



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Κεραυνοπληξία πλοίου: Πειραματική διερεύνηση, μέσω  
δοκιμών σε μοντέλα υπό κλίμακα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**Ανδρέα Χ. Αλεξάνδρου**

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Νοέμβριος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

**Κεραυνοπληξία πλοίου: Πειραματική διερεύνηση, μέσω  
δοκιμών σε μοντέλα υπό κλίμακα**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΤΟΥ

**Ανδρέα Χ. Αλεξάνδρου**

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2014.

.....  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....

**Ανδρέας Χ. Αλεξάνδρου**

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

Copyright © Ανδρέας Χ.Αλεξάνδρου, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Στην οικογένειά μου

## Περίληψη

Τα πλοία είναι δυνητικά επιρρεπή σε κεραυνικά πλήγματα τα οποία αποτελούν κίνδυνο ζημιάς του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, των συστημάτων πλοήγησης και επικοινωνίας. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη νέων ή η βελτίωση υφιστάμενων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας. Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η μελέτη συγκεκριμένων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας και η αποτελεσματικότητα της χρήσης τους σε πλοία. Στα πλαίσια αυτού του στόχου διεξήχθησαν πειραματικές μετρήσεις σε ένα μοντέλο πλοίου το οποίο είναι σχεδιασμένο σε κλίμακα 1:120 ενός πραγματικών διαστάσεων εμπορικού πλοίου. Ακολούθως, τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν, συγκρίθηκαν με τις μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν κάποιες μεθόδους εκτίμησης ζώνης προστασίας.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας, Ακτίνα σύλληψης, Απόσταση πρόσκρουσης, Τάση διάσπασης, Κανονική κατανομή.

## **Abstract**

Ships are potentially vulnerable to lightning strikes that constitute risk of damage to electronic equipment, navigation and communication systems. For this reason it is necessary to develop new or to improve current methods for the estimation of the protection zone. The purpose of this thesis is the study of specific methods regarding the estimation of the protection zone and the effectiveness of their use on ships. Within this objective, experimental measurements were performed on a mini replica of a merchant ship which is designed on a scale 1:120. Subsequently, the experimental results obtained were compared with the mathematical equations governing some methods for the evaluation of protection zone.

**Keywords:** Methods of lightning protection, Attractive radius, Striking distance, Disruption voltage, Normal distribution

## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη διερεύνηση της κεραυνοπληξίας πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, επιβάλλονται κρουστικές τάσεις σε ένα μοντέλο πλοίου ώστε να υπολογιστεί πειραματικά η μέση ακτίνα σύλληψης και η μέση απόσταση πρόσκρουσης μιας συγκεκριμένης κατασκευής του. Αυτές οι δύο παράμετροι συγκρίνονται με τις θεωρητικές τιμές συγκεκριμένων υπάρχουσων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας ώστε να εξαχθούν κατάλληλα συμπεράσματα.

Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα παρακάτω κεφάλαια:

**Κεφάλαιο 1:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες που αφορούν το φαινόμενο του κεραυνού. Πιο συγκεκριμένα γίνεται μια παρουσίαση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων της ατμόσφαιρας και αναλύονται οι τύποι, οι φάσεις και η πολικότητα των κεραυνικών εκκενώσεων. Τέλος αναλύεται το ρεύμα του κεραυνού καθώς επίσης και οι σχετικές παράμετροι του.

**Κεφάλαιο 2:** Στο παρόν κεφάλαιο εισάγονται βασικές έννοιες όπως η ακτίνα σύλληψης και η απόσταση πρόσκρουσης και αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας. Στο τέλος γίνεται μια σύγκριση μερικών από τις μεθόδους αυτές.

**Κεφάλαιο 3:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία. Επιπρόσθετα, περιγράφονται οι επιπτώσεις αυτού που αφορούν βλάβες στα ηλεκτρικά συστήματα και στο σκελετό του πλοίου καθώς επίσης και οι θερμικές συνέπειες στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης.

**Κεφάλαιο 4:** Το κεφάλαιο αυτό αφορά το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Γίνεται μια αναφορά στην πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία του πειράματος ράβδου-μεταλλικής πλάκας και ράβδου-μοντέλου πλοίου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις. Στο τέλος του κεφαλαίου, τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τις υπάρχουσες μαθηματικές εξισώσεις των διάφορων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας.



**Κεφάλαιο 5:** Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη πειραματική προσέγγιση του φαινομένου σύλληψης κεραυνού. Επίσης παρουσιάζονται πιθανές προτάσεις για την περαιτέρω διερεύνηση της κεραυνοπληξίας πλοίων μέσω εργαστηριακών πειραμάτων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Την κ. Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για τη συνεχή παρακολούθηση της πορείας της διπλωματικής μου, για την καθοδήγηση αλλά και για την στήριξη που μου προσέφερε όλους αυτούς τους μήνες, χάρη στα οποία κατάφερα να ολοκληρώσω την εργασία αυτή.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνου, Λέκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη βοήθεια και τις συμβουλές του καθώς και το άψογο κλίμα συνεργασίας που είχαμε. Η βοήθεια του κ. Γκόνου στα προβλήματα που αντιμετωπίσαμε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν εξαιρετικά σημαντική.

Τους κ. Χρίστο Ηλία και κ. Αριστείδη Γιάννακα, μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση για την πολύτιμη βοήθεια του όσο αφορά τη φωτογράφιση της ηλεκτρικής εκκένωσης.

Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια, στην Ευτυχία για την αμέριστη συμπαράσταση της και στους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	vi
Abstract .....	vii
Πρόλογος.....	viii
<b>Κεφάλαιο 1: Κεραυνός .....</b>	<b>1</b>
1.1 Κεραυνός.....	1
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	2
1.3 Ατμοσφαιρικά ιόντα και αγωγιμότητα.....	4
1.4 Το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα .....	8
1.5 Μηχανισμοί διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών .....	9
1.5.1 Φαινόμενο διασποράς.....	9
1.5.2 Φαινόμενο ισχυράς ψύξεως.....	10
1.5.3 Φαινόμενο διαρρήξεως .....	11
1.6 Τύποι κεραυνικών εκκενώσεων.....	13
1.6.1 Κεραυνοί ανάμεσα σε σύννεφα και γη.....	13
1.6.2 Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα.....	14
1.6.3 Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα .....	14
1.7 Φάσεις κεραυνικής εκκένωσης.....	14
1.7.1 Προεκκένωση.....	15
1.7.2 Εκκένωση αντιθέτου φοράς.....	16
1.7.3 Κύρια εκκένωση.....	16
1.8 Επανάληψη φαινομένου ηλεκτρικών εκκενώσεων .....	17
1.9 Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων.....	18
1.10 Ρεύμα κεραυνού και σχετικές παράμετροί του .....	19
<b>Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας .....</b>	<b>22</b>
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Μέθοδος κώνου προστασίας ( <i>Cone of protection method, CPM</i> ) .....	22
2.3 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας ( <i>Rolling sphere method, RSM</i> ).....	24
2.4 Μέθοδος Όγκου Συλλογής ( <i>Collection Volume Method, CVM</i> ).....	27
2.5 Μέθοδος <i>Leader Potential Concept (LPCM)</i> .....	34
2.6 Ελλειπτικό μοντέλο .....	35
2.7 Στατιστικό μοντέλο.....	38
2.8 Σύγκριση των μεθόδων αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία.....	43

<b>Κεφάλαιο 3: Κεραυνικό Πλήγμα.....</b>	<b>50</b>
3.1 Διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία .....	50
3.1.1 Σύνδεση κεραυνού-τερματικού αέρα.....	50
3.1.2 Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο .....	51
3.1.3 Διάχυση φορτίου στο νερό .....	51
3.1.4 Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου .....	53
3.2 Επιπτώσεις πρόσπτωσης κεραυνού σε πλοία.....	53
3.2.1 Βλάβες στα ηλεκτρικά συστήματα .....	53
3.2.2 Βλάβες στο σκελετό (hull).....	57
3.2.3 Θερμικές συνέπειες στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης .....	59
<b>Κεφάλαιο 4: Πειραματική προσέγγιση του φαινομένου σύλληψης κεραυνού .....</b>	<b>61</b>
4.1 Πειραματική διάταξη .....	61
4.1.1 Γεννήτρια κρουστικών τάσεων Ε.Μ.Π .....	61
4.1.2 Σύστημα ελέγχου και μετρητικό σύστημα.....	63
4.1.3 Μοντέλο Πλοίου Υπό Κλίμακα.....	64
4.2 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μεταλλικής πλάκας.....	66
4.2.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	66
4.2.2 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης .....	67
4.2.2.1 Μέθοδος επιπέδων τάσεων .....	68
4.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα.....	69
4.3 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μοντέλου πλοίου .....	74
4.3.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	74
4.3.2 Αναγωγή τάσης διάσπασης .....	75
4.3.2.1 Συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα $k_1$ .....	76
4.3.2.2 Συντελεστής διόρθωσης υγρασίας $k_2$ .....	76
4.3.2.3 Εκθέτες $m$ και $w$ .....	77
4.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα.....	78
4.4 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων- μαθηματικών σχέσεων .....	83
<b>Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα-Επόμενη μέρα .....</b>	<b>93</b>
5.1 Συμπεράσματα .....	93
5.2 Επόμενη μέρα.....	94
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Δείγμα εικόνων από τη διεξαγωγή του πειράματος .....</b>	<b>96</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Ύψος φορτισμένης ράβδου $D=100\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα.....	96
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Ύψος φορτισμένης ράβδου $D=100\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα. ....	98
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Ύψος φορτισμένης ράβδου $D=75\text{ cm}$ , Θετική Πολικότητα.....	100
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Ύψος φορτισμένης ράβδου $D=75\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα. ....	102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Ύψος φορτισμένης ράβδου, $D=50\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα. ....	104

<i>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ: Ύψος φορτισμένης ράβδου <math>D=50\text{cm}</math>, Αρνητική Πολικότητα .....</i>	<i>106</i>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>108</b>

# Κεφάλαιο 1: Κεραυνός

## 1.1 Κεραυνός

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα ονομάζονται κεραυνοί και αστραπές. Δημιουργούνται κατά τη διάρκεια καταιγίδων, συνήθως στα νέφη τύπου σωρειτομελανίτων (cumulonimbus). Μπορούν να ξεσπάσουν μεταξύ διαφορετικών νεφών, μέσα στο ίδιο νέφος ή μεταξύ νεφών και εδάφους. Έχει επικρατήσει να ονομάζουμε κεραυνούς τις ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ νεφών και εδάφους και αστραπές τις ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ νεφών. Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις προκύπτουν από το διαχωρισμό μεταξύ θετικών και αρνητικών φορτίων. Δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο και όταν η ένταση του φτάσει σε μεγάλη τιμή, ξεσπά ο κεραυνός με διάσπαση του αέρα και δημιουργία σπινθήρα [2].

Η διαφορά δυναμικού κατά την εκδήλωση ενός κεραυνού είναι πολλά εκατομμύρια Volt και η ένταση του ρεύματος δεκάδες χιλιάδες Αμπέρ. Το μήκος ενός κεραυνού φθάνει έως αρκετά χιλιόμετρα και έχει τεθλασμένη ή κυματοειδή μορφή ενώ το πλάτος του σπινθήρα είναι μικρό και φτάνει το πολύ μερικές δεκάδες εκατοστά. Η διάρκεια του κεραυνού είναι μικρότερη από ένα δευτερόλεπτο, αλλά η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι ~10.000 βαθμοί Κελσίου. Δημιουργεί έντονο ιονισμό των αερίων του αέρα, τα οποία εκπέμπουν φως κατά τη διάρκεια της εκκένωσης (το φαινόμενο της αστραπής). Η υπερβολική θέρμανση του αέρα και η εκτόνωσή του δημιουργεί τον δυνατό κρότο που ονομάζουμε βροντή. Κάθε μέρα στον πλανήτη μετρώνται πάνω από 40.000 καταιγίδες οι οποίες δημιουργούν σχεδόν 10.000.000 κεραυνούς [5].



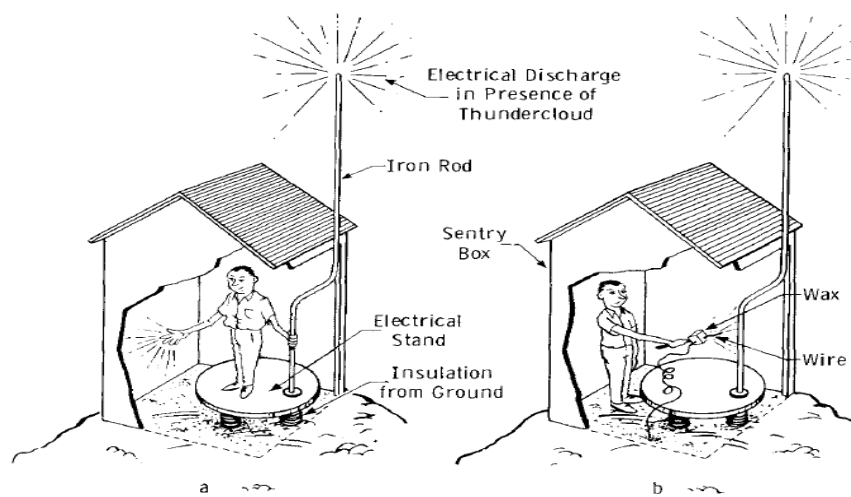
Εικόνα 1.1: Κεραυνός [7].

## 1.2 Ιστορική αναδρομή

Ο κεραυνός υπήρξε ένα από τα πρώτα φυσικά φαινόμενα που παρατήρησε ο άνθρωπος. Η βίαιη εκδήλωσή του σε συνδυασμό με την άγνοια του τρόπου πρόκλησής του δημιούργησε τεράστιο φόβο στον άνθρωπο που του προσέδωσε θεϊκές ιδιότητες.

Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος κατά το δεύτερο μισό του 18ου αιώνα πειραματιζόμενος με έναν χαρταετό, συσχέτισε για πρώτη φορά το “άγνωστο” φαινόμενο με το ηλεκτρικό ρεύμα και την ηλεκτρική εκκένωση. Πριν από την εποχή αυτή η επιστήμη του ηλεκτρισμού είχε φθάσει στο σημείο όπου ηλεκτρικές μηχανές ήταν ικανές να διαχωρίσουν τα αρνητικά φορτία από τα θετικά φορτία μέσω της τριβής δύο διαφορετικών υλικών. Τα φορτία αποθηκεύονταν σε πρωτόγονους πυκνωτές, όπως οι φιάλες του Leyden, από τις οποίες μπορούσαν να παραχθούν και να παρατηρηθούν σπινθήρες.

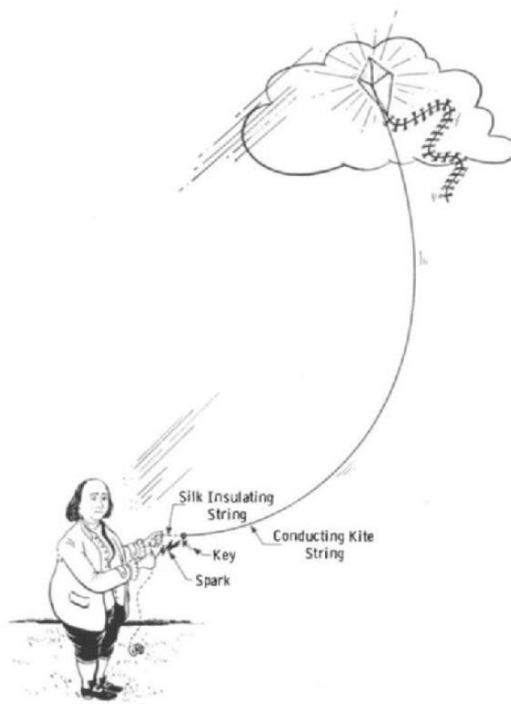
Αρχικά, στόχος του ήταν να αποδείξει ότι τα σύννεφα ήταν ηλεκτρικά φορτισμένα άρα και ο κεραυνός ο οποίος προέρχεται από αυτά. Όμως ο Φραγκλίνος δεν είχε προβλέψει την επικινδυνότητα του όλου πειράματος. Σκέφτηκε έναν πύργο σε ένα υψηλό σημείο από τον οποίο προεξείχε μια μεταλλική ράβδος. Μέσα στον πύργο κάποιος θα κρατούσε την μεταλλική ράβδο στηριζόμενος σε μια βάση, και έτσι θα προκαλείτω μια ηλεκτρική αποφόρτιση στο άλλο του χέρι. Σε περίπτωση που αυτό θα προκαλούσε κινδύνους σκέφτηκε την προσθήκη λαβής από κεριά σ'ένα σύρμα γειωμένο και έτσι το ηλεκτρικό φορτίο θα περνούσε από τη ράβδο στο σύρμα χωρίς να επηρεάσει τον άνθρωπο.



Εικόνα 1.2:Το αρχικό πείραμα του Βενιαμίν Φραγκλίνου [1].

Το πείραμα του όμως εκτελέστηκε επιτυχώς από έναν άλλο επιστήμονα, τον Γάλλο Francois D'Alibard, τον Μάιο του 1752 όταν παρατηρήθηκαν σπινθήρες να ξεπηδούν από τη σιδερένια ράβδο, κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Ο G.W.Richmann, ένας Σουηδός φυσικός, τον Ιούλιο του 1753, απέδειξε ότι τα καταιγιδοφόρα νέφη περιέχουν ηλεκτρικό φορτίο. Δυστυχώς επιβεβαίωσε την απόδειξη με το θάνατό του, όταν τον χτύπησε κεραυνός.

Το αρχικό πείραμα του Φραγκλίνου δεν ολοκληρώθηκε, αφού θέλησε να το βελτιώσει και έτσι σκέφτηκε να χρησιμοποιήσει έναν ηλεκτρικό χαρταετό. Προτιμήθηκε έναντι της μεταλλικής ράβδου αφού θα μπορούσε να πετάξει παντού σε πιο μεγάλο υψόμετρο. Ο σπάγγος ήταν κατασκευασμένος από μετάξι και είχε δέσει ένα μεταλλικό κλειδί στην άκρη του. Το 1752, στην Πενσυλβάνια των ΗΠΑ, πέταξε ο διασημότερος χαρταετός της ιστορίας και ο Φραγκλίνος παρατήρησε τους σπινθήρες από το μεταλλικό ηλεκτρισμένο κλειδί να καταλήγουν στα χέρια του. Μ'αυτή την κατάληξη ο Φραγκλίνος είχε επαληθεύσει την θεωρία του αν και το γνώριζε προηγουμένως από την απόδειξη του D'Alibard.



Εικόνα 1.3:Το πείραμα του Βενιαμίν Φραγκλίνου με τον ηλεκτρικό χαρταετό [1].

Ο Φραγκλίνος, ο οποίος ταυτίστηκε με αυτή την ανακάλυψη σε παγκόσμιο επίπεδο ίσως περισσότερο από κάθε άλλη προσωπικότητα, απέδειξε ότι ο κεραυνός είναι ηλεκτρικό φορτίο. Μετά από αυτήν την ανακάλυψη δεν υπήρχε άλλη ουσιαστική πρόοδος στην κατανόηση του φαινομένου του κεραυνού ώσπου στο τέλος του 19ου αιώνα νέες φωτογραφικές μηχανές καθώς επίσης και η φασματοσκοπία εντάχθηκαν στη μελέτη του φαινομένου του κεραυνού από τους επιστήμονες [1].

### 1.3 Ατμοσφαιρικά ιόντα και αγωγιμότητα

Τα ηλεκτρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα και οι ηλεκτρικές ιδιότητες της ατμόσφαιρας παίζουν σημαντικό ρόλο σε μετεωρολογικές και άλλες ατμοσφαιρικές διεργασίες. Ένα παράδειγμα που μπορεί να σκεφτεί κάποιος είναι ο κεραυνός. Είναι γνωστό ότι ένας φορτισμένος αγωγός στην ατμόσφαιρα, ηλεκτρικά μονωμένος από το έδαφος, χάνει σταδιακά το φορτίο του. Προκύπτει ότι ο ρυθμός απώλειας είναι ανάλογος του ολικού φορτίου στον αγωγό. Δηλαδή

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ \quad (1.3.1)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (1.3.1) προκύπτει  $Q(t) = Q_0 \cdot e^{-a \cdot t}$  (1.3.2) όπου  $a$  είναι ο συντελεστής εκφόρτισης. Η εκφόρτιση οφείλεται στο γεγονός ότι η ατμόσφαιρα δεν είναι τέλειος μονωτής αλλά περιέχει ελεύθερα θετικά και αρνητικά ιόντα. Η αριθμητική πυκνότητα (συγκέντρωση) των ιόντων στην ατμόσφαιρα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά.

Στην ανώτερη ατμόσφαιρα η ηλιακή υπεριώδης ακτινοβολία μήκους κύματος,  $\lambda < 2000$  Å (angstrom) είναι υπεύθυνη για τον ιονισμό των μορίων και των ατόμων και τη δημιουργία της ιονόσφαιρας. Όμως η υπεριώδης ηλιακή ακτινοβολία δεν φτάνει στην τροπόσφαιρα, γιατί απορροφάται στα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Έτσι οι κύριες πηγές παραγωγής ιόντων στην τροπόσφαιρα είναι οι ραδιενεργές ουσίες που αποσυντίθενται στο φλοιό της γης και την ατμόσφαιρα και οι κοσμικές ακτίνες. Ο πυρήνας των ραδιενεργών στοιχείων είναι ασταθής και τείνει διασπώμενος προς μια ευσταθή κατάσταση. Κατά τη διάσπαση απελευθερώνονται ορισμένα σωμάτια, όπως θετικά φορτισμένοι πυρήνες Ηλίου  $He^{++}$  (ακτίνες  $\alpha$ ) ή ηλεκτρόνια



(ακτίνες β) και ακτίνες γ, οι οποίες μπορεί να είναι αρκετά ενεργητικές ώστε να προκαλέσουν δευτερογενή ιονισμό.

Επιπρόσθετα, μια εξίσου σπουδαία πηγή ατμοσφαιρικού ιονισμού είναι οι κοσμικές ακτίνες υψηλής ενέργειας (κυρίως πρωτόνια) που φθάνουν στο περιβάλλον της γης από το σύμπαν και μέσω κρούσεων με τα συστατικά ατμοσφαιρικά αέρια δημιουργούν ιόντα. Οι κοσμικές ακτίνες χαμηλότερης ενέργειας απορροφώνται στην ανώτερη ατμόσφαιρα, ενώ οι πιο ενεργητικές φθάνουν μέχρι το έδαφος. Ο μέσος αριθμός ζευγών ιόντων που παράγονται στο επίπεδο της θάλασσας από τις κοσμικές ακτίνες, είναι περίπου  $1.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ . Η παραγωγή ιόντων αυξάνει με το γεωμαγνητικό πλάτος, επειδή το μαγνητικό πεδίο της γης κατευθύνει τις κοσμικές ακτίνες προς τους γεωμαγνητικούς πόλους. Τα πρωτογενή ιόντα που παράγονται από την ακτινοβολία είναι ιονισμένα μόρια αέρα και ηλεκτρόνια. Τα πρωτογενή ιόντα και τα ηλεκτρόνια ακολουθούν κατόπιν διάφορα στάδια, κατά τα οποία αντιδρούν ή προσκολλώνται σε άλλα μόρια και δημιουργούν φορτισμένα συγκροτήματα από 15-20 μόρια. Αυτά τα συγκροτήματα μορίων είναι αρκετά σταθερά και αντιπροσωπεύουν κατηγορία των μικρών ιόντων στην ατμόσφαιρα. Τα μικρά ιόντα μπορούν να προσαρτηθούν σε αιωρήματα (aerosols) οπότε και μιλάμε για μεγάλα ιόντα.

Τα μικρά ιόντα μπορούν να επανασυνδεθούν θετικά και αρνητικά και να χάσουν τα φορτία τους. Στην πράξη επικρατεί μια κατάσταση ισορροπίας, κατά την οποία ο αριθμός των ιόντων που δημιουργούνται, μέσω ραδιενεργών διασπάσεων και κοσμικής ακτινοβολίας, ισούται με τον αριθμό των ιόντων που εξαφανίζονται, μέσω επανασύνδεσης ή προσκόλλησης σε αιωρήματα. Η ισορροπία παραγωγής και απωλειών εκφράζεται από τη σχέση :

$$q = \alpha n^2 + \beta nN \quad (1.3.3)$$

όπου  $q$  είναι ο ολικός ρυθμός παραγωγής ανά μονάδα όγκου και μονάδα χρόνου,  $n$  είναι η συγκέντρωση μικρών ιόντων,  $N$  η συγκέντρωση αιωρημάτων,  $\alpha$  ο συντελεστής ανασύνδεσης (υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, STP,  $\alpha = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ ) και  $\beta$  ο συντελεστής προσκόλλησης, ( $\beta = 3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$ , STP). Εάν τα  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $N$  και  $q$  είναι γνωστά από μετρήσεις, τότε η συγκέντρωση των μικρών ιόντων μπορεί να βρεθεί από την παραπάνω σχέση. Κοντά σε πόλεις όπου το  $N$  φτάνει  $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , οι απώλειες των μικρών ιόντων

οφείλονται κυρίως στον όρο  $\beta nN$ , ενώ ο όρος ανασύνδεσης  $an^2$  είναι πιο σημαντικός σε υπαίθριες περιοχές και πάνω από θάλασσες. Η συγκέντρωση των μικρών ιόντων αυξάνει με το ύψος. Αυτό οφείλεται στη δραστική μείωση της συγκέντρωσης των αιωρημάτων με το ύψος και στην αύξηση της παραγωγής λόγω ενίσχυσης του αποτελέσματος των κοσμικών ακτίνων. Ο αριθμός των θετικών ιόντων είναι κατά ένα ποσοστό (~10-15%) μεγαλύτερος από τον αριθμό των αρνητικών ιόντων, με αποτέλεσμα στην κατώτερη ατμόσφαιρα, να υπάρχει ένα καθαρό θετικό φορτίο. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια προσφύονται ευκολότερα σε μεγάλα σωματίδια αιωρημάτων τα οποία αποσύρονται από την ατμόσφαιρα ευκολότερα καταλήγοντας στη Γη, η οποία και φορτίζεται θετικά ως προς την ατμόσφαιρα.

Τα ιόντα υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου, μπαίνουν σε κίνηση. Η ιοντική κινητικότητα ορίζεται σαν η μέση ταχύτητα ολίσθησης,  $u_i$  υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου ίσου με μονάδα, δηλαδή  $k_i = u_i / E$ . Η κινητικότητα  $k_i$  εξαρτάται από τη φύση του ιονισμένου μέσου, τις διαστάσεις των ιόντων, τη μέση ελεύθερη διαδρομή και τη θερμοκρασία. Από την κινητική θεωρία των αερίων προκύπτει ότι η ιοντική κινητικότητα δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση :

$$k_i = (q_i/2m_i)(l/\bar{U}) \quad (1.3.4) \quad \text{με} \quad \bar{U} = (3KT/2m_i)^{1/2} \quad (1.3.5)$$

όπου  $(q_i/m_i)$  είναι ο λόγος φορτίου/μάζας του ιόντος,  $l$  η μέση ελεύθερη διαδρομή,  $\bar{U}$  η μέση ταχύτητα της θερμικής κίνησης του,  $K$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία του ιοντικού αερίου. Η κινητικότητα των μικρών ιόντων στον αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας είναι  $1 - 2 \cdot 10^{-4} (m^2/Vs)$ , ενώ των μεγάλων είναι  $10^{-8} - 10^{-6} (m^2/Vs)$ . Δηλαδή η κινητικότητα των μικρών ιόντων είναι εκατό φορές έως δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από αυτή των μεγάλων ιόντων.

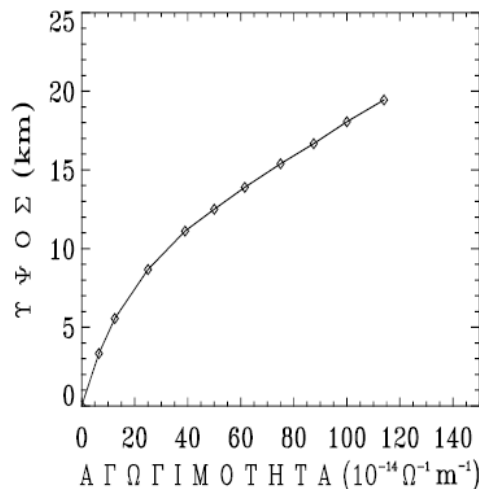
Η παρουσία ιόντων στην ατμόσφαιρα καθορίζει την αγωγιμότητά της. Τα ιόντα, ανάλογα με το φορτίο τους, κινούνται είτε παράλληλα είτε αντιπαράλληλα ενός ηλεκτρικού πεδίου  $E$ , με ταχύτητα ολίσθησης  $u_i^\pm = k_i^\pm \cdot E$ . Κάθε ιόν  $i^\pm$  φέρει ένα φορτίο  $e$  και συνεπώς τα ιόντα τύπου  $i^\pm$  με συγκέντρωση  $n_i^\pm$ , συνεισφέρουν ποσότητα  $j_i^\pm = k_i^\pm n_i^\pm eE$ , στο ρεύμα που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, υπό την επίδραση του πεδίου  $E$ .

Έτσι η ολική πυκνότητα ρεύματος είναι :

$$J = \sum_i (j_i^+ + j_i^-) = \sum_i (k_i^+ n_i^+ e_i^+ + k_i^- n_i^- e_i^-) E = \lambda E \quad (1.3.6)$$

όπου η ποσότητα  $\lambda$  ορίζεται ως η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η αγωγιμότητα  $\lambda$  αυξάνει με το ύψος λόγω της αύξησης της κινητικότητας  $k$  με το ύψος, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της μέσης ελεύθερης διαδρομής αλλά και στη μείωση της θερμοκρασίας. Κοντά στο έδαφος η αγωγιμότητα είναι  $\lambda = 2.25 \cdot 10^{-14} \Omega^{-1} m^{-1}$ , η οποία είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αγωγιμότητα του χαλκού (καλού αγωγού), του γερμανίου (ημιαγωγός) και του γυαλιού (μονωτής) που είναι  $10^8 \Omega^{-1} m^{-1}$ ,  $10^{-1} \Omega^{-1} m^{-1}$  και  $10^{-11} \Omega^{-1} m^{-1}$  αντίστοιχα. Το σχήμα 1.4 δίνει μια εικόνα της μεταβολής της αγωγιμότητας  $\lambda$  με το ύψος, όπου οι τιμές που φαίνονται είναι απλά αντιπροσωπευτικές.



Σχήμα 1.4: Τυπική καμπύλη μεταβολής της ατμοσφαιρικής αγωγιμότητας με το ύψος [3].

