στο σύννεφο με πολλές επαναλήψεις φωτός και σκοταδιού φωτεινών εκφορτίσεων. Το φορτίο του οδηγού προμηθεύτηκε από το έδαφος μέσω του λιωμένου καναλιού του καλωδίου με αρκετή αγωγιμότητα. Από τη μέτρηση πεδίου αυτό αποφασίστηκε να είναι ο θετικός οδηγός. Παρόμοια streak φωτογραφία με δύο είδη οδηγών πάρθηκε στην εκφόρτιση αστραπής του 1987-10.

Γενικά υπάρχουν δύο τύποι φυσικής εκφόρτισης αστραπής που ξεκινούν με τον κάτω οδηγό έξω από τα σύννεφα θυέλλης (τύπος A) και με τον πάνω οδηγό έξω από το έδαφος ή τον πυλώνα (τύπος B). Οι εκφορτίσεις αστραπών τύπου B παρατηρούνται συνήθως στη γραμμή μεταφοράς και στον πυλώνα στα χειμωνιάτικα σύννεφα θυέλλης στην Ιαπωνία εξαιτίας του

χαμηλού υψόμετρου του πάτου του σύννεφου στα 1000 [m] περίπου.

Στην διαδικασία εκφόρτισης με οδηγό, όπως φαίνεται στην εικόνα 18, πρώτα ο κάτω οδηγός που ανταποκρίνεται στην εκφόρτιση τύπου Α εμφανίζεται από το κάτω μέρος του καλωδίου, και μετά ο πάνω οδηγός της εκφόρτισης τύπου Β ακολουθεί μετά το λιώσιμο του καλωδίου μέχρι να γίνει η κύρια εκφόρτιση. Η διαδικασία με οδηγό στην εκφόρτιση είναι λίγο πιο πολύπλοκη από αυτή στην φυσική περίπτωση, πάντως η όλη άποψη της εκφόρτισης αστραπής, εκτός από την διαδικασία του πρώτου οδηγού, είναι παρόμοια με τη φυσική αστραπή τύπου Β. Η διαδικασία πρώτου οδηγού εδώ προσφέρει διαθέσιμη εκτίμηση της «απόστασης χτυπήματος».

#### **4. Συμπεράσματα**

Πειράματα πυροδοτούμενης αστραπής χρησιμοποιώντας ρουκέτα έγιναν στο Okushishiku Highland το 1986 και 1987. 13 χτυπήματα αστραπής έγιναν στο βουνό το χειμώνα της τάξης των 1000 [m] και 8 κτυπήματα συζητήθηκαν κύρια. Από τα αποτελέσματα που πάρθηκαν μπορούν να βγουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Πέντε χτυπήματα αστραπής έγιναν στο πυλώνα και ένα ξεχωριστά έγινε με έναν αγωγό, γήινο καλώδιο, και πυροκροτητή ρουκέτας, αντίστοιχα. Αυτά τα χτυπήματα αστραπής παράχθηκαν με μια μέθοδο στην οποία χρησιμοποιείται μια νάιλον γραμμή μήκους 100 [m].

2. Η ανίχνευση των συννέφων θυέλλης και η μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου στο έδαφος εφαρμόζοντας τη μέθοδο ρεύματος εκφόρτισης στεφάνης ήταν πολύ χρήσιμα στο κρύο και χιονισμένο βουνό.
3. Συγκριτικά μεγάλη αστραπή με ρεύμα περισσότερο από 50 [KA] ή φορτίο περισσότερο από 200 [C] παράχθηκαν. Τέτοιες μεγάλες εκφορτίσεις αστραπών μπορούν να φθείρουν σοβαρά τις γραμμές μεταφοράς και τα γήινα καλώδια.
4. Από ακουστική μέτρηση του κεραυνού χρησιμοποιώντας τρία μικρόφωνα, το κανάλι εκφόρτισης αναστηλώθηκε από μια κανονικοποιημένη σταυροσυσχετισμένη ανάλυση. Η αναστύλωση επίσης προσδιόρισε καλά το κανάλι εκφόρτισης συγκρινόμενο με τη φωτογραφία που πάρθηκε.
5. Σύμφωνα με τη streak φωτογραφία η εκφόρτιση αστραπής άρχισε από τη κάτω πλευρά του καλωδίου. Μέσα σε μερικές εκατοντάδες msec ο κλιμακωτός οδηγός φάνηκε να κινείται προς τα κάτω για να πλησιάσει τον βραχίονα του πυλώνα. Ένα τοπικό «χτύπημα επιστροφής» εμφανίστηκε και διαδόθηκε από τον βραχίονα του πυλώνα για να ακυρώσει το αριστερό φορτίο από τον κλιμακωτό οδηγό και μετά ο πάνω οδηγός ξεκίνησε από την κορυφή της ρουκέτας και συνέχισε προς τα πάνω μέσα στο σύννεφο. Τέτοια εκφόρτιση ήταν διαθέσιμη στο να ερευνήσουμε την απόσταση χτυπήματος.

Αρκετά LLS βρίσκονταν κοντά στον τόπο του πειράματος. Ωστόσο δεν προσδιόρισαν καμιά πυροδοτούμενη αστραπή. Αυτό δείχνει ότι υπάρχουν μερικές διαφορές μεταξύ της τεχνητής και της φυσικής αστραπής το χειμώνα.



## 5. Επίλογος

Είναι γνωστό ότι η απόσταση χτύπηματος αυξάνει όταν αυξάνει το ρεύμα, σαν ένα παράδειγμα ισότητας  $r_s = 3,3 I^{0,78}$  προτεινόμενο από τον Golde και Chan. Στο πείραμα τεχνητής αστραπής στον πυλώνα που χρησιμοποιήθηκε η νάιλον γραμμή άλλα τέσσερα δεδομένα εδώθησαν. Αυτά τα δεδομένα φαίνεται να κατανεμήθηκαν κοντά στην έκφραση του Golde και Chan [14]. Σε σύγκριση με τη φυσική περίπτωση κάποιες ιδιαιτερότητες του τόπου και των συνθηκών του πειράματος πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

1. Οι γραμμές μεταφοράς και οι πυλώνες στην τοποθεσία ήταν περικυκλωμένες από σύννεφα θυέλλης, και η εκφόρτιση τεχνητής αστραπής έγινε μέσα στα σύννεφα θυέλλης.
2. Μια συγκριτικά μικρή απόσταση περίπου 40 με 60 [m] μεταξύ του κάτω μέρους του καλωδίου και του πυλώνα είναι ένα βασικός παράγοντας για την απόσταση χτύπηματος. Μεγαλύτερη απόσταση νάιλον γραμμή θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο πείραμα για να πάρουμε μεγαλύτερη απόσταση.
3. Σύμφωνα με την εικόνα 18, πρώτα ο κλιμακωτός οδηγός ξεκινάει από το κάτω μέρος του καλωδίου και μετά το τοπικό «χτύπημα επιστροφής» ξεκινά από τον πυλώνα για να συναντηθούν και τέλος ο επάνω οδηγός κατευθύνεται προς το σύννεφο. Στη φυσική αστραπή πρώτα ο κλιμακωτός οδηγός ξεκινά από τα σύννεφα θυέλλης όπως συνήθως και το χτύπημα επιστροφής αρχίζει από την πλευρά του εδάφους.

4. Ο παράγοντας ανίχνευση του συστήματος εντόπισης αστραπής στην Ιαπωνία λέγεται ότι είναι περίπου 50% ή και λιγότερο για τις φυσικές αστραπές του χειμώνα [15].
5. Μια συσκευή προστασίας από αστραπή, χρησιμοποιώντας συλλέκτη υπέρτασης προτείνεται στους πυλώνες μεταφοράς [16]. Για να δοκιμάσουμε τα χαρακτηριστικά αντίστασης τέτοιων συλλεκτών υπέρτασης ενάντια στο απ' ευθείας χτύπημα στη γραμμή μεταφοράς, το πείραμα τεχνητή αστραπής είναι χρήσιμο. Η μέτρηση της απόστασης χτυπήματος μπορεί να γίνει κατά τη διάρκεια του πειράματος.

## Κεφάλαιο 3

### Εκφορτίσεις με λέιζερ σε μεγάλα κενά

#### Περίληψη

Πειράματα που στόχευαν στον έλεγχο των ηλεκτρικών εκφορτίσεων πραγματοποιήθηκαν με την βοήθεια μιας σειράς air-breakdown πλάσματος (Κανάλι πλάσματος) παραγόμενου με λέιζερ. Οι ηλεκτρικές εκφορτίσεις έλαβαν χώρα στα 4,5 [m] με λέιζερ CO<sub>2</sub> υψηλής ενέργειας συγκεντρωμένης από ένα καφρέφτη με μήκος συγκέντρωσης 10 [m]. Παρατηρήθηκαν σε ποσοστό 50% ασυνήθιστα χαρακτηριστικά αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης και ο μηχανισμός μιας από λέιζερ ελεγχόμενης εκφόρτισης έγινε εμφανής. Πειράματα εκφόρτισης με λέιζερ σε ομίχλη ή βροχή είχαν επίσης πραγματοποιηθεί για να διευκρινίσουν τα αποτελέσματα υγροποίησης πάνω στην καθοδήγηση των χαρακτηριστικών και τα αποτελέσματα αναλύθηκαν ποσοτικά.

Λέξεις κλειδιά: Εκφόρτιση οδηγούμενη από λέιζερ, Αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση, Αστραπή, Ατμοσφαιρικές συνθήκες..

## Εισαγωγή

Η αστραπή είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα για την σχεδίαση μόνωσης των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας. Έγιναν πολλές μελέτες όχι μόνο για τη φυσική αστραπή αλλά και για την αμυντική δράση των συσκευών μεταφοράς ενέργειας για να τις προστατέψουν από την αστραπή.

Πρόσφατοι πρόοδοι στην τεχνολογία λέιζερ προτείνουν την πιθανότητα μιας ράβδου αστραπής λέιζερ (LLR). Όταν ένα λέιζερ μεγάλης ενέργειας εστιάζεται στον αέρα, μια αλυσίδα air-breakdown πλάσματος παράγεται κατά μήκος της ακτίνας λέιζερ. Αυτό το πλάσμα έχει την ικανότητα να παράγει ηλεκτρικές εκφορτίσεις [1-4]. Εάν η ενέργεια του λέιζερ αυξηθεί μπορεί να παραχθεί μακρύ air-breakdown πλάσμα, το οποίο μπορεί να πυροδοτήσει φυσική αστραπή. Η πυροδότηση αστραπής με λέιζερ είναι μια τεχνική πολλά υποσχόμενη για την προστασία των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας και για τη μελέτη της φυσικής αστραπής. Ωστόσο τα βασικά χαρακτηριστικά των εκφορτίσεων με λέιζερ είναι ακόμα άγνωστα.

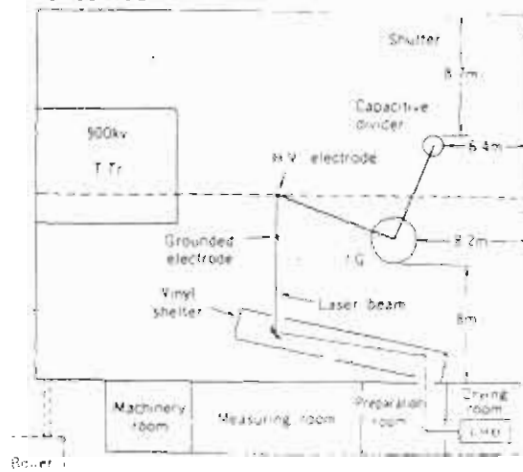
Σε μια προσπάθεια να κατανοήσουμε το φυσικό μηχανισμό των εκφορτίσεων με λέιζερ, έχουμε πραγματοποιήσει πειράματα σε τέτοιου είδους εκφορτίσεις. Σε προηγούμενο φυλλάδιό μας δείξαμε τα χαρακτηριστικά της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης μιας εκφότισης με λέιζερ και την επίδραση της πολικότητας για κενά λιγότερο από 2 [m]. Για να κατευθύνουμε τη φυσική αστραπή ωστόσο είναι απαραίτητο να διευκρινίσουμε τα χαρακτηριστικά αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης των

εκφορτίσεων που γίνονται με λέιζερ σε μεγαλύτερα κενά. Η επίδραση της ομίχλης ή της βροχής στα χαρακτηριστικά χρειάζεται επίσης, να διευκρινιστεί.