Το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού, που αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας αυτής, είναι  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ , όπου  $\epsilon_0$  είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού,  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  (farad/m) και  $\sigma$  η πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια του αγωγού. Συνεπώς το ολικό φορτίο στον αγωγό είναι  $Q = \int_S \sigma ds$  (1.3.7). Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στο περιβάλλον του αγωγού τα ιόντα κινούνται προς και από τον αγωγό παράγοντας ρεύμα ίσο με:

$$I = -\frac{dQ}{dt} = \int_S J \cdot ds = \int_S \lambda \cdot E \cdot ds = \frac{\lambda}{\epsilon_0} \int_S \epsilon_0 \cdot E \cdot ds = \frac{\lambda Q}{\epsilon_0} \quad (1.3.8)$$

όπου το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει μείωση του φορτίου με το χρόνο. Ολοκληρώνοντας την πιο πάνω σχέση παίρνουμε το φορτίο στον αγωγό συναρτήσει του χρόνου:

$$Q(t) = Q_0 \exp\left(-\frac{\lambda t}{\epsilon_0}\right) \quad (1.3.9)$$

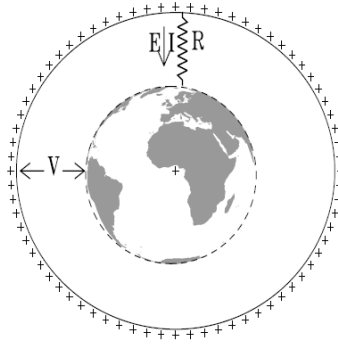
Από την σχέση (1.3.9) παρατηρούμε ότι η εκφόρτιση του αγωγού οφείλεται στην αγωγιμότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ ο χαρακτηριστικός χρόνος εκφόρτισης είναι  $\tau = \epsilon_0/\lambda$ . Επομένως η αγωγιμότητα και το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή φορτίων στα νέφη, που οδηγούν στους κεραυνούς.

#### 1.4 Το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει πάντα ένα ηλεκτρικό πεδίο σαν αποτέλεσμα του καθαρού ελεύθερου φορτίου στην επιφάνεια της γης και στην ατμόσφαιρα. Το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα είναι ηλεκτροστατικής φύσης και μεταβάλλεται ευρύτατα, χωρικά και χρονικά. Η μέση τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στην ατμόσφαιρα πλησίον της επιφάνειας της γης είναι  $\sim -120$  V/m και κατευθύνεται προς τη γη. Τοπικά και χρονικά όμως η διεύθυνση και το μέγεθος του πεδίου εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (νεφοκάλυψη, τύπο νεφών, ανέμους, βροχοπτώσεις, ηλεκτρικές καταιγίδες, αιωρήματα κλπ). Γι'αυτό όταν αναφερόμαστε στο ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να διευκρινίζουμε τι είδους ατμοσφαιρικές συνθήκες επικρατούν. Έτσι έχουμε: 1) πεδίο καλού καιρού (fair weather field) όταν λιγότερο από 4/10 του ουρανού είναι νεφοσκεπές και οι άνεμοι δεν είναι ισχυροί και 2) πεδίο διαταραγμένου καιρού (disturbed weather field) στις άλλες περιπτώσεις. Τυπικό παράδειγμα διαταραγμένου καιρού είναι, όταν επικρατούν καταιγίδες. Μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους δείχνουν ότι το πεδίο μεταβάλλεται τοπικά και χρονικά, αλλά κατά μέσο όρο έχει μέτρο 120 V/m και κατευθύνεται προς τη γη. Δηλαδή,  $E_0 = -120\hat{z}$  (V/m). Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το πεδίο κατευθύνεται προς τη γη, από όπου και συμπεραίνεται ότι η γη είναι αρνητικά φορτισμένη.

Το φορτίο της γης παραμένει σχεδόν σταθερό, γεγονός που συνεπάγεται την ύπαρξη κάποιου ισχυρού μηχανισμού ηλεκτρογεννήτριας που συνεχώς φορτίζει τη γη, σε σχέση με την

ατμόσφαιρα. Δηλαδή υπάρχει ένας μηχανισμός που μεταφέρει αρνητικά φορτία προς τη γη, με ρυθμό ίσο με 1350 Cb/s [3]. Αυτός ο μηχανισμός φόρτισης του πυκνωτή ατμόσφαιρα-γη, σχετίζεται άμεσα με τις κεραυνο-καταιγίδες, που λαμβάνουν χώρα ανά τον κόσμο με ρυθμό μερικών εκατοντάδων ανά πάσα στιγμή.



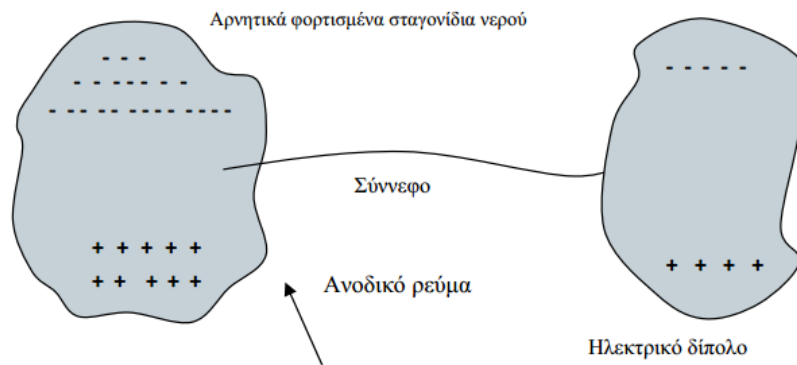
Σχήμα 1.5: Ηλεκτρικό ανάλογο του συστήματος γη-ιονόσφαιρα είναι ο σφαιρικός πυκνωτής, εσωτερικός αγωγός του οποίου είναι η επιφάνεια της γης και εξωτερικός η ιονόσφαιρα. Η κατώτερη ατμόσφαιρα αποτελεί το μεταξύ των αγωγών διηλεκτρικό, μέσω του οποίου είναι δυνατή η διαρροή φορτίων που δίνουν το συνεχές ρεύμα από την ιονόσφαιρα στην γη [3].

## 1.5 Μηχανισμοί διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών

Για τη διατύπωση μιας μονοσήμαντης θεωρίας όσον αφορά τους μηχανισμούς διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό των νεφών έχουν γίνει προ πολλού πολλές προσπάθειες. Το βέβαιο είναι ότι στο εσωτερικό των νεφών εξελίσσονται σύνθετες και πολύπλοκες διεργασίες και γι'αυτό το λόγο η περιγραφή του μηχανισμού διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών θα περιοριστεί σε τρία φαινόμενα για τα οποία μπορεί να υποτεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων. Τα τρία φαινόμενα είναι το φαινόμενο διασποράς, ισχυράς ψύξεως και διαρρήξεως.

### 1.5.1 Φαινόμενο διασποράς

Οι ποσότητες νερού που βρίσκονται στο εσωτερικό των νεφών καταιγίδας υπό την επίδραση των αναταράξεων που προκαλούνται από ανοδικά ρεύματα αέρος ταχύτητας 30-40 m/s δίνουν σταγονίδια οδηγούμενα προς το πάνω μέρος του νέφους όπως ακριβώς και τα σταγονίδια νερού που γεμίζουν το χώρο κοντά στους καταρράκτες. Έτσι με αυτόν το τρόπο το σύννεφο εμφανίζεται σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο με το θετικό φορτίο στην κάτω περιοχή του.

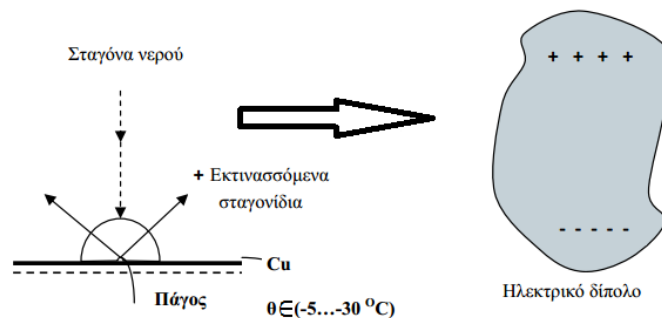


Σχήμα 1.6: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διασποράς [4].

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 80% των κεραυνών που κατευθύνονται στη γη προέρχονται από σύννεφα που είναι αρνητικά φορτισμένα στην κάτω περιοχή τους, καθώς επίσης ότι η διασπορά σταγονιδίων νερού είναι δυνατή μόνο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των  $0^{\circ}\text{C}$  τίθεται σε αμφιβολία κατά πόσο ένας τέτοιος μηχανισμός θα μπορούσε να ερμηνεύσει ικανοποιητικά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του νέφους έστω και σ'ένα ποσοστό 20% του συνόλου [4].

### 1.5.2 Φαινόμενο ισχυράς ψύξεως

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται κατ'αρχήν το πειραματικό του ανάλογο (σχήμα 1.7): Σε πλάκα χαλκού υπό θερμοκρασία  $-5...-30^{\circ}\text{C}$  και μονωμένη ηλεκτρικά έναντι του περιβάλλοντος (προς έλεγχο του ηλεκτρικού φορτίου που θα αναπτυχθεί πάνω της) πέφτουν σταγόνες νερού. Λόγω της εξαιρετικά χαμηλής θερμοκρασίας της αγωγίμης πλάκας, ένα μέρος του νερού στερεοποιείται άμεσα δημιουργώντας κρυστάλλους πάγου σ'αυτήν. Το υπόλοιπο μέρος του νερού εκτινάσσεται (διατηρούμενο σε υγρή κατάσταση) προς τα πάνω. Πειραματικά διαπιστώνεται ότι η πλάκα χαλκού εμφανίζει αρνητικό φορτίο, ενώ τα προς τα πάνω εκτινασσόμενα σταγονίδια ύδατος έχουν θετικό φορτίο.

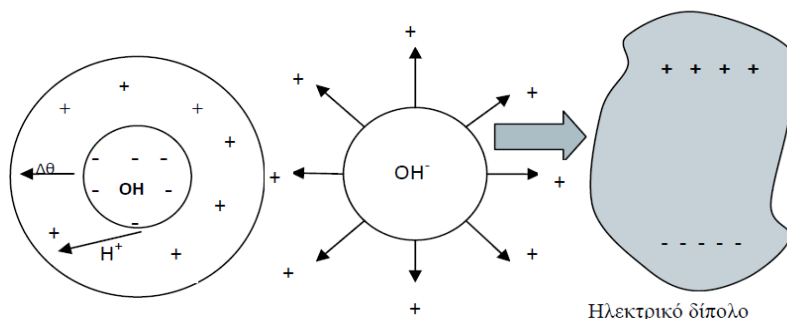


Σχήμα 1.7: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο ισχυράς ψύξεως [4].

Στην περίπτωση του διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του συννέφου το ρόλο της “ψυχρής” πλάκας αναλαμβάνουν κρύσταλλοι πάγου, οι οποίοι, κατευθυνόμενοι λόγω του βάρους τους προς τα κάτω, μεταφέρουν προς την αντίστοιχη περιοχή του νέφους το αρνητικό τους φορτίο, ενώ τα εκτινασσόμενα σταγονίδια προς τα πάνω φορτίζουν θετικά το πάνω μέρος του συννέφου. Μ’ αυτόν τον τρόπο εξηγείται η δημιουργία ηλεκτρικού διπόλου (στο σύννεφο), που παρουσιάζει τα αρνητικά φορτία στο κάτω μέρος του. Παραδοχή του αναφερθέντος μηχανισμού θα μπορούσε να εξηγήσει το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων σε εκείνα τα σύννεφα από τα οποία προέρχεται το 80% των κεραυνοπληξιών που συμβαίνουν στη γη. Το ασθενές όμως σημείο της παραδοχής του μηχανισμού αυτού εντοπίζεται στο ότι κατά το πείραμα με την πλάκα του χαλκού εμφανίζονται μη αμνητέα ηλεκτρικά φορτία πάνω σε αυτήν μόνο όταν οι σταγόνες ύδατος περιλαμβάνουν ίχνη προσμίξεως όπως υδροξείδιο αμμωνίου ( $NH_4OH$ ) [4].

### 1.5.3 Φαινόμενο διαρρήξεως

Για να γίνει πιο κατανοητός ο μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων, έστω ένας κρύσταλλος πάγου όπου το εσωτερικό του (πυρήνας) διατηρείται ακόμη σε υγρή κατάσταση (σχήμα 1.8). Λόγω της πτωτικής μεταβολής της θερμοκρασίας από τον πυρήνα προς το περίβλημα του κρυστάλλου, τα ιόντα υδρογόνου  $H^+$  που είναι περίπου δέκα φορές πιο ευκίνητα από τα ιόντα υδροξυλίου  $OH^-$  κινούνται προς το περίβλημα στο οποίο και προσδίδουν θετικό φορτίο. Τα σχετικά δυσκίνητα ιόντα  $OH^-$  μένουν στον πυρήνα του κρυστάλλου, στον οποίο και προσδίδουν αρνητικό φορτίο.



Σχήμα 1.8: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διαρρήξεως [4].

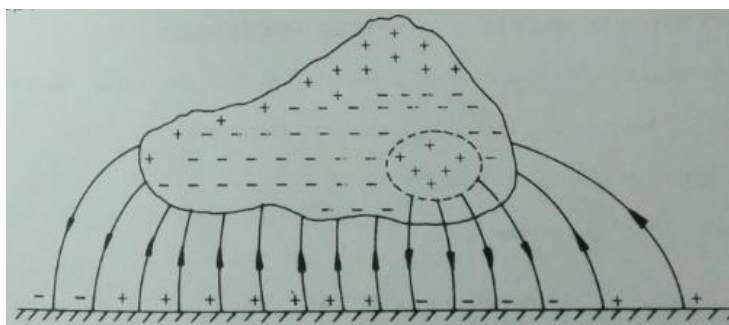
Με τη βαθμιαία ψύξη του πυρήνα προκαλείται αύξηση του όγκου του, με συνέπεια τη διάρρηξη του εξωτερικού μέρους (περιβλήματος) του κρυστάλλου, οπότε οι βαρείς πυρήνες  $OH^-$  πέφτουν προς τα κάτω, ενώ τα τεμαχίδια στα οποία διαρρηγνύεται η θετικά φορτισμένη επιφάνεια του κρυστάλλου λόγω των αναταράξεων που επικρατούν στο εσωτερικό του νέφους, μεταφέρονται προς τα ανώτερα στρώματά του. Με αυτόν τον τρόπο εξηγείται η δημιουργία ενός ηλεκτρικού διπόλου, με τα αρνητικά φορτία στη βάση του νέφους.

Συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους εξάγονται τα ακόλουθα:

Α) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία τόσο θετικά, όσο και αρνητικά, σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Με λίγα λόγια η φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα σύννεφα κατά κανόνα παρουσιάζουν στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικότητας, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες Cb και στο πάνω μέρος τους ένα φορτίο θετικότητας. Έτσι, στο χώρο μεταξύ σύννεφου και γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στη γη πάνω σε επαγόμενα φορτία, αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχουν τα φορτία του σύννεφου (σχήμα 1.9).

Β) Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των δύο προσήμων δημιουργούν μια συγκεχυμένη εικόνα μέσα στο νέφος, η οποία διαρκώς μεταβάλλεται, γεγονός που εμποδίζει τη συστηματική ταξινόμηση των ηλεκτρικών καταστάσεων που μπορούν να επικρατούν μέσα σε ένα ηλεκτρισμένο νέφος.

Γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων μέσα στο νέφος συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (μερικά πρώτα λεπτά της ώρας ως μισή ώρα περίπου) [4].





## 1.6 Τύποι κεραυνικών εκκενώσεων

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες[4]:

1. Μεταξύ σύννεφου-γης και αντίστροφα.
2. Εντός του ίδιου του συννέφου.
3. Μεταξύ των συννέφων.

### 1.6.1 Κεραυνοί ανάμεσα σε σύννεφα και γη

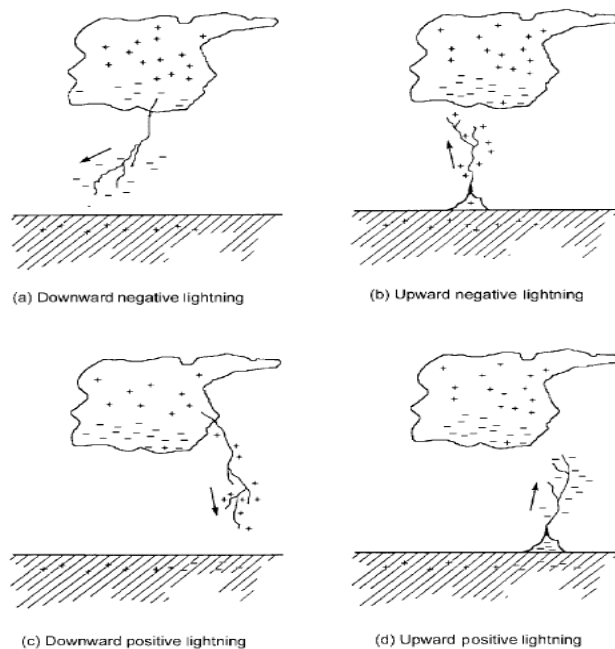
Κάθε κεραυνικό πλήγμα περιλαμβάνει έναν οχετό καθόδου, έναν ανοδικό οχετό επιστροφής και μπορεί να περιλαμβάνει ένα σχετικά μικρό συνεχές ρεύμα το οποίο ακολουθεί τον οχετό επιστροφής [6]. Με βάση την παρατηρούμενη πολικότητα εκκένωσης που καταλήγει στο έδαφος και την κατεύθυνση διάδοσης του αρχικού οχετού, έχουν αναγνωρισθεί τέσσερα διαφορετικά είδη κεραυνών μεταξύ σύννεφου-εδάφους, τα οποία παρουσιάζονται στο (σχήμα 1.10):

α) Κατερχόμενη αρνητική εκκένωση

β) Ανερχόμενη αρνητική εκκένωση

γ) Κατερχόμενη θετική εκκένωση

δ) Ανερχόμενη θετική εκκένωση.



Σχήμα 1.10: Είδη Κεραυνών σύννεφου-εδάφους [6].

Πιστεύεται ότι οι κατερχόμενες αρνητικές εκκενώσεις (τύπου α) αποτελούν το 90% ή και περισσότερο του παγκόσμιου ποσοστού εκκενώσεων σύννεφου σε έδαφος, και ότι το 10% ίσως και λιγότερο αποτελούν οι κατερχόμενες θετικές εκκενώσεις (τύπου γ). Οι ανερχόμενες εκκενώσεις (τύπου β και δ) θεωρείται ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο από ψηλά αντικείμενα (πάνω από 100m) ή σε αντικείμενα που βρίσκονται σε κορυφές βουνών [6].

### 1.6.2 Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα

Οι υπάρχουσες πληροφορίες για τους κεραυνούς του τύπου αυτού είναι λίγες και επιπλέον συχνά αντιφάσκουν μεταξύ τους. Γενικά στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και στο κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές μερικές εκατοντάδες Α έως 1 kA.[4]

### 1.6.3 Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα

Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα εμφανίζονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Βασικό χαρακτηριστικό των κεραυνών αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου μέχρι και 40 km.[4]

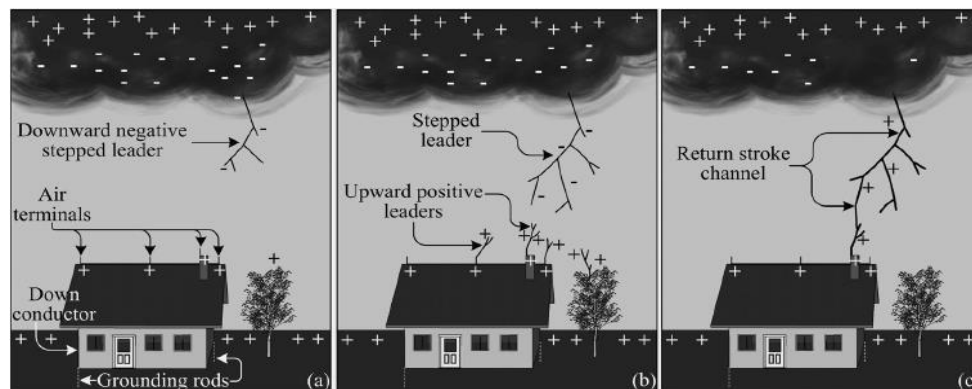
## 1.7 Φάσεις κεραυνικής εκκένωσης

Οι φάσεις μιας κεραυνικής εκκένωσης είναι τρεις και φαίνονται στο σχήμα 1.11 :

A) Προεκκένωση

B) Εκκένωση αντίθετης φοράς

Γ) Κύρια Εκκένωση

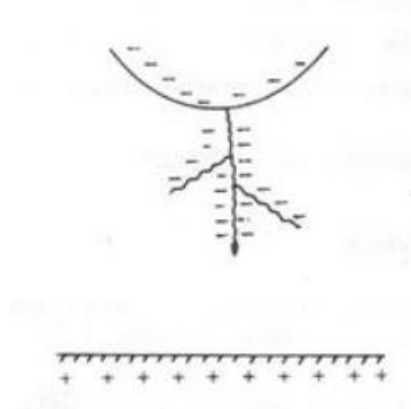


Σχήμα 1.11 Φάσεις κεραυνικής εκκένωσης. α) Προεκκένωση β) Εκκένωση Αντίθετης Φοράς γ) Κύρια Εκκένωση [7].

### 1.7.1 Προεκκένωση

Σ'αυτή τη φάση το ηλεκτρισμένο νέφος εμφανίζεται μακροσκοπικά σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο με αποτέλεσμα να επάγονται στο έδαφος πεδία με ένταση πάνω από 5 KV/m. Στις άκρες του νέφους με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Έτσι οι υψηλές αυτές εντάσεις, συνδυαζόμενες με τη μικρή πυκνότητα του αέρα και μερικούς άλλους παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης.

Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός ενός οχετού ο οποίος ακολουθεί τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Ο οχετός ακολουθεί την κατεύθυνση που θα προκαλέσει την ηλεκτρική σύνδεση και αλληλοεξουδετέρωση των δύο ετερόσημων φορτίων. Αν οι γραμμές μέγιστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος, ο οχετός, (καλούμενος οχετός προεκκένωσης) θα κατευθυνθεί προς αυτό (όπως φαίνεται στο σχήμα 1.12 ).



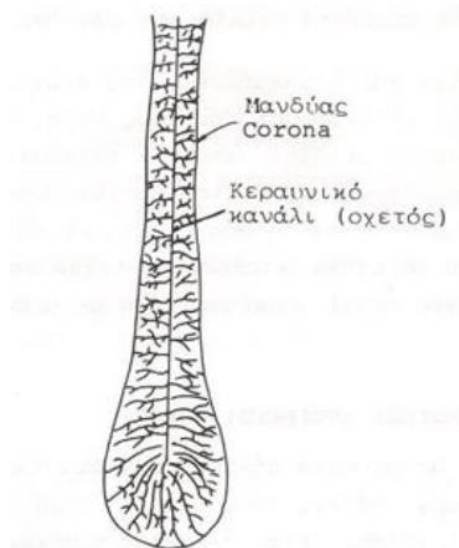
Σχήμα 1.12: Έναρξη εκκένωσης του κεραυνού.

Η προεκκένωση ξεκινάει από μια περιοχή του σύννεφου όπου το ηλεκτρικό πεδίο θα αποκτήσει πολύ μεγάλες τιμές της τάξεως μερικών εκατοντάδων V/m. Δημιουργείται έτσι ένας αγωγίμος δρόμος (οχετός), ο οποίος τροφοδοτείται συνέχεια με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από το σύννεφο. Μπορεί να υπάρξουν διακλαδώσεις του αγωγίμου οχετού που όμως δεν καταλήγουν προς τη γη, αφού δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων. Η μέση ταχύτητα προωθήσεως του οχετού προεκκένωσης είναι περίπου 0.3 m/μs,

ταχύτητα η οποία είναι περίπου ίση με το ένα χιλιοστό της ταχύτητας μετάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό[4].

### 1.7.2 Εκκένωση αντιθέτου φοράς

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο άκρο του προς το έδαφος, είναι πολύ μεγάλη και υπερβαίνει κατά πολύ την πεδιακή ένταση που απαιτείται για τον ιονισμό του αέρα από κρούσεις (γύρω στα 30 KV/cm). Αυτός είναι και ο λόγος που ο οχετός περιβάλλεται διαρκώς από ένα μανδύα Corona που εκτείνεται μερικά μέτρα γύρω από αυτόν. Το πάχος του μανδύα αυτού είναι μεγαλύτερο στο άκρο του οχετού που είναι κοντά στο έδαφος και αυξάνεται όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει το έδαφος. Το φαινόμενο Corona καταλήγει σε μια ανερχόμενη εκκένωση, η οποία τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο οχετό και να επιτευχθεί μια πλήρης γεφύρωση του διακένου αέρα, με άλλα λόγια το κεραυνικό πλήγμα. Στο σχήμα 1.13 φαίνεται η μορφή που έχει ο οχετός και ο μανδύας Corona [4].



Σχήμα 1.13: Κεραυνικό κανάλι (οχετός) [4]

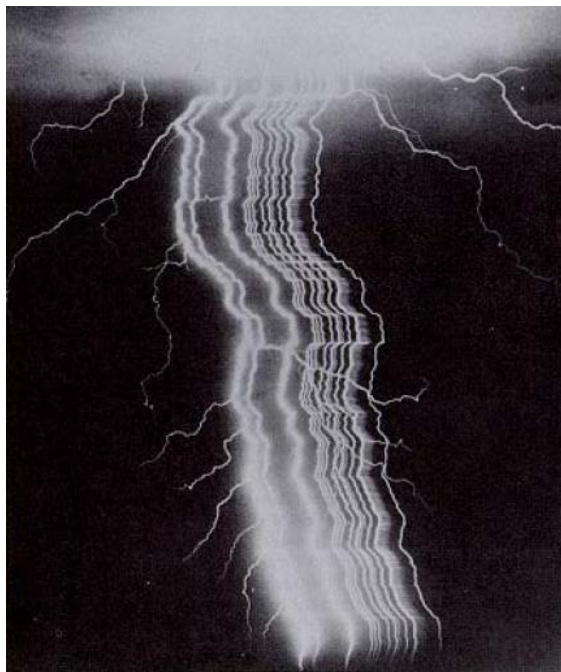
### 1.7.3 Κύρια εκκένωση

Η κύρια εκκένωση (πλήγμα επιστροφής) είναι η τελευταία φάση της κεραυνικής εκκένωσης. Στη φάση αυτή που πραγματοποιείται με μεγάλη ταχύτητα, υπάρχει γεφύρωση της απόστασης μεταξύ νέφους και γης. Ο αγώγιμος οχετός προεκκένωσης που προϋπήρχε

παίρνει τη μορφή ενός πλήρους οχετού εκκένωσης. Τα ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στον αγωγό είναι της τάξης των 10...100 kA με κλίσεις μετώπου της τάξης των 20...100 kA/μs ενώ η διάρκεια ροής των ρευμάτων αυτών είναι της τάξης των μερικών δεκάδων μs. Το μήκος ενός κεραυνικού οχετού εξαρτάται από το ύψος που βρίσκεται το αντίστοιχο καταιγιδοφόρο νέφος, ενώ όταν πρόκειται για κεραυνό που λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο νεφών εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων νεφών. Σε περίπτωση κεραυνοπληξίας προς τη γη, το μήκος των κεραυνικών οχετών είναι της τάξης των λίγων χιλιομέτρων το πολύ. Επίσης η διάμετρος ενός οχετού εκκενώσεως είναι της τάξης των μερικών εκατοστών [4].

### **1.8 Επανάληψη φαινομένου ηλεκτρικών εκκενώσεων**

Η διεργασία της εκκένωσης μπορεί να τελειώσει μετά την κύρια εκκένωση. Συνήθως όμως υπάρχει επανάληψη του φαινομένου μία ή και περισσότερες φορές. Στην περίπτωση αυτή, μερικά εκατοστά του δευτερολέπτου μετά από την πρώτη εκκένωση, αφού η βάση του σύννεφου επαναφορτισθεί σε υψηλό δυναμικό, μια νέα εκκένωση λαμβάνει χώρα, αρχίζοντας από το ίδιο σημείο που άρχισε ο πρώτος οχετός προεκκένωσης και φυσικά προτιμά να διαδίδεται μέσω του προϋπάρχοντος ιονισμένου καναλιού με ταχύτητα  $\sim 2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Η δεύτερη αυτή εκκένωση (dart leader), φτάνει στη γη σε 2 ms περίπου, και αμέσως ακολουθείται από ένα νέο κύπημα επιστροφής λιγότερο ισχυρό από το πρώτο. Η εκκένωση (dart leader)-οχετός επιστροφής μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές (σχήμα 1.14) μέχρις ότου το ιονισμένο κανάλι φθίνει και η όλη διαδικασία σταματά. Αυτό συμβαίνει όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ βάσης σύννεφου και εδάφους έχει μειωθεί σημαντικά από τη μεταφορά ηλεκτρονίων στο έδαφος [3].



Σχήμα 1.14: Φωτογραφία κεραυνού με Streak-camera στην οποία διακρίνονται δώδεκα διαδοχικά κτύπηματα από τ' αριστερά προς τα δεξιά.. Η συνεχής εκπομπή φωτός μετά το ενδέκατο κτύπημα υποδηλώνει τη συνεχή ροή ρεύματος, για κάποιο χρονικό διάστημα, μετά από αυτό το κτύπημα [3].

## 1.9 Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων

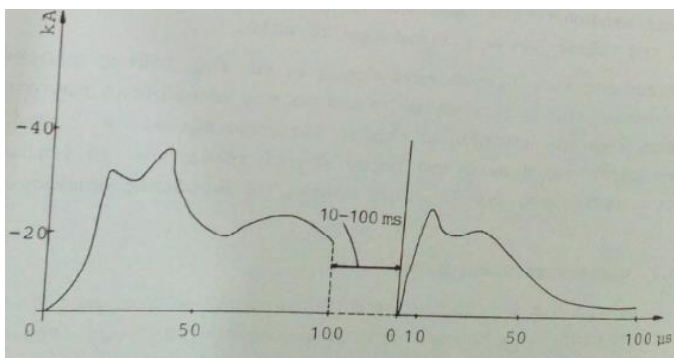
Σαν πολικότητα εκκενώσεως λαμβάνεται η πολικότητα φορτίου του κάτω μέρους του συννέφου που προκάλεσε την εκκένωση. Σύμφωνα με την συνθήκη αυτή το 80% περίπου των κεραυνών είναι αρνητικής πολικότητας. Για την ένταση του ρεύματος του κεραυνού ισχύουν τα παρακάτω στοιχεία τα οποία έχουν εξαχθεί από πειραματικά δεδομένα:

- Οι μέγιστες εντάσεις των κεραυνικών ρευμάτων φθάνουν πολλές δεκάδες kA.
- Η μέση τιμή είναι μικρότερη της τάξεως των 2 kA.
- Το εύρος της πρώτης εκκένωσης είναι μεγαλύτερο από τις τυχόν επόμενες εκκενώσεις.

Από διάφορες μετρήσεις ακριβείας που έχουν γίνει έχουν προκύψει οι εξής μορφές κυμάτων του ρεύματος για τα διάφορα είδη κεραυνών:

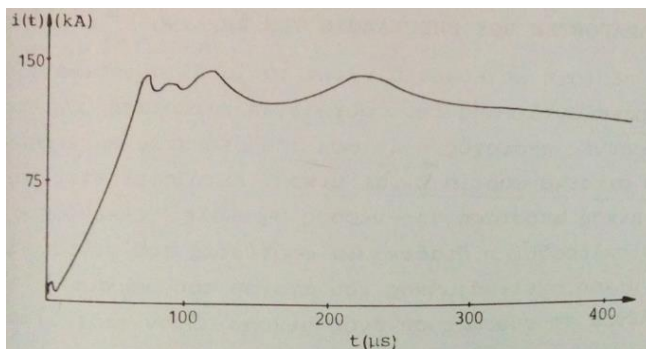
**α) Αρνητικοί κεραυνοί:** Η μορφή του κύματος των ρευμάτων των “αρνητικών κεραυνών” παρουσιάζει ένα αρχικό τμήμα διάρκειας λίγων ms, με μικρή κλίση, ακολουθούμενο από άλλο

τμήμα πολύ μεγαλύτερης κλίσης (περί τα 40 kA,  $\mu\text{s}$ ) ως την τιμή κορυφής και τέλος από ένα άλλο τμήμα μεγάλης διάρκειας με ακανόνιστη μορφή.