Γι' αυτό εμείς έχουμε πραγματοποιήσει πειράματα στις εκφορτίσεις με λέιζερ με μια γεννήτρια ωθήσεων 2,4 [MV] σε μια αίθουσα ομίχλης στο εργαστήριό μας. Ηλεκτρικές εκφορτίσεις καθοδηγήθηκαν πάνω από τα 4,5 [m] και για τις δύο πολικότητες. Τα αποτελέσματά μας δείχνουν τα ασυνήθιστα χαρακτηριστικά αφύσικη ηλεκτρική εκκένωσης των εκφορτίσεων με λέιζερ. Έχουν γίνει επίσης πειράματα για τις εκφορτίσεις με λέιζερ σε τεχνητή ομίχλη και τεχνητή βροχή και τα χαρακτηριστικά σ' ένα κενό περισσότερο από 10 [m] συζητούνται.

## 1. Πειραματικός εξοπλισμός

### 1.1 UHV αίθουσα ομίχλης



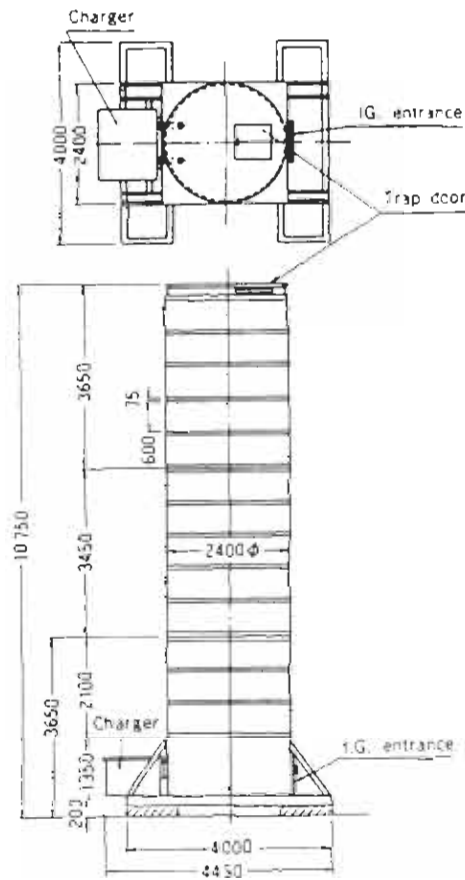
Εικ. 1: Σχηματικό διάγραμμα της αίθουσας ομίχλης UHV

Η εικόνα 1 δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα της UHV αίθουσας ομίχλης. Αυτή η αίθουσα ομίχλης, (35X26X35 m (h)) κατασκευάστηκε το 1979 για να ερευνήσει το αντιμολυσματικό σχέδιο για UHV συστήματα μεταφοράς. Η UHV αίθουσα ομίχλης χρησιμοποιήθηκε για το τεστ καθαρής ομίχλης μολυσμένων μονωτήρων και των μεταλλικών επενδύσεων. Έχει κατασκευαστεί από ένα σκελετό σιδήρου και ατσάλινες πλάκες καλυμμένες με χλωριούχο βινύλιο έχουν στερεωθεί στους εξωτερικούς και εσωτερικούς τοίχους με ανοξειδωτα ατσάλινα μπουλόνια για να εμποδίσουν τη διάβρωση και τον ηλεκτρικό θόρυβο. Δύο λέβητες με δυνατότητα παραγωγής ατμού 2400 [kg/hr] ο καθένας, παράγουν ομίχλη στην αίθουσα ομίχλης. Σωληνώσεις ατμού με περίπου 100 ακροφύσια εγκαταστάθηκαν 85 [cm] πάνω από το έδαφος κατά μήκος του τοίχου στην αίθουσα ομίχλης. Ένα όργανο μέτρησης πυκνότητας σύννεφου [6] που αναπτύχθηκε από το ινστιτούτο μετεωρολογικής έρευνας για να μετρήσουν την περιεκτικότητα υγρού στα σύννεφα χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει την πυκνότητά της ομίχλης. Λεπτομέρειες της UHV αίθουσας ομίχλης και πειραματικά αποτελέσματα του τεστ της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης με εναλλασσόμενο ρεύμα σε ομίχλη φαίνονται στην παραπομπή [7].

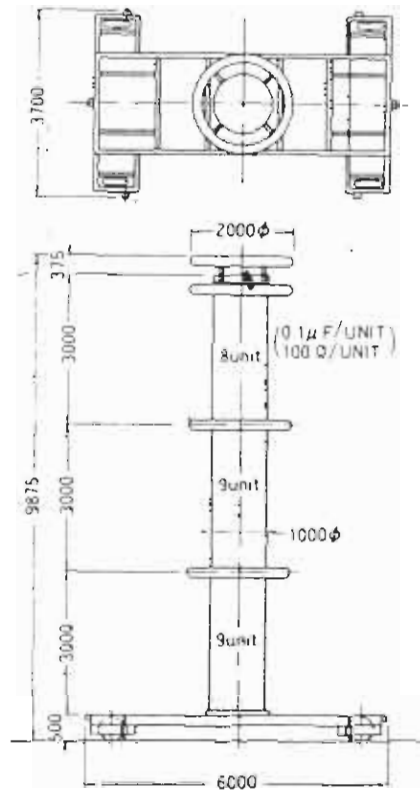
## 1.2 Γεννήτρια ωθήσεων

Η γεννήτρια ωθήσεων (I.G.) και ο διαχωριστής χωρητικότητας που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα που φτιάχτηκαν για να μελετήσουν τα χαρακτηριστικά της ωθούμενης αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης σε μεγάλα κενά αέρος σε βροχή ή ομίχλης.

Για να δημιουργήσουμε μια τάση ώθησης στην ομίχλη η γεννήτρια ώθησης είναι καλυμμένη με πλαστικές πλάκες ενισχυμένες με φαΐμπεργκλας (FRP). Στεγνός εξοπλισμός και ένας ανεμιστήρας εγκαταστάθηκαν για να ελαχιστοποιήσουν την υγρασία μέσα στην γεννήτρια ώθησης και να εμποδίσουν την βροχή ή την ομίχλη να μπουν μέσα. Ο διαχωριστής χωρητικότητας επίσης είναι καλυμμένος με ένα σωλήνα (FRP). Οι διαστάσεις και τα κύρια μέρη του εξοπλισμού φαίνονται στην εικόνα 2 και συνοψίζονται στον πίνακα 1.



**Εικ. 2α: Παλμική γεννήτρια**



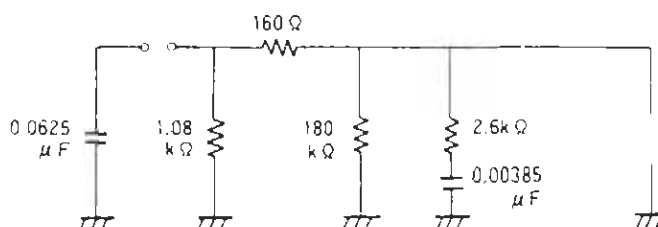
Εικ. 2β: Διαχωριστής χωρητικότητας



**Πίνακας 1: Παράμετροι της I.G. και του διαχωριστή χωρητικότητας**

Παλμική γεννήτρια	Τάση φόρπισης	2400 kV		
	Αριθμός μονάδων	12 μονάδες (Κορυφή 5 μονάδες, μέση 5 μονάδες, βάση 2 μονάδες)		
	Ολική χωρητικότητα	0,0625 $\mu$ F		
	Ολική ενέργεια	180 kJ		
	Πυκνωτής	1,5 $\mu$ F $\pm$ 10%, 100kV DC		
	Κύματα	1,2/50 $\mu$ s, 250/2500 $\mu$ s, 500/5000 $\mu$ s		
	Βάρος	12,6 t		
	Διαστάσεις	Ύψος 10,8 m Διάμετρος 2,4 m $\varnothing$		
	κύκλωμα σταθερές	Ολική	Χωρητική αντίσταση 0,00385 $\mu$ F 2,6k	
Διαχωριστής χωρητικότητας		Σε κάθε μονάδα	Χωρητική αντίσταση 0,1 $\mu$ F 100	
	Ρυθμιστές τάσεις	1,2/50 $\mu$ s: 2000 kV 250/2500 $\mu$ s: 1800 kV 500/5000 $\mu$ s: 1800 kV AC: 300kV συνεχή 400 kV 10 min		
	Αριθμός μονάδων	26 μονάδες (Κορυφή 8 μονάδες, μέση 9 μονάδες, βάση 9 μονάδες)		
	Χρόνος ανταπόκρισης	180 nsec		
	Βάρος	4,5 t		
	Διαστάσεις	Ύψος 9,9m Διάμετρος 1 m $\varnothing$		
	Καλώδιο μέτρησης	10D2V (50 27,5m, διπλή προστασία)		

Το κύκλωμα του πειράματος φαίνεται στην εικόνα 3 και η τάση σε μορφή κύματος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν η βασική ώθηση αστραπής.



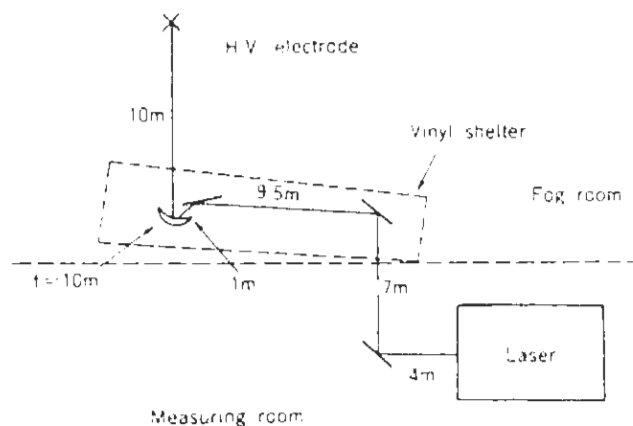
Εικ. 3: Κύκλωμα πειράματος

### 1.3 Σύστημα λέιζερ

Ένα παλμικό σύστημα λέιζερ διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα. Η παραγόμενη ενέργεια είναι περίπου 50 [J/παλμό] και η απόκλιση της ακτίνας είναι 0,12 [mrad] με έναν ευμετάβλητο ήχο. Οι λεπτομέρειες αυτού του συστήματος φαίνονται αλλού [5].

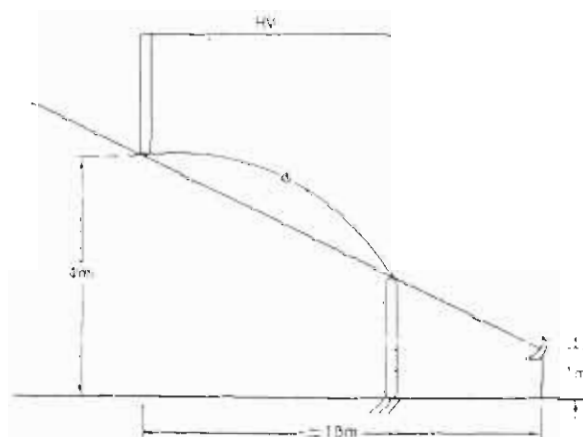
Επειδή η θερμοκρασία και η υγρασία στην αίθουσα ομίχλης ήταν πολύ υψηλές (θερμοκρασία: πάνω από 30 [°C], σχετική υγρασία: πάνω από 60%) το σύστημα λέιζερ τοποθετήθηκε σε ένα ειδικό δωμάτιο για να στεγνώσουν οι μολυσμένοι μονωτές και η ακτίνα οδηγήθηκε στη αίθουσα ομίχλης με επίπεδους καθρέφτες και έναν κοίλο εστιακό καθρέφτη. Το εστιακό μήκος στον καθρέφτη εστίασης ήταν 10 [m]. Για να εμποδίσουν την ομίχλη να υγραίνει την επιφάνεια των καθρεφτών, οι καθρέφτες τοποθετήθηκαν σε ένα μεγάλο στέγαστρο από βινύλιο. Μέρος των τοίχων του

στεγάστρου κόπηκαν και η ακτίνα λέιζερ πέρασε στην αίθουσα ομίχλης από το παράθυρο. Ένας ανεμιστήρας χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει ρεύμα προς τα έξω για να εμποδιστεί η ομίχλη να μπει μέσα στο στέγαστρο από βινύλιο. Η εικόνα 4 δείχνει την οπτική πορεία της ακτίνας λέιζερ.