Σχήμα 1.15: Παλμογραφήματα αρνητικού κεραυνού [4]

**β) Θετικοί κεραυνοί:** Οι θετικοί κεραυνοί αποτελούνται από ένα μόνο πλήγμα. Ο παλμός είναι σχετικά μεγάλης διάρκειας, (ο χρόνος ημίσεως εύρους είναι της τάξης των 500  $\mu\text{s}$ ) και έχει μέτωπο μικρής κλίσης (γύρω στα 2,5 kA/ $\mu\text{s}$ ).

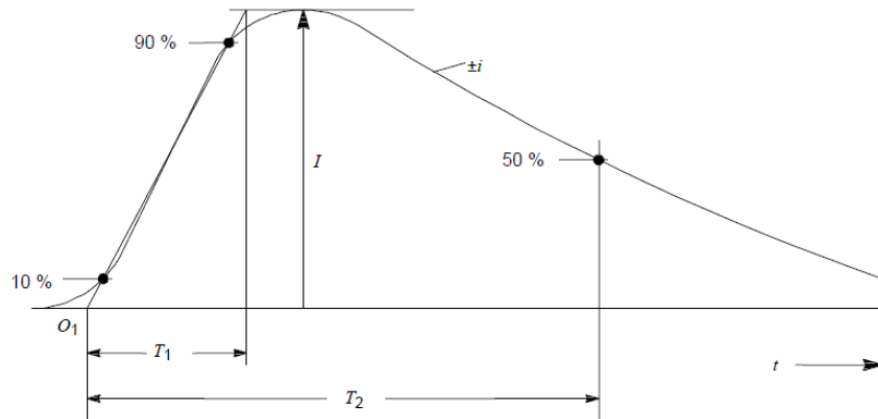


Σχήμα 1.16 : Τυπικό παλμογράφημα του ρεύματος θετικού κεραυνού. [4]

### 1.10 Ρεύμα κεραυνού και σχετικές παράμετροί του

Σε μια κατερχόμενη αρνητική εκκένωση, τα διαδοχικά πλήγματα έχουν πιο μικρή κορυφή ρεύματος από ότι η πρώτη εκκένωση, καθώς επίσης οι ακόλουθες εκκενώσεις έχουν πολύ συντομότερο μέτωπο από την πρώτη εκκένωση. Γενικά η κυματομορφή του ρεύματος είναι διπλοεκθετική, στην οποία ο χρόνος μετώπου είναι της τάξης κλάσματος ενός μικροδευτερολέπτου με αποτέλεσμα η μέγιστη χρονική παράγωγος να ισούται με μερικές δεκάδες Giga Amperes το δευτερόλεπτο. Η μέγιστη τιμή του ρεύματος φθάνει κατά μέσο όρο

τα 30 kA για την πρώτη εκκένωση ενώ για τις ακόλουθες εκκενώσεις φθάνει τα 15 kA στους αρνητικούς κεραυνούς. Οι θετικοί κεραυνοί, αντιθέτως, έχουν μόνο ένα πλήγμα με μεγαλύτερη τιμή κορυφής, πιο αργό χρόνο μετώπου και μεγαλύτερη συνολική διάρκεια. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τη κυματομορφή του ρεύματος όπως έχει καθοριστεί από διεθνή πρότυπα (IEC 62305 (2006) series ) [8].



Σχήμα 1.17: Η κυματομορφή του ρεύματος, όπως έχει καθοριστεί από διεθνή πρότυπα. Ο χρόνος  $T_1$  ονομάζεται χρόνος μετώπου και ισούται περίπου με τον χρόνο ανόδου. Το σημείο στην ουρά της κυματομορφής που αντιστοιχεί στο 50% του μεγίστου ορίζει σε συνδυασμό με την ονομαστική αρχή του χρόνου το χρόνο ημίσεως εύρους  $T_2$  [8].

Ο κεραυνός σαν ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους:

- a) **Μέγιστη τιμή ρεύματος:** Σαν συνέπεια της μέγιστης τιμής, είναι η υπερπήδηση μονωτήρων και η καταστροφή των μονωτικών υλικών λόγω αυξημένου δυναμικού του σημείου πλήγματος.
- b) **Μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος  $(\frac{di}{dt})_{max}$ :** Καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόχους κυκλωμάτων και τάσεις που αναπτύσσονται σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία οι οποίες μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες πχ σε συστήματα πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών.



- c) **Μεταφερόμενο φορτίο**  $\int_0^{\infty} i(t)dt$ : Προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.
- d) **Ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος**  $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$ : Είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).
- e) **Μερικές τιμές των παραμέτρων του κερανού φαίνονται στον ακόλουθο (πίνακα 1.1).**  
 Η στήλη με το (+) δηλώνει τους θετικούς κεραυνούς, η στήλη με το (-) δηλώνει τους αρνητικούς κεραυνούς και η στήλη με το (-/+) δηλώνει τους αρνητικούς μαζί με τους θετικούς κεραυνούς [4].

A/A	Παράμετρος	+		-		-/+	Μέγιστες μετρούμενες τιμές
		5%	50%	5%	50%		
1	$\hat{i}$ (kA)	80	30	250	35	114	515 (PL)
2	$(\frac{di}{dt})_{max}$ (kA/μs)	120	40	32	2,4	102	230( USA,1965)
3	$\int_0^{\infty} i(t)dt$ (A·s)	40	7,5	350	80	102	400
4	$\int_0^{\infty} i^2(t)dt$ (κA <sup>2</sup> ·s)	0,55	0,055	15	0,65	3,5	19(CH)

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές κεραυνικών παραμέτρων από μετρήσεις μέχρι το 1989 [4].

## Κεφάλαιο 2: Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας

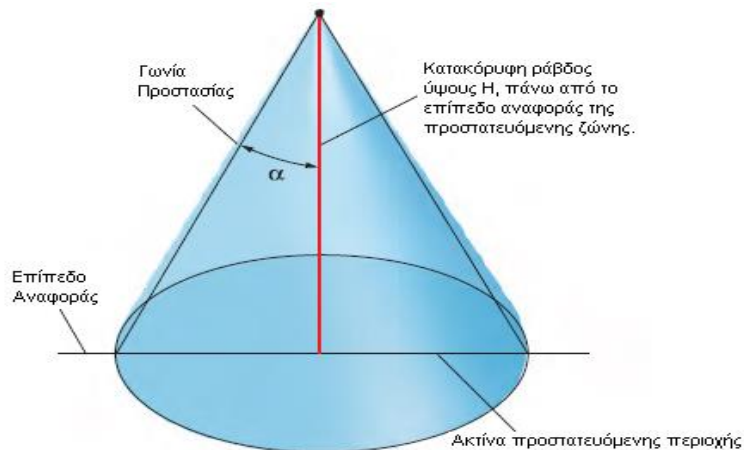
### 2.1 Εισαγωγή

Τα πλοία είναι τα αντικείμενα με το μεγαλύτερο ύψος στους ωκεανούς με αποτέλεσμα να είναι δυνητικά επιρρεπή στα κεραυνικά χτυπήματα. Τα κεραυνικά πλήγματα αποτελούν σημαντικό κίνδυνο ζημιάς του ηλεκτρονικού εξοπλισμού των συστημάτων πλοήγησης και επικοινωνίας. Οι απαιτήσεις για αντικεραυνική προστασία στα πλοία είναι μεγαλύτερες εν αντιθέσει με τα συμβατικά κτίρια.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ζώνης προστασίας που δημιουργεί ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας οι οποίες και θα αναλυθούν παρακάτω. Για την κατανόηση και περιγραφή αυτών των μεθόδων είναι απαραίτητες δύο παράμετροι: Η απόσταση πρόσκρουσης ή διάσπασης (striking distance,  $D$ ) και η ακτίνα σύλληψης (attractive radius,  $R$ ). Η απόσταση διάσπασης ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της άκρης του κατερχόμενου οχητού και του εδάφους τη στιγμή που ο ανερχόμενος οχητός τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο οχητό και να επιτευχθεί μια πλήρης γεφύρωση του διακένου του αέρα. Η ακτίνα σύλληψης είναι η πλευρική απόσταση από το συλλεκτήριο σύστημα στην οποία αν βρεθεί ο κατερχόμενος οχητός θα συλληφθεί από το συλλεκτήριο σύστημα.

### 2.2 Μέθοδος κώνου προστασίας (Cone of protection method, CPM)

Η μέθοδος του κώνου προστασίας έχει ιστορία πάνω από 200 χρόνια και προηγείται των ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων (EGM) παρόλο που το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για να περιγράψει την λειτουργία της μεθόδου αυτής [9]. Ο προστατευόμενος όγκος που παρέχεται από ένα αλεξικεραύνο ή μια κατακόρυφη ράβδο θεωρείται ότι έχει τη μορφή ενός φανταστικού ορθού κυκλικού κώνου με κορυφή την απόληξη της κατακόρυφης ράβδου. Σε αυτή τη μέθοδο προστασίας το ρεύμα κεραυνού δε λαμβάνεται υπόψη, παρά μόνο το ύψος της κατακόρυφης ράβδου το οποίο πρέπει να υπολογιστεί σωστά ώστε η ακτίνα της προστατευόμενης περιοχής να είναι επαρκώς μεγάλη ώστε η κατασκευή να καλύπτεται από το κεραυνικό πλήγμα.



Σχήμα 2.1: Ζώνη προστασίας συλλεκτήριου συστήματος με τη μέθοδο της γωνίας προστασίας με κατακόρυφη ράβδο [11].

Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης ( $D$ ) και της ακτίνας σύλληψης ( $R$ ):

$$D=2H \quad (2.2.1)$$

$$R=H \quad (2.2.2)$$

όπου  $H$  το ύψος του αλεξικέρανου συμπεριλαμβανομένου του ύψους της κατασκευής από το έδαφος.

Η γωνία προστασίας  $\alpha$  ορίζεται ως η γωνία ανάμεσα στην κατακόρυφη ράβδο και στην επιφάνεια του κώνου. Για αναλογία προστασίας 1:1, δηλαδή όταν ο λόγος της ακτίνας σύλληψης ( $R$ ) ως προς την απόσταση της κορυφής του αλεξικέρανου ( $H$ ) ισούται με μονάδα τότε χρησιμοποιείται κώνος προστασίας  $45^\circ$  ενώ για αναλογία 2:1 δηλαδή όταν ο λόγος της ακτίνας σύλληψης ( $R$ ) ως προς την απόσταση της κορυφής του αλεξικέρανου ( $H$ ) ισούται με δύο, τότε χρησιμοποιείται κώνος προστασίας  $60^\circ$  [6]. Όσο μεγαλύτερη η γωνία του κώνου που χρησιμοποιείται τόσο πιθανότερο το σύστημα προστασίας να αποτύχει. Για πολύ ευαίσθητες κατασκευές, γωνίες προστασίας κάτω των  $45^\circ$  πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Η μέθοδος του κώνου προστασίας είναι αποτέλεσμα φτωχών και ανεπαρκών εφαρμοσμένων φυσικών αρχών. Χρησιμοποιώντας σε κατασκευές αυτή τη μέθοδο προστασίας, δεν είναι ασυνήθιστο ο κεραυνός να χτυπήσει μέσα στη ζώνη προστασίας. Επίσης δεν χρησιμοποιείται σε κατασκευές οι οποίες χαρακτηρίζονται ως γεωμετρικά περίπλοκες.

### 2.3 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας (Rolling sphere method, RSM)

Στη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας η άκρη του κατερχόμενου οχητού θεωρείται ότι βρίσκεται στο κέντρο μιας σφαίρας με ακτίνα ίση με την απόσταση πρόσκρουσης (D). Η κυλιόμενη σφαίρα χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν τα πιθανά σημεία τερματισμού του κεραυνικού πλήγματος. Η φανταστική αυτή σφαίρα προκαθορισμένης ακτίνας κυλιέται πάνω από τερματικά αέρα, καλώδια θωράκισης και άλλα γειωμένα μεταλλικά αντικείμενα που προορίζονται για αντικεραυνική προστασία. Αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κάτω από την κυρτή επιφάνεια της σφαίρας προστατεύονται από το άμεσο κεραυνικό πλήγμα εν αντιθέσει με άλλα αντικείμενα που αγγίζουν ή διεισδύουν στην επιφάνεια της κεραυνικής σφαίρας με αποτέλεσμα να μην είναι προστατευμένα [12].

Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης (D) και της ακτίνας σύλληψης (R):

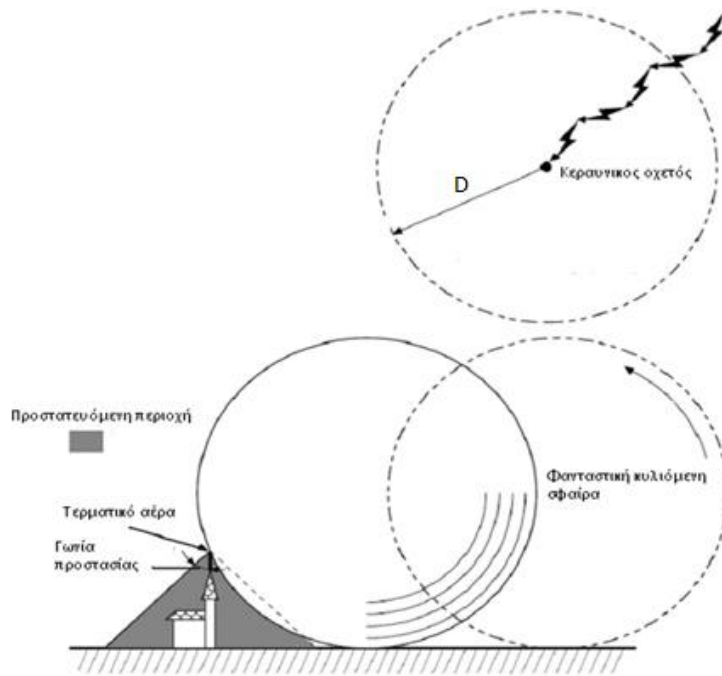
$$D = 10 \cdot I_p^{0.65} \quad (2.3.1)$$

όπου  $I_p$  είναι το μέγιστο ρεύμα του οχητού προεκκένωσης μετρούμενο σε kA.

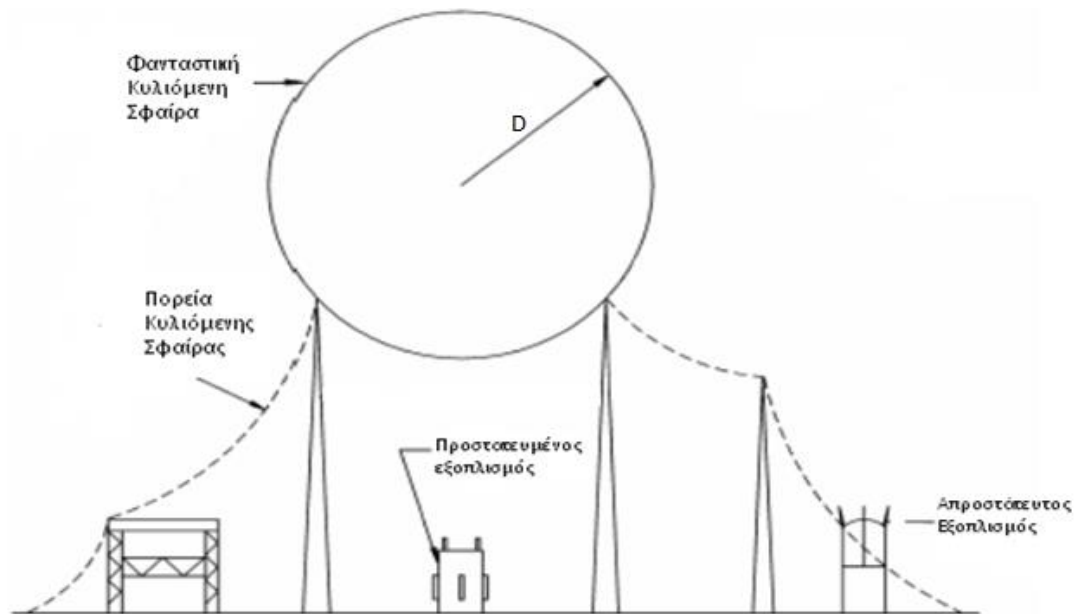
$$R = \sqrt{2 \cdot H \cdot D - H^2} \quad (2.3.2)$$

όπου H το ύψος του αλεξικέρανου συμπεριλαμβανομένου του ύψους της κατασκευής από το έδαφος.

Παρακάτω απεικονίζονται δύο συστήματα αντικεραυνικής προστασίας που βασίζονται στη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας:



Σχήμα 2.2: Μέθοδος Κυλιόμενης Σφαίρας με ένα τερματικό αέρα [13].



Σχήμα 2.3: Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας με περισσότερα από ένα τερματικά αέρα [12].

Όταν οι ράβδοι χρησιμοποιούνται ως τερματικά αέρα για προστασία σε επίπεδες επιφάνειες είναι χρήσιμη η ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$L = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot D \cdot h - h^2} \quad (2.3.3)$$

όπου  $L$ : η απόσταση μεταξύ των δύο ράβδων (m)

$D$ : η απόσταση πρόσκρουσης (m)

$h$ : ύψος της κάθε ράβδου (m)

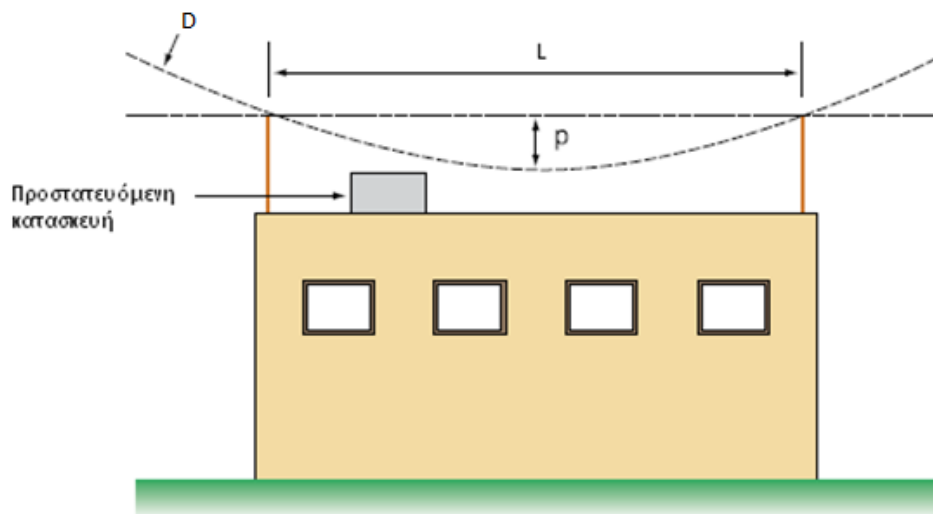
Η απόσταση διείσδυσης της σφαίρας δίνεται από τη σχέση:

$$p = D - \sqrt{D^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (2.3.4)$$

όπου  $p$ : η απόσταση διείσδυσης (m)

$D$ : η απόσταση πρόσκρουσης (m)

$L$ : η απόσταση μεταξύ των δύο ράβδων (m)



Σχήμα 2.4: Απόσταση διείσδυσης με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας ανάμεσα σε δύο κατακόρυφες ράβδους [15].

Η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ουγγαρία το 1962 ενώ καμία άλλη μελέτη δεν δημοσιεύθηκε πριν το διάστημα αυτό. Η εφαρμογή της έχει επαληθευτεί με περισσότερα από 40 χρόνια πρακτικής. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η πιο διαδεδομένη για την σχεδίαση συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας και εξαπλώνεται σε όλο τον κόσμο όλο και περισσότερο, παρόλο που παραβλέπεται το ύψος της κατασκευής και

λαμβάνεται υπόψη μόνο το ρεύμα του κεραυνού. Τέλος, η μέθοδος αυτή δε μπορεί να αποτελέσει τη βάση για επιστημονικές μελέτες [14].

## 2.4 Μέθοδος Όγκου Συλλογής (Collection Volume Method, CVM)

Η μέθοδος του όγκου συλλογής μετράει πάνω από μια δεκαετία εφαρμογής. Ένα μεγάλο ποσοστό των σχεδιαστικών εγκαταστάσεων της που χρησιμοποιούνται για αντικεραυνική προστασία βρίσκουν εφαρμογή στις πιο επιρρεπείς σε κεραυνικά χτυπήματα περιοχές στον κόσμο. Πρόσφατα πραγματοποιήθηκε η πρώτη παγκόσμια στατιστική μελέτη με στόχο την αξιολόγηση της καταλληλότητας της μεθόδου CVM, για την βέλτιστη τοποθέτηση τερματικών αέρα. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν δείχνουν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μια καλή τεχνική για το σχεδιασμό αποτελεσματικών συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας για ένα ευρύ φάσμα τύπων, υψών και θέσεων των κατασκευών.

Ισχύουν οι σχέσεις [16]:

$$D = 0.8 \cdot [(H + 15) \cdot I_p]^{2/3} \quad (2.4.1)$$

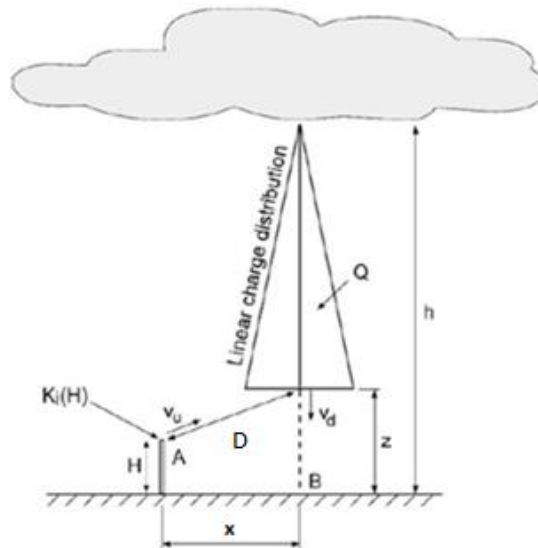
$$R = \sqrt{2 \cdot H \cdot D \cdot -H^2} \quad (2.4.2)$$

όπου:  $H$  το ύψος του αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου του ύψους της κατασκευής από το έδαφος

$I_p$ : το μέγιστο ρεύμα του σχετού προεκκένωσης μετρούμενο σε kA

Η μέθοδος CVM που εφαρμόζεται σε πραγματικές τρισδιάστατες κατασκευές προέρχεται από την έρευνα που διεξήγαγε ο A.J Eriksson. Κατά τη διάρκεια της έρευνάς του, η θεωρητική έννοια ενός “όγκου έλξης” ή ενός “όγκου συλλογής” για την σύλληψη κεραυνικών πληγμάτων είχε μόλις πρόσφατα προταθεί. Ο Eriksson πρότεινε ένα μοντέλο απόστασης πρόσκρουσης που βασιζόταν σε κατασκευαστικές παραμέτρους καθώς και στην τιμή του ρεύματος του κεραυνού. Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο του λαμβάνει υπόψιν ένα συντελεστή  $K_i$  ο οποίος είναι ο λόγος του επαυξημένου ηλεκτρικού πεδίου στην κορυφή της κατασκευής ( $E_T$ ) προς το περιβάλλον πεδίο ( $E_o$ ). Ο Eriksson εξέτασε την προσέγγιση ενός γραμμικά φορτισμένου

καθοδικού οχετού και εκτίμησε το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στην κορυφή της κατασκευής και στο έδαφος κάτω ακριβώς από τον οχετό, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Μοντέλο προσέγγισης καθοδικού οχετού σε κατασκευή που βρίσκεται σε μια αυθαίρετη απόσταση  $x$  [17].

Όταν το περιβάλλον ηλεκτρικό πεδίο είναι επαρκούς έντασης ή πιο συγκεκριμένα, όταν ο καθοδικός οχετός βρίσκεται επαρκώς κοντά στην κατασκευή, τότε ένας ανοδικός οχετός θα ξεκινήσει από αυτή. Η απόσταση του καθοδικού οχετού σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης. Ο Eriksson εφάρμοσε τις παρακάτω υποθέσεις και κριτήρια για να προσδιορίσει την απόσταση διάσπασης:

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην κορυφή του αλεξικέραυνου καθορίζεται από το συντελεστή  $K_i$  που σχετίζεται με το είδος και τη μορφολογία της εκάστοτε κατασκευής.
- Ο καθοδικός οχετός αντιστοιχεί σε μια κάθετη στήλη συνολικού φορτίου  $Q$  που πηγάζει από το σύννεφο και διανέμεται γραμμικά. Η μέση ταχύτητα του οχετού είναι  $V_d$ .
- Η τιμή του κεραυνικού ρεύματος σχετίζεται με το φορτίο με βάση τη σχέση:  

$$I_p = 10,6 \cdot Q^{0,7}$$
- Η επίδραση της γεωμετρίας και ως εκ τούτου των φορτίων χώρου στα άκρα της κατασκευής λαμβάνεται υπόψη με την εισαγωγή της έννοιας “κρίσιμη ακτίνα” που



παρουσιάστηκε από τους Carrara και Thione [17] μετά από μια σειρά εργαστηριακών ερευνών. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, η έναρξη ενός σταθερού καθοδικού οχετού ξεκινά όταν αναπτυχθεί κατάλληλη πεδιακή ένταση γύρω από μια κρίσιμη ακτίνα. Αυτό σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο στην άκρη του κατερχόμενου οχετού θα πρέπει να αυξάνεται συνεχώς μέχρι να φτάσει την κρίσιμη τιμή πεδίου σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την κατασκευή που ονομάζεται κρίσιμη ακτίνα.

- Ως εκ τούτου το κριτήριο για την δημιουργία ενός ανερχόμενου οχετού κάτω από τις πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι η επίτευξη πεδιακής έντασης 3.1 MV/m στην κρίσιμη ακτίνα. Η τιμή αυτή μπορεί να απαιτεί διόρθωση λόγω διακυμάνσεων της πυκνότητας του αέρα, της υγρασίας κτλ.

Η εφαρμογή της έννοιας της κρίσιμης ακτίνας υποδηλώνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο  $E_m$  για την έναρξη ανοδικού οχετού για την κορυφή της κατασκευής και το έδαφος είναι 3.1 MV/m κάτω από πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ανάλογα με την θέση του καθοδικού οχετού, το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την κρίσιμη ακτίνα είτε στην κορυφή της κατασκευής (A), είτε στο έδαφος (B), μπορεί να ξεπεράσει την τιμή  $E_m$  αποδίδοντας έναν ανοδικό οχετό και ένα πιθανό σημείο σύνδεσης. Σαφώς, ο συντελεστής αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου της κατασκευής καθορίζει ποιο από αυτά θα πραγματοποιηθεί πρώτο και για ποια θέση του καθοδικού οχετού.

Μαθηματικά, το πεδιακό κριτήριο έναρξης του οχετού συνοψίζεται ως εξής:

- Σημείο A (κατασκευή)

Συνολική ένταση πεδίου:  $E_t = K_i \cdot E_A$ , όπου :

$$E_A = \frac{Q}{\pi \epsilon x^2 \left(\frac{h-z}{x}\right)^2} \left[ \frac{\left(\frac{h-z}{x}\right)}{\left(1+\left(\frac{z}{x}\right)^2\right)^{0.5}} + \sinh^{-1} \frac{z}{x} - \sinh^{-1} \frac{h}{x} \right] \quad (2.4.3)$$

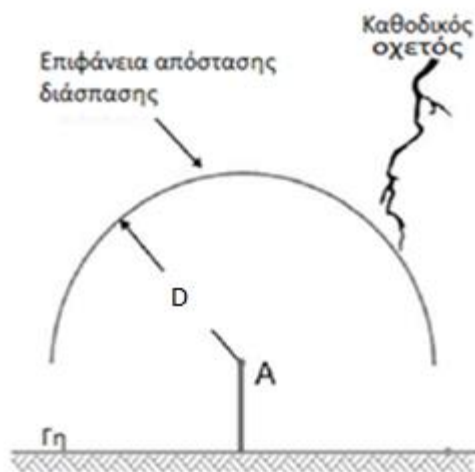
Ο Eriksson εξήγαγε την σχέση (2.4.3) αφού υπέθεσε ότι το φορτίο ανά μονάδα μήκους αυξάνεται γραμμικά κατά μήκος του οχετού (από το σύννεφο προς την άκρη του) και ότι  $z > H$  και  $H \leq x$ . Ένας ανερχόμενος οχετός θα ξεκινήσει εάν  $E_t \geq E_m$ .

- Σημείο B (έδαφος)

Ένας ανερχόμενος οχετός θα ξεκινήσει εάν  $E_B > E_m$ , όπου:

$$E_B = \frac{Q}{\pi \epsilon (h-z)^2} \left[ \frac{h-z}{z} + \ln \left( \frac{z}{h} \right) \right] \quad (2.4.4)$$

Χρησιμοποιώντας τις πιο πάνω σχέσεις για ένα δεδομένο φορτίο  $Q$  κατερχόμενου οχετού, μπορεί να καθορισθεί μια “επιφάνεια απόστασης διάσπασης” πάνω από την κατασκευή. Αυτό περιλαμβάνει μια σειρά από επαναληπτικούς υπολογισμούς των  $E_t$  και  $E_B$  για (i) διαφορετικές θέσεις και (ii) χαρακτηριστικά των καθοδικών οχετών. Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου επαναληπτικού υπολογισμού φαίνεται στο σχήμα 2.6:



Σχήμα 2.6: Επαναληπτικοί υπολογισμοί οι οποίοι εφαρμόζουν το κριτήριο έναρξης οχετού δημιουργώντας μια “επιφάνεια απόστασης διάσπασης” πάνω από το σημείο A [17].