Εικ. 4: Διάταξη της ακτίνας λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα

## 2. Πειραματική μέθοδος



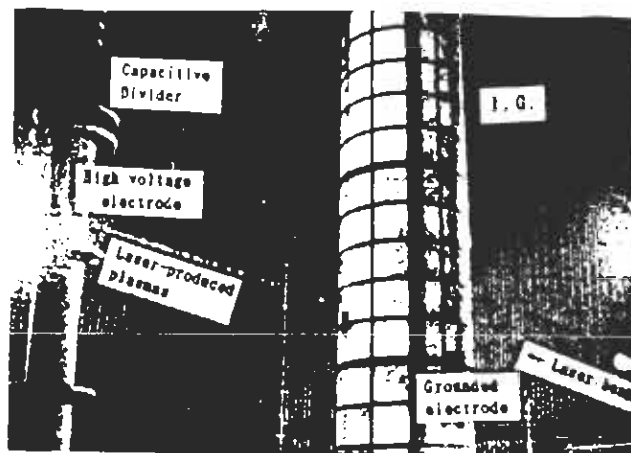
Εικ. 5: Διάταξη πειράματος

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στην εικόνα 5. Το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης ήταν μια τετράγωνη (0,5 [inch]X 0,5 [inch]) ράβδος από ορείχαλκο και το γειωμένο ηλεκτρόδιο ήταν μια ημισφαιρική ράβδος από ορείχαλκο (ακτίνα 0,5 [cm]). Ο καθρέφτης εστίασης προσαρμόστηκε έτσι ώστε να εστιάζει ακριβώς κάτω από την άκρη του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης.

Μετά την ακτινοβολία λέιζερ, διοχετεύτηκε τάση στο ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Επειδή οι αφύσικες ηλεκτρικές εκκενώσεις τάσης των εκφορτίσεων με λέιζερ είναι σχεδόν συνεχείς στην καθυστέρηση μεταξύ 10 [μs] και 100 [μs], ένας χρόνος καθυστέρησης 50 [μs] επιλέχτηκε για όλα τα πειράματα.

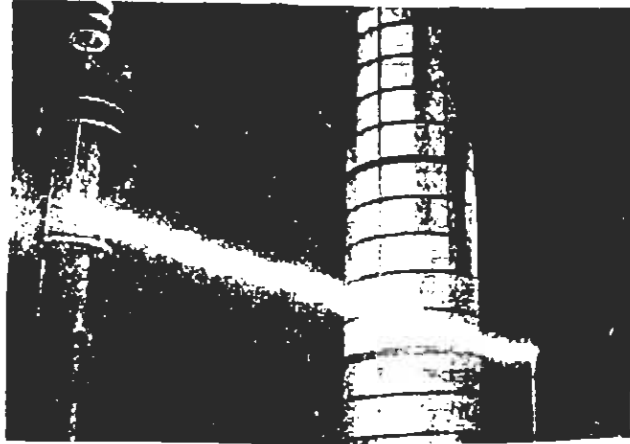
### 3. Αποτελέσματα και συζήτηση

#### 3.1 50% τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης κατά μήκους του κενού



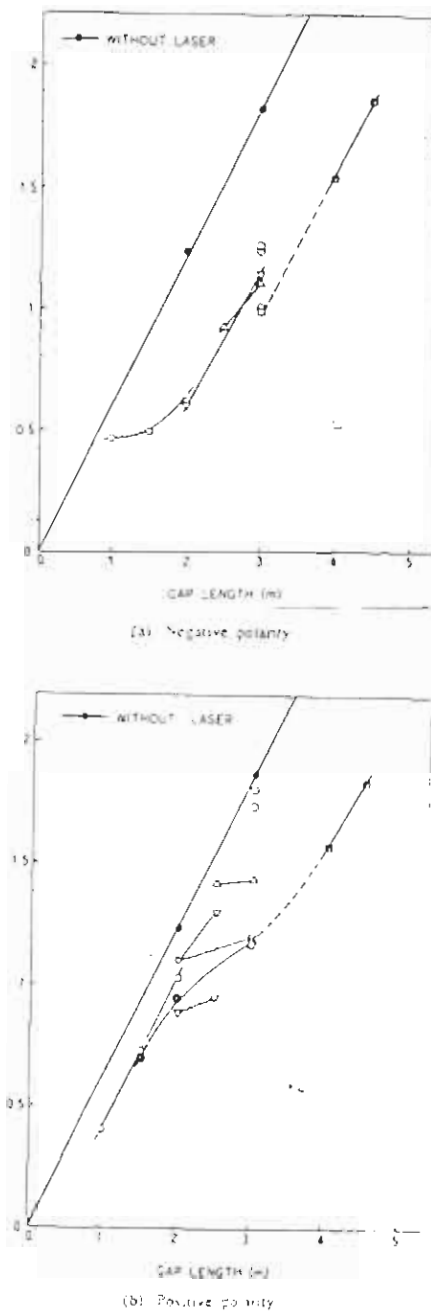
Εικ. 6: Παραγωγή λέιζερ πλάσματος

Η εικόνα 6 δείχνει μια στιγμιαία φωτογραφία πλάσματος που έχει παραχθεί από λέιζερ. Το μήκος του κενού σ' αυτή την περίπτωση ήταν 3 [m].



*Εικ. 7: Εκφόρτιση με λέιζερ*

Η εικόνα 7 είναι μια στιγμιαία φωτογραφία εκφόρτισης με λέιζερ. Η εκφόρτιση αναπτύσσεται ευθεία κατά μήκος του πλάσματος που παράχθηκε με λέιζερ και σπινθηροβολεί πάνω από το κενό που μένει.



Εικ. 8: Τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης σε σχέση με το μήκος κενού

Η εικόνα 8 δείχνει τα χαρακτηριστικά του 50% του μήκους των αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων τάσης για θετικές και αρνητικές πολικότητες.

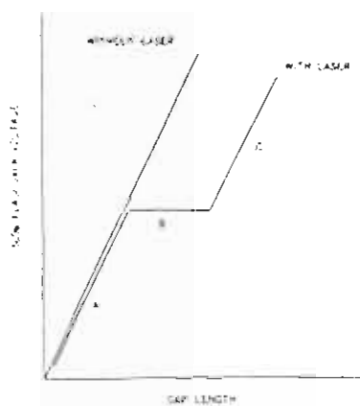
Τα ίδια σύμβολα στην εικόνα δείχνουν δεδομένα που πάρθηκαν την ίδια μέρα. Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν θερμοκρασία 22-29 [°C] και σχετική υγρασία 60-88%.

Χωρίς ακτινοβολία λέιζερ το 50% της δύναμης της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης του κενού είναι περίπου 600 [KV/m] και για τις δύο πολικότητες και η σπάνταρ τιμή της τάσης του 50% της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι λιγότερο από ένα μικρό ποσοστό της εκατό. Για εκφορτίσεις με λέιζερ ωστόσο η εκτόπιση του 50% της τάσης της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι ιδιαίτερα μεγάλη και τα χαρακτηριστικά της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης για τις δύο πολικότητες είναι διαφορετικά.

Για ένα κενό περισσότερο από 4 [m], η διαφορά μεταξύ των τάσεων αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης της τεχνητής εκφόρτισης, είναι μικρή και για τις δύο πολικότητες. Οι τάσεις αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων για ένα κενό 4,5 [m] με ακτινοβολία λέιζερ είναι περίπου 1,8 [MV] και για τις δύο πολικότητες. Στην περίπτωση αρνητικής πολικότητας η τάση του 50% της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης μειώνεται γραμμικά με τη μείωση του μήκους του κενού και είναι περίπου συνεχής για κενά 1-2 [m]. Για κενά μικρότερου μήκους από 1 [m] η τάση του 50% της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι περίπου ίδια όπως και χωρίς την ακτινοβολία λέιζερ. Στην περίπτωση της θετικής πολικότητας η τάση του 50% της αφύσικης ηλεκτρικής

εκκένωσης μειώνεται με τη μείωση του μήκους του κενού αλλά για κενά μήκους 2-3 [m] τα δεδομένα διαφοροποιούνται. Κοιτάζοντας τα δεδομένα την ίδια μέρα οι τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης φάνηκαν να είναι σχεδόν συνεχής για κενά 2-3 [m] αλλά η τιμή διαφέρει κατά πολύ. Για κενά λιγότερο από 2 [m] η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης, μειώνεται γραμμικά με το μήκος του κενού.

Απ' αυτά τα αποτελέσματα συμπεραίνουμε ότι υπάρχει αρχική τάση απαραίτητη για να δημιουργηθεί μια εκφόρτιση κατά μήκος του πλάσματος, και όσο η εκφόρτιση διατρέχει κατά μήκος του πλάσματος η πτώση τάσεως μεταξύ του υψηλού ηλεκτροδίου τάσης και του άκρου της εκφόρτισης είναι μηδαμινή. Με άλλα λόγια το πλάσμα δρα σαν μια προέκταση του ηλεκτροδίου υψηλής τάσης. Η εικόνα 9 δείχνει ένα σχηματικό διάγραμμα των χαρακτηριστικών αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης των εκφορτίσεων με λέιζερ βασισμένη στο παραπάνω συμπέρασμα.



*Εικ. 9: Σχηματική παράσταση των χαρακτηριστικών αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης της εκφόρτισης με λέιζερ*

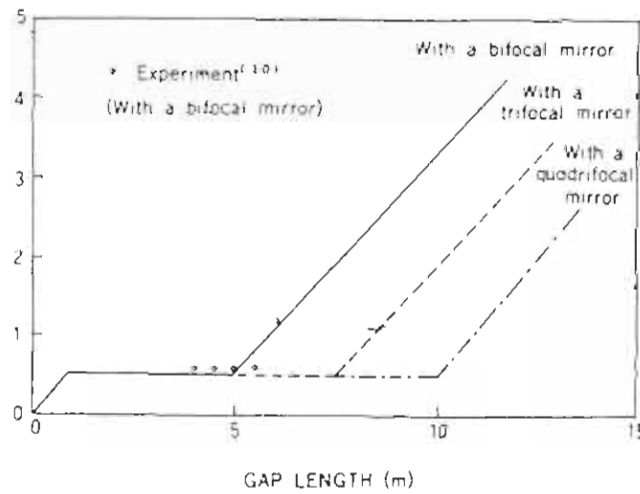


Τα χαρακτηριστικά τάσεως της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης χωρίζονται σε τρεις φάσεις, οι τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης των εκφορτίσεων με λέιζερ είναι περίπου ίδιες όπως και χωρίς την ακτινοβολία λέιζερ (φάση Α), οι τάσεις υπερλάμψεως είναι συνεχείς (φάση Β), οι τάσεις αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων είναι μικρότερες από εκείνες χωρίς ακτινοβολία λέιζερ αλλά αυξάνονται με το μήκος του κενού με τον ίδιο ρυθμό όπως και χωρίς ακτινοβολία λέιζερ (φάση Γ). Στη φάση Α η τάση που χρησιμοποιείται είναι μικρότερη από την αρχική τιμή και οι τάσεις αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων των κενών δεν μειώνονται πολύ με το πλάσμα. Στη φάση Β η χρησιμοποιούμενη τάση είναι η αρχική τάση και η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι σχεδόν συνεχής. Στη φάση Γ το μήκος του κενού είναι μεγαλύτερο από το σύνολο του μήκους του καναλιού του πλάσματος και το μήκος του κενού αέρος στο οποίο η φυσική ηλεκτρική εκκένωση βρίσκεται με την αρχική τάση. Σ' αυτό το πείραμα το μήκος του καναλιού του πλάσματος είναι 1,5 [m]. Η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι το άθροισμα της αρχικής τάσης και της τάσης που χρειάζεται η αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση στο κενό που παραμένει. Η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης από κει και πέρα αυξάνεται με μια κλίση περίπου 600 [KV/m] που είναι η ίδια όπως και χωρίς ακτινοβολία λέιζερ.

Για αρνητική πολικότητα, η αρχική τάση είναι περίπου 500 [kV]. Για θετική πολικότητα η αρχική τιμή ποικίλει από 900 [kV] σε 1500 [kV]. Ένας λόγος για τη διαφορά είναι ότι οι αρνητικές εκφορτίσεις είναι πιθανόν να καθοδηγηθούν από πλάσμα που παράχθηκε από λέιζερ αλλά οι θετικές όχι. Λαμβάνοντας υπ' όψιν

τη μεγάλη απόκλιση των αρχικών τιμών για θετική πολικότητα, η αρχική τάση φαίνεται να εξαρτάται όχι μόνο από την πολικότητα της χρησιμοποιούμενης τάσης αλλά και από τα χαρακτηριστικά του πλάσματος. Με άλλα λόγια η τιμή ποικίλει για τα είδη πλάσματος που παράγονται κάτω από διαφορετικές πειραματικές συνθήκες, όπως ενέργεια λέιζερ, σύστημα εστίασης και άλλα. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων, ωστόσο, η ενέργεια των παλμών λέιζερ, διατηρούνταν συνέχεια και οι ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία και η υγρασία ήταν σχεδόν ίδιες όπως αναφέρθηκε και πριν. Τα διαθέσιμα δεδομένα δεν δείχνουν καμιά φανερή σχέση ανάμεσα σε τέτοιους παραμέτρους και την αρχική τάση και γι' αυτό πιο λεπτομερείς έρευνες είναι απαραίτητες για να κατανοήσουμε το φαινόμενο καλύτερα. Αν η χρησιμοποιούμενη τάση είναι αρκετά υψηλή η εκφόρτιση και για τις δύο πολικότητες μπορεί να κατευθυνθεί από πλάσμα που έχει παραχθεί από λέιζερ.