Η επίτευξη του αναγκαίου ηλεκτρικού πεδίου  $E_m$  ώστε να δημιουργηθεί ένας ανοδικός οχετός ο οποίος θα ενωθεί με τον κατερχόμενο οχετό είναι αναγκαία αλλά όχι επαρκής προϋπόθεση. Ο Eriksson αναφέρει ότι ο κεραυνός θα τερματίσει στην κατασκευή αντί στο έδαφος, όταν ο ανοδικός οχετός είναι δυνατόν να διασχίσει την ενδιάμεση απόσταση πριν το ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος φθάσει την κρίσιμη τιμή έναρξης οχετού. Έστω  $z_m$  η απόσταση μεταξύ της άκρης του κατερχόμενου οχετού και του εδάφους (σημείο B) όταν πληρούται η συνθήκη  $E_B = E_m$ . Ακολουθώντας την πιο συντηρητική προσέγγιση του Eriksson, ο ανοδικός οχετός θα πρέπει να διασχίσει ολόκληρη την απόσταση  $(D - z_m)$  για να συνδεθεί με τον

κατερχόμενο, προτού ο τελευταίος διασχίσει την απόσταση  $(z - z_m)$  προς το έδαφος. Καθορίζοντας τη μέση ταχύτητα του ανερχόμενου οχητού ως  $u_u$ , το κριτήριο αυτό ανάγεται σε:

$$\frac{(D-z_m)}{u_u} \leq \frac{(z-z_m)}{u_d} \quad (2.4.5)$$

Ως εκ τούτου, ο λόγος ταχυτήτων  $K_v = u_d/u_u$  είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για το μοντέλο. Αν η απόσταση  $Z_m$  είναι μικρή σε σχέση με την απόσταση πρόσκρουσης η σχέση (2.4.5) γράφεται :  $D = z/K_v$ . Ωστόσο, διατηρώντας την απόσταση  $z_m$  για την γενικότερη περίπτωση και αντικαθιστώντας τη σχέση  $D = \sqrt{(z-H)^2 + x^2}$  από το σχήμα 2.5 στη σχέση (2.4.5) προκύπτει :

$$x = \sqrt{\left[\frac{z_m \cdot (K_v - 1) + z}{K_v}\right]^2 - (z - H)^2} \quad (2.4.6)$$

Εάν  $u_d = u_u$  και  $z_m \ll D$  η σχέση (2.4.5) δίνει  $D = z$  και η σχέση (2.4.6) απλοποιείται σε :

$$z = \frac{x^2 + H^2}{2H} \quad (2.4.7)$$

Με βάση τη λιγότερο συντηρητική προσέγγιση (αλλά ακριβότερη) στην οποία ο ανερχόμενος οχητός χρειάζεται να διασχίσει μια απόσταση  $[D - (z - z_m)]$  λόγω της καθόδου του κατερχόμενου οχητού ισχύει η ακόλουθη σχέση:

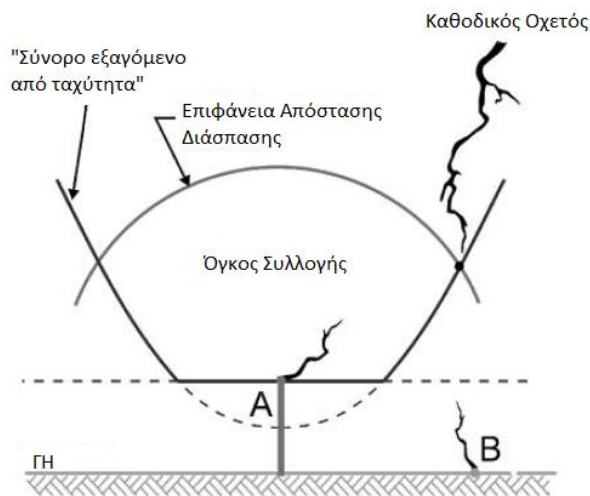
$$\frac{[D - (z - z_m)]}{u_u} \leq \frac{(z - z_m)}{u_d} \quad (2.4.8)$$

Αν η απόσταση  $z_m$  είναι πολύ μικρή σε σχέση με την απόσταση πρόσκρουσης η σχέση (2.4.8) γράφεται:  $D = z \cdot (1 + \frac{1}{K_v})$ . Αντικαθιστώντας τη σχέση  $D = \sqrt{(z - H)^2 + x^2}$  από το σχήμα 2.5 στη σχέση (2.4.8) προκύπτει:

$$x = \sqrt{\left[\frac{(z-z_m) \cdot (1+K_v)}{K_v}\right]^2 - (z-H)^2} \quad (2.4.9)$$

Για μεγάλες τιμές του  $K_v$  και υποθέτοντας  $z_m \ll D$ , η σχέση για την απόσταση ( $x$ ) τείνει να γίνει αυτή της σχέσης (2.4.7).

Για μία κατασκευή δεδομένου ύψους  $H$  τα σημεία  $(x, z)$  ικανοποιώντας την σχέση (2.4.7), χαράσσουν έναν παραβολικό όγκο που βρίσκεται πάνω από την κατασκευή. Για άλλη μια φορά, τα σημεία αυτά λαμβάνονται μέσα από μια σειρά επαναληπτικών υπολογισμών για διαφορετικές θέσεις του καθοδικού οχετού. Η περιοχή αυτή αναφέρεται σαν “σύνορο εξαγόμενο από ταχύτητα” (velocity-derived boundary). Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου υπολογισμού απεικονίζεται στο πιο κάτω σχήμα:

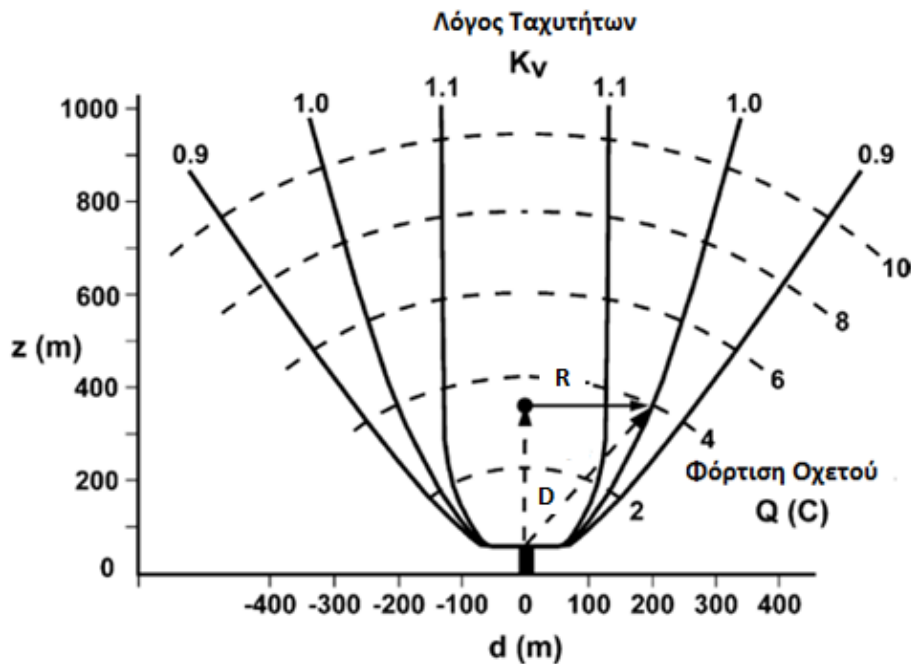


Σχήμα 2.7: Η εφαρμογή του κριτηρίου έναρξης και μετάδοσης ανοδικού οχετού οδηγεί στο “σύνορο εξαγόμενο από ταχύτητα” (velocity-derived boundary), ολοκληρώνοντας τον “όγκο συλλογής” του εκάστοτε σημείου κατασκευής [17].

Ο “όγκος συλλογής” του εκάστοτε σημείου κατασκευής είναι ο όγκος που περικλείεται ανάμεσα στην επιφάνεια “απόστασης διάσπασης” και του “συνόρου εξαγόμενου από

ταχύτητα”. Εάν ο κεραυνός καταλήγει σε αυτόν τον όγκο συλλογής τότε αυτός θα συλλεχθεί από το συλλεκτήριο σύστημα συλλογής .

Η απόσταση που αντιστοιχεί στην ακτίνα διατομής του όγκου συλλογής για ένα συγκεκριμένο κατερχόμενο οχετό ονομάζεται ακτίνα σύλληψης της κατασκευής, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8 για μια κατασκευή ύψους 30 μέτρων. Η ακτίνα σύλληψης (R) αυξάνεται όσο αυξάνεται η φόρτιση του κατερχόμενου οχετού, με αποτέλεσμα η κατασκευή να μπορεί να συλλάβει κεραυνούς σε μεγαλύτερη απόσταση αν ο κεραυνός μεταφέρει περισσότερο φορτίο. Επίσης η ακτίνα σύλληψης είναι αντιστρόφως ανάλογη με το λόγο ταχυτήτων  $K_v = u_d/u_u$  , αν και η ευαισθησία σε αυτήν την παράμετρο είναι ελαττωμένη, σε περίπτωση που η φόρτιση του κατερχόμενου οχετού είναι μικρή. Η ακτίνα σύλληψης θεωρείται η πιο σημαντική εξωτερική παράμετρος της ανάλυσης με τη μέθοδο CVM, διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η προστατευμένη περιοχή μιας κατασκευής.



Σχήμα 2.8: Όγκος συλλογής μιας κατασκευής ύψους 30m για διαφορετικές φορτίσεις κατερχόμενων οχετών και διαφορετικό λόγο ταχυτήτων [17].

Το μέγεθος του όγκου συλλογής εξαρτάται από :

- Τη φόρτιση του κατερχόμενου οχετού ή το μέγιστο ρεύμα του κεραυνού το οποίο σε συνδυασμό με το ύψος της κατασκευής ορίζουν την επιφάνεια απόστασης διάσπασης.
- Την αναλογία της ταχύτητας του κατερχόμενου οχετού προς την ταχύτητα του ανερχόμενου οχετού.
- Τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για τη διάσπαση του αέρα ποικίλει άμεσα σε σχέση με την υγρασία και την πίεση του αέρα.

## 2.5 Μέθοδος Leader Potential Concept (LPCM)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι ο οχετός προεκκένωσης είναι ισοδύναμος με ένα αγώγιμο καλώδιο που εκτείνεται εντός του ηλεκτρικού πεδίου που περιβάλλει ένα φορτισμένο νέφος. Επιπρόσθετα, το συνολικό φορτίο του κεραυνού θεωρείται μηδενικό πριν γίνει η ζεύξη καθοδικού και ανοδικού οχετού προεκκένωσης, δηλαδή πριν αυτός αγγίξει το έδαφος. Το δυναμικό του κεραυνού που ήταν ίσο με  $V$  πριν την επαφή μηδενίζεται μόλις αυτός αγγίξει το έδαφος. Αυτή η μεταβολή του δυναμικού ισοδυναμεί με το να προσθέσουμε ένα σταθερό φορτίο ανά μονάδα μήκους  $q$  κατά μήκος του κεραυνικού καναλιού κατά τη διάρκεια του ανοδικού οχετού σύνδεσης. Το φορτίο αυτό ανά μονάδα μήκους σε ένα κεραυνικό κανάλι με χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους  $C$  υπολογίζεται ως:

$$q = -C \cdot V \quad (2.5.1)$$

Για τον υπολογισμό του δυναμικού ( $V$ ) του κεραυνού από τη σχέση (2.5.1) είναι απαραίτητη η χωρητικότητα ( $C$ ) ανά μονάδα μήκους του κεραυνικού καναλιού. Για έναν κατακόρυφο, λεπτό, μακρύ αγωγό που βρίσκεται κάθετα στο έδαφος (με διάμετρο  $m$  και μήκος  $Z$ ), ο οποίος προσεγγίζει ένα κεραυνικό κανάλι, η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους του υπολογίζεται μέσα από τη σχέση:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{Z}{m}\right)} \quad (2.5.2)$$

Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου του κεραυνικού καναλιού και του φορτίου του βασίζεται στην υπόθεση ότι τα φορτία διανέμονται σε ένα μανδύα κορόνα (με ηλεκτρικό πεδίο  $\leq 3 \text{ MV/m}$ ) και ισούται με:

$$m = (q/3 \cdot 10^6 \pi \epsilon) \quad (2.5.3)$$

Από τις σχέσεις (2.5.1),(2.5.2) και (2.5.3) προκύπτει ότι το δυναμικό του κεραυνού ισούται με :

$$V = \frac{-q}{2\pi\epsilon} \cdot \ln\left(\frac{3 \cdot 10^6 \pi \epsilon Z}{q}\right) \quad (2.5.4)$$

Τελικά η απόσταση πρόσκρουσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D = \frac{V}{750} , \text{ σε μέτρα} \quad (2.5.5)$$

Το δυναμικό του κεραυνού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την σχέση (2.5.4) όπου  $q$  είναι το φορτίο ανά μονάδα μήκους του κεραυνικού καναλιού μετρούμενο σε  $\text{mC/m}$  και  $Z$  είναι η απόσταση βάσης σύννεφου και εδάφους σε μέτρα. Το ύψος  $Z$  μπορεί να υπολογιστεί από μέτρηση, αλλά γενικά χρησιμοποιείται η τιμή  $5000\text{m}$ . Η εκτιμώμενη απόσταση πρόσκρουσης τελικά απλοποιείται ως:

$$D = \left(\frac{q}{41.7 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot \ln((q/41.7 \cdot 10^{-3})(1/2Z)) \quad (2.5.6)$$

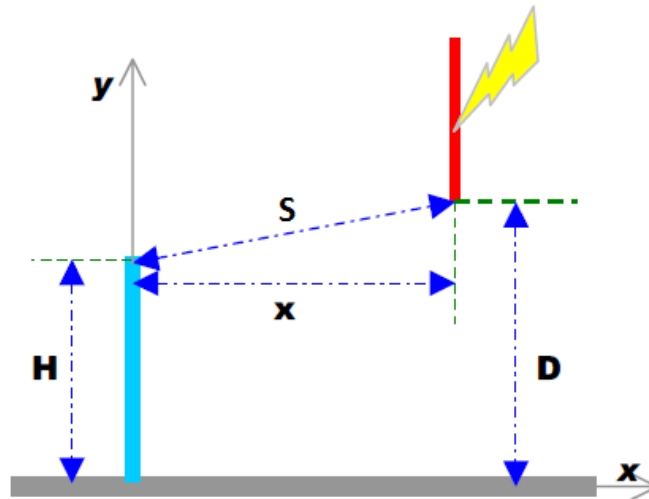
## 2.6 Ελλειπτικό μοντέλο

Το 2007 ο S.Grzybowski και η ομάδα του, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου της Πολιτείας του Μισισσιπιπύ, παρουσίασαν ένα ελλειπτικό μοντέλο για την εκτίμηση της απόστασης πρόσκρουσης και της ακτίνας σύλληψης μιας ράβδου Franklin σε ένα μοντέλο πλοίου [24,28]. Η ζώνη προστασίας προσδιορίζεται από το ρεύμα του κεραυνού, το ύψος του αλεξικέραυνου (ράβδος Franklin) και την πολικότητα του κεραυνού. Οι μετρήσεις τους έγιναν σε υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου.

Η γενική ιδέα αυτού του μοντέλου υποθέτει ότι: η απόσταση πρόσκρουσης προς το έδαφος ( $D$ ), αλλά και η απόσταση πρόσκρουσης προς την κορυφή του αλεξικέραυνου ( $S$ ) όπως απεικονίζονται στο σχήμα 2.9 για θετική είτε αρνητική πολικότητα κεραυνού, δεν έχουν το ίδιο μήκος όπως συμβαίνει στο μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας. Η σχέση μεταξύ των σχέσεων  $S$  και  $D$  είναι καθοριστικής σημασίας[31] για τον προσδιορισμό της ζώνης προστασίας του

αλεξικέρανου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό και πρόβλεψη του τελικού σημείου που πλήττει ένας κεραυνός.

Για τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ  $S$  και  $D$  ο S.Grzybowski και η ομάδα του χρησιμοποίησαν την παρακάτω διάταξη:



Σχήμα 2.9: Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της απόστασης διάσπασης μιας ράβδου Franklin [24]

Για το συγκεκριμένο ύψος  $H$  της ράβδου και της απόστασης  $D$  μεταξύ του άκρου της φορτισμένης ράβδου και του εδάφους, μεταβάλλοντας την απόσταση  $x$  μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων αναπτύχθηκαν σπινθήρες είτε προς τη ράβδο, είτε και προς το έδαφος για το ίδιο επίπεδο κρουστικής τάσης ( $1.2/50\mu\text{s}$ ). Η φορτισμένη ράβδος αντιπροσωπεύει τον κατερχόμενο οχετό, μια μεταλλική πλάκα αντιπροσωπεύει το έδαφος και για αλεξικέραυνο χρησιμοποιείται μια ράβδος Franklin. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχουν τρεις παράγοντες που καθορίζουν την απόσταση διάσπασης: το ύψος της ράβδου  $H$  (σε  $\text{cm}$ ), η απόσταση διάσπασης της φορτισμένης ράβδου από το έδαφος  $D$  (σε  $\text{cm}$ ) και η πολικότητα της κρουστικής τάσης. Οι εξισώσεις που πρόεκυψαν [28] για τον υπολογισμό της απόστασης διάσπασης  $S$  (σε  $\text{cm}$ ), για κεραυνό θετικής πολικότητας (σχέση 2.6.1) και αρνητικής πολικότητας (σχέση 2.6.2), είναι :

$$S = D \cdot \left( 0.8 \cdot e^{-\left(0.125 \cdot H/D\right)} + 0.17 \right) \quad (2.6.1)$$

$$S = D \cdot \left( 1 + 0.24 \cdot e^{-\left(H/D\right)} \right) \quad (2.6.2)$$

Στη σχέση (2.6.2) η απόσταση πρόσκρουσης  $S$  είναι μεγαλύτερη από την απόσταση πρόσκρουσης  $D$  και η απόσταση  $S$  αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης  $D$ . Στη σχέση



(2.6.1) η απόσταση πρόσκρουσης S είναι μικρότερη από την απόσταση πρόσκρουσης D και η απόσταση S αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης D με μικρότερο ρυθμό.

Από τις σχέσεις (2.6.1) και (2.6.2) όπου προσδιορίζεται η απόσταση πρόσκρουσης από τη γειωμένη ράβδο μπορεί να εξαχθεί μια σχέση για την πλευρική απόσταση μεταξύ του κατερχόμενου οχετού και της γειωμένης ράβδου [25]. Αυτή η απόσταση ( $a_o$ ) ορίζει την ακτίνα σύλληψης στο ελλειπτικό μοντέλο και δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$a_o = D \cdot \sqrt{\frac{S^2 - (D-H)^2}{D^2 - (D-H)^2}} \quad (2.6.3)$$

Η απόσταση πρόσκρουσης εξαρτάται και από το ύψος της ράβδου και από το ρεύμα του κεραυνού παρόλο που στις σχέσεις (2.6.1) και (2.6.2) απουσιάζει η παράμετρος του ρεύματος. Γι' αυτό το λόγο οι ερευνητές βρήκαν μια διατύπωση της εξάρτησης της απόστασης πρόσκρουσης από το ρεύμα του κεραυνού, το ύψος του γειωμένου αντικειμένου και την πολικότητα του κεραυνού. Προέκυψαν νέες εξισώσεις [24] οι οποίες περιλαμβάνουν και την εξάρτηση από το ρεύμα, για κεραυνό θετικής πολικότητας (σχέση 2.6.4) και αρνητικής πολικότητας (σχέση 2.6.5):

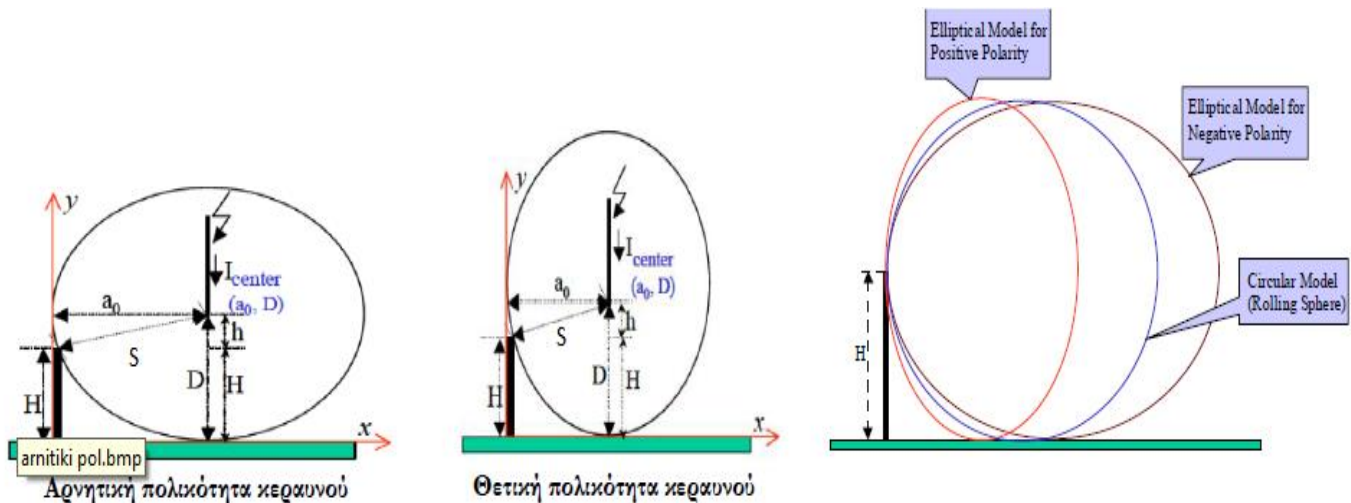
$$S = 9.8959 \cdot (I_p)^{0.7251} + 1.7872 \cdot (H)^{-0.6092} \quad (2.6.4)$$

$$S = 6.0519 \cdot (I_p)^{0.6228} + 0.0027 \cdot (H)^{0.7029} \quad (2.6.5)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι αποστάσεις διάσπασης προς τη ράβδο Franklin και προς το έδαφος είναι διαφορετικές, παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά για θετική και αρνητική πολικότητα του κεραυνού. Με βάση αυτή τη θεώρηση, δημιουργήθηκε ένα ελλειπτικό μοντέλο για την αξιολόγηση της ζώνης προστασίας που δημιουργείται από μία ράβδο Franklin. Το παρακάτω σχήμα 2.10 απεικονίζει το ελλειπτικό μοντέλο για αρνητική και θετική πολικότητα κεραυνού αλλά και μια σύγκρισή τους με το μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας. Από τα σχήματα είναι φανερό γιατί ένας κεραυνός χτυπάει αρκετά αντικείμενα, όταν η ζώνη προστασίας υπολογίζεται με βάση το μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας.

Η ζώνη προστασίας της ράβδου Franklin στο ελλειπτικό μοντέλο καθορίζεται από το χαμηλότερο τμήμα της έλλειψης, το οποίο εφάπτεται στην κορυφή της ράβδου και στο

έδαφος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10, η ζώνη προστασίας είναι μικρότερη για κεραυνό θετικής πολικότητας ενώ είναι μεγαλύτερη για κεραυνό αρνητικής πολικότητας.



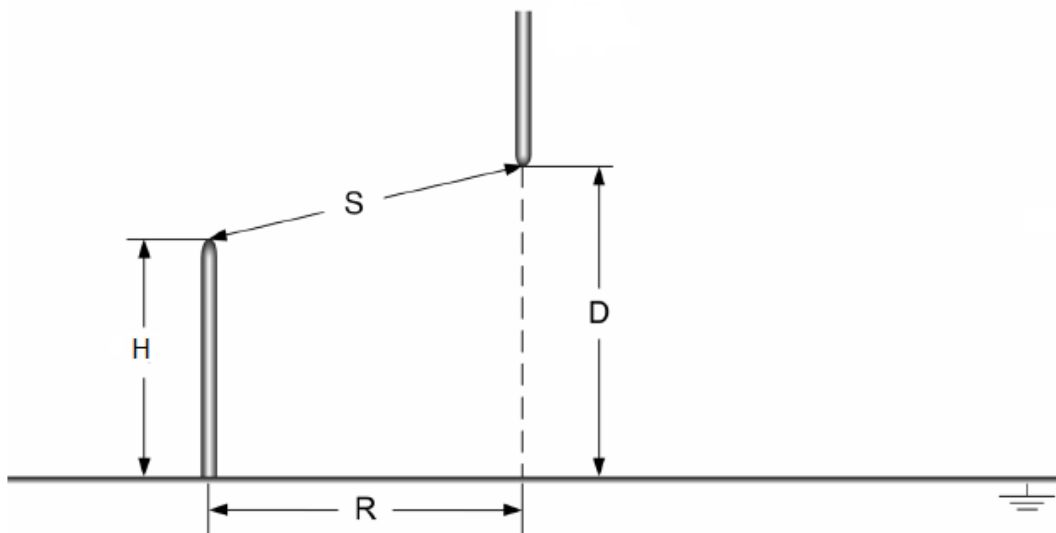
Σχήμα 2.10: Ελλειπτικά μοντέλα με βάση την πολικότητα του κεραυνού και σύγκριση των ζωνών προστασίας [24]

## 2.7 Στατιστικό μοντέλο

Σύμφωνα με το Τσοβίλη[26] ο κεραυνός θεωρείται ένα σύνθετο φαινόμενο το οποίο περιγράφεται πιθανοκρατικά. Έτσι ανέπτυξε ένα στατιστικό μοντέλο για τη σύλληψη του κεραυνού λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση πρόσκρουσης, την ακτίνα σύλληψης, την πολικότητα του κεραυνού, το ύψος του αλεξικέραυνου, το ρεύμα, τα φαινόμενα γειννίασης και την πιθανότητα σύλληψης του κεραυνού [29,30]. Μέσα από το πείραμα αυτό κατάφερε να περιγράψει με μαθηματικές εξισώσεις την απόσταση πρόσκρουσης αλλά και την ακτίνα σύλληψης οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

Αρχικά, μελέτησε τα διάκενα φορτισμένης ράβδου-γειωμένης πλάκας για να βρει με τη μέθοδο των επιπέδων τάσης (η μέθοδος αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην ενότητα 4.2.2.1) την τάση διάσπασης  $U_s$  που αντιστοιχεί σε 97.5% πιθανότητα διάσπασης. Στη συνέχεια οι τάσεις  $U_s$  επιβάλλονταν κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων φορτισμένης ράβδου, μιας μεταλλικής γειωμένης πλάκας και μιας γειωμένης ράβδου όπως απεικονίζεται στο σχ. 2.11. Ακολούθως, εφάρμοσε 20 κρουστικές τάσεις για κάθε πλευρική απόσταση μεταξύ των 2 ράβδων. Ξεκίνησε με 20 κρουστικές τάσεις σε μια απόσταση στην οποία για όλες τις επιβολές της τάσης η ηλεκτρική εκκένωση κατέληγε στη γειωμένη πλάκα και μείωνε κάθε φορά την πλευρική

απόσταση ώστε η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήγει πάντα στην γειωμένη ράβδο. Με αυτό τον τρόπο προέκυψαν καμπύλες πιθανότητας σύλληψης οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Να τονιστεί ότι η διαδικασία εφαρμόστηκε για διαφορετική πολικότητα και διαφορετική απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης ράβδου-γης. Τέλος, για κάθε κατανομή πιθανότητας σύλληψης υπολογίστηκε η μέση τιμή της πλευρικής απόστασης μεταξύ των δύο ράβδων για την οποία η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στη γειωμένη ράβδο αντιστοιχεί σε 50%.



Σχήμα 2.11: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης. H: ύψος γειωμένης ράβδου, D: απόσταση πρόσκρουσης στη γη, S: απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης-γειωμένης ράβδου, R: ακτίνα σύλληψης [26].

Αφού η απόσταση πρόσκρουσης και η ακτίνα σύλληψης ακολουθούν κανονική κατανομή, συμπεραίνεται ότι οι κατανομές τους μπορούν να περιγραφούν από μια μέση τιμή  $S_C$  και  $R_C$  αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων από τις καμπύλες που προέκυψαν και ακολουθούν κανονική κατανομή, ο Τσοβίλης κατάφερε να υπολογίσει τη μέση τιμή της ακτίνας σύλληψης ( $R_C$ ) και την μέση τιμή της απόστασης πρόσκρουσης ( $S_C$ ) για τις οποίες η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στη γειωμένη ράβδο αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα. Οι σχέσεις αυτές φαίνονται παρακάτω:

$$R_C = D \cdot \left[ c_1 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + c_2 \right] \quad (2.7.1)$$

$$S_c = D \cdot \left[ a \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b \right] \quad (2.7.2)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a$ ,  $b$  φαίνονται στον Πίνακα 2.1.

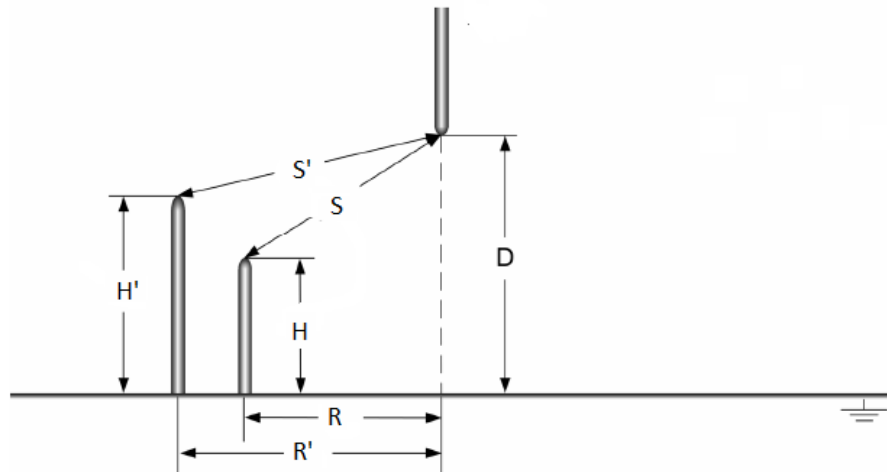
Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
a	-0.032	0.065	$c_1$	0.235	0.272
b	0.90	1.24	$c_2$	0.90	1.24

Πίνακας 2.1: Οι τιμές των συντελεστών  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a$ ,  $b$  των εξισώσεων 2.7.1 και 2.7.2 [26].

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το συγκεκριμένο πείραμα είναι:

- Για δεδομένο ύψος ( $H$ ) της γειωμένης ράβδου η πιθανότητα σύλληψης της ηλεκτρικής εκκένωσης αυξάνεται όταν μειώνεται η πλευρική απόσταση μεταξύ των ράβδων.
- Όταν αυξάνεται το ύψος της γειωμένης ράβδου τότε η ακτίνα σύλληψης αυξάνεται μη γραμμικά.
- Η απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης ράβδου-γειωμένης ράβδου μειώνεται λογαριθμικά με την αύξηση του ύψους της γειωμένης ράβδου.
- Η ακτίνα σύλληψης αυξάνεται λογαριθμικά με το κανονικοποιημένο ύψος της γειωμένης ράβδου  $H/D$ .
- Για δεδομένο λόγο  $H/D$  η ακτίνα σύλληψης είναι μεγαλύτερη υπό αρνητική πολικότητα επιβαλλόμενης τάσης εν συγκρίσει με θετική πολικότητα.
- Η απόσταση της φορτισμένης ράβδου από την πλάκα έχει μικρή επίδραση στην εξάρτηση της κανονικοποιημένης ακτίνας σύλληψης  $R/D$  από το λόγο  $H/D$ , ιδιαίτερα υπό θετική πολικότητα επιβαλλόμενης τάσης.

Πέρα από την πιο πάνω πειραματική διερεύνηση ο Τσοβίλης διερεύνησε τα φαινόμενα γειννίασης κατά τη σύλληψη του κεραυνού. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποίησε την πιο κάτω πειραματική διάταξη 4 ηλεκτροδίων όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12:



Σχήμα 2.12: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης για τη διερεύνηση φαινομένων γειννίαςσης [26].

Η κοντή ράβδος τοποθετήθηκε στην κρίσιμη ακτίνα σύλληψης η οποία και βρέθηκε στο προηγούμενο στάδιο, ενώ η ψηλή ράβδος τοποθετήθηκε σε μια πλευρική απόσταση στην οποία όλες οι επιβολές τάσεων διάσπασης ( $U_s$ ) κατέληγαν στην κοντή ράβδο είτε στην πλάκα. Επιβάλλονταν 40 τάσεις για κάθε πλευρική απόσταση ψηλής ράβδου-φορτισμένης ράβδου. Η πλευρική απόσταση μειωνόταν μέχρις ότου όλες οι επιβολές τάσεων κατέληγαν στην ψηλή ράβδο. Με αυτή τη διαδικασία εξήχθησαν καμπύλες πιθανότητας σύλληψης για τη ψηλή ράβδο οι οποίες ακολουθούσαν κανονική κατανομή.