Για να κατευθύνουμε μια εκφόρτιση σε μεγάλο κενό είναι απαραίτητο να παράγουμε πλάσμα κατά μήκος μιας μεγάλης απόστασης. Μια μέθοδος είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα ειδικό σύστημα εστίασης, όπως ένας φακός με πολλά foci [8] ή μια axicon [9]. Πράγματι χρησιμοποιώντας ένα καθρέφτη ο οποίος αποτελείται από δύο καθρέπτες με διαφορετικά μήκη εστίασης (καθρέφτες διπλής εστίασης), η παραγωγή μιας αρνητικής εκφόρτισης 6 [m] επιτεύχθηκε [10], και το μήκος επίδρασης του πλάσματος που παράχθηκε από λέιζερ είναι [5m] σ' αυτή την περίπτωση. Από προηγούμενη σκέψη, αυτό είναι το μήκος του ισοδύναμου ηλεκτροδίου από το πλάσμα.

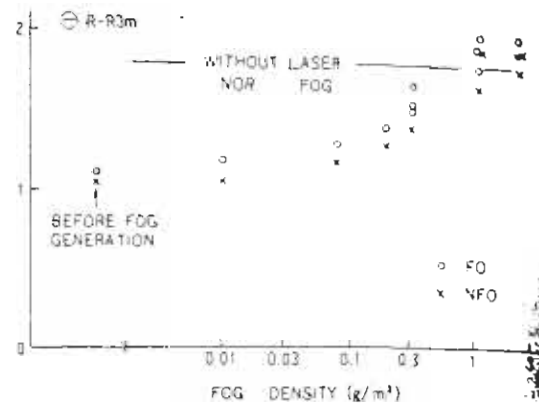


*Εικ. 10: Χαρακτηριστικά αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης από εκφορτίσεις με ένα πολυεστιακό καθρέφτη*

Η εικόνα 10 δείχνει τα εκτιμώμενα χαρακτηριστικά τάσης αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης της αρνητικής πολικότητας υποθέτοντας ότι η αρχική τάση είναι 500 [KV]. Τα εκτιμώμενα συμφωνούν απόλυτα με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην εικόνα 10 τα χαρακτηριστικά αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης με καθρέφτες που έχουν τρεις ή τέσσερις εστίες φαίνονται, υποθέτοντας ότι το μήκος του ισότιμου ηλεκτροδίου πλάσματος αυξάνει με τον αριθμό της εστίας. Όπως φαίνεται στην εικόνα είναι πιθανό να κατευθύνουμε εκφορτίσεις περισσότερο από 10 [m] με τάσεις της τάξεως των 500 [KV].

### 3.2 Χαρακτηριστικά εκφόρτισης που παράχθηκε από λέιζερ σε ομίχλη

Οι τάσεις αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων των εκφορτίσεων με λέιζερ σε ομίχλη μετρήθηκαν για ένα κενό 3 [m]. Η αίθουσα γέμισε με ατμό ομίχλης και τότε η παραγωγή ομίχλης σταμάτησε. Πειράματα αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης έγιναν ως εξής: πρώτον, μια ώθηση τάσης χρησιμοποιήθηκε με την καθυστέρηση μετά απ' την ακτινοβολία λέιζερ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Εάν υπάρξει αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση η χρησιμοποιούμενη τάση έχει μειωθεί και διοχετεύεται ξανά με το λέιζερ με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να μην υπάρχουν αφύσικες ηλεκτρικές εκκενώσεις. Η πυκνότητα της ομίχλης μετρήθηκε με την πυκνότητα του συννέφου σε ένα ύψος 4 [m]. Επειδή η πυκνότητα της ομίχλης μειωνόταν με τον χρόνο τα πειράματα έγιναν αρκετές φορές για διαφορετικές πυκνότητες ομίχλης. Η πολικότητα της χρησιμοποιούμενης τάσης ήταν αρνητική και οι άλλες πειραματικές συνθήκες ήταν οι ίδιες όπως και πριν.



Εικ. 11: Αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση από εκφορτίσεις με λέιζερ στην ομίχλη

Η εικόνα 11 δείχνει τα πειραματικά αποτελέσματα. Στην εικόνα το 0 (ανοιχτός κύκλος) συμβολίζει την αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση και το X (σταυρός) συμβολίζει τη απουσία αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης. Η θερμοκρασία και σχετική υγρασία στην αίθουσα ομίχλης πριν την παραγωγή ομίχλης ήταν 24 [°C] και 87% αντίστοιχα. Οι θερμοκρασίες στην αίθουσα ομίχλης κατά την διάρκεια των πειραμάτων ήταν 28 έως 31 [°C].

Όταν η πυκνότητα της ομίχλης ήταν παραπάνω από 1 [gr/m<sup>3</sup>], η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης της εκφόρτισης με λέιζερ ήταν τόσο υψηλή όσο με αυτή χωρίς λέιζερ και ομίχλη. Κάτω από τέτοιες συνθήκες το πλάσμα δεν μπορεί να παρατηρηθεί με γυμνό μάτι. Για πυκνότητα ομίχλης του 0,1 [gr/m<sup>3</sup>] η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης των εκφορτίσεων με λέιζερ μεγαλώνει μόνο 10-20% σε σύγκριση με αυτή χωρίς ομίχλη.

Επειδή η απορρόφηση εξαιτίας του ατμού του νερού είναι μηδαμινή για ένα παλμό με λέιζερ CO<sub>2</sub> η απορρόφηση και διασκόρπιση από σωματίδια ομίχλης είναι σημαντικές για τη διάδοση ενός παλμού λέιζερ CO<sub>2</sub> μέσα απ' την ομίχλη. Τότε ανακαλύπτουμε την δράση της ομίχλης στα χαρακτηριστικά της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης.

Για την πρώτη προσέγγιση υποθέτουμε ότι η απώλεια ενέργειας που προκλήθηκε από τις ομίχλες κατά τη διάρκεια μεταφοράς είναι εξαιτίας της εξάτμισης των σωματιδίων. Η απώλεια ενέργειας Q δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Q = K \int_0^L \pi r^2 \rho dl \quad (1)$$

όπου: K= Ειδική ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση

$r$  = Η ακτίνα του λέιζερ

$\rho$  = Η πυκνότητα της ομίχλης

$L$  = Το οπτικό μήκος της πορείας στην ομίχλη

Εάν το  $r$  και το  $\rho$  είναι συνεχή κατά μήκος της ακτίνας λέιζερ παίρνουμε τον τύπο:

$$Q = K\pi r^2 \rho L \quad (2)$$

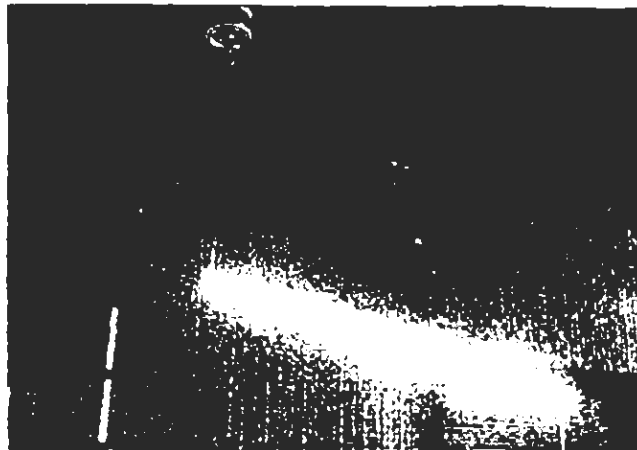
Στα πειράματα η μέση τιμή του μήκους της ακτίνας λέιζερ ήταν περίπου 2 [cm] και το μήκος της οπτικής πορείας στην ομίχλη ήταν περίπου 10 [m]. Η τιμή του  $K$  που χρησιμοποιήθηκε ήταν 2600 [J/gr] το οποίο σε σύνθεση με την θερμότητα της εξάτμισης περιλαμβάνει την ενέργεια που χρειάζεται για να ζεστανούμε το νερό από 20-100 [°C]. Βάζοντας αυτές τις τιμές στον τύπο (2) παίρνουμε  $Q = 0,3$  [J] και 34 [J] για  $\rho = 0,01$  [gr/m<sup>3</sup>] και 1 [gr/m<sup>3</sup>] αντίστοιχα. Στην περίπτωση που  $\rho = 1$  [gr/m<sup>3</sup>] η ενέργεια που χρειάζεται για να εξατμιστούν τα σωματίδια της ομίχλης στην οπτική πορεία είναι ίδια με την ενέργεια του παλμού λέιζερ. Σε τέτοια πυκνή ομίχλη σχεδόν κανένα πλάσμα από λέιζερ δεν παρατηρήθηκε στα πειράματα όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Για  $\rho = 0,01$  [gr/m<sup>3</sup>] ωστόσο η ενέργεια που χρειάζεται για την εξάτμιση της ομίχλης ήταν μηδαμινή και η τάση αφύσικη ηλεκτρική εκκένωσης ήταν η ίδια όπως και χωρίς ομίχλη.

Για να πυροδοτήσουμε φυσική αστραπή με λέιζερ το πλάσμα που παράγεται από το λέιζερ για περίπου 100 [m] είναι απαραίτητο. Η δράση της ομίχλης μπορεί να εκτιμηθεί από τον τύπο (2). Θεωρώντας μια μέση διάμετρο της δέσμης 5 [cm] και μήκος του καναλιού πλάσματος 100 [m] παίρνουμε 200 [J] για εξάτμιση της

ομίχλης όταν  $\rho = 0,1 \text{ [g/m}^3\text{]}$ . Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι το λέιζερ του μεγέθους KJ χρειάζεται για να πυροδοτήσει φυσική αστραπή [8] μια τιμή 200 [J] δεν φαίνεται τόσο μεγάλη.

Οι τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης των κενών όταν μια παλμική τάση χρησιμοποιήθηκε είχε ήδη μετρηθεί σε ξηρό αέρα και σε ομίχλη [11]. Για παλμούς αστραπής, οι τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης δεν μειώνονται με την ομίχλη και οι μειώσεις των τάσεων αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης που φαίνονται στην εικόνα 11 είναι από εδώ και πέρα αποτέλεσμα του πλάσματος με λέιζερ.

### 3.3 Χαρακτηριστικά εκφόρτισης που παράχθησαν με λέιζερ σε βροχή

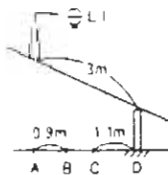


*Εικ. 12: Εκφόρτιση λέιζερ σε τεχνητή βροχή*

Η εικόνα 12 δείχνει μια στιγμιαία φωτογραφία μιας εκφόρτισης με λέιζερ σε τεχνητή βροχή. Σ' αυτό το πείραμα νερό βρύσης διασκορπίστηκε πάνω από το κενό με μια μάνικα. Τα μικροσκοπικά φωτεινά σημεία που φαίνονται στην εικόνα είναι στάλες νερού που αντανακλούν την εκφόρτιση. Ο ρυθμός βροχόπτωσης στο κενό ήταν 1,5 [mm/min] κατά μέσο όρο. Κάτω απ' αυτή την τεχνητή βροχή, πραγματοποιήθηκαν πειράματα στις εκφορτίσεις με λέιζερ και το 50% των τάσεων αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης επιτεύχθηκαν με τη μέθοδο πάνω-κάτω. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον πίνακα 2 και το 50% της τάσης αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης της εκφόρτισης με λέιζερ δεν αλλάζει κάτω από τεχνητή βροχή.

**Πίνακας 2:** Τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης από εκφορτίσεις με λέιζερ

Τιμή βροχόπτωσης



A: 0,8 [mm/min]

B: 1,4 [mm/min]

C: 2,6 [mm/min]

D: 1,2 [mm/min]

	50% Τάση αφύσικης ηλ. Εκκένωσης	Στάνταρ απόκλιση
Με βροχή	1,08 [MV]	8,9 %
Χωρίς βροχή	1,05 [MV]	6,5 %



Όσο αφορά τη μεταφορά δέσμης λέιζερ διαμέσου βροχής η εξάτμιση όλων των σωματιδίων στην οπτική πορεία είναι απίθανη γιατί ο όγκος κάθε σταγόνας βροχής είναι πολύ μεγαλύτερος απ' αυτές της ομίχλης. Αντίθετα θα έπρεπε να σκεφτούμε την περίπτωση να μπλοκάρει η επίδραση της δέσμης του λέιζερ από τα σωματίδια.

Είχε αποδειχτεί από τον Best [12] ότι σε πολλές περιπτώσεις το μέγεθος της βροχόπτωσης συμφωνεί με τους παρακάτω τύπους:

$$1-F = \exp\left\{-\left(\frac{D}{\alpha}\right)^n\right\} \quad (3)$$

$$\alpha = AR^p \quad (4)$$

$$W = CR^r \quad (5)$$

όπου: F είναι το μέτρο του υγρού νερού στον αέρα σε σταγόνες με διάμετρο μικρότερη από D

W είναι το ποσό του υγρού νερού κατά μονάδα όγκου -αέρα, και

R είναι ο ρυθμός βροχόπτωσης

A, C, p, r, n είναι σταθερές

Αν εκφράσουμε το R σε mm/hr το W σε mm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> και το D σε mm αυτές οι σταθερές είναι 1,30, 67, 0,232, 0,846 και 2,25 αντίστοιχα [12].

Με την προϋπόθεση ότι οι ισότητες είναι πραγματοποιήσιμες σε τεχνητή βροχή στο πείραμα ανακαλύπτουμε την επίδραση των σταγόνων νερού στη μετάδοση της δέσμης λέιζερ. Αν και ο

ρυθμός βροχόπτωσης δεν είναι σταθερός στο κενό η διαφορά είναι μικρή. Μετά για ευκολία χρησιμοποιούμε ρυθμό βροχόπτωσης 2 [mm/min] για την εκτίμηση. Βάζοντας  $R=2$  [mm/min], ( $=120$  [mm/hr]) στον τύπο (5) παίρνουμε  $W=4,3$  [g/m<sup>3</sup>]. Το μήκος της περιοχής όπου συμβαίνει η βροχόπτωση είναι σχεδόν ίσο με το μήκος του κενού στο πείραμα. Αν ο μέσος όρος ακτίνας της δέσμης λέιζερ είναι 2 [cm], ο όγκος της δέσμης λέιζερ σε τεχνητή βροχή είναι περίπου  $3,8 \times 10^{-3}$  [m<sup>3</sup>]. Τότε το νερό που περιέχεται σ' αυτόν τον όγκο είναι  $16 \times 10^{-3}$  [cc]. Αν βάλουμε  $D=1$  [mm] στο τύπο (3) παίρνουμε  $F=0,84$  από δω και πέρα οι διάμετροι των περισσότερων σταγόνων είναι λιγότερο από 1 [mm]. Αν το σχήμα της σταγόνας είναι σφαιρικό ο όγκος νερού σε 1 [mm] διάμετρο είναι  $5,2 \times 10^{-4}$  [cc]. Υπάρχουν περίπου 31 σταγόνες τέτοιου μεγέθους στον όγκο. Από τη στιγμή που η οροθετημένη από τις σταγόνες περιοχή είναι λιγότερο από το 2% της δέσμης η επίδραση αυτών των σταγόνων στη μετάδοση του λέιζερ είναι σχετικά μικρή. Αυτό το αποτέλεσμα εξηγεί γιατί οι τάσεις αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων δεν αυξάνονται κάτω από τεχνητή βροχή.

Συνήθως οι ρυθμοί βροχόπτωσης κάτω από φυσικές συνθήκες είναι πολύ μικρότεροι από αυτούς του μήκους της τεχνητής βροχής σ' αυτό το πείραμα. Αν υποθέσουμε ότι το μήκος της δέσμης λέιζερ είναι 100 [mm] και η μέση ακτίνα της δέσμης είναι 5 [cm], η περιεκτικότητα σε νερό στη δέσμη είναι 0,8 [cc] για ένα ρυθμό βροχόπτωσης 25 [mm/hr] και υπάρχουν περίπου 1500 σταγόνες στη δέσμη. Η οροθετημένη περιοχή από αυτές τις σταγόνες είναι περίπου το 15% της περιοχής της δέσμης. Ακόμα και σε βαριά βροχή, η δράση της βροχόπτωσης στη μετάδοση

της δέσμης λέιζερ δεν είναι μεγάλη. Συμπερασματικά η βροχή όπως και η ομίχλη δεν δημιουργούν μεγάλη δυσκολία στη μετάδοση της δέσμης λέιζερ.

Υπάρχουν ακόμα αρκετά προβλήματα για να λυθούν για να επιτευχθεί αστραπή πυροδοτούμενη με λέιζερ. Πρώτα απ' όλα η δραστική παραγωγή πλάσματος σε μεγάλη απόσταση δεν είναι απαραίτητα εύκολη υπόθεση. Μαζί με τη βροχόπτωση η αύξηση της ακτίνας του πλάσματος από λέιζερ μπορεί να έχει ζημιογόνα δράση για τη μετάδοση των παλμών λέιζερ γιατί το πλάσμα θεωρείται αδιαπέραστο από τον παλμό λέιζερ. Μια μέθοδος πολλαπλών δεσμών προτάθηκε για να μειώσει την δράση μπλοκαρίσματος του πλάσματος αλλά η πειραματική επιβεβαίωση δεν έχει γίνει ακόμα. Υπάρχει ένα ακόμα σημείο που δεν πρέπει να αγνοήσουμε. Π.χ. ο μηχανισμός ανάπτυξης ηλεκτρικών εκφορτίσεων κατά μήκος του πλάσματος, που δεν έχει ακόμα κατανοηθεί. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ασυνήθιστα χαρακτηριστικά των εκφορτίσεων με λέιζερ και ο μηχανισμός ανάπτυξης μπορεί να είναι διαφορετικός απ' αυτόν μιας κανονικής εκφόρτισης. Αυτό που είναι πιο σημαντικό είναι να διαχωριστεί η σχέση μεταξύ των χαρακτηριστικών του πλάσματος με λέιζερ και της ανάπτυξης της εκφόρτισης. Από μια θεωρητική άποψη η έγκυρη ακτινοβολία από μια δέσμη λέιζερ είναι επίσης απαραίτητη για την πυροδότηση αστραπής και αυτό απαιτεί ένα τρόπο για να καθορίσουμε τη συμπεριφορά των συννέφων θυέλλης. Αυτή η δουλειά χρειάζεται να γίνει στο μέλλον.

#### 4. Συμπεράσματα

Πειράματα για τις εκφορτίσεις με λέιζερ έγιναν για κενά rod-rod πάνω από 4,5 [m] στον αέρα, και εκφορτίσεις κατευθύνθηκαν επίσης σε ομίχλη ή βροχή. Τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

1. Υπάρχει μια αρχική τάση που είναι απαραίτητη για να μεταδοθεί η εκφόρτιση κατά μήκος του πλάσματος.
2. Τα χαρακτηριστικά της τάσης αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης των εκφορτίσεων με λέιζερ χωρίζονται σε τρεις φάσεις που εξαρτώνται από τη χρησιμοποίηση και το μήκος του κενού (Φάση Α-Φάση Γ).
3. Αν η χρησιμοποιούμενη τάση είναι μικρότερη από την αρχική τάση (φάση Α) το πλάσμα με λέιζερ που έχει παραχθεί δεν έχει σχεδόν καμιά επίδραση στις εκφορτίσεις και η τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης δεν μειώνεται με το πλάσμα.
4. Εάν η χρησιμοποιούμενη τάση είναι ίση με την αρχική τάση (Φάση Β), οι τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης είναι σταθερές και ανεξάρτητες από το μήκος του κενού, όταν το μήκος του κενού είναι μικρότερο από το μήκος του πλάσματος με λέιζερ.
5. Αν το μήκος του κενού είναι μεγαλύτερο απ' αυτό του πλάσματος με λέιζερ (Φάση Γ) οι τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης αυξάνονται γραμμικά με το μήκος του κενού.
6. Ούτε η φυσική ομίχλη ούτε η βροχή καθυστερούν σοβαρά την πυροδότηση φυσικής αστραπής με λέιζερ.

## Κεφάλαιο 4

### **22 Διεθνές συνέδριο για την προστασία από την αστραπή. Συζήτηση για την προστασία από την τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή**

Κεντρικό ινστιτούτο έρευνας της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας  
Τόκιο, Ιαπωνία

#### **Περίληψη**

Το πείραμα πυροδοτούμενης αστραπής από μια μικρή ρουκέτα πραγματοποιήθηκε από το 1977 στην Ιαπωνία. Στην περίπτωση που εφαρμόζουμε αυτή τη μέθοδο στην προστασία από την αστραπή υπάρχουν μερικά προβλήματα που πρέπει να λυθούν.

Πρόσφατα, τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή με λέιζερ μελετήθηκε αλλά καμιά φυσική αστραπή δεν πυροδοτήθηκε ακόμα.

Απ' την άλλη πυροδοτούμενη αστραπή από νεροπίδακα ερευνήθηκε επίσης στην Ιαπωνία.

Αυτό το φυλλάδιο παρουσιάζει μια σύντομη περίληψη διάφορων μεθόδων πυροδοτούμενης αστραπής και η πιθανότητα προστασίας από αστραπή χρησιμοποιώντας τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή συζητείται.

## Εισαγωγή

Στις γραμμές μεταφοράς ενέργειας στην Ιαπωνία περίπου το 65% των βλαβών οφείλονται σε φυσικά φαινόμενα. Από τα φυσικά φαινόμενα περίπου 75% οφείλεται σε εκφόρτιση αστραπής. Σε τέτοιες βλάβες η βλάβη του διπλού κυκλώματος είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα γιατί μπορεί να προκαλέσει διακοπή ηλεκτρισμού στην πρωτεύουσα.

Στην Ιαπωνία οι βλάβες των διπλών κυκλωμάτων συμβαίνουν πιο συχνά το χειμώνα από το καλοκαίρι. Μια από τις αιτίες γι' αυτές τις βλάβες πιστεύεται ότι είναι τα ασυνήθιστα χαρακτηριστικά των συννέφων θυέλλης κατά το χειμώνα. Προκειμένου να μειώσουμε τέτοιες βλάβες στις γραμμές μεταφοράς είναι απαραίτητο να μελετήσουμε την χειμωνιάτικη αστραπή πιο λεπτομερώς και απαιτούνται νέες μέθοδοι προστασίας από την αστραπή.

Σαν μια αποτελεσματική μέθοδος για την προστασία της γραμμής μεταφοράς από το χτύπημα χειμωνιάτικης αστραπής έχει ερευνηθεί να οδηγείται μια εκφόρτιση αστραπής σε ασφαλή ζώνη. Προκειμένου να οδηγηθεί η εκφόρτιση αστραπής, είναι απαραίτητο όχι μόνο να προβλεφθούν τα σύννεφα θυέλλης αξιόπιστα αλλά και να καθιερωθεί η τεχνική της τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής.

Στη μέθοδο της τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής, το πείραμα της πυροδοτούμενης αστραπής από μια μικρή ρουκέτα πραγματοποιήθηκε σε πολλές χώρες. Αυτή η τεχνική έχει σχεδόν

καθιερωθεί, αλλά υπάρχουν μερικά προβλήματα στην πρακτική εφαρμογή της.

Ως μια άλλη μέθοδος το πείραμα πυροδοτούμενης αστραπής από ένα λέιζερ έχει μελετηθεί, αλλά καμιά φυσική αστραπή δεν έχει πυροδοτηθεί ακόμα. Αφετέρου το πείραμα πυροδοτούμενης αστραπής από υγροπίδακα μελετάται.

Αυτό το φυλλάδιο παρουσιάζει τις βασικές ιδέες αυτών των μεθόδων πυροδοτούμενης αστραπής. Βάση των πειραματικών αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων, η πιθανότητα προστασίας από την αστραπή με τη βοήθεια τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής συζητιέται.