Η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην ψηλή ράβδο είναι  $p$  (πιθανότητα σύλληψης) ενώ η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στην πλάκα ή στην κοντή ράβδο είναι  $0.5(1-p)$  (πιθανότητα αστοχίας). Έτσι η πλευρική απόσταση της ψηλής ράβδου από τη φορτισμένη ράβδο που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης ίση με 33%, ονομάζεται κρίσιμη ακτίνα σύλληψης ( $R_{cn}$ ) για την περίπτωση 2 γειωμένων ράβδων. Λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις γειννίαςσης κατά τη σύλληψη της εκκένωσης η κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης ( $S_{cn}$ ) και η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης ( $R_{cn}$ ) της ψηλής ράβδου παρουσία της κοντύτερης ράβδου τροποποιούνται κατά ένα συντελεστή  $\lambda$  σε σχέση με τις προηγούμενες σχέσεις (2.7.1), (2.7.2):

$$R_{cn} = \lambda \cdot R_C \quad (2.7.3)$$

$$S_{cn} = \lambda \cdot S_C \quad (2.7.4)$$

Ο συντελεστής λ σύμφωνα με τον Τσοβίλη παίρνει τις πιο κάτω τιμές:

	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
Απόσταση πρόσκρουσης	0.98	$1 - 0.03 \cdot \left(\frac{H'}{D}\right)$
Ακτίνα σύλληψης	$0.96 + 0.03 \cdot \left(\frac{H'}{D}\right)$	$1 - 0.03 \cdot \left(\frac{H'}{D}\right)$

Πίνακας 2.2: Οι τιμές του συντελεστή λ που προέκυψαν από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων [26].

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το συγκεκριμένο πείραμα είναι:

- Η παρουσία γεινιάζουσας ράβδου επηρεάζει την κατανομή πιθανότητας σύλληψης της ψηλής ράβδου καθώς η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης μειώνεται κατά μια ποσότητα  $\Delta R_C$ .
- Η ακτίνα σύλληψης και η απόσταση πρόσκρουσης μεταβάλλονται λογαριθμικά με την αύξηση του ύψους της ψηλής ράβδου και είναι μεγαλύτερες υπό αρνητική πολικότητα σε σχέση με αυτές υπό θετική πολικότητα επιβαλλόμενης τάσης.

Να τονιστεί ότι αφού επεξεργαστήκαμε τα αποτελέσματα του Τσοβίλη εξάγαμε σχέσεις για τη μέση τιμή της ακτίνας σύλληψης ( $R_C$ ) και τη μέση τιμή της απόστασης πρόσκρουσης ( $S_C$ ) για τις οποίες η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στη γειωμένη ράβδο αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα σε περίπτωση γεινιάσης όπως και συμβαίνει στο μοντέλο πλοίου μας. Η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην προς μελέτη κατασκευή του μοντέλου είναι  $p$  (πιθανότητα σύλληψης), ενώ η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει σε μια γεινιάζουσα χαμηλότερη κατασκευή ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του πλοίου ή στην γειωμένη πλάκα αντιστοιχεί σε  $1-p$  (πιθανότητα αστοχίας). Οι σχέσεις που εξήχθησαν φαίνονται παρακάτω:

$$R_C = D \cdot \left[ a_1 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + a_2 \right] \quad (2.7.5)$$

$$S_C = D \cdot \left[ b_1 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b_2 \right] \quad (2.7.6)$$

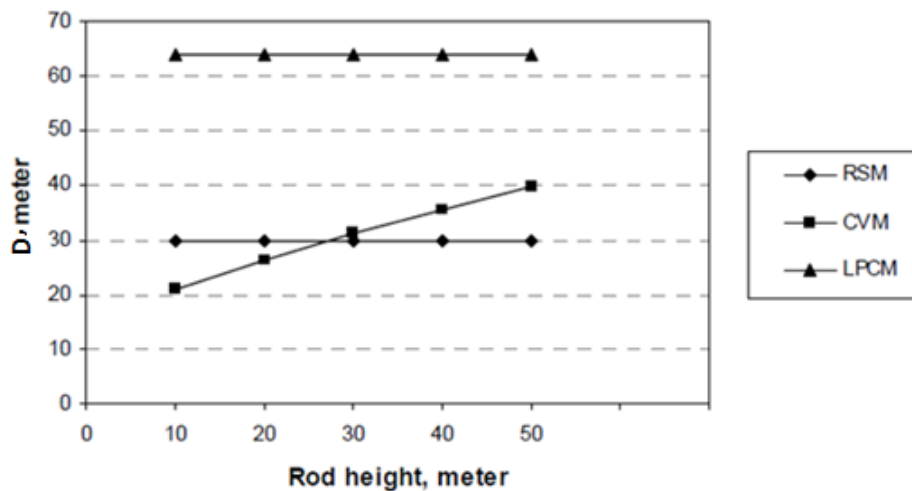
Οι τιμές των συντελεστών  $a_1, a_2, b_1, b_2$  φαίνονται στον Πίνακα 2.3:

Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
$b_1$	-0.032	0.0266	$a_1$	0.2416	0.2516
$b_2$	0.8873	1.1486	$a_2$	0.8958	1.1439

Πίνακας 2.3: Οι τιμές των συντελεστών  $a_1, a_2, b_1, b_2$  των εξισώσεων 2.7.5 και 2.7.6.

## 2.8 Σύγκριση των μεθόδων αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία

Το σχήμα 2.13 δείχνει την απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους RCM, CVM και LPCM σε συνάρτηση με το ύψος του αλεξικέραυνου (H) στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το ύψος του καταρτιού πλοίου. Το ρεύμα κεραυνού επιλέχθηκε στα 5.4 kA και αντιστοιχεί σε επίπεδο προστασίας II και έχει τιμή 0.38mC/m για το φορτίο ανά μονάδα μήκους. Η απόσταση βάσης συννέφου και εδάφους ισούται με 5000m. Επίσης το ύψος H επιλέχθηκε μεταξύ 10 και 50m αφού η πλειοψηφία των πολεμικών και εμπορικών πλοίων έχουν ύψη που ανήκουν σε αυτό το εύρος τιμών [18].

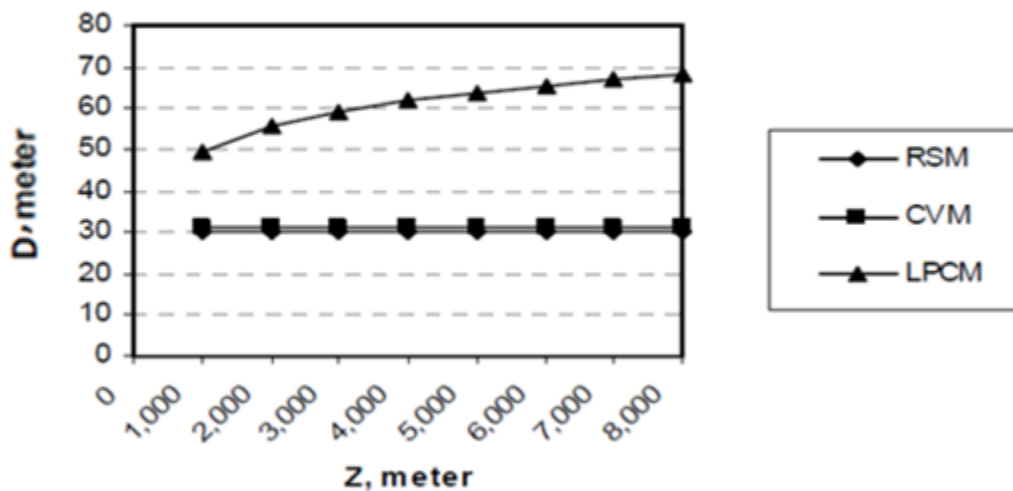


Σχήμα 2.13: Η απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους RCM, CVM και LPCM συναρτήσει του ύψους του αλεξικέραυνου για  $Z=5000m$  και  $I_p = 5.4 kA$  [18]

Από το πιο πάνω σχήμα είναι σαφές ότι η μέθοδος LPCM ενισχύει σημαντικά την απόσταση πρόσκρουσης έναντι των δύο άλλων μεθόδων (περίπου 2.5 φορές περισσότερο).

Επιπρόσθετα η απόσταση πρόσκρουσης της μέθοδου RSM είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται αφού το ρεύμα του κεραυνού είναι σταθερό στα 5.4kA. Αυτό δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (2.4.1). Το ίδιο ισχύει και για την απόσταση διάσπασης της μεθόδου LPCM έχοντας υπόψη τη σχέση (2.5.6) και ότι το φορτίο ( $q$ ) και το μήκος του κεραυνικού καναλιού ( $Z$ ) είναι σταθερά χωρίς κάποια μεταβολή.

Στο σχήμα 2.14 απεικονίζεται και για τις τρεις μεθόδους η απόσταση πρόσκρουσης ( $D$ ) συναρτήσει του μήκους του κεραυνικού καναλιού ( $Z$ ). Το ύψος του αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου του ύψους του καταρτιού είναι 30m και το ρεύμα κεραυνού είναι 5.4kA. Από το πιο κάτω σχήμα φαίνεται ότι η απόσταση πρόσκρουσης ποικίλει όταν μεταβάλλεται το ύψος  $Z$  μόνο για τη μέθοδο LPCM. Η παράμετρος αυτή δεν περιέχεται στις άλλες δύο μεθόδους.

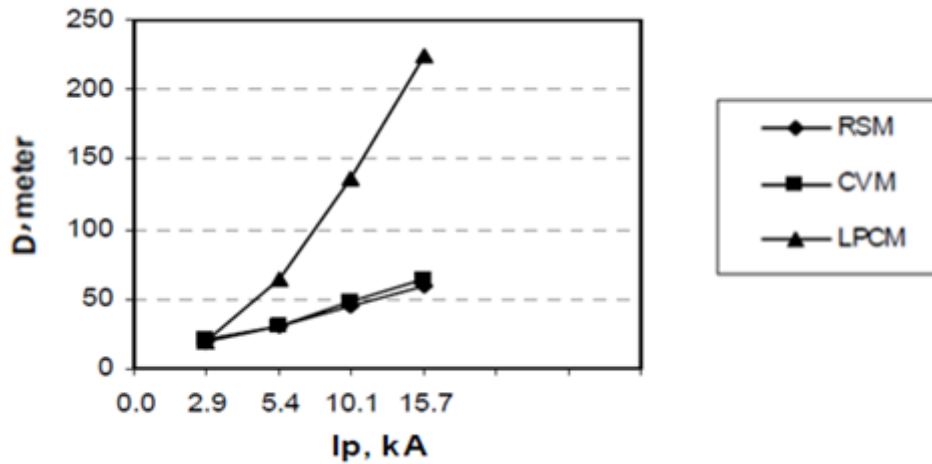


Σχήμα 2.14: Απόσταση πρόσκρουσης ( $D$ ) συναρτήσει του μήκους του κεραυνικού καναλιού ( $Z$ ) για  $H=30m$  και  $I_p = 5.4 kA$  [18]

Το σχήμα 2.15 δείχνει τη σχέση μεταξύ της απόστασης πρόσκρουσης και του ρεύματος κεραυνού για τις τρεις αναφερθείσες μεθόδους για ύψος του αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου και του ύψους του καταρτιού  $H=30m$  και  $Z=5000m$ . Οι τιμές που



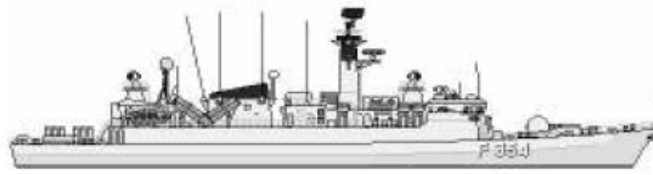
επιλέχθηκαν για το ρεύμα κεραυνού είναι αυτές που ανταποκρίνονται στα επίπεδα προστασίας I, II, III και IV με αντίστοιχες τιμές 2.9, 5.4, 10.1 και 15.7kA.



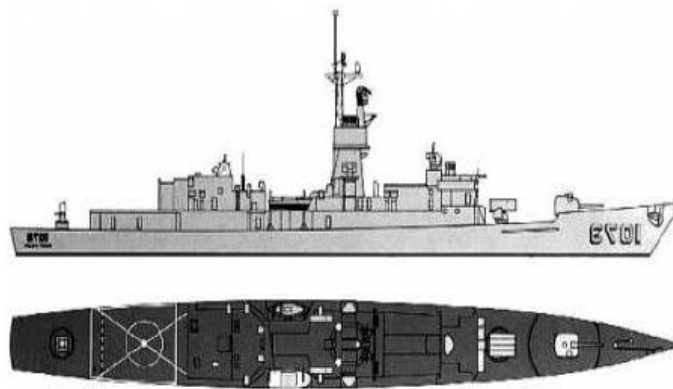
Σχήμα 2.15: Απόσταση πρόσκρουσης (D) συναρτήσει του ρεύματος κεραυνού για H=30m και Z=5000m [18].

Από τα πιο πάνω σχήματα (2.13-15) φαίνεται ότι σχεδόν για όλα τα επίπεδα προστασίας η μέθοδος LPCM παρουσιάζει μια εκτεταμένη αύξηση της απόστασης πρόσκρουσης σε σχέση με τις μεθόδους RCM και CVM. Με την αύξηση αυτή επιτυγχάνεται μειωμένος αριθμός χρήσης αλεξικέραυνων για την ίδια συγκεκριμένη περιοχή. Αυτό πρέπει να δημιουργήσει προβληματισμούς σχετικά με το κόστος για την επίτευξη μιας αποτελεσματικής προστασίας του πλοίου από κεραυνικά πλήγματα [18].

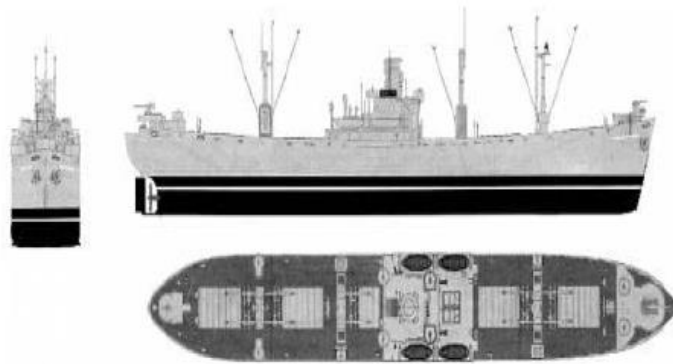
Πιο κάτω ακολουθούν πέντε διαφορετικά είδη πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν γραφικές παραστάσεις οι οποίες περιέχουν δεδομένα για την απόσταση πρόσκρουσης (D), την ακτίνα σύλληψης (R) και τον αριθμό των αλεξικέραυνων που πρέπει να είναι εξοπλισμένα πέντε διαφορετικά είδη πλοίων:



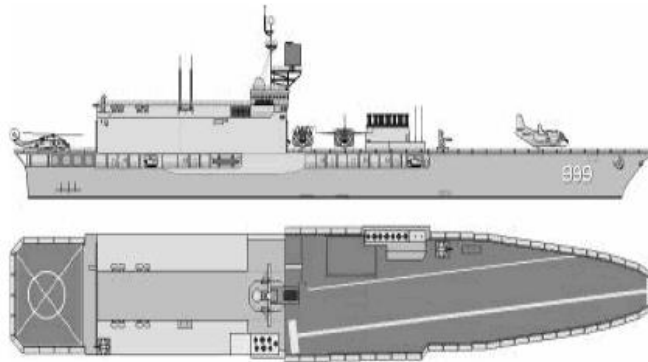
Σχήμα 2.16: Μεσαίο Πολεμικό Πλοίο [18]



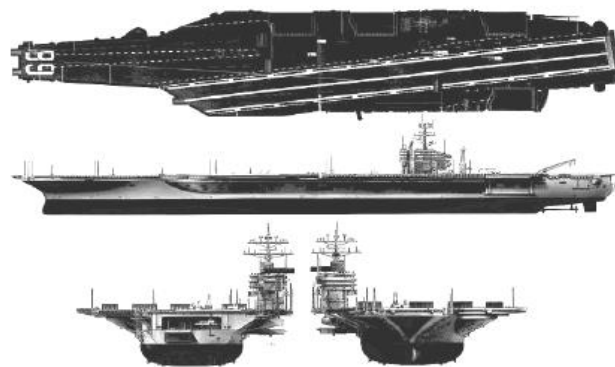
Σχήμα 2.17: Φρεγάτα [18]



Σχήμα 2.18: Εμπορικό πλοίο [18]



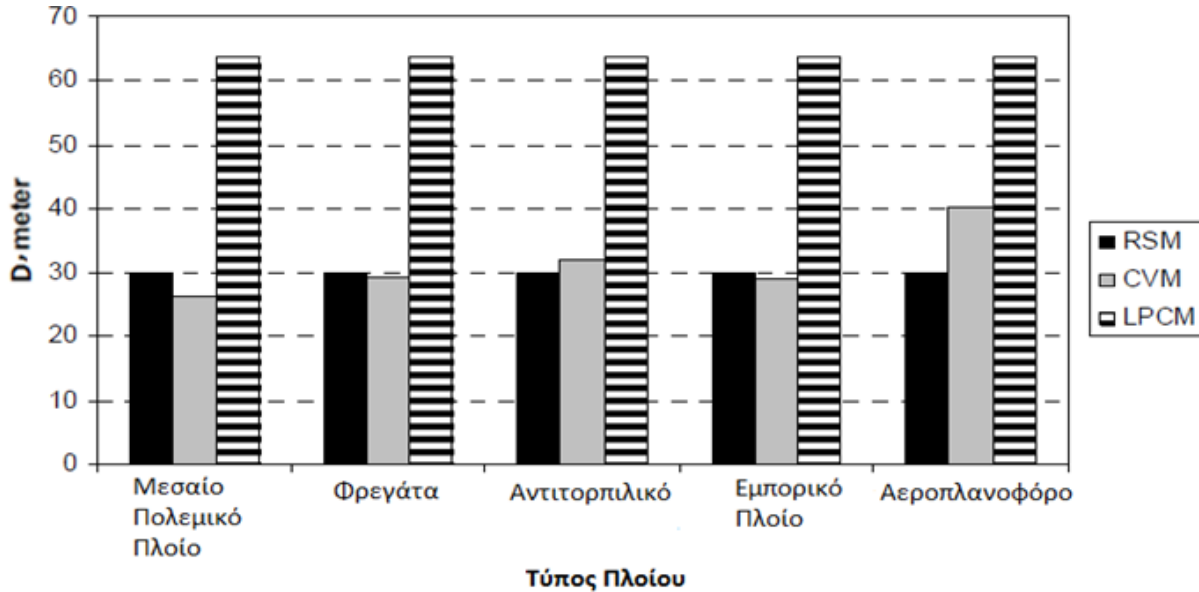
Σχήμα 2.19: Αντιτορπλικό [18]



Σχήμα 2.20: Αεροπλανοφόρο [18]

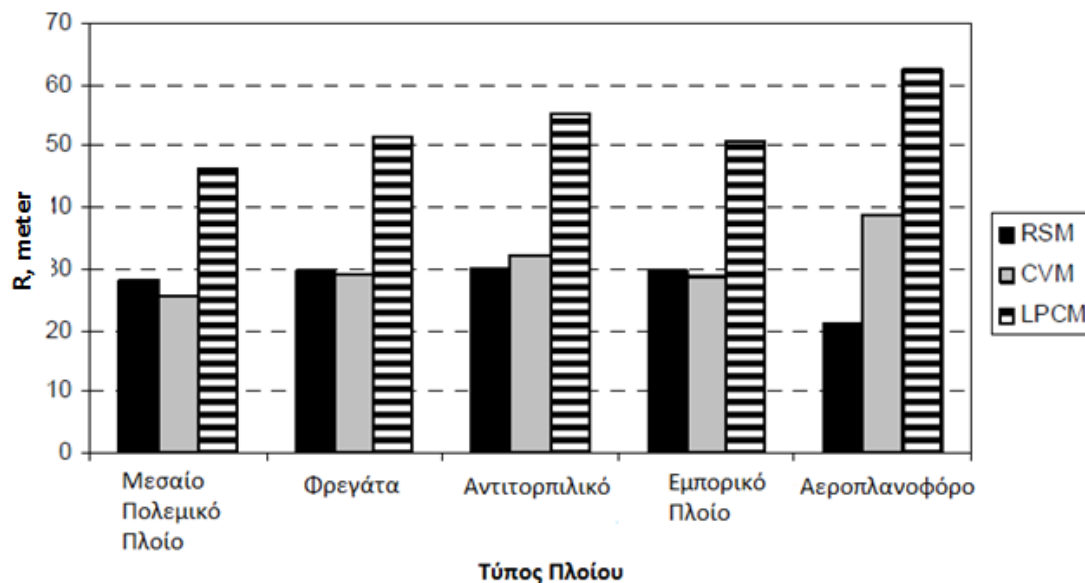
Το σχήμα 2.21 παρουσιάζει την απόσταση πρόσκρουσης ξεχωριστά για το κάθε είδος πλοίου σε κάθε μια από τις τρεις μεθόδους προστασίας. Οι τιμές που αντιστοιχούν στην απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους CVM και RSM είναι σχεδόν ίσες εκτός στην περίπτωση του αεροπλανοφόρου, διότι η απόσταση πρόσκρουσης στη μέθοδο CVM εξαρτάται και από το ύψος του καταρτιού και το αεροπλανοφόρο έχει το μεγαλύτερο ύψος συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα πλοία. Επιπρόσθετα, η απόσταση πρόσκρουσης της μεθόδου LPCM για όλα τα πλοία που μελετήθηκαν είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις δύο άλλες μεθόδους. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του αεροπλανοφόρου. Η διαφορά είναι περίπου 20-30 μέτρα για κάθε είδος πλοίου, η οποία είναι σημαντική αν αναλογιστεί κανείς το μήκος των πλοίων. Οι μέγιστες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των μεθόδων RSM και CVM για

σχεδόν όλους τους τύπους πλοίων βρίσκονται μόνο στο  $\pm 10\%$ , ενώ τα αποτελέσματα της μεθόδου LPCM έχουν διαφορές που κυμαίνονται μεταξύ  $\pm 60\%$  και  $\pm 140\%$  σε σύγκριση τόσο με την RSM όσο και με τη CVM.



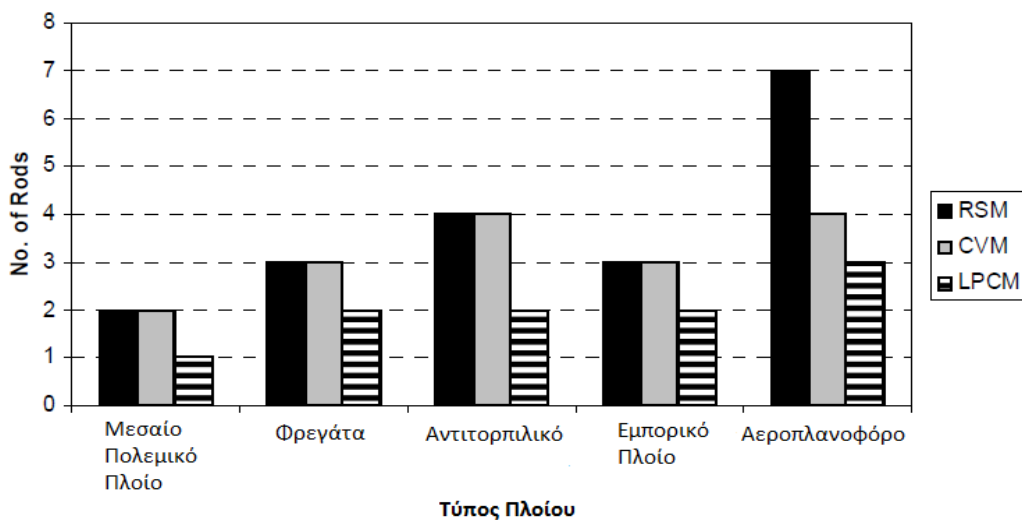
Σχήμα 2.21: Απόσταση πρόσκρουσης για κάθε είδος πλοίου.  $I_p=5.4kA$  και  $Z=5000m$  [18]

Το σχήμα 2.22 απεικονίζει τα αποτελέσματα που πάρθηκαν για την ακτίνα σύλληψης για κάθε τύπο πλοίου και για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους προστασίας. Και σε αυτήν την περίπτωση οι τιμές της ακτίνας σύλληψης που λαμβάνονται από τις μεθόδους CVM και RSM είναι σχεδόν ίδιες, ενώ διαφέρουν σημαντικά από την μέθοδο LPCM. Οι μέγιστες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων από RSM και CVM για όλους σχεδόν τους τύπους πλοίων είναι μόνο  $\pm 10\%$  ενώ τα αποτελέσματα από LPCM έχουν διαφορές που κυμαίνονται μεταξύ  $\pm 65\%$  και  $\pm 200\%$  σε σύγκριση τόσο με RSM και CVM.



Σχήμα 2.22: Ακτίνα σύλληψης για κάθε είδος πλοίου.  $I_p=5.4kA$  και  $Z=5000m$  [18].

Τέλος, το σχήμα 2.23 δείχνει τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για τον αριθμό των αλεξικέραυνων για τις τρεις μεθόδους για κάθε τύπο πλοίου. Ο αριθμός για κάθε ένα από τα σκάφη είναι σχεδόν ίδιος εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος RCM είτε η CVM, ενώ για την LPCM, ο αριθμός αλεξικέραυνων αντιστοιχεί περίπου στο μισό συγκριτικά με τις δύο άλλες μεθόδους. Κατά συνέπεια το κόστος της μεθόδου LPCM είναι μειωμένο σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους.



Σχήμα 2.23: Αριθμός αλεξικέραυνων για κάθε είδος πλοίου.  $I_p=5.4kA$  και  $Z=5000m$  [18].

## **Κεφάλαιο 3: Κεραυνικό Πλήγμα**

### **3.1 Διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία**

Το επερχόμενο κεραυνικό χτύπημα ξεκινάει όταν μια στήλη φορτίου πλησιάζει σε μια απόσταση μερικών δεκάδων μέτρων από το έδαφος που ονομάζεται οχετός προεκκένωσης. Σε αυτό το σημείο ρεύμα ξεκινά να ρέει προς τον οχετό προεκκένωσης, αλλά και προς το νερό. Το ρεύμα αυτό ρέει είτε από την ηλεκτρική αγωγιμότητα μέσα από τους αγωγούς είτε μέσα από φορτισμένους ανοδικούς οχετούς που ακολουθούν τον ιονισμό του αέρα και του νερού. Τελικά ένας από τους ανοδικούς οχετούς καταφέρνει να συνδεθεί με τον οχετό προεκκένωσης όπου και πραγματοποιείται η φυσική σύνδεση του κεραυνού με το πλοίο. Σε αυτό το στάδιο το νέφος είναι αποτελεσματικά βραχυκυκλωμένο με το έδαφος μέσω ενός συνεχούς ιονισμένου καναλιού και το μέγιστο ρεύμα που ρέει έχει εύρος μερικών δεκάδων kA κατά τη διάρκεια του οχετού επιστροφής. Αυτό το ρεύμα εξασθενεί σε μερικές δεκάδες μs, αλλά μπορεί να ακολουθείται από ένα συνεχές ρεύμα μερικών εκατοντάδων A για μερικές εκατοντάδες ms. Αν και το ρεύμα αυτό είναι πολύ χαμηλότερης έντασης δύναται να προκαλέσει θερμικές επιπτώσεις στο πλοίο.

Όταν ένα πλοίο πλήττεται από ένα κεραυνό οι σημαντικότερες διεργασίες που ακολουθούν αυτό το συμβάν είναι:

- Σύνδεση κεραυνού-τερματικού αέρα.
- Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο.
- Διάχυση φορτίου στο νερό.
- Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου.

#### **3.1.1 Σύνδεση κεραυνού-τερματικού αέρα**

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία αποδεδειγμένη επιστημονική μέθοδος για να αποτρέψει το κεραυνικό χτύπημα σε πλοία, το βασικό πρόβλημα παρουσιάζεται στην εφαρμογή μέτρων προστασίας, αφού χτυπηθεί ένα πλοίο. Η γεωμετρία των αγωγών που βρίσκονται στην κορυφή του πλοίου καθώς και η θέση του καθοδικού οχετού προεκκένωσης, καθορίζουν το σημείο όπου το κεραυνικό κανάλι πραγματοποιεί τη σύνδεσή του με το πλοίο.

Για παράδειγμα, εάν ο σχετός προεκκένωσης βρίσκεται στο πίσω μέρος του πλοίου είναι πολύ πιθανό να χτυπηθούν οι αγωγοί που βρίσκονται στην πρύμνη. Για αυτό το λόγο η μέθοδος του κώνου προστασίας είναι προβληματική για ένα πλοίο. Αγωγοί και πλήρωμα πλοίου που βρίσκονται έξω από την περιοχή προστασίας είναι δυνατό να προκαλέσουν ανοδικούς οχετούς. Ως εκ τούτου, η μεγάλη ανησυχία σχετικά με τη σύνδεση κεραυνού-πλοίου είναι η εξασφάλιση ότι ο κεραυνός θα καταλήξει σε αλεξικέραυνα ή σε άλλους τερματικούς αγωγούς και όχι στο πλήρωμα ή σε κάποιο ευάλωτο ηλεκτρικό εξοπλισμό πλοίου.

### **3.1.2 Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο**

Αφού ο κεραυνός συνδεθεί με το αλεξικέραυνο οι αγωγοί εσωτερικών κυκλωμάτων που συνδέουν τις ηλεκτρικές συσκευές του πλοίου άγουν ρεύμα, ακόμα και αυτοί που δεν συνδέονται άμεσα με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Έτσι το φορτίο που συσσωρεύεται στους αγωγούς μπορεί να προκαλέσει σπινθήρες οι οποίοι με τη σειρά τους να δημιουργήσουν νέα αγωγή κανάλια δεδομένου ότι το φορτίο του κεραυνού προσπαθεί να εκφορτισθεί. Οι απλές βασικές αρχές κυκλωμάτων δηλαδή ότι το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή με τη μικρότερη αντίσταση έχουν περιορισμένη χρησιμοποίηση κατά τη διάρκεια των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων λόγω μη γραμμικής συμπεριφοράς της υψηλής τάσης και ρεύματος. Μερικές από τις συνέπειες της ροής του κεραυνικού ρεύματος είναι η καταστροφή αισθητήριων συστημάτων, η ανατίναξη μετρητών ταχύτητας και η εξάχνωση κεραιών που βρίσκονται στη κορυφή του καταρτιού των πλοίων. Αποτέλεσμα το πλοίο να μένει ακινητοποιημένο και χωρίς μέσα επικοινωνίας. Για αυτό το λόγο ο ρόλος των αγωγών προστασίας με φορά προς το νερό, δηλαδή αυτών που συνδέουν τα αλεξικέραυνα με τα ηλεκτρόδια γείωσης ώστε να οδηγηθεί το κεραυνικό ρεύμα στο νερό, είναι να εμποδίζουν τις παράπλευρες εκκενώσεις, να προστατεύουν τα αισθητήρια συστήματα και να περιορίζουν στο ελάχιστο την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των ηλεκτρονικών συστημάτων.

### **3.1.3 Διάχυση φορτίου στο νερό**

Το fiberglass είναι τόσο καλός μονωτής, που χρησιμοποιείται για την κατασκευή μονωτήρων στις εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων. Παρόλα αυτά, η τάση του κεραυνού είναι κάτι παραπάνω από αρκετή για να προκαλέσει διάσπαση στο κουφάρι ενός μη μεταλλικού πλοίου που είναι κατασκευασμένο από fiberglass, αν δεν δοθεί στο κεραυνικό ρεύμα μια

εναλλακτική διέξοδος. Κάθε διείσδυση του ρεύματος αυτού αφήνει μια απανθρακωμένη τρύπα και πολύ περισσότερες εσωτερικές ζημιές. Σκοπός των ηλεκτροδίων γείωσης είναι να δημιουργήσουν γέφυρα μέσα στο νερό, ώστε να περιορισθούν οι βλάβες στο κουφάρι του πλοίου. Στο μέρος του πλοίου που βρίσκεται μέσα στο νερό τοποθετείται μια πλάκα γείωσης. Από μόνη της αυτή η πλάκα είναι ανεπαρκής ώστε να αποτρέψει παράπλευρες εκκενώσεις, και είναι αναγκαίο να υπάρχουν πολλαπλοί διασυνδεδεμένοι αγωγοί. Αυτό όμως προκαλεί μια σειρά νέων προβλημάτων:

- Επιταχύνεται η διαδικασία γαλβανικής διάβρωσης.
- Γίνεται ηλεκτρολυτική διάβρωση στις μαρίνες με τη διαρροή ρευμάτων.
- Η τοποθέτηση πολλαπλών διασυνδέσεων στο κουφάρι του πλοίου αυξάνει την πιθανότητα εισροής νερού στο πλοίο.