## **1. Μέθοδοι τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής**

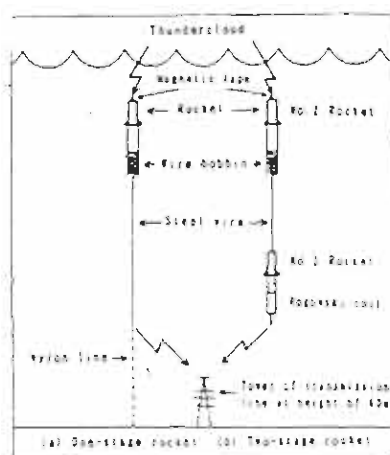
Προκειμένου να συζητηθεί η πιθανότητα της προστασίας από την αστραπή με τη βοήθεια τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής, η γνώση των μεθόδων πυροδοτούμενης αστραπής που αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται.

### **1.1 Πυροδοτούμενη αστραπή με ρουκέτα**

Η πυροδοτούμενη αστραπή με ρουκέτα είναι μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μια μικρή ρουκέτα με ένα αιωρούμενο ασάλινο σύρμα για να κατευθύνει τη φυσική αστραπή στο έδαφος. Αυτό το πείραμα επιτεύχθηκε πρώτη φορά από τον Newman et al [1]. Μετά από αυτό, προκειμένου να διασαφηνίσουμε τα χαρακτηριστικά εκφόρτισης της αστραπής πειράματα

πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα έχουν γίνει σε όλο τον κόσμο /2/, /3/, /4/. Στην Ιαπωνία, το πείραμα της πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα άρχισε το 1977 στην Kahokugata σε μια αξιοποιημένη περιοχή 0 [m] πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, στο νομό Ishikawa. Αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε από το 1977 έως το 1985, εκτός από το 1983. Μετά από αυτό ο χώρος του πειράματος μετατοπίστηκε στην κορυφή του βουνού Okushishiku, 928 [m] πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Σε αυτή τη τοποθεσία υπάρχει ένας πυλώνας δοκιμαστικής γραμμής μεταφοράς που είναι εκτός λειτουργίας και ο οποίος έχει ύψος 60 [m]. Το πείραμα άρχισε να πραγματοποιείται το 1986. Γι' αυτό το διάστημα, επιπρόσθετα με την πυροδοτούμενη αστραπή στο έδαφος, καθιερώθηκε η τεχνική του να οδηγείται η εκφόρτιση αστραπής στον πυλώνα γραμμής μεταφοράς /5/.

Η μέθοδος πυροδοτούμενης αστραπής στον πυλώνα γραμμής μεταφοράς φαίνεται στην εικόνα 1/6/.



Εικ. 1: Μέθοδος της πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα στον πύργο από την γραμμή μεταφοράς



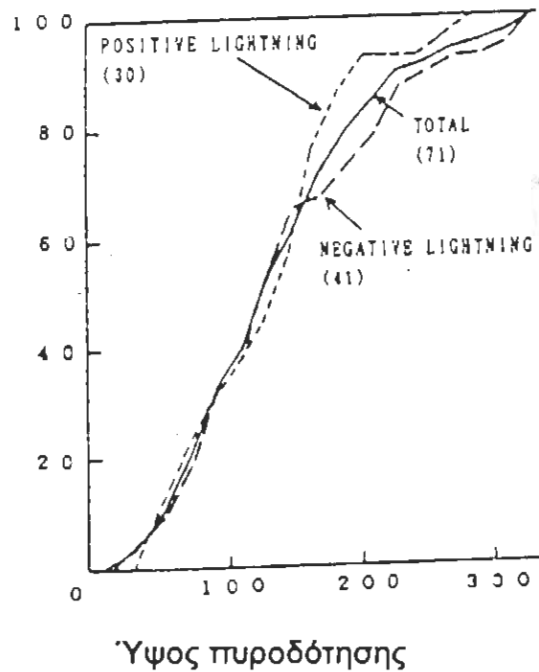
Η εικόνα 1α δείχνει τη μέθοδο με ρουκέτα ενός σταδίου. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται από το 1986. Αυτή η νέα τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει το πείραμα ενός μεγάλου κενού εκφόρτισης. Αυτό είναι δυνατό να ερευνηθεί την προστασία των γραμμών μεταφοράς από την εκφόρτιση αστραπής [7].

Τα χαρακτηριστικά της πυροδοτούμενης αστραπής στο πυλώνα παρατηρήθηκαν λεπτομερώς από μια κάμερα, κινούμενη με μεγάλη ταχύτητα.

Από αυτή την παρατήρηση διευκρινίστηκε ότι μια επιφανειακή εκφόρτιση στην νάιλον γραμμή συμβαίνει μερικές φορές με μια ακτινοβολία της τάξεως περίπου 10 με 20 [m]. Από τη στιγμή που είναι πολύ δύσκολο να εκτιμήσουμε τη συνολική τιμή του ρεύματος αστραπής, έχει γίνει απαραίτητο να αναπτύξουμε την καινούργια μέθοδο πυροδοτούμενης αστραπής χωρίς νάιλον γραμμή.

Η εικόνα 1β δείχνει την μέθοδο της πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα δύο σταδίων. Πρώτα η νούμερο 1 ρουκέτα μαζί με τη ρουκέτα νούμερο 2 είναι εκτοξευμένες. Και η νούμερο 2 ρουκέτα εκτοξεύεται μετά από δύο λεπτά όταν η νούμερο 1 ρουκέτα ανυψώνεται. Και κατόπιν η ρουκέτα νούμερο 2 ανυψώνεται έχοντας αιωρούμενο ένα ασάλινο σύρμα διαμέτρου 0,2 [mm]. Καθώς υπάρχει 1 ασάλινο σύρμα μεταξύ της ρουκέτας νούμερο 1 και της ρουκέτας νούμερο 2, ένας οδηγός κατευθυνόμενος προς τα επάνω ξεκινά από τη ρουκέτα νούμερο 2 στο σύννεφο θυέλλης, και ένας κατευθυνόμενος προς τα κάτω οδηγός ξεκινά από την ρουκέτα νούμερο 1 στον πυλώνα και κατόπιν η αστραπή χτυπά στον πυλώνα.

Ένα ρεύμα αστραπής με την μορφή κύματος μετρήθηκε από ένα συμπαγές πηνίο Rogowski, με μια ψηφιακή μονάδα μνήμης στο κάτω μέρος της ρουκέτας νούμερο 1 και η μέγιστη τιμή του ρεύματος μετριέται από μια μαγνητική ταινία στην κορυφή της ρουκέτας νούμερο 2. Με αυτό το σύστημα τρεις αστραπές πυροδοτήθηκαν. Το ρεύμα μετρήθηκε από μια μαγνητική ταινία, αλλά δεν μετρήθηκε ρεύμα από το πηνίο Rogowski εξαιτίας δυσλειτουργίας του συστήματος καταγραφής.



Εικ. 2: Πιθανό ύψος του ασφάλινου σύρματος σε περίπτωση επιτυχημένης πυροδότησης αστραπής με ρουκέτα

Η εικόνα 2 δείχνει την αθροιστική κατανομή ενός υψόμετρου την στιγμή επιτυχίας της πυροδότησης /8/. Το υψόμετρο εκτιμήθηκε, μετρώντας την διαφορά της αντίστασης του ατσάλινου καλωδίου μεταξύ της στιγμής πριν και μετά της πυροδότησης της ρουκέτας. Η εκφόρτιση αστραπής η οποία δεν ακολουθεί επακριβώς το ατσάλινο καλώδιο (ανώμαλη εκφόρτιση) συμβαίνει μερικές φορές.

Η γνώση για την πυροδοτούμενη αστραπή με ρουκέτα το χειμώνα, όπως περιγράφεται παραπάνω, συνοψίζεται στα παρακάτω /8/.

1. Το ποσοστό της επιτυχίας πυροδοτούμενης αστραπής είναι περίπου 60%.
2. Η πυροδοτούμενη αστραπή είναι επιτυχής κατά 50% μέσα σε 120 μέτρα ύψος ατσάλινου καλωδίου.
3. Η πιθανότητα να συμβεί ανώμαλη εκφόρτιση είναι περίπου 15%.

Φαίνεται ότι η τεχνική του να κατευθυνθεί η εκφόρτιση αστραπής σε ένα συγκεκριμένο μέρος και χρόνο έχει σχεδόν καθιερωθεί. Αλλά στην περίπτωση που εφαρμόστηκε αυτή η μέθοδος στην προστασία από την αστραπή υπάρχουν πρακτικά προβλήματα όπως αυτά που ακολουθούν.

1. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στην πυροδότηση της ρουκέτας για λόγους ασφάλειας και περιβαλλοντικά προβλήματα.
2. Όταν η ρουκέτα δεν καταφέρνει να πυροδοτήσει αστραπή, πέφτει κάτω μαζί με το αιωρούμενο καλώδιο. Είναι πιθανόν να

προξενήσει κάποια ζημιά στις κατασκευές και σε άλλα αντικείμενα του εδάφους.

Γι' αυτούς τους λόγους είναι απίθανο να χρησιμοποιήσουμε το σύστημα πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα στην αστική περιοχή ή κοντά σε γραμμές μεταφοράς. Σαφέστατα αυτό δεν είναι πρακτικό για την προστασία των συσκευών ενέργειας. Πιθανή εφαρμογή του συστήματος πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα είναι η μελέτη της φυσικής αστραπής σε έρημη περιοχή.

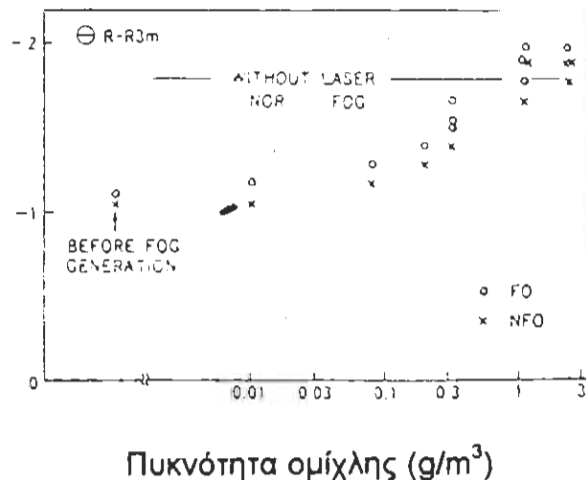
## 1.2 Πυροδοτούμενη αστραπή με λέιζερ

Τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή με λέιζερ μελετήθηκε πρόσφατα, ιδιαίτερα στην Ιαπωνία. Παρόλα αυτά, αυτή η τεχνική δεν έχει καθιερωθεί ακόμη.

Όταν μια υψηλής δύναμης παλμική ακτίνα λέιζερ CO<sub>2</sub> συγκεντρωθεί στον αέρα με έναν καθρέφτη με μεγάλο εστιακό μήκος, μια αλυσίδα αερο-καταλυμένου πλάσματος παράγεται στον αέρα. Η γενική ιδέα της πυροδοτούμενης αστραπής με λέιζερ, είναι να κατευθύνει την αστραπή με αυτό το πλάσμα που παράχθηκε από το λέιζερ αντί για το αστάλινο σύρμα στην πυροδοτούμενη αστραπή από ρουκέτα.

Στην περίπτωση εφαρμογής αυτής της μεθόδου για την προστασία από την αστραπή, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι η ακτίνα λέιζερ απορροφάται και διασκορπίζεται καθώς διαπερνά τον αέρα. Σε σχέση με το θέμα της διασποράς της ενέργειας του λέιζερ, πειράματα εκφόρτισης οδηγημένης από λέιζερ πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες βροχής ή σε ομίχλης /9/.

Η εικόνα 3 δείχνει το πολύ φωτεινό σημείο τάσης της κατευθυνόμενης με λέιζερ εκφόρτισης σε τεχνητή ομίχλη που έχει παραχθεί σε αίθουσα ομίχλης.

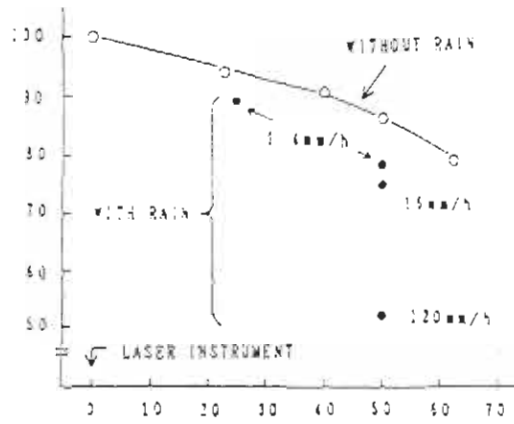


Εικ. 3: Τάσεις αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης με λέιζερ εκφορτίσεων στην ομίχλη

Εάν η πυκνότητα της ομίχλης είναι μεγαλύτερη από 1 [g/m<sup>3</sup>], η φωτεινή τάση της κατευθυνόμενης από λέιζερ εκφόρτισης είναι υψηλή όσο και αυτή χωρίς λέιζερ και ομίχλη. Στην περίπτωση που η πυκνότητα της ομίχλης είναι της τάξης του 0,1 [g/m<sup>3</sup>], η φωτεινή τάση της κατευθυνόμενης από λέιζερ εκφόρτισης αυξάνει 10-20% σε σύγκριση με αυτή που είναι χωρίς ομίχλη.

Το πείραμα της εκφόρτισης κατευθυνόμενης από λέιζερ σε τεχνητή βροχή δείχνει ότι η επίδραση της βροχής, είναι αμελητέα ακόμα και σε μεγάλη βροχή /9/.

Η εικόνα 4 δείχνει τα χαρακτηριστικά μιας μεταφοράς ενέργειας ενός λέιζερ CO<sub>2</sub> με βροχή στον αέρα /10/.



Απόσταση από όργανο λέιζερ [m]

Εικ. 4: Χαρακτηριστικά μεταφοράς ενέργειας από CO<sub>2</sub> λέιζερ με βροχή στον αέρα

Για μια βροχόπτωση έντασης 16 [mm/h], η μεταδοτικότητα της ενέργειας του λέιζερ σε μια απόσταση 50 μέτρων είναι περίπου 10% λιγότερη σε σύγκριση με αυτή χωρίς βροχή. Στις συνθήκες εντάσεως βροχοπτώσεως 120 [mm/h], η μεταδοτικότητα της ενέργειας του λέιζερ σε μια απόσταση 50 [m] είναι περίπου 35% λιγότερο από αυτή χωρίς βροχή.

Η γνώση ενός πειράματος εκφόρτισης κατευθυνόμενης από λέιζερ σε ομίχλη ή βροχή συνοψίζεται στα παρακάτω:

1. Η δράση της κατεύθυνσης της αστραπής με λέιζερ είναι 10 με 20% σε ομίχλη πυκνότητας 0,1 [g/m<sup>3</sup>] (Η πυκνότητα ομίχλης που παρατηρείται σε φυσική κατάσταση σπάνια ξεπερνά αυτήν την τιμή). Η επίδραση της φυσικής βροχής δεν είναι μεγάλη.
2. Η μεταδοτικότητα της ενέργειας του λέιζερ είναι περίπου 10% λιγότερη σε σύγκριση με αυτή χωρίς βροχή και σ' αυτή την

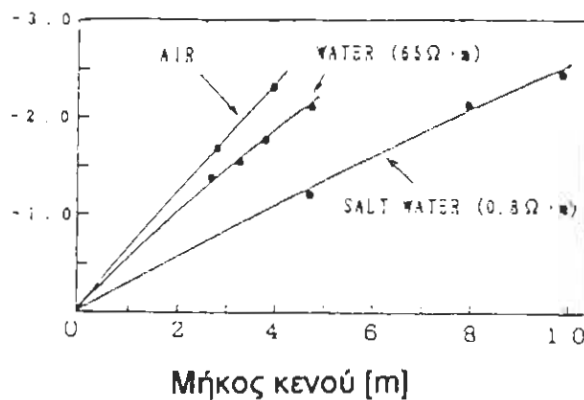
περίπτωση η απόσταση από το λέιζερ είναι 50 [m] και η ένταση βροχόπτωσης είναι 16 [mm/h].

Στο πείραμα στο /9/, το μήκος του κενού είναι 3 [m] και η ακτίνα λέιζερ οδηγήθηκε στο κενό, σχεδόν χωρίς απώλεια ενέργειας. Στην περίπτωση που πυροδοτείται φυσική αστραπή η ακτίνα λέιζερ μπορεί να μεταφερθεί για περισσότερο από 100 [m].

Από τη στιγμή που τα σύννεφα θυέλλης τον χειμώνα στην Ιαπωνία συνήθως συνοδεύονται από χιόνι, φαίνεται ότι η ενέργεια του λέιζερ διασκορπίζεται κατά τη διάρκεια της πορείας της σε μεγάλη απόσταση. Είναι απαραίτητο να ξεκαθαρίσουμε τα χαρακτηριστικά της πορείας του λέιζερ και της παραγωγής πλάσματος σε μεγάλη έκταση σε φυσικές συνθήκες.

### 1.3 Πυροδοτούμενη αστραπή με νεροπίδακα

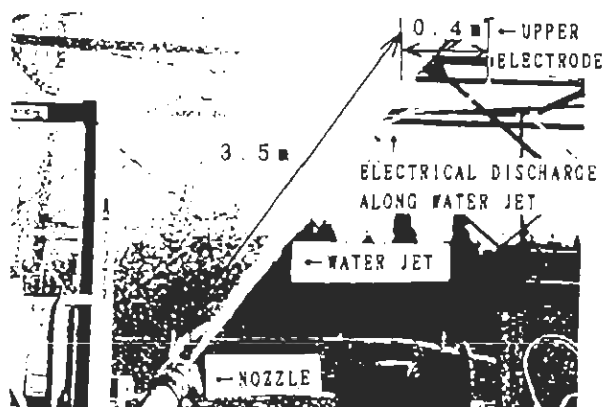
Η μέθοδος της πυροδοτούμενης αστραπής με νεροπίδακα ερευνήθηκε στην Ιαπωνία /11/ /10/.



Εικ. 5: 50% τάση αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης κατά μήκος στο rod-rod κενό με νεροπίδακα

Η εικόνα 5 δείχνει το 50% των αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων τάσης στα διαδοχικά κενά κατά μήκος του νεροπίδακα (ικανότητα αντίστασης 65 [ $\Omega \cdot m$ ]) και κατά μήκος του θαλασσινού νεροπίδακα (ικανότητα αντίστασης 0,8 [ $\Omega \cdot m$ ]) /10/. Η κανονική αντανάκλαση της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης τάσης είναι λιγότερο από 5%. Το 50% των αφύσικων ηλεκτρικών εκκενώσεων τάσης με τον νεροπίδακα είναι 20% λιγότερο σε σύγκριση με την αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση τάσεων στον αέρα. Στην περίπτωση που διοχετεύσουμε τάση κατά μήκος διαδοχικών κενών με νερό η ηλεκτρική εκφόρτιση διαδίδεται κατά μήκος του νερού τέλεια. Το 50% της αφύσικης ηλεκτρικής εκκένωσης τάσης με θαλασσινό νεροπίδακα είναι 50% λιγότερη σε σύγκριση με την αφύσικη ηλεκτρική εκκένωση τάσεως στον αέρα.

Η εικόνα 6 δείχνει το κανάλι ηλεκτρικής εκφόρτισης όταν ο νεροπίδακας δεν είναι κατά μήκος του επάνω ηλεκτροδίου /10/. Σ' αυτή την περίπτωση επίσης, η επίδραση της κατευθυνόμενης ηλεκτρικής εκφόρτισης επιβεβαιώθηκε.



Εικ. 6: Κατεύθυνση ηλεκτρικής εκκένωσης από νεροπίδακα η οποία δεν είναι κατά μήκος του ανώτερου ηλεκτροδίου



Αλλά, η πορεία ηλεκτρικής εκφόρτισης μερικές φορές δεν είναι κατά μήκος του νερού. Στο σχεδιάγραμμα της εικόνας 6 η συχνότητα κατά την οποία η ηλεκτρική εκφόρτιση μεταδίδεται τέλεια κατά μήκος του νεροπίδακα είναι περίπου 30%.

## 2. Συζήτηση

Βασισμένοι στα πειραματικά αποτελέσματα της κατεύθυνσης της ηλεκτρικής εκφόρτισης με νεροπίδακα και με λέιζερ και η γνώση από το πείραμα πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα, η πιθανότητα της προστασίας από αστραπή χρησιμοποιώντας τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή λαμβάνεται υπ' όψιν από εδώ και πέρα.

Πρώτον, ακόμα και στην περίπτωση της πυροδοτούμενης αστραπής από ρουκέτα το ποσοστό επιτυχίας της πυροδοτούμενης αστραπής είναι περίπου 60%. Γι' αυτό είναι πολύ σημαντικό να βρούμε από δω και πέρα τρόπο να προβλέψουμε την συμπεριφορά των συννέφων θυέλλης με ακρίβεια.

Δεύτερον, για επιτυχή πυροδότηση με μια πιθανότητα παραπάνω από 50% η ρουκέτα πρέπει να ανέβει παραπάνω από 120 [m]. Με άλλα λόγια για να κατευθύνουμε την αστραπή στο έδαφος είναι απαραίτητο να τραβήξουμε τον αγωγό σ' ένα ύψος μεγαλύτερο από 100 [m]. Στην περίπτωση πυροδοτούμενης αστραπής από λέιζερ ή από νεροπίδακα είναι συνεπώς απαραίτητο να παράγουμε μια αλυσίδα πλάσματα παραγόμενα

από λέιζερ ή μια σήλη νερού για μια απόσταση πάνω από 100 [m].

Στην περίπτωση του λέιζερ, μπορεί να είναι πιθανό, αλλά είναι απαραίτητο να κάνουμε μεγαλύτερη έρευνα για να γνωρίσουμε την ενέργεια που χρειάζεται και το οπτικό σύστημα που είναι πιο αποτελεσματικό για να παράγει ένα τόσο μακρύ κανάλι πλάσματος. Παρόλο ότι ο θεωρητικός υπολογισμός της παραγωγής πλάσματος κατά μήκος της ακτίνας του λέιζερ έχει γίνει /12/, περισσότερες λεπτομερείς έρευνες απαιτούνται θεωρητικώς και πρακτικώς.

Ακόμα, στο πείραμα της πυροδοτούμενης αστραπής από ρουκέτα ανώμαλες εκφορτίσεις έγιναν με συχνότητα περίπου 15%. Προκειμένου να προστατεύσουμε τέλεια την αστραπή με τη μέθοδο της πυροδοτούμενης αστραπής, η παρουσία ανώμαλων εκφορτίσεων είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα.

Η ανώμαλη εκφόρτιση συνήθως συμβαίνει μετά από αρκετά nsec εξαέρωσης του καλωδίου. Η αιτία των ανώμαλων εκφορτίσεων φαίνεται να είναι η μείωση της αγωγιμότητας του καναλιού. Στην περίπτωση του λέιζερ ή του νεροπίδακα η μείωση της αγωγιμότητας του καναλιού μπορεί να είναι πιο γρήγορη. Εάν αυτό ισχύει, ανώμαλες εκφορτίσεις συμβαίνουν πιο συχνά απ' ό τι στην πυροδοτούμενη αστραπή με ρουκέτα. Αυτό είναι ένα άλλο πρόβλημα που πρέπει να λυθεί στο μέλλον.

Ένα από τα μειονεκτήματα της πυροδοτούμενης αστραπής από ρουκέτα είναι ο χρόνος ανταπόκρισης του συστήματος. Παίρνει κάποιο χρόνο για τη ρουκέτα να φτάσει στο απαραίτητο ύψος για να πυροδοτήσει αστραπή. Ο συγχρονισμός στην εκτόξευση είναι

πολύ σημαντικός και απαιτείται πολύ εμπειρία. Αυτή είναι μια αιτία αποτυχίας της πυροδοτούμενης αστραπής στην αρχή των πειραμάτων της πυροδοτούμενης αστραπής.

Για τον νεροπίδακα, αυτό είναι πιο σοβαρό. Από πρακτική άποψη ο νεροπίδακας πρέπει να χρησιμοποιείται για μεγάλες χρονικές περιόδους και με μεγάλη ποσότητα νερού. Μια ιδέα για την πυροδοτούμενη αστραπή από νεροπίδακα, είναι να χρησιμοποιηθεί θαλασσινό νερό, διότι η αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη και η δράση καθοδήγησης είναι καλύτερη. Υπάρχει γραπτό κείμενο για το θέμα των χτυπημάτων αστραπής από κύμα νερού στη θάλασσα /13/.

Με δεδομένο ότι τα χειμωνιάτικα σύννεφα θυέλλης στην Ιαπωνία πλησιάζουν συνήθως από την πλευρά της θάλασσας της Ιαπωνίας, οι νεροπίδακες μπορεί να έχουν στην ακρογιαλιά μια καλή αμυντική δράση. Παρά ταύτα πιο εντατικές έρευνες απαιτούνται για την κατευθυντική δράση μιας μακριάς στήλης νερού και για τα περιβαλλοντολογικά προβλήματα όπως η μόλυνση του αλατιού για να εφαρμοστεί αυτό το σύστημα.