Αισθητήρια συστήματα, μεταλλικά εξαρτήματα και όλα τα βυθισμένα μεταλλικά αντικείμενα, όπως εξωλέμβιες, μπορούν ακούσια να λειτουργήσουν σαν γείωση του κεραυνού. Συνοπτικά, το φορτίο συσσωρεύεται σε όλους τους αγωγούς του πλοίου ακόμα και όταν το ρεύμα ρέει στο νερό. Η πυκνότητα φορτίου είναι μεγαλύτερη κοντά στο νερό και σε αιχμηρές γωνίες και άκρες αγωγών απ' όπου είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν σπινθήρες. Έτσι, αιχμηρές γωνίες είναι ιδιαίτερα επιθυμητές στην εξωτερική πλευρά των ηλεκτροδίων γείωσης. Όπως όταν αρχίζει η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι και όταν αναπτύσσονται σπινθήρες, η αντίσταση γείωσης μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η τάση ολόκληρου του συστήματος προστασίας. Συνοπτικά, το κύριο πρόβλημα όσο αφορά την διάχυση φορτίου μέσα στο νερό είναι το πώς θα εφοδιαστεί το σύστημα με τον απαραίτητο αριθμό αλλά και την απαραίτητη κατανομή ηλεκτροδίων γείωσης ώστε να μειωθούν οι παράπλευρες εκκενώσεις, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την διαβρωτική επίδραση των πολλαπλών βυθισμένων αγωγών που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους.



### 3.1.4 Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου

Ενώ οι αιχμηρές γωνίες έχουν ευεργετικά αποτελέσματα στα ηλεκτρόδια γείωσης, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο για τα αγώγιμα εξαρτήματα που βρίσκονται πάνω στο πλοίο και είναι ανεπιθύμητο να λειτουργούν ως ηλεκτρόδια γείωσης. Κάθε σπινθήρας που σχηματίζεται από αυτά, δρα ως παράπλευρη εκκένωση, που μπορεί να τραυματίσει το πλήρωμα, να ανοίξει τρύπα στο κουφάρι του πλοίου και να καταστρέψει τα ηλεκτρονικά συστήματα. Ανεξέλεγκτες παράπλευρες εκκενώσεις πρέπει να αποφεύγονται. Από την άλλη μεριά, η θέση πάνω στο πλοίο ή και το σχήμα κάποιων εξαρτημάτων είναι πολύ πιθανό να μην μπορεί να αλλάξει. Για παράδειγμα, παρατηρείται πολύ συχνά μια παράπλευρη εκκένωση ανάμεσα στην αλυσίδα της άγκυρας και το νερό όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.1: Εκτεταμένες βλάβες στο κουφάρι πλοίου λόγω ανάπτυξης παράπλευρων εκκενώσεων μεταξύ της αλυσίδας της άγκυρας και του νερού [20].

## 3.2 Επιπτώσεις πρόσπτωσης κεραυνού σε πλοία

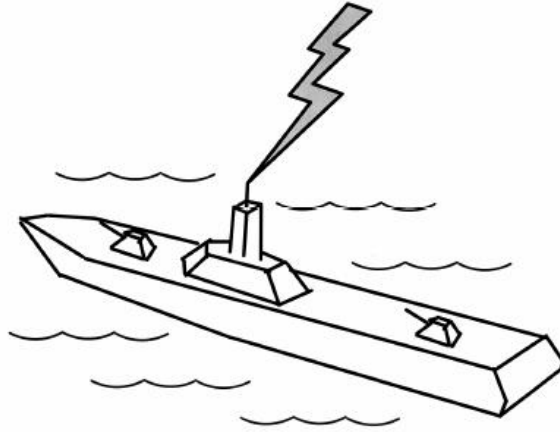
### 3.2.1 Βλάβες στα ηλεκτρικά συστήματα

Το ηλεκτρικό σύστημα των μεταλλικών πλοίων είναι παρόμοιο σε μεγάλο βαθμό με το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Παρόλα αυτά, η σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος το καθιστά πιο επιρρεπές σε παροδικές διακυμάνσεις τάσεως αφού διαδραματίζει σημαντικό ρόλο η συμπαγής κατασκευή του πλοίου

και η περιορισμένη σύνθετη αντίστασή του. Παρακάτω θα αναλυθούν οι συνέπειες των υπερτάσεων στο ηλεκτρικό σύστημα πλοίων που προξενεί ένα κεραυνικό χτύπημα.

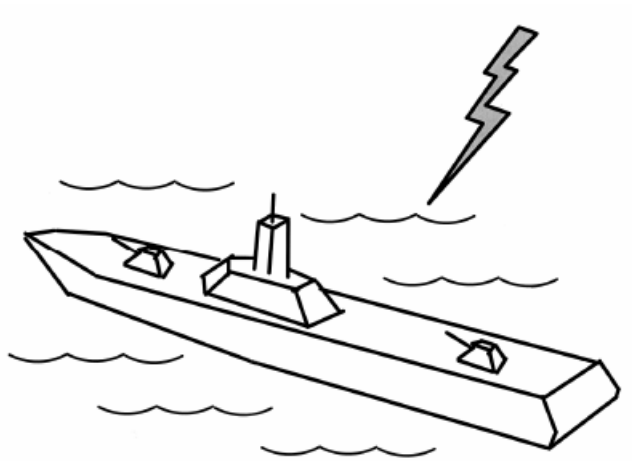
Ο κεραυνός είναι ένα αναγνωρίσιμο φυσικό φαινόμενο στο οποίο οφείλονται συχνά ηλεκτρικές υπερτάσεις σε ηλεκτρικά συστήματα πλοίων. Παρόλο που η συχνότητα εμφάνισης υπερτάσεων που οφείλεται σε κεραυνικά πλήγματα είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις διακοπτικές υπερτάσεις, οι συνέπειες αυτών χαρακτηρίζονται καταστροφικές για τα ηλεκτρικά συστήματα. Κεραυνικά χτυπήματα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τα ηλεκτρικά συστήματα ενός πλοίου διακρίνονται σε άμεσα κεραυνικά χτυπήματα, σε κεραυνικά χτυπήματα κοντά στην επιφάνεια που περιβάλλει τα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου και σε μακρινά κεραυνικά χτυπήματα τα οποία όμως είναι δυνατόν να προκαλέσουν ηλεκτρικές υπερτάσεις σε ηλεκτρικά συστήματα. Η κλίμακα των βλαβών στα ηλεκτρονικά κατανέμεται ανάλογα με το αν κανένα, μερικά ή όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα του σκάφους καθίστανται μη λειτουργήσιμα σαν αποτέλεσμα του κεραυνικού πλήγματος. Τέτοιου είδους συστήματα είναι δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, ράδιο VHF, ράδιο μετεωρολογικής ενημέρωσης, συστήματα μέτρησης ταχύτητας, συστήματα μέτρησης ταχύτητας αέρα κ.α.

Στην περίπτωση ενός άμεσου κεραυνικού χτυπήματος (σχήμα 3.2) οι υπερτάσεις που ακολουθούν είναι οι πιο σοβαρές με επακόλουθο την υψηλή καταπόνηση των προστατευτικών διατάξεων υπέρτασης που αλληλεπιδρούν με το γεγονός του κεραυνικού πλήγματος. Το εν λόγω επίπεδο καταπόνησης είναι πολύ πιθανόν να καταστρέψει οποιοδήποτε ηλεκτρικό είτε ηλεκτρονικό εξοπλισμό ο οποίος είναι απροστάτευτος. Επιπρόσθετα, το άμεσο κεραυνικό χτύπημα σε πλοία μπορεί να προκαλέσει θερμική καταπόνηση στην καλωδίωση του ηλεκτρικού συστήματος. Η θερμική αυτή καταπόνηση μπορεί με τη σειρά της να δημιουργήσει μόνιμη ζημιά στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου. Πέρα από τις καταστροφικές συνέπειες στα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου η άμεση κεραυνική πρόσπτωση δύναται να επηρεάσει τα συστήματα ελέγχου και τα συστήματα επικοινωνίας του πλοίου.



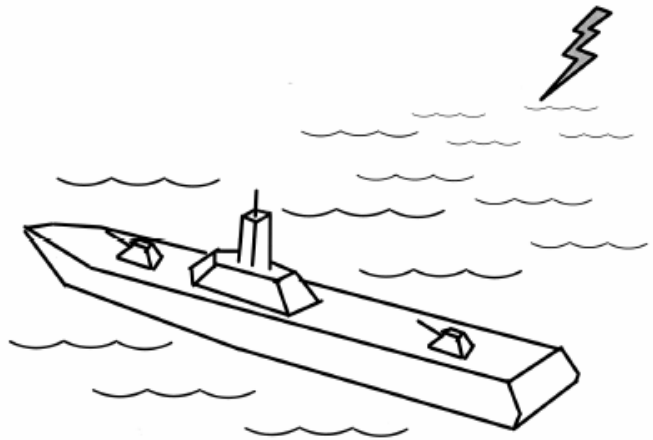
Σχήμα 3.2: Άμεσο κεραυνικό χτύπημα [21].

Στην περίπτωση που το κεραυνικό χτύπημα δεν είναι άμεσο αλλά προσπίπτει σε μια κοντινή απόσταση από το πλοίο και το ηλεκτρικό σύστημα αυτού όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3, τότε παρουσιάζονται φαινόμενα επαγωγικής και χωρητικής σύζευξης. Η απειλή για το ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου είναι σχεδόν η ίδια με αυτή του άμεσου κεραυνικού χτυπήματος με τη διαφορά ότι μόνο ένα μέρος του κεραυνικού ρεύματος εμπλέκεται. Έτσι οι συσκευές προστασίας από υπερτάσεις που είναι εγκατεστημένες στο πλοίο αναμένεται να εκτεθούν σε μια μέτρια καταπόνηση.



Σχήμα 3.3: Κεραυνικό χτύπημα σε κοντινή απόσταση από το πλοίο [21].

Κατά τη διάρκεια ενός μακρινού κεραυνικού χτυπήματος από το πλοίο όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4 η απειλή για επαγόμενες υπερτάσεις είναι ακόμη μικρότερη συγκριτικά με το κοντινό ή άμεσο κεραυνικό χτύπημα αφού το κεραυνικό κανάλι βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τα ηλεκτρικά κυκλώματα του πλοίου. Οι συσκευές προστασίας από υπερτάσεις αναμένεται να υποβληθούν σε μια ελάχιστη καταπόνηση κατά τη διάρκεια αυτού του τύπου κεραυνικού πλήγματος. Ωστόσο, τα επανειλημμένα γεγονότα μακρινού κεραυνικού χτυπήματος είναι σε θέση να προκαλέσουν διακοπή, φθορά ή και σωρευτική ζημιά σε ηλεκτρικές συσκευές ή ηλεκτρονικά κυκλώματα.



Σχήμα 3.4: Κεραυνικό χτύπημα σε μακρινή απόσταση από το πλοίο [21].

Ένα άλλο φαινόμενο που αξίζει να αναφερθεί είναι η ανακατανομή ατμοσφαιρικών φορτίσεων η οποία μπορεί να προκύψει από την ταχεία κίνηση φορτίων μέσα στο σύννεφο. Αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται αμέσως μετά τα κεραυνικά χτυπήματα ή κατά την διάρκεια αυτών, αλλά μπορεί να συμβεί χωρίς την ύπαρξη κεραυνών. Η γρήγορη κίνηση φορτίων μέσα στο σύννεφο δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο παρόμοιο με αυτό που δημιουργείται από κεραυνούς ανάμεσα στα σύννεφα. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η επαγωγή τάσεως και ρεύματος στα κυκλώματα ισχύος, επικοινωνιών και επεξεργασίας σήματος χωρίς την ύπαρξη άμεσων, κοντινών ή μακρινών κεραυνικών πληγμάτων στο πλοίο.

### 3.2.2 Βλάβες στο σκελετό (hull)

Όπως έχει αναφερθεί πιο πάνω, στα μη μεταλλικά σκάφη πρέπει να τοποθετείται μια πλάκα γείωσης (grounding plate) στο μέρος του σκάφους που βρίσκεται μέσα στο νερό. Στα μεταλλικά πλοία αυτή η πλάκα γείωσης δεν είναι αναγκαία διότι το ρόλο της επιφάνειας γείωσης τον αναλαμβάνει η ίδια η γάστρα του πλοίου. Δηλαδή τα πλοία που είναι κατασκευασμένα από υλικά όπως χάλυβας και αλουμίνιο παρέχουν στον κεραυνό αγώγιμο δρόμο προς τη θάλασσα. Παρακάτω θα αναλυθεί ο ρόλος της πλάκας γείωσης και πως σχετίζεται με τις βλάβες στο σκελετό σκάφους που προκύπτουν από ένα κεραυνικό χτύπημα. Αντίστοιχη συμπεριφορά/φαινόμενα επιδεικνύει συνολικά ο σκελετός του πλοίου σε μεταλλικά πλοία.

Όταν συμβαίνει ένα κεραυνικό πλήγμα, η μέγιστη τιμή του ρεύματος εξαρτάται μόνο από το φορτίο που φέρει ο κατερχόμενος βηματικός προπομπός. Άρα ο κεραυνός συμπεριφέρεται σαν μια γεννήτρια ρευμάτων Norton χαμηλής αντίδρασης με την κυματομορφή ρεύματος να παρουσιάζει μέγιστο κοντά στα 30kA[22]. Τα αναπτυσσόμενα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από την ροή ρεύματος από την πλάκα γείωσης προς το νερό που βρίσκεται κοντά της, εξαρτώνται από την πυκνότητα ροής ρεύματος που είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του συστήματος σκελετού-πλάκας γείωσης-νερού. Καθώς ο χρόνος αύξησης του ρεύματος είναι της τάξης των 100ns ή μεγαλύτερος, με φάσμα συχνοτήτων μικρότερο των μερικών MHz και μήκος κύματος 100m, το πεδίο δυναμικού που σχετίζεται με τη ροή ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτροστατικό κατά μήκος ενός σκάφους.

Αυτά τα ηλεκτρικά πεδία αυξάνουν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ πλάκας γείωσης (και όλων των αγωγών που συνδέονται με αυτήν) και του περιβάλλοντος νερού. Αν η διαφορά δυναμικού είναι αρκετά μεγάλη, μπορεί να οδηγήσει σε πλευρικές εκκενώσεις που μπορούν να τρυπήσουν τη μάζα του σκελετού του σκάφους ή να προκαλέσουν τραυματισμούς στους επιβαίνοντες. Καθώς το κεραυνικό ρεύμα ρέει μέσω της πλάκας γείωσης προς το νερό, αυξάνει το δυναμικό της πλάκας γείωσης και του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε επίπεδο που εξαρτάται από τη συνολική αντίσταση μεταξύ της πλάκας και ενός απομακρυσμένου σημείου που φέρει μηδενική τάση. Στόχος της μικρής επιφάνειας της πλάκας γείωσης, όπως

ορίζεται από τα περισσότερα πρότυπα είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης γείωσης, για να μειωθεί η τάση σε τιμή τέτοια που να καθίσταται ακίνδυνη.

Μια λογική γεωμετρική προσέγγιση για ένα σκάφος με μία πλάκα γείωσης είναι ένα οριζόντιο κυκλικό ηλεκτρόδιο στην επιφάνεια του νερού. Για αυτήν την προσέγγιση υπολογίζεται αντίσταση:

$$R = \frac{1}{2\sigma D} \quad (3.2.1)$$

όπου  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα του γλυκού νερού με  $\sigma = 10^{-3}(\Omega \cdot m)^{-1}$  χωρίς διαλυμένα άλατα και  $D$  η διάμετρος της πλάκας (34cm για τα πρότυπα ISO 1013 και ABYC). Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στη σχέση (3.2.1) η αντίσταση ισούται με 1.45k $\Omega$ , που σημαίνει ότι θεωρώντας πως δεν υπάρχουν φαινόμενα μείωσης της αντίστασης γείωσης, η μέγιστη τιμή τάσης της πλάκας γείωσης πλησιάζει τα 44MV για κεραυνικό ρεύμα 30kA. Θεωρώντας τη ροή του ρεύματος σχεδόν ακτινική, το δυναμικό πέφτει αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης και το δυναμικό στο νερό μηδενίζεται σε απόσταση ίση με μερικές ακτίνες της πλάκας γείωσης, δηλαδή σε περισσότερο από 1m. Η κλίση του δυναμικού (ή ένταση ηλεκτρικού πεδίου) της τάξης των 500kV/m είναι αρκετή για ηλεκτρική διάσπαση. Καθώς διαφορές δυναμικού της τάξης των 44MV υπάρχουν σε αποστάσεις της τάξης του 1m, η δημιουργία ηλεκτρικής διάσπασης είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Άρα, μια πλευρική εκκένωση είναι πολύ πιθανόν να συμβεί μεταξύ της πλάκας γείωσης (ή όποιου υπερθαλάσσιου ηλεκτρικού τμήματος είναι συνδεδεμένο με αυτήν) και του νερού.

Η γεωμετρία της πλάκας γείωσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις τιμές της αντίστασης  $R$ . Εφαρμόζοντας διαφορετικές γεωμετρίες στην πλάκα γείωσης είναι εφικτή η μείωση της αντίστασης γείωσης. Για παράδειγμα αν η πλάκα γείωσης αποτελείται από μια μακρόστενη λωρίδα μήκους  $L$  και πάχους  $d$ , τοποθετημένη κατά μήκος του κέντρου του πυθμένα του σκάφους, η αντίσταση σύμφωνα με τον Saraoja [22] είναι:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{2L}{1.36d}\right)}{\pi L \sigma} \Omega \quad (3.2.2)$$

Πιο συγκεκριμένα, για  $L=10m$  και  $d=9.3mm$  (για να επιτευχθεί εμβαδό που να συμμορφώνεται με τα πρότυπα ABYC και ISO) πετυχαίνεται αντίσταση 234 $\Omega$  και το δυναμικό

της πλάκας γείωσης είναι 7MV για κεραυνικό ρεύμα 30kA. Ακόμα και αν μειώθηκε κατά έξι φορές το δυναμικό σε σχέση με τα 44MV, η τάση βρίσκεται σε επικίνδυνα υψηλά επίπεδα.

Αντίθετα, σε συνθήκες θαλασσινού νερού ισχύει  $\sigma = 4(\Omega \cdot m)^{-1}$ , για το κυκλικό ηλεκτρόδιο η αντίσταση είναι 0.36Ω με τάση 11kV ενώ για το ηλεκτρόδιο σε λωρίδα η αντίσταση είναι 0.06Ω με τάση 1.8kV. Καμία από αυτές τις τάσεις δεν αποτελεί κίνδυνο για σχηματισμό πλευρικών εκκενώσεων, άρα το θαλασσινό νερό είναι πολύ ασφαλέστερο σε αυτόν τον τομέα σε σύγκριση με το γλυκό νερό.

### 3.2.3 Θερμικές συνέπειες στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης

Στην μελέτη ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, πρέπει να εξεταστούν οι συνέπειες ενός πλήγματος στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης (downconductor damage) του συστήματος, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας σε αυτούς. Το κεραυνικό ρεύμα περνά μέσα από το αλεξικέραυνο στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης και στη συνέχεια στο μεταλλικό σκελετό του πλοίου που λειτουργεί ως τερματικό γείωσης είτε στη πλάκα γείωσης σε μη μεταλλικά πλοία. Θερμική καταπόνηση από τις απώλειες Joule υφίστανται οι καθοδικοί αγωγοί γείωσης και έτσι πρέπει να εξακριβωθεί εάν το ρεύμα αυτό είναι ικανό να προκαλέσει την απαιτούμενη θερμική καταπόνηση στον αγωγό ώστε να υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης.

Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος  $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$  είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων) και μετριέται σε Ampere<sup>2</sup> · Seconds ( $A^2s$ ). Όταν υπολογίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας ενός αγωγού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η διάχυση της θερμότητας θεωρείται αμελητέα, λόγω της μικρής διάρκειας ροής του ρεύματος. Η ενέργεια που εκλύεται σε ένα μέσο με αντίσταση R όταν διαρρέεται από ρεύμα  $i(t)$  είναι:

$$W = R \int i^2 dt \quad [\text{Joule}] \quad (3.2.3)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας του είναι:

$$\Delta\theta = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \left( \frac{\int i^2 dt \cdot a \cdot \rho}{q^2 \cdot \gamma \cdot C_w} \right) \right] \text{ [K]} \quad (3.2.4)$$

όπου:

$\alpha$ : ο συντελεστής θερμότητας σε [1/K]

$\rho$ : η ειδική αντίσταση αγωγού σε [ $\Omega m$ ]

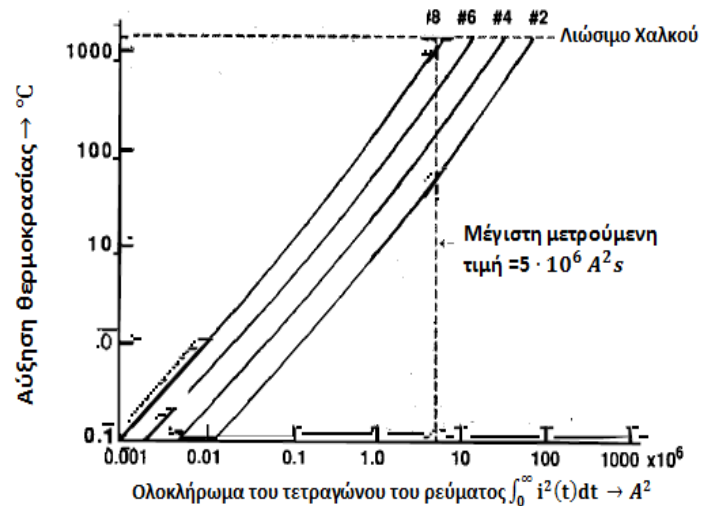
$q$ : η διατομή του αγωγού σε [ $m^2$ ]

$\gamma$ : η πυκνότητα του υλικού σε [ $kg/m^3$ ]

$C_w$ : ο συντελεστής θερμοχωρητικότητας σε [ $J/Kg \cdot K$ ]

Στο σχήμα 3.5 κατά τον Golde [22], φαίνεται πώς μεταβάλλεται η θερμοκρασία για διάφορες διατομές χάλκινων καθοδικών αγωγών σε σχέση με το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος  $\int_0^\infty i^2(t) dt$ . Η

μέγιστη τιμή του ολοκληρώματος  $\int i^2 dt$  που έχει μετρηθεί ποτέ για αρνητικούς κατερχόμενους κεραυνούς είναι  $5 \cdot 10^6 A^2 s$ . Στο σχήμα 3.5, συμπτωματικά, φαίνεται πως η μέγιστη αυτή τιμή του ολοκληρώματος εμφανίζεται για ένα καθοδικό αγωγό #8 (διαμέτρου  $8.36 mm^2$ ) όπου και επιτυγχάνεται λιώσιμο του χαλκού από τη θερμική καταπόνηση στους 1000 βαθμούς Κελσίου. Για την ίδια μέγιστη τιμή του ολοκληρώματος ( $5 \cdot 10^6 A^2 s$ ) παρατηρείται ότι ο καθοδικός αγωγός #4 (διαμέτρου  $21.2 mm^2$ ) φθάνει σε μια θερμοκρασία περίπου των 100 °C, θερμοκρασία μειωμένη κατά ένα παράγοντα δέκα. Για αυτό το λόγο αν είναι επιθυμητή η ανάθεση ενός περιθωρίου ασφαλείας με μέγιστη θερμοκρασία τους 100 °C που δύναται να φθάσει ο αγωγός, προτιμάται καθοδικός αγωγός χαλκού #4 (διαμέτρου  $21.2 mm^2$ ).



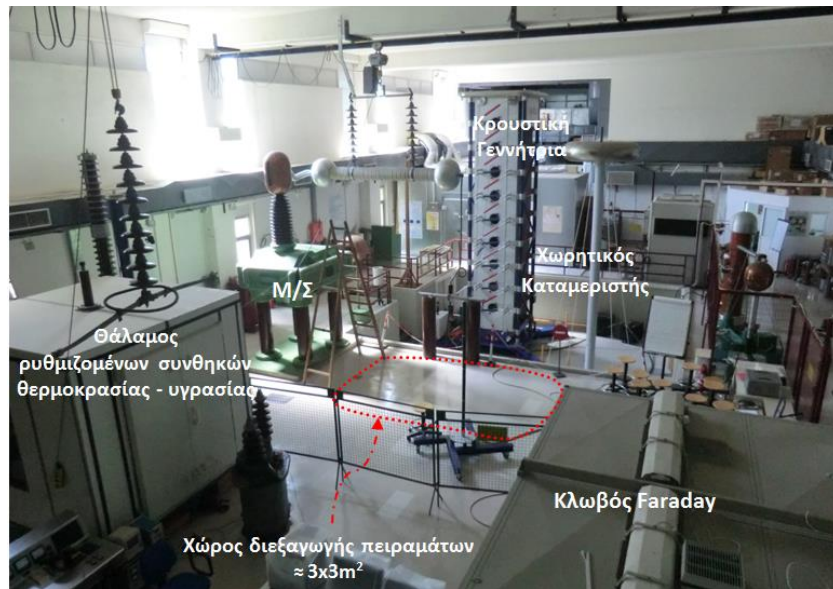
Σχήμα 3.5 : Μεταβολή θερμοκρασίας χάλκινων αγωγών σε σχέση με το ολοκλήρωμα  $\int_0^\infty i^2(t) dt$  [A<sup>2</sup>s] [22].



## Κεφάλαιο 4: Πειραματική προσέγγιση του φαινομένου σύλληψης κεραυνού

### 4.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη διερεύνησης του φαινομένου σύλληψης κεραυνού μέσω δοκιμών σε μοντέλο υπό κλίμακα πραγματοποιείται σε ένα χώρο περίπου 9 τετραγωνικών μέτρων στο εργαστήριο υψηλών τάσεων του ΕΜΠ όπως απεικονίζεται στο σχ. 4.1.



Σχήμα 4.1: Χώρος διεξαγωγής πειράματος

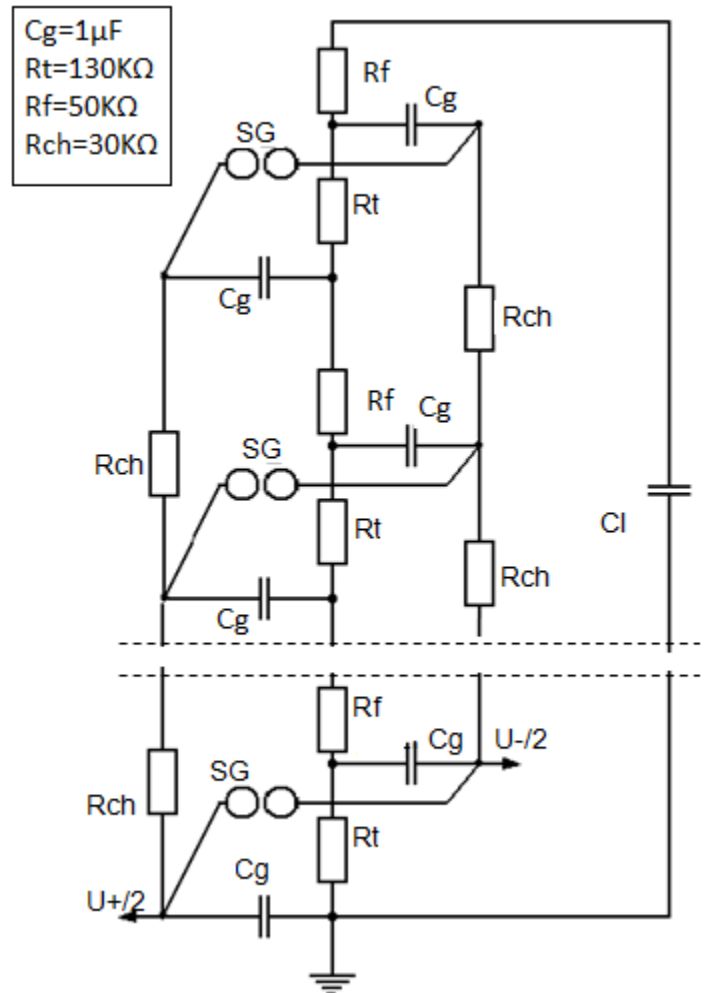
Παρακάτω ακολουθεί μια περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για το συγκεκριμένο πείραμα:

#### 4.1.1 Γεννήτρια κρουστικών τάσεων Ε.Μ.Π

Η κρουστική γεννήτρια APITZ/CRATOS αποτελείται από εννέα βαθμίδες και σε κάθε βαθμίδα η ενέργεια φόρτισης των πυκνωτών κρούσεως είναι 10KJ. Ουσιαστικά είναι μια τροποποίηση της πολυβάθμιας κρουστικής γεννήτριας τύπου Marx. Η διαφορά έγκειται στο συνδυασμό 2 πυκνωτών σε σειρά ανά βαθμίδα. Ο ένας πυκνωτής φορτίζεται ως το 50% της προεπιλεγμένης τιμής τάσης φόρτισης, ενώ ο άλλος φορτίζεται σε αντίθετη πολικότητα έως το -50% της προεπιλεγμένης τάσης φόρτισης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης όλες οι βαθμίδες είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Όταν η τάση φόρτισης φθάσει στην προεπιλεγμένη τιμή το διάκενο σφαιρών της πρώτης βαθμίδας διασπάται και η τάση εξόδου της πρώτης βαθμίδας αυξάνει γρήγορα από το μηδέν μέχρι την τιμή της τάσης φόρτισης. Το γεγονός αυτό προκαλεί

εσωτερική μεταβατική τάση, η οποία αυξάνει την τάση στο διάκενο της δεύτερης βαθμίδας και προκαλεί διάσπαση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, διαδοχικά, και μέσα σε μερικά ns όλες οι βαθμίδες διασπώνται και συνδέονται σε σειρά. Τα πλεονεκτήματα του τροποποιημένου κυκλώματος σε σύγκριση με τη γεννήτρια Marx είναι η ανάπτυξη υψηλότερων εσωτερικών υπερτάσεων (που αυξάνουν το εύρος έναυσης) και η χαμηλότερη τιμή της παράσιτης αυτεπαγωγής.

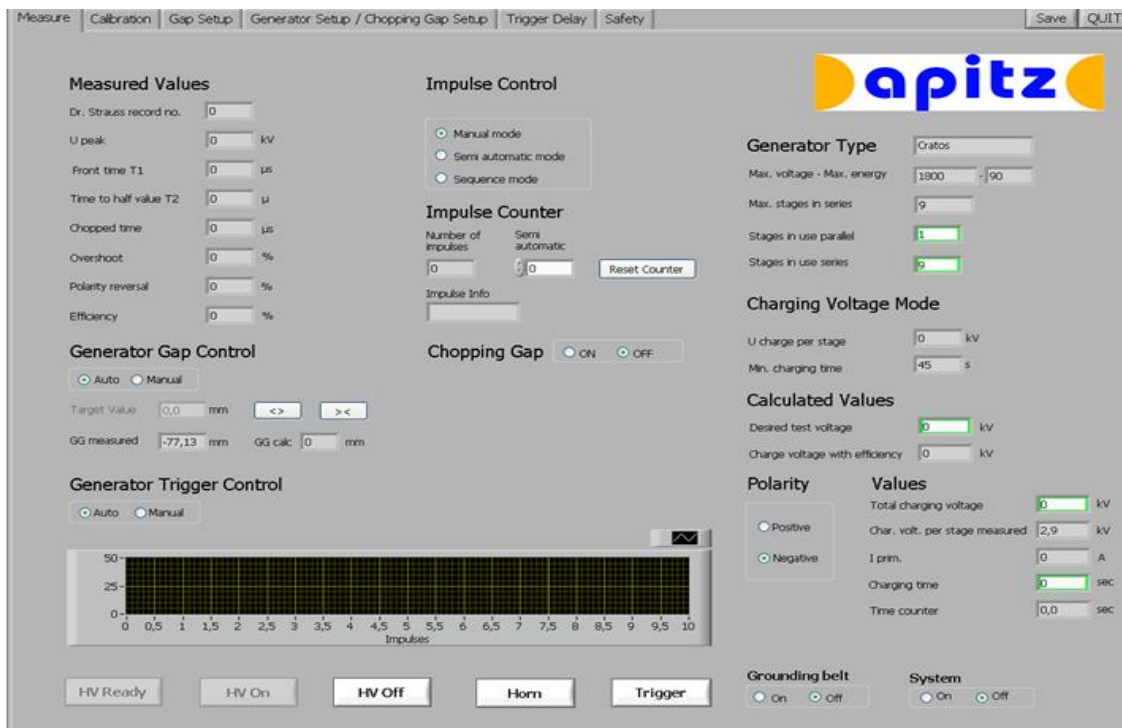
Σε κάθε βαθμίδα της κρουστικής γεννήτριας υπάρχει μια αντίσταση ουράς  $R_t=130\text{K}\Omega$ , μια αντίσταση μετώπου  $R_f=50\text{K}\Omega$ , 2 αντιστάσεις φόρτισης  $R_{ch}=30\text{K}\Omega$  η κάθε μία και ένας πυκνωτής κρούσης  $C_g=1\mu\text{F}$ . Ο πυκνωτής φορτίου  $C_l=449.8\text{pF}$  στην έξοδο της κρουστικής γεννήτριας αποτελείται από τον εν σειρά συνδιασμό ενός πυκνωτή υψηλής τάσεως  $C_1=930\text{nF}$  και ενός πυκνωτή χαμηλής τάσεως  $C_2=450\text{pF}$ . Έτσι ο χωρητικός καταμεριστής τάσης έχει λόγο καταμερισμού ίσο με  $K = \frac{C_1+C_2}{C_1} = 2068$ . Στο σχήμα 4.2 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της εννιαβάθμιας γεννήτριας APITZ/CRATOS.



Σχήμα 4.2: Σχηματικό διάγραμμα της εννιαβάθμιας γεννήτριας APITZ/CRATOS [23]

#### 4.1.2 Σύστημα ελέγχου και μετρητικό σύστημα

Μέσα στον κλωβό Faraday υπάρχει το σύστημα ελέγχου “Cratos” και το μετρητικό σύστημα “Win TR-AS v2.878”. Αυτά τα δύο συστήματα ελέγχονται μέσω 2 υπολογιστών οι οποίοι πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους. Στο σχ. 4.3 απεικονίζεται η βασική οθόνη λογισμικού του συστήματος ελέγχου CRATOS.



Σχήμα 4.3: Βασική οθόνη λογισμικού του συστήματος ελέγχου CRATOS [23].

Για τη σωστή λειτουργία του “CRATOS” ακολουθούνται τα εξής βήματα: Αρχικά καθορίζουμε την πολικότητα στο πεδίο polarity. Ακολούθως στο πεδίο Calculated Values στην επιλογή Desired test voltage βάζουμε την επιθυμητή τιμή της τάσης όπου και υπολογίζεται η τάση φόρτισης (charge voltage with efficiency). Στο πεδίο Values και συγκεκριμένα στο total charging voltage αντιγράφουμε την τιμή που υπολογίσθηκε από την τάση φόρτισης προηγουμένως. Μετά στο πεδίο Values καθορίζουμε το χρόνο φόρτισης που ως συνήθως είναι μεγαλύτερος από 45 sec. Γενικά αυτή την εντολή την κρατάμε σχεδόν πάντα σταθερή. Αργότερα επιλέγουμε ON στο πεδίο System και ON στο πεδίο Grounding Belt. Ακολούθως επιλέγουμε “HV Ready”. Πρέπει να τονιστεί ότι το σύστημα παραμένει σε κατάσταση “HV Ready” στην πρώτη δοκιμή για τουλάχιστον 3 λεπτά. Για να καταγραφεί η κρουστική τάση

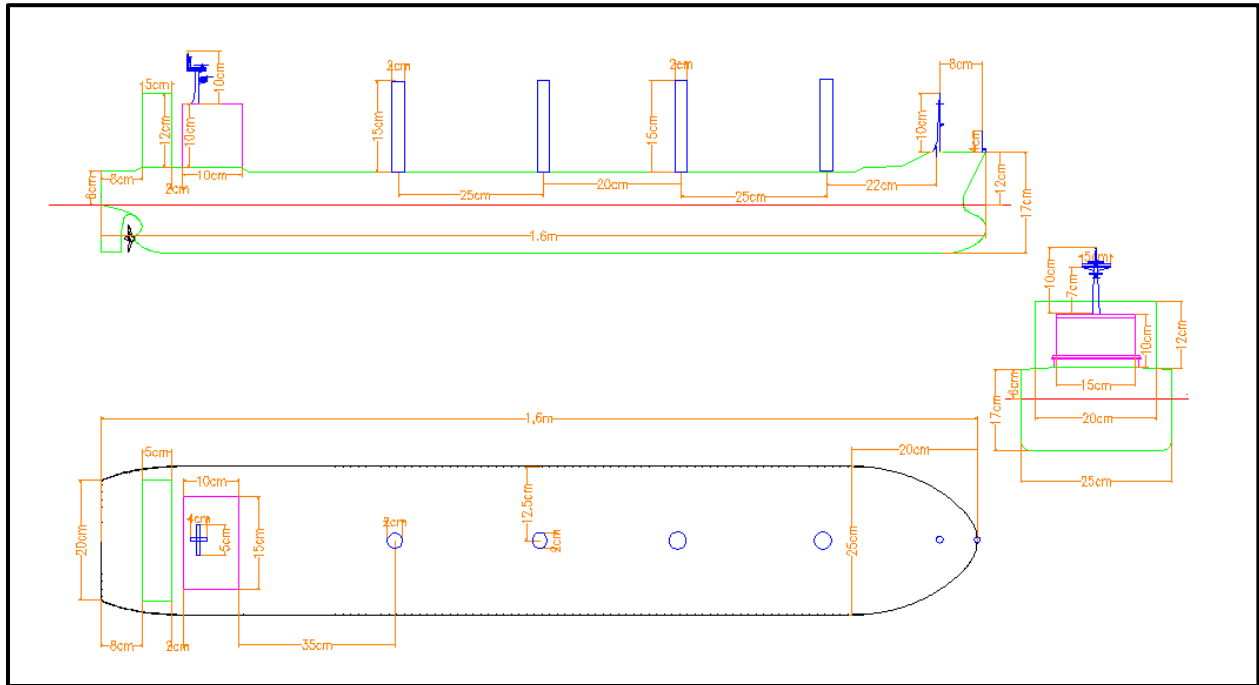
πρέπει πρώτα να ρυθμιστεί το μετρητικό σύστημα “Win TR-AS v2.878”. Έτσι επιλέγουμε σ’ αυτό File→ Project→Create New Project και δίνουμε ένα τίτλο στο αρχείο. Επιλέγουμε επίσης την επιθυμητή πολικότητα και την κατάλληλη τιμή του πεδίου CH1. Προτιμάται ο χωρητικός καταμεριστής με τη μπλε γραμμή για την παρουσίαση της κυματομορφής. Στη συνέχεια πατάμε το κουμπί F8 (recording, wait for trigger). Τέλος στο CRATOS πατάμε “HV ON” ώστε μετά τον προκαθορισμένο χρόνο να πραγματοποιηθεί η εκφόρτιση. Να σημειωθεί ότι είναι πολύ βασικό σε περίπτωση που θέλουμε να βγούμε από τον κλωβό Faraday και να εισέλθουμε στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος να θέσουμε HV→OFF, System→ OFF και Grounding Belt→OFF.

#### **4.1.3 Μοντέλο Πλοίου Υπό Κλίμακα**

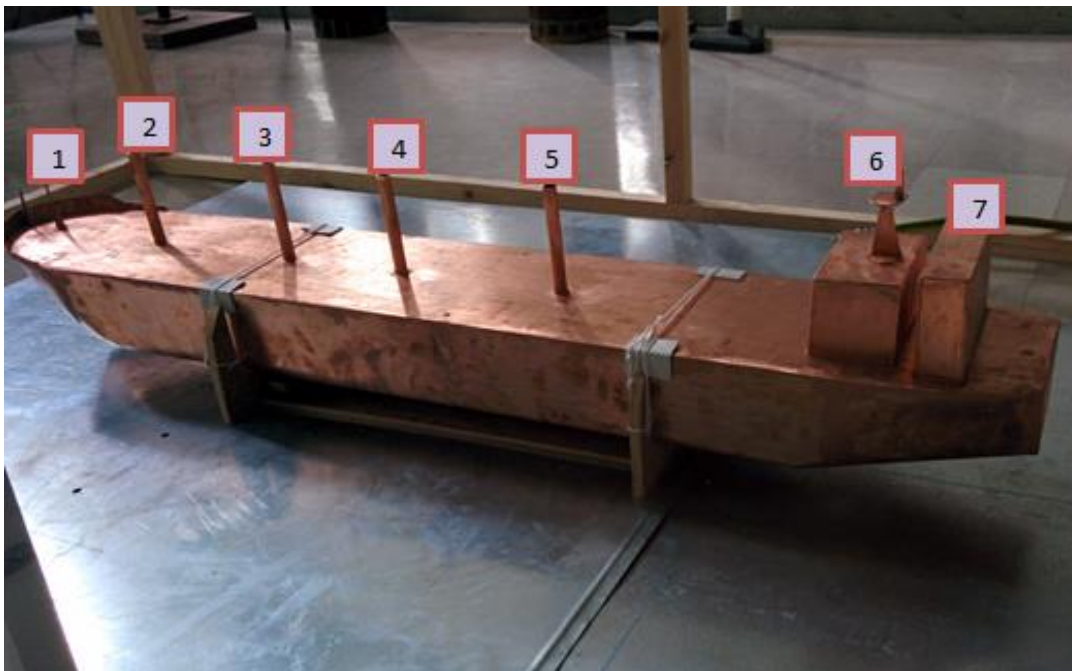
Το μοντέλο πλοίου για την πειραματική διερεύνηση κεραυνοπληξίας είναι σχεδιασμένο υπό κλίμακα 1:120 ενός πραγματικών διαστάσεων εμπορικού πλοίου. Η πλάγια όψη και η κάτοψη με τις ακριβείς διαστάσεις του απεικονίζονται στο σχήμα 4.4. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι κατασκευασμένο από χαλκό και έχει μήκος 160 cm και πλάτος 25 cm. Ο κεραυνός τείνει να χτυπήσει τις υψηλές κατασκευές του πλοίου, που συνήθως αυτές είναι γερανοί φορτίου, καπνοδόχοι, συστήματα επικοινωνιών και χώροι ναυσιπλοΐας του πλοίου όπου εκεί μέσα βρίσκονται εγκατεστημένα τα μέσα και όργανα ναυσιπλοΐας και επικοινωνίας, τα χειριστήρια μηχανής και το πηδάλιο. Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο μας οι 4 ράβδοι στο μέσο συμβολίζουν γεραμούς φορτίου, οι υπερκατασκευές στην πρύμνη που ονομάζονται και επίστεγο συμβολίζουν καπνοδόχους του μηχανοστασίου, χώρους ναυσιπλοΐας και θάλαμους διαμονής προσωπικού όπου στην κορυφή της μιας υπερκατασκευής βρίσκεται η κεραία του πλοίου ενώ στην πλώρη οι 2 “ακίδες” συμβολίζουν κάποιο σύστημα πλοήγησης.

Το μοντέλο πλοίου είναι τοποθετημένο πάνω σε μια μεταλλική πλάκα η οποία έχει πάχος περίπου 2 mm και είναι γειωμένη. Η πλάκα αυτή αντιπροσωπεύει τη θάλασσα. Επίσης μια φορτισμένη κυλινδρική ράβδος αναπαριστά την κεφαλή του κατερχόμενου οχέτου. Η ράβδος αυτή είναι μήκους 50 cm και έχει διάμετρο 5mm. Τέλος στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος υπάρχει μια κατασκευή στήριξης για μετέπειτα χρήση τοροειδούς όπου θα προσομοιώνει το νέφος. Η ξύλινη αυτή κατασκευή αποτελείται από εγκάρσιες εγκοπές οι οποίες ξεκινάνε από

το 0.50 m και φθάνουν μέχρι το 1.80 m ανά 10 cm. Όλα αυτά απεικονίζονται στα σχήματα 4.5 και 4.6.



Σχήμα 4.4: 2D- Σχέδιο μοντέλου πλοίου σχεδιασμένο στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCad με τις ακριβείς διαστάσεις του.



**Κατασκευή 1:**  
Σύστημα Πλοήγησης

**Κατασκευές 2-5:**  
Γερανοί Φορτίου

**Υπερκατασκευή 6:**  
Χώροι ναυσιπλοΐας και διαμονής του πληρώματος όπου στην κορυφή βρίσκεται η κεραία του πλοίου.

**Υπερκατασκευή 7:**  
Καπνοδόχοι μηχανοστασίου.

Σχήμα 4.5: Μοντέλο πλοίου στο οποίο φαίνονται αριθμημένες οι κατασκευές του.

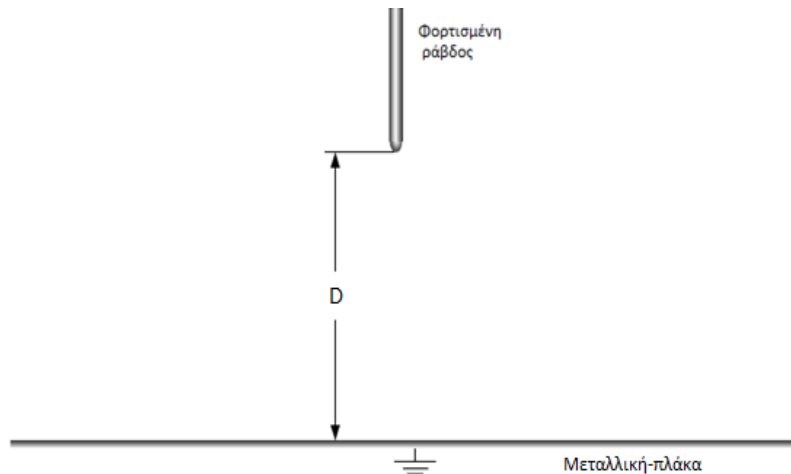


Σχήμα 4.6: Στο σχήμα φαίνονται το μοντέλο πλοίου, η μεταλλική πλάκα, η ράβδος και η ξυλοκατασκευή για το τοροειδές.

## 4.2 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μεταλλικής πλάκας

### 4.2.1 Διαδικασία μετρήσεων

Στο αρχικό στάδιο του πειράματος μελετήθηκαν τα διάκενα ράβδου-πλάκας χωρίς το μοντέλο πλοίου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Συγκεκριμένα, η φορτισμένη ράβδος καταπονείται με κανονική εξωτερική κρουστική υψηλή τάση (ΚρυΤ) κυματομορφής 1.2/50  $\mu$ s μέσω της εννιαβάθμιας κρουστικής γεννήτριας APITZ/CRATOS του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ.



Σχήμα 4.7: Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης ράβδου-πλάκας όπου  $D$  είναι η απόσταση πρόσκρουσης της φορτισμένης ράβδου από τη γη.

Στο στάδιο αυτό στόχος μας είναι να βρούμε την καμπύλη διάσπασης του διακένου για διάφορες αποστάσεις πρόσκρουσης στη γη ( $D$ ) η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή. Οι επιβολές των τάσεων είναι αρνητικής και θετικής πολικότητας. Η φορτισμένη ράβδος τοποθετήθηκε διαδοχικά πάνω από τη γειωμένη πλάκα σε ύψος  $D=0.50\text{m}$ ,  $D=0.75\text{m}$ ,  $D=1\text{m}$  τόσο για θετική πολικότητα όσο και για αρνητική πολικότητα. Επίσης γίνονταν 20 επιβολές τάσεων ανά επίπεδο τάσης με το χρονικό διάστημα μεταξύ 2 διαδοχικών επιβολών να είναι 2 λεπτά. Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος επιπέδων τάσεων περιγράφεται αναλυτικά στο μέρος (4.2.2.1) που ακολουθεί. Έτσι κατασκευάστηκαν οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης μέσα από τις οποίες υπολογίστηκαν οι 97.5% τάσεις διάσπασης  $U_s$  για όλα τα διάκενα ράβδου-πλάκας. Οι τάσεις διάσπασης  $U_s$  που υπολογίστηκαν σε αυτό στάδιο είναι αυτές που θα επιβάλλονται για την διεξαγωγή του πειράματος φορτισμένη ράβδος-μοντέλο πλοίου.

#### 4.2.2 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης

Η ηλεκτρική διάσπαση μπορεί να περιγραφεί ως μια στοχαστική διαδικασία. Επομένως ο αξιόπιστος προσδιορισμός της τάσης διάσπασης γίνεται μέσω στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων δοκιμών ηλεκτρικής διάσπασης. Στην πράξη, βρίσκεται μια κατανομή πιθανότητας διάσπασης η οποία μπορεί αναλυτικά να οριστεί ως συνάρτηση δύο παραμέτρων: της 50% τάσης διάσπασης,  $U_{50}$ , η τιμή τάσης για την οποία η πιθανότητα διάσπασης είναι 50%, και της συμβατικής απόκλισης,  $z$ , η οποία υπολογίζεται ως η διαφορά  $U_{50} - U_{16}$ , όπου  $U_{16}$  η τιμή της τάσης για την οποία η πιθανότητα διάσπασης είναι 16%. Οι

χαρακτηριστικές αυτές παράμετροι μπορούν εύκολα να υπολογιστούν μέσω της προσέγγισης της κατανομής πιθανότητας διάσπασης με μια γνωστή συνάρτηση κατανομής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η κατανομή πιθανότητας διάσπασης μπορεί να προσεγγιστεί πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή και επομένως τα πειραματικά δεδομένα διάσπασης ικανοποιούν την πιο κάτω σχέση:

$$p(U) = \frac{1}{z \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-U_{50})^2}{(2 \cdot z^2)}} dU \quad (4.2.1)$$

Οι παράμετροι  $U_{50}$  και  $z$  ταυτίζονται με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-1 [27] οι δοκιμές ηλεκτρικής διάσπασης διακρίνονται σε 3 κατηγορίες, ανάλογα με τη διαδικασία απόκτησης των αποτελεσμάτων:

- 1η Κατηγορία δοκιμών ή “Μέθοδος επιπέδων τάσεως” (Multiple-level test).
- 2η Κατηγορία δοκιμών ή “Μέθοδοι αυξομείωσης τάσεων” (Up and down tests).
- 3η Κατηγορία δοκιμών ή “Μέθοδοι διαδοχικών διασπάσεων” (Successive discharge tests).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης χρησιμοποιείται η μέθοδος των επιπέδων τάσεων όπου και αυτή περιγράφεται αναλυτικά πιο κάτω:

#### 4.2.2.1 Μέθοδος επιπέδων τάσεων

Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο επιβάλλονται τάσεις εύρους  $U_i$  όπου ( $i= 1, 2, \dots, n$ ). Αν επιβληθεί ένας αριθμός τάσεων ίσος με  $m_i$  ανά επίπεδο και από αυτές το διάκενο διασπασθεί  $d_i$  φορές τότε η πιθανότητα διασπάσεως στην τάση  $U_i$ , ή  $p(U_i)$ , θεωρείται ίση με τη συχνότητα της διάσπασης  $f_i = \frac{d_i}{m_i}$ . Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι τα ζεύγη τιμών  $U_i, p(U_i)$  από τα οποία, μετά τη συσχέτιση τους μέσω του γραφήματος κανονικής κατανομής, προκύπτουν η 50% τάσης διάσπασης,  $U_{50}$ , και η συμβατική τυπική απόκλιση,  $z$ .

Για να έχει αξιοπιστία η μέθοδος αυτή πρέπει ο αριθμός των ανά επίπεδο επιβολών της τάσης να είναι αρκετά μεγάλος ( $m \geq 10$ ). Το πρώτο επίπεδο τάσεως  $U_1$  πρέπει να έχει πιθανότητα διασπάσεως  $p(U_1)=0$  και η αύξηση της τάσεως  $\Delta U$  ανά επίπεδο πρέπει να



κυμαίνεται περίπου από 1% - 3%. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται μέχρις ότου η πιθανότητα διασπάσεως  $p(U)$  να φθάσει το 100%. Επομένως με τη “μέθοδο επιπέδων τάσεων”, υπολογίζονται οι κατανομές πιθανότητας διάσπασης κάθε διακένου  $D$ , εφαρμόζοντας 20 επιβολές τάσης ανά επίπεδο σε χρονικά διαστήματα 2 λεπτών ανάμεσα σε δύο διαδοχικές επιβολές.

#### 4.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Ακολουθώντας τη διαδικασία μετρήσεων, που περιγράφηκε στο τμήμα 4.2.1, τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταγραφεί στους ακόλουθους πίνακες. Οι επιβολές τάσεων μεταξύ ράβδου-πλάκας πραγματοποιήθηκαν για συγκεκριμένα επίπεδα τάσεων, διαφορετική πολικότητα και διαφορετικές αποστάσεις πρόσκρουσης.

D=50cm, Θετική Πολικότητα																						
Επίπεδα τάσης	Πίεση: 991mbar						Υγρασία: 10.44 g/m <sup>3</sup>						Θερμοκρασία: 24°C						Πλήθος διασπάσεων ( $d_i$ )	Πιθανότητα διάσπασης ( $P(U_i)$ )		
	Διάσπαση διακένου: √     Αντοχή: Χ																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			19	20
255 kV	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	0/20	0%
260 kV	Χ	Χ	Χ	Χ	√	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	√	Χ	Χ	Χ	√	Χ	Χ	3/20	15%
265 kV	√	Χ	√	√	√	√	Χ	√	Χ	Χ	√	Χ	Χ	Χ	Χ	√	√	√	Χ	10/20	50%	
270 kV	Χ	√	√	√	Χ	Χ	√	Χ	√	√	√	√	√	√	Χ	√	√	Χ	√	14/20	70%	
276 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%	

Πίνακας 4.1: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=50cm.

D=50cm, Αρνητική Πολικότητα																							
Επίπεδα τάσης	Πίεση: 989mbar					Υγρασία: 11.09 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 24 °C					Πλήθος διασπάσεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα διάσπασης (P(U <sub>i</sub> ))						
	Διάσπαση διακένου: √ Αντοχή: Χ																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20	
495 kV	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	0/20	0%	
505 kV	Χ	√	Χ	Χ	√	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	√	3/20	15%
515 kV	√	Χ	Χ	Χ	√	Χ	√	Χ	Χ	√	Χ	√	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	√	6/20	30%
527 kV	Χ	Χ	√	Χ	√	Χ	√	√	Χ	√	√	√	Χ	Χ	Χ	√	Χ	√	√	√	√	11/20	55%
540 kV	√	√	Χ	√	√	√	√	√	√	√	√	Χ	√	Χ	√	√	√	√	√	Χ	√	16/20	80%
547 kV	√	√	Χ	√	√	√	Χ	√	√	√	Χ	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	17/20	85%
560 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.2: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=50cm.

D=75cm, Θετική Πολικότητα																							
Επίπεδα τάσης	Πίεση: 993mbar					Υγρασία: 12.43 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 25°C					Πλήθος διασπάσεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα διάσπασης (P(U <sub>i</sub> ))						
	Διάσπαση διακένου: √ Αντοχή: Χ																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20	
387 kV	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	0/20	0%	
391 kV	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	√	Χ	Χ	Χ	√	Χ	Χ	√	√	Χ	Χ	Χ	Χ	4/20	20%	
395 kV	Χ	√	√	Χ	Χ	Χ	√	Χ	√	Χ	Χ	Χ	√	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	Χ	√	6/20	30%	
400 kV	√	√	√	√	Χ	√	√	√	Χ	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	18/20	90%
410 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.3: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=75cm.

D=75 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Επίπεδα τάσης	Πίεση: 993 mbar					Υγρασία: 11.96 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 25°C					Πλήθος διασπάσεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα διάσπασης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Διάσπαση διακένου: √ Αντοχή: Χ																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
695 kV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
700 kV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	1/20	5%
715 kV	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	√	X	√	X	√	X	X	√	X	5/20	25%
730 kV	X	√	√	√	X	X	X	√	X	X	X	√	√	√	X	√	X	√	X	X	9/20	45%
741 kV	√	√	X	√	X	X	√	√	√	X	X	√	√	√	√	X	√	√	√	√	14/20	70%
762 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	√	19/20	95%
770 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.4: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=75cm.

D=100 cm, Θετική Πολικότητα																						
Επίπεδα τάσης	Πίεση: 994mbar					Υγρασία: 11.04 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 25°C					Πλήθος διασπάσεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα διάσπασης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Διάσπαση διακένου: √ Αντοχή: Χ																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
495 kV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
500 kV	X	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	X	2/20	10%
505 kV	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	X	X	√	X	X	√	X	√	X	5/20	25%
515 kV	√	√	√	√	√	√	√	X	√	X	X	√	X	X	X	√	X	X	√	11/20	55%	
520 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.5: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=100cm.

D=100 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Επίπεδα τάσης	Πίεση: 995 mbar					Υγρασία: 12.9 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 26°C					Πλήθος διασπάσεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα διάσπασης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Διάσπαση διακένου: √ Αντοχή: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
826 kV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
840 kV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	√	√	X	X	X	4/20	20%
857 kV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	√	X	2/20	10%
870 kV	X	X	√	X	X	X	X	√	√	X	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	4/20	20%
891 kV	X	X	√	√	√	X	√	X	√	X	√	√	√	X	√	X	X	X	√	X	10/20	50%
900 kV	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	X	X	X	√	X	X	X	X	X	11/20	55%
916 kV	√	√	√	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	18/20	90%
930 kV	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

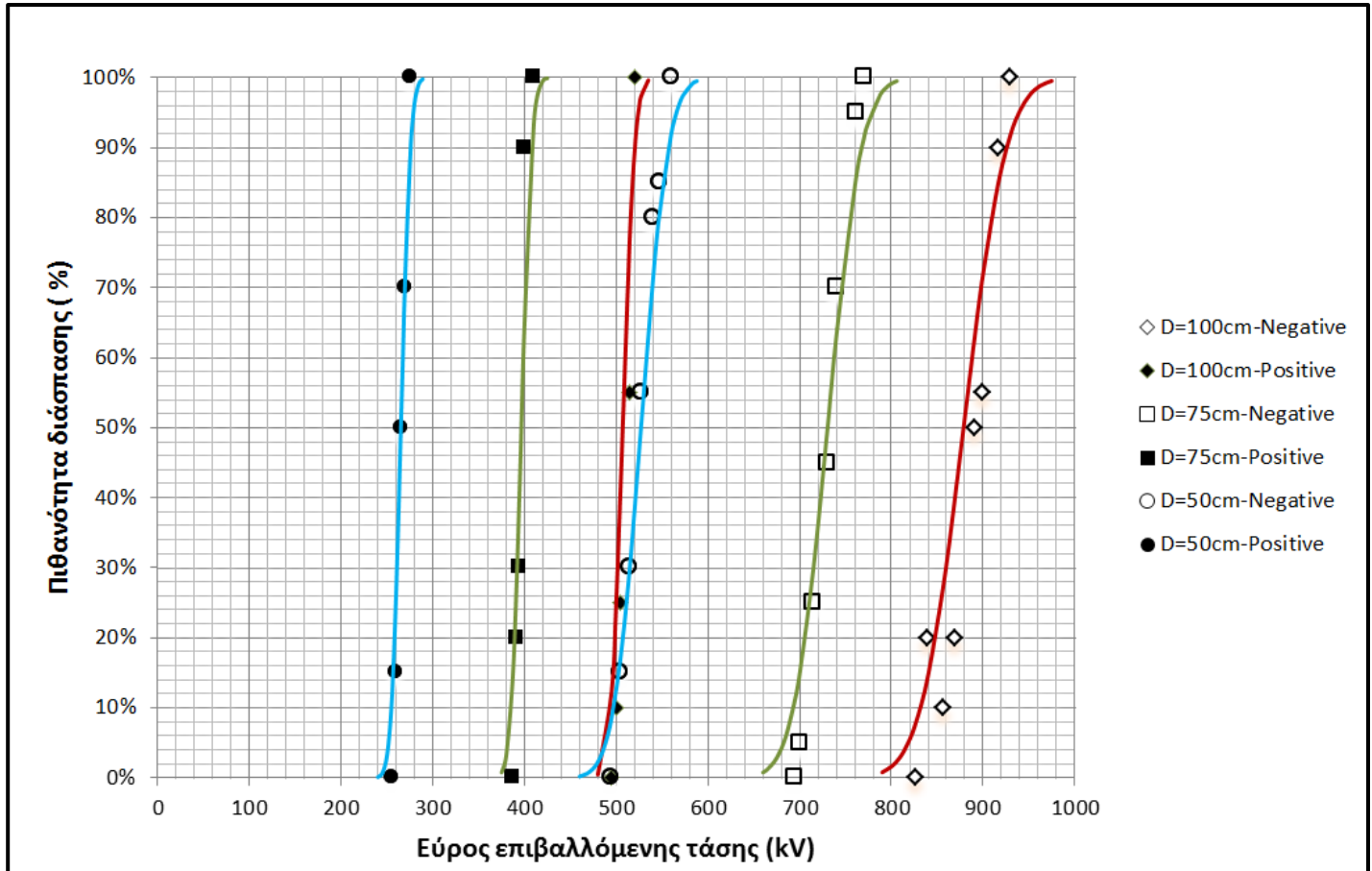
Πίνακας 4.6: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=100cm.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν στους πιο πάνω πίνακες βρέθηκαν οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης (σχ.4.8) οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Από τις καμπύλες αυτές βρέθηκαν οι τάσεις διάσπασης  $U_s$  (πίνακας 4.7) για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα που αντιστοιχούν σε πιθανότητα διάσπασης 97.5%.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τις ακόλουθες καμπύλες και τον πίνακα είναι τα εξής:

- Οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή.
- Για κάθε ζεύγος μετρήσεων θετικής και αρνητικής πολικότητας για ένα σταθερό ύψος φορτισμένης ράβδου (D=50cm, D=75cm, D=100cm), η καμπύλη πιθανότητας διάσπασης αρνητικής πολικότητας αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκρινόμενη με την καμπύλη πιθανότητας σύλληψης θετικής πολικότητας.