Όσο για την πυροδοτούμενη με λέιζερ αστραπή ο χρόνος ανταπόκρισης δεν έχει σημασία εκτός από την συχνότητα επανάληψης εάν χρησιμοποιηθεί παλμικό λέιζερ.

### 3. Συμπεράσματα

Τρεις μέθοδοι τεχνητά πυροδοτούμενης αστραπής περιγράφηκαν και η πιθανότητα της προστασίας από αστραπή με τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή συζητείται.

Πρώτα απ' όλα, για τον σκοπό της προστασίας από αστραπή με τεχνητά πυροδοτούμενη αστραπή, το πιο σημαντικό θέμα είναι το πως να προβλέψουμε τα σύννεφα θυέλλης. Ειδικά απαιτείται πιο εκτεταμένη έρευνα των χειμωνιάτικων σύννεφων θυέλλης.

Φαίνεται ότι η μέθοδος της πυροδοτούμενης αστραπής με ρουκέτα έχει καθιερωθεί. Αλλά είναι σχεδόν αδύνατο να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος προστασίας αστραπής σε συσκευή δύναμης για λόγους ασφαλείας. Αντί για αυτή τη μέθοδο, φαίνεται ότι η πυροδοτούμενη αστραπή από λέιζερ ή από νεροπίδακα υπόσχονται πιο πολλά.

Η πυροδοτούμενη αστραπή με λέιζερ έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως για παράδειγμα μεγάλη ανταπόκριση. Στο πείραμα της εκφόρτισης καθοδηγούμενης από λέιζερ, το μήκος του κενού των καθοδηγούμενων εκφορτίσεων με λέιζερ CO<sub>2</sub> είναι μόνο μερικά μέτρα. Το ύψος των χειμωνιάτικων συννέφων θυέλλης είναι αρκετά χιλιόμετρα. Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη μέθοδο για την προστασία από αστραπή, είναι απαραίτητο να γίνει μεγαλύτερη έρευνα για τη διέλευση της ακτίνας και για την παραγωγή πλάσματος σε μεγάλη απόσταση στον αέρα.

Στο πείραμα της εκφόρτισης καθοδηγούμενης από νερό, το μήκος του κενού των κατευθυνόμενων εκφορτίσεων από

νεροπίδακα θαλασσινού νερού είναι το μέγιστο 10 [m]. Εάν το νερό του νεροπίδακα φτάσει στα 100 [m] ύψος, είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί για προστασία από αστραπή. Αλλά τα περιβαλλοντολογικά προβλήματα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν.

## Βιβλιογραφία

### *Από το κεφάλαιο 1*

- (1) M.M. Newman et al. Journ. Geophys. Res 72 pp 4761-4764 (1967)
- (2) M.M. Newman. Problems of atmospheric and space Electricity. Coroniti Edit. PP 482-490-Elsevier, 1965
- (3) C. Gary, A. Cimador, R. Fieux. La foudre: Etude du phenomene-Application a la protection des lignes de transport-Revue Generale de l' Electricite: pp 44-62 T 84 No 1-Janvier 1975
- (4) «Les Renardieres group»-Research on long air gap discharges-Electra, No 23, July 1972 and N 35 July 1974.
- (5) W.D. Rayle-Ball lightning characteristics-NASA-TND 3188-1966
- (6) A. Clombet et P.Hubert-Deux appareils de mesure du champ electrique naturel-Rapport CEA R 4809 1977
- (7) P.Hubert et G.Mouget-Signaoux de foudre enregistres sur bande magnetique video-Rapport CEA 1977 R 4818
- (8) P.Hubert-Tentative pour observer la foudre en boule dans le voisinage d' eclairs declenches artificiellement-Rapport DPh EP-76-349 SACLSAY 1976
- (9) M.A. UMAN-Lightning-page 4 Mac Graw Hill 1969

- (10) B.F. Schonland-The Lightning discharge-Handbuch der Physik-Vol.22 pp 33-38, Janv. 1975
- (11) M.A. Uman, D.K. Mc Lain, E.P. Kriderr-Am. Journal of Physics-Vol.43-pp 38-38, January 1975
- (12) M.A. Uman, D.K. Mc Lain, R.J. Fischer, E.P.Krider Journal Geophysic Re. 78, pp. 3530-3537, 1973
- (13) Lin, Shao-chi-Cylindrical shock waves produced by instantaneous energy release. J. Appl. Physics, Vol 25 NR 1 Jan 1954.
- (14) Jones D.L. et al. Shock waves from a lightning discharge-J. Geophysical Res. Vol. 73 NR 10 May 1968.
- (15) R. Fieux, P. Hubert-Triggered lightning hazards Nature 260-p.188-1976
- (16) R.H. Golde-Lightning protection-Arnold Public. London 1973
- (17) C. Gary-La foudre-Mecanisme d' impact et fonctionnement des paratonnerres. La Meteorologie Vi No 2p. 35-1975.
- (18) J.H. Hagenguth et J.G. Anderson-Lightning to the empire state building-trans. AIEE pt 3-641-649 (1952).
- (19) K. Berger-Novel observations on lightning discharges-Result of research on Mount San Salvatore-Jour. Of the Franklin Istitute, No 283-p. 478-1967.
- (20) C. Gary-Shunt coaxial pour la mesure des courants de choc in «Techniques de Laboratoire» chap. 23 pp. 258-262

- (21) A.C.Liew, M.Darveniza-«Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths»-Proceedings iee vol 121 No 2, February 1974.
- (22) Micchael a Sargent, M. Darveniza-«Tower surge impedance»-IEEE-Transactions Apparatus and Systems-Vol. Pas.88, No5, May 1968-pp. 680-687.

***Από το κεφάλαιο 2***

- (1) R.E. Perala, «Triggering of Lightning by the Atlas Centaur Vehicle», Proceedings of International Aerospace and ground Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, Oklahoma, pp. 47-57, April 1988.
- (2) D.R. MacGorman and W.D. Rust, «An Evaluation of the LLP and LPATS Lightning Ground Strike Mapping Systems», pp. 235-240 of Addendum to Proceedings of International Aerospace and ground Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, Oklahoma, 19-22 April 1988.
- (3) B.G. Melander, R.T Hasbrouk, and J.P. Johnson, «Lightning Test Results for LLNL' s Lightning Invulnerable Device System using both Simulated and Triggered Lightning», Addendum to Proceedings of International Aerospace and ground Conference on Lightning and Static Electricity, Oklahoma City, Oklahoma, pp. 63-79, April 1988.
- (4) A. Wada, K. Horii, «Discussions on the Data obtained in the Rocket Triggered Lightning Experiment (1977-1988)», Joint Meeting of Electric Discharge and High Voltage Engineering



of IEE Japan. Sirahama, Japan, ED-89-135, HV-89-78, October, 1989.

- (5) J. Hojo et al., «Characteristics and Evaluation of Lightning Field Waveforms», T. IEE Japan, Vol. 108-B, No. 4, 1988
- (6) S. Ito, Y. Ichihara and Y. Ohgi, «Application of Lightning Arresters for Transmission Lines and its Effect», CIGRE SC 33-87 (Coll) 01.05 IWD., 1987.

### **Από το Κεφάλαιο 3**

- (1) D.W. Koopman, T.D. Wilkerson, «Channeling of an ionizing electrical streamer by a laser beam», J. Appl. Phys., Vol. 42, pp. 1883-1886, 1970.
- (2) D.W. Koopman, K.A. Saum, «Formation and guiding of highvelocity electrical streamers by laser induced ionization», JJ. Appl. Phys., Vol.44, pp. 5328-5336, 1973
- (3) J.R. Greig et al., «Electrical discharges guided by pulsed CO<sub>2</sub>-laser radiation», Phys. Rev. Lett., Vol. 41, pp. 174-177, 1978
- (4) J.R. Greig et al., «Interaction of laser-induced ionization with electric fields», AIAA 13th Fluid & Plasma Dynamics Conf., 1980
- (5) T. Shindo et al., «Model experiments of laser triggered lightning», IEEE PES Winter Meeting, No. 92 WM 258-4 PWRD, 1992

- (6) Y. Sasho, «Studies and development of meteorological instruments for cloud physics and micrometeorology», Papers in Meteorology and Geophysics, Vol. 19, pp. 587-598, 1968.
- (7) K. Takasu et al., «AC Flashover characteristics of long air gaps and insulator strings under fog conditions», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, pp. 639-645, 1981.
- (8) T. Shindo, S. Sasaki, «Development of the laser triggered lightning technique and its future», J. IEE of Japan, Vol. 111, pp. 739-746, 1991.
- (9) F.V. Bunkin et al., «Laser spark with a continuous channel in air», Sov. J. Quantum Electron., Vol. 13, pp. 254-255, 1983
- (10) E. Fujiwara et al., «Laser triggered lightning», The review of laser engineering, Vol. 19, pp. 528-537, 1991.
- (11) Y. Aihara et al., «Impulse flashover characteristics under fog condition (Part 1)-Impulse flashover characteristics of long air gaps under fog condition», CRIEPI Report No. 183031, 1984.
- (12) A.C. Best. «The size distribution of raindrops», Quart.J. of Royal Meteor. Soc., Vol. 76, pp. 16-36, 1950

#### **Από το κεφάλαιο 4**

- (1) M. M. Newman, J. R. Stahman, J.D. Robb, E.A. Lewis, S.G. Martin, S.V. Zinn, «Triggered Lightning Strokes at Very Close Range», J. Geophys. Res Vol. 72, No. 18, pp. 4761-4764 (1967)

- (2) R. P. Fieux, C.H. Gary, B.P. Hutzler, A.R. Eybert-Berard, P.L. Hubert, A.C. Meesters, P.H. Perroud, J.H. Hamelin, J. M. Person, «Research on artificially Triggered Lightning in France», IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 3, pp. 725-733 (1978)
- (3) Blitzforschungsgruppe Munchen, «Aktuelle Aufgaben und Methoden der Blitzforschung», ETZ-A, Vol.99, pp.652-654 (1978)
- (4) K. Horii, A. Wada, K. Nakamura, M. Yoda, Z. Kawasaki, K.T. sirait, J. Soekarto, A.M. Sunoto, «Experiment of Rocket-triggered Lightning in Indonesia», J. IEE of Japan, Vol. 110-B, No. 12, pp. 1068-1069 (1990).
- (5) K. Nakamura, K. Horii, Y. Kito, A. Wada, G. Ikeda, S. Sumi, MM. Yoda, S. Aiba, H. Sakurano, K. Wakamatsu, «Artificially Triggered Lightning Experiments to An EHV Transmission on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp. 1311-1318 (1991)
- (6) A. Wada, K. Nakamura, H. Horii, «Technique of Triggered Lightning to Tower of Transmission Line by Two-stage Rocket», J. IEE oh Japan. Vol. 112-B, No. 4, pp. 355-356 (1992)
- (7) K. Nakamura, A. Wada, K. Horii, «Discussion on a Long Gap Discharge to An EHV Transmission Tower by a Rocket Triggered Lightning Experiment», 1991 Int. Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, No. 62 (1991).

- (8) A. Wada, K. Horii, «Discussion on the Rocket Triggered Lightning Experiment During Winter in Japan (1977-1988)», Technical Report of IEE of Japan. ED-89-135, HV-89-78, pp.29-38 (1989)
- (9) T. Shindo, M. Miki, Y. Aihara, A. Wada, «Laser-Guided Discharges in Long Gaps», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 4, pp. 2016-2022 (1993)
- (10) A. Wada, Y. Aihara, T. Sakai, A. Nagamori, S. Sugimoto, N. Nisida, «Effect of Guiding of Electrical Discharge by Water Jet-Possibility of Water Jet Triggered Lightning», Technical Report of IEE of Japan, ED-93-182, HV-93-90, pp. 105-114 (1993).
- (11) K. Takaki, H. Akiyama, S. Maeda, «Basic Experiments of Triggered Lightning Using A Water Jet», 8th int. Symposium on High Voltage Engineering, No. 72-01, pp. 285-288 (1993).
- (12) T. Shindo, M. Miki, Y. Aihara, A. Wada, «A Study of Laser-triggered Lightning-calculation of Plasma Generation Along A Laser Beam», 8th Int. Symposium on High Voltage Engineering, No. 72-06, pp. 305-308 (1993)
- (13) M. Brook, G. Armstrong, R.P.H. Winder, B. Vonnegut, C.B. Moore, «Artificial Initiation of Lightning Discharges», J. Geophys. Res., Vol. 66, No. 1, pp. 3967-3969 (1961).