- Για αρνητική πολικότητα οι τάσεις διάσπασης είναι πάντα μεγαλύτερες εν αντιθέσει με αυτές της θετικής πολικότητας.
- Η τάση διάσπασης αυξάνεται με την αύξηση του ύψους της φορτισμένης ράβδου από την πλάκα.



Σχήμα 4.8: Καμπύλες πιθανότητας διάσπασης διακένων ράβδου-πλάκας οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή

Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας	Τάση διάσπασης $U_s$	
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
D=50cm	281 kV	573 kV
D=75cm	414 kV	788 kV
D=100cm	527 kV	951 kV

Πίνακας 4.7 Τάσεις διάσπασης  $U_s$  για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα.

### 4.3 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μοντέλου πλοίου

#### 4.3.1 Διαδικασία μετρήσεων

Αρχικά το μοντέλο πλοίου τοποθετείται στη μεταλλική γειωμένη πλάκα όπου καταπονείται υπό κρουστικές τάσεις για διαφορετικά ύψη της φορτισμένης ράβδου:  $D=0.50m$ ,  $D=0.75m$ ,  $D=1m$  τόσο για θετική πολικότητα όσο και για αρνητική πολικότητα. Οι κρουστικές τάσεις που επιβάλλονται αντιστοιχούν σε 97.5% τάσεις διάσπασης που έχουν υπολογιστεί από το προηγούμενο στάδιο με βάση τις κανονικές κατανομές πιθανότητας ράβδου-μεταλλικής πλάκας οι οποίες έχουν αναχθεί σε διορθωμένες τάσεις με βάση τις ατμοσφαιρικές συνθήκες της εκάστοτε μέρας. Στο κεφάλαιο 4.3.2 αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Για τον προσδιορισμό της κατανομής της πιθανότητας σύλληψης στην υπερκατασκευή υπ' αριθμόν 6 και συγκεκριμένα στην κεραία του μοντέλου του πλοίου όπως αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 4.6 διεξάγονται πειράματα “επιπέδων απόστασης” σε αναλογία με τα πειράματα “επιπέδων τάσης” τα οποία εφαρμόστηκαν στο πειραματικό μέρος 4.2. Συγκεκριμένα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία: Με σταθερή επιβαλλόμενη τάση διάσπασης,  $U_s$ , η οποία αντιστοιχεί σε πιθανότητα διάσπασης ίση με 97.5% και σταθερή απόσταση πρόσκρουσης ( $D$ ) φορτισμένης ράβδου η οποία αναπαριστά τον κατερχόμενο οχετό, εφαρμόζονται 20 επιβολές τάσης μεταξύ της φορτισμένης ράβδου και της κεραίας συνολικού ύψους  $H=41cm$  από τη πλάκα στην οποία το αλεξικέραυνο συμπεριλαμβάνεται στο συνολικό ύψος. Ξεκινώντας από μια θέση της κατασκευής στην οποία για όλες τις επιβολές της τάσης η εκκένωση κατέληγε πάντα στην πλάκα ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του μοντέλου (εκτός της κεραίας όπου μελετάται), η πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κατασκευής μειωνόταν με καθορισμένα βήματα μέχρι τη θέση για την οποία για όλες τις επιβολές της τάσης η εκκένωση κατέληγε πάντα στην κεραία. Δηλαδή η φορτισμένη ράβδος ήταν πάντα σε ένα σταθερό ύψος ( $D=50cm$  ή  $D=75cm$  ή  $D=100cm$ ) από την πλάκα ενώ το μοντέλο πλοίου μετακινούταν σε μια οριζόντια καθορισμένη πορεία πάνω στην πλάκα. Για κάθε διαφορετική πλευρική απόσταση επιβάλλαμε 20 κρουστικές τάσεις.

Αφού ολοκληρώθηκαν οι επιβολές των τάσεων, εξήχθησαν οι καμπύλες κατανομής πιθανότητας σύλληψης. Η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην προς μελέτη

κατασκευή είναι  $p$  (πιθανότητα σύλληψης), ενώ η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει σε οποιοδήποτε άλλο μέρος του μοντέλου είτε στη γειωμένη πλάκα είναι  $(1-p)$ . Οι κατανομές πιθανότητας σύλληψης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή έτσι για κάθε κατανομή πιθανότητας σύλληψης υπολογίστηκε η μέση τιμή της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας στην οποία με 50% πιθανότητα η εκκένωση κατέληγε στην κεραία (μέση ακτίνα σύλληψης  $R_c$ ) καθώς και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση  $\sigma$ . Ακολούθως γνωρίζοντας τη μέση ακτίνα σύλληψης  $R_c$  μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη μέση αποστάση πρόσκρουσης  $S_c$  από το Πυθαγόρειο θεώρημα.

#### 4.3.2 Αναγωγή τάσης διάσπασης

Οι τάσεις διάσπασης που αντιστοιχούν σε πιθανότητα 97.5% (πίνακας 4.7) έχουν αναχθεί σε διορθωμένες τάσεις διάσπασης (πίνακας 4.8) σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-1 [27]. Αυτές είναι και οι τιμές των τάσεων που εφαρμόστηκαν κατά την πειραματική διερεύνηση ράβδου-μοντέλου πλοίου.

Η τάση διάσπασης στο διάκενο αέρα γενικά εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (πίεση αέρα, υγρασία, θερμοκρασία) και συνήθως αυξάνεται με την αύξηση πίεσης του αέρα είτε με την αύξηση της υγρασίας. Για αυτό το λόγο εισάγονται κάποιοι διορθωτικοί παράγοντες ώστε να αναχθεί η τάση διάσπασης  $U_s$  του πειράματος ράβδου-πλάκας με πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία( $t$ ), πίεση ( $b$ ), υγρασία ( $h$ )) σε μια τάση  $U_o$  με βάση τις πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες ( $t_o, b_o, h_o$ ), βλέπε σχέση (4.3.1). Ακολούθως η πρότυπη τάση  $U_o$  ανάγεται στη διορθωμένη τάση  $U_s$  με βάση τις εκάστοτε πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία( $t$ ), πίεση ( $b$ ), υγρασία ( $h$ )) για το πείραμα ράβδου-μοντέλου πλοίου [32], βλέπε σχέση (4.3.2).

Οι πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες σύμφωνα με το πρότυπο [27] είναι:

Θερμοκρασία:  $t_o = 20^\circ\text{C}$

Ατμοσφαιρική πίεση:  $b_o = 1013 \text{ mbar}$

Απόλυτη υγρασία:  $h_o = 11 \text{ g/m}^3$

$$U_o = \frac{U_s}{k_1 \cdot k_2} \quad (4.3.1)$$

$$U_s = U_o \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (4.3.2)$$

Όπου:  $k_1$ : Ο συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα .

$k_2$ : Ο συντελεστής διόρθωσης υγρασίας.

Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας	Διορθωμένη τάση διάσπασης $U_s$ σύμφωνα με IEC 60060-1	
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
D=50cm	278,1 kV	573,6 kV
D=75cm	402.9 kV	803.1 kV
D=100cm	520.3 kV	959 kV

Πίνακας 4.8: Διορθωμένες τάσεις διάσπασης  $U_s$  σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-1.

#### 4.3.2.1 Συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα $k_1$

Ο συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα αέρα  $\delta$  και εκφράζεται μέσω της σχέσης (4.3.3) και ο εκθέτης  $m$  δίνεται στην ενότητα 4.3.2.3:

$$k_1 = \delta^m \quad (4.3.3)$$

Όπου:

$$\delta = \frac{b}{b_o} \cdot \frac{273+t_o}{273+t} \quad (4.3.4)$$

Οι θερμοκρασίες  $t_o$  και  $t$  εκφράζονται σε βαθμούς Κελσίου και οι πυκνότητες αέρα  $b$  και  $b_o$  εκφράζονται σε millibars.

#### 4.3.2.2 Συντελεστής διόρθωσης υγρασίας $k_2$

Ο συντελεστής διόρθωσης υγρασίας εξαρτάται από έναν εκθέτη  $w$  ο οποίος αναλύεται στην ενότητα 4.3.2.3 και από το συντελεστή  $k$ . Ο συντελεστής  $k$  εξαρτάται από το λόγο της υγρασίας του αέρα ( $h$ ) προς τη σχετική πυκνότητα αέρα ( $\delta$ ) :

$$k_2 = k^w \quad (4.3.5)$$

Όπου:

$$k = 1 + 0,010 \cdot \left( \frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad \text{για} \quad 1 \frac{g}{m^3} \leq \frac{h}{\delta} \leq 15 \frac{g}{m^3} \quad (4.3.6)$$



#### 4.3.2.3 Εκθέτες m και w

Οι εκθέτες m και w υπολογίζονται μέσω της σχέσης (4.3.7) και του σχήματος 4.9.

$$g = \frac{U_B}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} \quad (4.3.7)$$

Όπου:

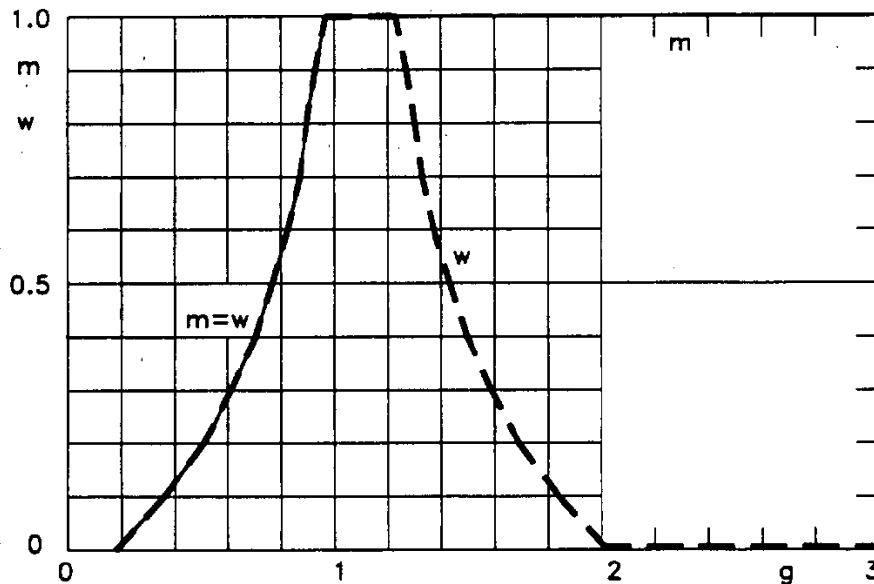
$U_B$ : Η τάση διάσπασης που αντιστοιχεί σε πιθανότητα 50% στις πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ράβδου-πλάκας σε kV.

L: Μήκος διακένου σε m.

$\delta$ : Σχετική πυκνότητα αέρα.

k: Συντελεστής k η τιμή του οποίου υπολογίζεται στην ενότητα 4.3.2.2.

Να τονιστεί ότι σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-1 οι εκθέτες m και w βρίσκονται ακόμη υπό διερεύνηση και οι προσεγγιστικές τιμές τους υπολογίζονται από το σχήμα 4.9 αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής g από τη σχέση (4.3.7).



Σχήμα 4.9: Τιμές των εκθετών m και w για το συντελεστή διόρθωσης πυκνότητας αέρα και για το συντελεστή διόρθωσης της υγρασίας αντίστοιχα, ως συνάρτηση της παραμέτρου g [27].

### 4.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Ακολουθώντας τη διαδικασία μετρήσεων, που περιγράφηκε στο τμήμα 4.3.1, τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταγραφεί στους ακόλουθους πίνακες (4.9-4.14). Με βάση τα αποτελέσματα αυτά βρέθηκαν οι καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της ηλεκτρικής εκκένωσης από την κεραία οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή (σχήμα 4.10).

D= 50 cm, Θετική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας (κατασκευή no.6) R→[cm]	Πίεση: 997 mbar					Υγρασία: 8.918 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 24°C					Πλήθος συλλήψεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα σύλληψης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Σύλληψη: √ Αστοχία: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
30 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
27 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	X	√	√		3/20	15%
25 cm	X	X	X	X	√	X	√	X	X	X	X	X	√	X	X	X	√	X	X		4/20	20%
23 cm	√	X	√	X	X	√	X	√	√	√	X	√	X	√	√	√	√	X	X	X	11/20	55%
20 cm	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	19/20	95%
18 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.9: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=50cm.

D= 50 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας (κατασκευή no.6) R→[cm]	Πίεση: 990 mbar					Υγρασία: 8.7 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 24°C					Πλήθος συλλήψεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα σύλληψης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Σύλληψη: √ Αστοχία: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
44 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
40 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	X	X	X	X	2/20	10%
38 cm	X	X	X	X	X	√	X	√	√	X	X	X	X	√	X	√	√	X	X	X	6/20	30%
34 cm	X	X	X	√	X	√	X	X	√	√	√	X	√	√	√	X	√	√	X	X	10/20	50%
30 cm	√	X	X	X	X	√	√	√	√	√	√	√	X	X	X	√	√	√	X	√	12/20	60%
27 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	√	X	√	√	√	√	√	X	17/20	85%
24 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	19/20	95%
22 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.10: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=50cm.

D= 75 cm, Θετική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας (κατασκευή no.6) R→[cm]	Πίεση: 984 mbar					Υγρασία: 10.44 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 24°C					Πλήθος συλλήψεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα σύλληψης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Σύλληψη: √ Αστοχία: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
66 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
62 cm	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	2/20	10%

54 cm	√	X	√	X	√	√	√	√	X	√	X	√	√	X	√	X	√	√	X	√	13/20	65%
50 cm	X	X	√	√	√	X	√	X	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	15/20	75%
41 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.11: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=75cm.

D= 75 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας (κατασκευή no.6) R→[cm]	Πίεση: mbar					Υγρασία: $g/m^3$					Θερμοκρασία: °C					Πλήθος συλλήψεων ( $d_i$ )	Πιθανότητα σύλληψης ( $P(U_i)$ )					
	Σύλληψη: √ Αστοχία: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
88 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
85 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	1/20	5%
78 cm	X	X	X	X	√	√	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	√	X	X	X	4/20	20%
72 cm	X	√	X	√	X	√	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	√	√	√	6/20	30%
60 cm	√	X	√	X	X	√	X	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	15/20	75%
55 cm	√	√	√	√	X	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	18/20	90%
52 cm	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	19/20	95%
50 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.12: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=75cm.

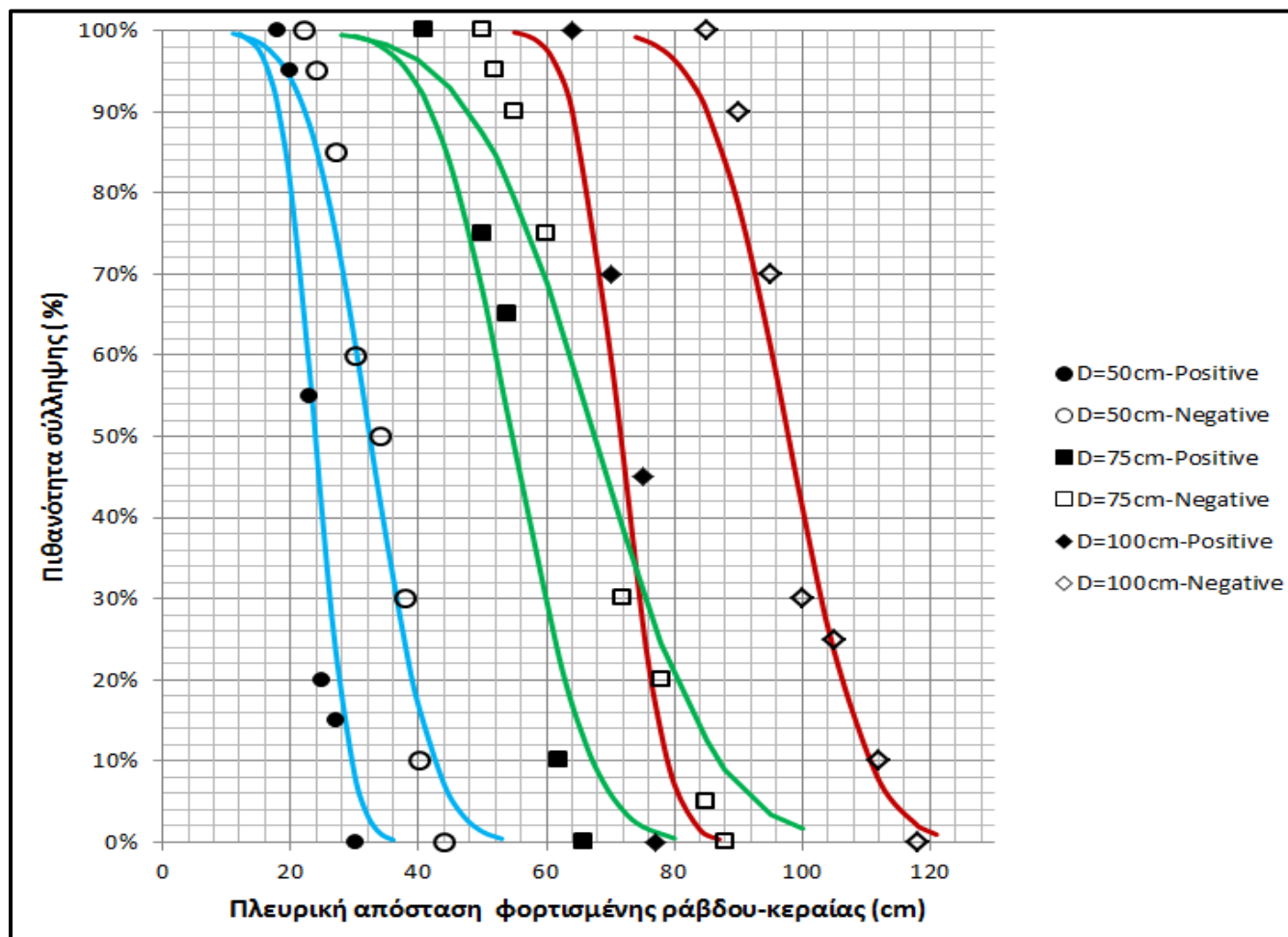
D= 100 cm, Θετική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας (κατασκευή no.6) R→[cm]	Πίεση: 996mbar					Υγρασία: 8.93 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 22 °C					Πλήθος συλλήψεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα σύλληψης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Σύλληψη: √ Αστοχία: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
77 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
75 cm	√	X	X	X	√	√	X	X	X	X	√	X	√	X	X	√	X	√	√	√	9/20	45%
70 cm	√	√	√	√	X	X	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	X	X	14/20	70
64 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.13: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=100cm

D= 100 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας (κατασκευή no.6) R→[cm]	Πίεση: 992 mbar					Υγρασία: 9.86 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 23 °C					Πλήθος συλλήψεων (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα σύλληψης (P(U <sub>i</sub> ))					
	Σύλληψη: √ Αστοχία: X																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
118 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
112 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	2/20	10%
105 cm	X	√	X	√	X	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	√	X	X	X	X	5/20	25%
100 cm	X	X	X	X	X	√	X	X	√	X	X	X	√	X	X	√	√	X	√	X	6/20	30%

95 cm	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	14/20	70%
90 cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	18/20	90%
85 cm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20/20	100%

Πίνακας 4.14: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης D=100cm



Σχήμα 4.10: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από την κεραία του μοντέλου πλοίου οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τις πιο πάνω καμπύλες είναι τα εξής:

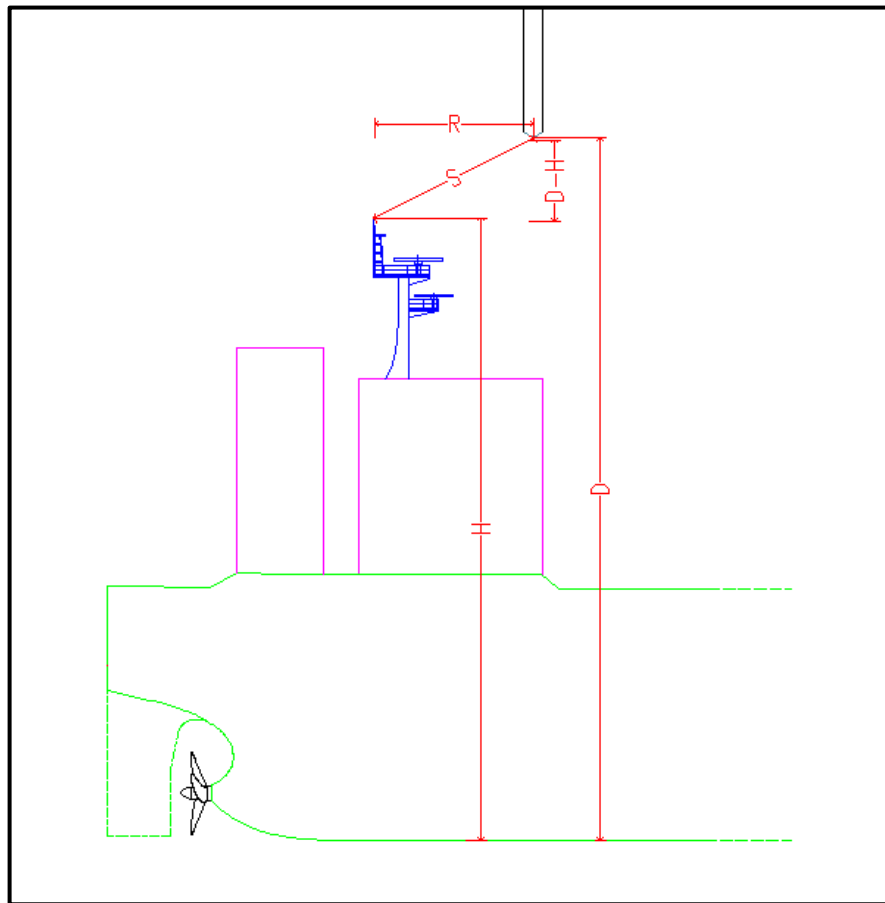
- Οι καμπύλες πιθανότητας σύλληψης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή.
- Η πιθανότητα σύλληψης αυξάνεται με τη μείωση της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης ράβδου-κεραίας.
- Για κάθε ζεύγος μετρήσεων θετικής και αρνητικής πολικότητας για ένα σταθερό ύψος φορτισμένης ράβδου (D=50cm, D=75cm, D=100cm), η καμπύλη πιθανότητας σύλληψης

αρνητικής πολικότητας αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκρινόμενη με την καμπύλη πιθανότητας σύλληψης θετικής πολικότητας.

#### 4.4 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων- μαθηματικών σχέσεων

Η ζητούμενη μέση ακτίνα σύλληψης ( $R_c$ ) που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης 50% της ηλεκτρικής εκκένωσης στην κεραία του πλοίου υπολογίστηκε από τις καμπύλες κατανομής πιθανότητας σύλληψης της ηλεκτρικής εκκένωσης για συγκεκριμένη πολικότητα και ύψος φορτισμένης ράβδου από την πλάκα. Έτσι σύμφωνα με το σχήμα 4.11 και με βάση το πυθαγόρειο θεώρημα, γνωρίζοντας την μέση ακτίνα σύλληψης ( $R_c$ ) η μέση απόσταση πρόσκρουσης ( $S_c$ ) φορτισμένης ράβδου-κεραίας πλοίου υπολογίζεται ως:

$$S_c = \sqrt{R_c^2 + (D - H)^2} \quad (4.4.1)$$



Σχήμα 4.11: Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής υπ' αριθμόν 6. R: ακτίνα σύλληψης, D: απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-πλάκας, H: ύψος κατασκευής, S: απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-κατασκευής.

Τα ζητούμενα  $R_c$  και  $S_c$  αφού υπολογιστούν για διαφορετικό ύψος της φορτισμένης ράβδου από την πλάκα και για διαφορετική πολικότητα στη συνέχεια συγκρίνονται με τις θεωρητικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 2: Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας. Αυτές αφορούν τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας, το ελλειπτικό μοντέλο που προτάθηκε από τον S.Grzybowski και το στατιστικό μοντέλο σύλληψης κεραυνού του Τσοβίλη. Να σημειωθεί ότι όλες οι εξισώσεις των προς εξέταση μεθόδων ισχύουν για 50% πιθανότητα σύλληψης. Πιο συγκεκριμένα οι εξισώσεις με τις οποίες έγινε η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων φαίνονται συγκεντρωτικά πιο κάτω:

➤ **Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας:**

$$S=D \quad (4.4.2)$$

$$R = \sqrt{2 \cdot H \cdot D - H^2} \quad (2.3.2)$$

Ισχύει  $S=D$  γιατί η ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας ταυτίζεται με την απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης ράβδου-πλάκας και με την απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-κατασκευής.

➤ **Ελλειπτικό μοντέλο εκτίμησης ακτίνας σύλληψης:**

$$S = D \cdot \left( 0.8 \cdot e^{-(0.125 \cdot H/D)} + 0.17 \right) \quad (2.6.1)$$

$$S = D \cdot \left( 1 + 0.24 \cdot e^{-(H/D)} \right) \quad (2.6.2)$$

Η σχέση (2.6.1) αντιστοιχεί σε θετική πολικότητα ενώ η σχέση (2.6.2) σε αρνητική πολικότητα.

$$R = a_o = D \cdot \sqrt{\frac{S^2 - (D-H)^2}{D^2 - (D-H)^2}} \quad (2.6.3)$$

➤ **Στατιστικό μοντέλο**

$$R_c = D \cdot \left[ c_1 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + c_2 \right] \quad (2.7.1)$$

$$S_c = D \cdot \left[ a \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b \right] \quad (2.7.2)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a$ ,  $b$  φαίνονται στον Πίνακα 2.1.



Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
a	-0.032	0.065	$c_1$	0.235	0.272
b	0.90	1.24	$c_2$	0.90	1.24

Πίνακας 2.1: Οι τιμές των συντελεστών  $c_1$ ,  $c_2$ , a, b των εξισώσεων 2.7.1 και 2.7.2 [26].

➤ **Στατιστικό μοντέλο-Γειτνίαση**

$$R_C = D \cdot \left[ a_1 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + a_2 \right] \quad (2.7.5)$$

$$S_C = D \cdot \left[ b_1 \cdot \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b_2 \right] \quad (2.7.6)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  φαίνονται στον Πίνακα 2.3:

Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
$b_1$	-0.032	0.0266	$a_1$	0.2416	0.2516
$b_2$	0.8873	1.1486	$a_2$	0.8958	1.1439

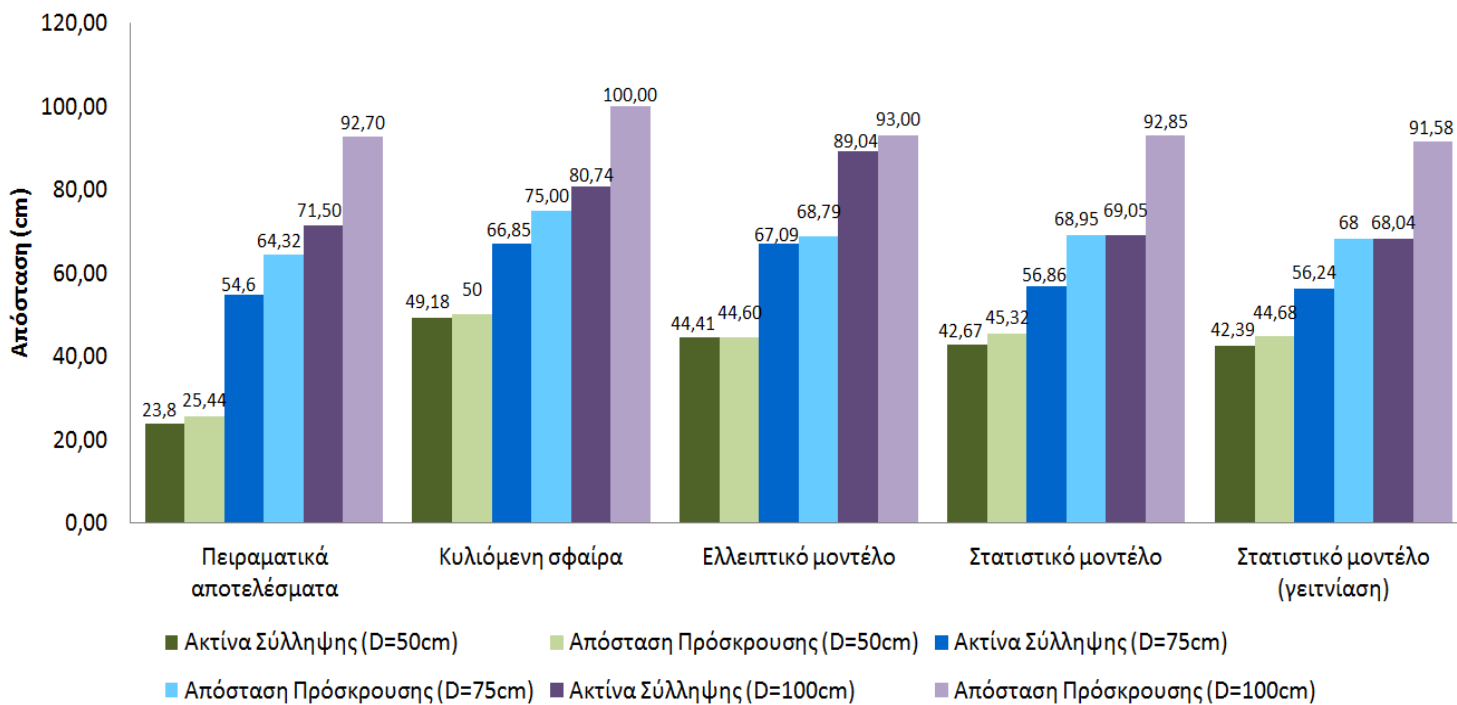
Πίνακας 2.3: Οι τιμές των συντελεστών  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  των εξισώσεων 2.7.5 και 2.7.6.

Τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μέση απόσταση πρόσκρουσης και τη μέση ακτίνα σύλληψης έχουν συμπληρωθεί στον πίνακα 4.15. Επίσης στα σχήματα 4.12 και 4.13 απεικονίζονται τα αποτελέσματα σε γραφήματα στηλών τόσο για θετική πολικότητα όσο και για αρνητική πολικότητα αντίστοιχα ανά μέθοδο εκτίμησης ζώνης προστασίας. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα κατηγοριοποιούνται ανά ύψος φορτισμένης ράβδου (σχ. 4.14-4.17) ώστε με αυτό το τρόπο να καταστεί δυνατή μια άμεση σύγκριση και να μπορέσουν να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Ύψος φορτισμένης ράβδου		Θεωρητικά αποτελέσματα								Πειραματικά αποτελέσματα	
		Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας		Ελλειπτικό μοντέλο		Στατιστικό μοντέλο		Στατιστικό μοντέλο (γεινίαση)		Μέση ακτίνα σύλληψης ( $R_c$ )	Μέση απόσταση πρόσκρουσης ( $S_c$ )
		D(cm)	R(cm)	S(cm)	R(cm)	S(cm)	R(cm)	S(cm)	R(cm)		
Θετική Πολικότητα	50	49,18	50	44,41	44,60	42,67	45,32	42,39	44,68	23,8	25,44
	75	66,85	75	67,09	68,79	56,86	68,95	56,24	68,00	54,6	64,32
	100	80,74	100	89,04	93,00	69,05	92,85	68,04	91,58	71,5	92,7
Αρνητική Πολικότητα	50	49,18	50	55,45	55,29	59,30	61,36	54,70	57,17	32,37	33,60
	75	66,85	75	87,91	85,42	80,68	90,06	74,40	84,94	67,5	75,58
	100	80,74	100	123,59	115,93	99,75	118,20	91,96	112,49	97,8	114,22

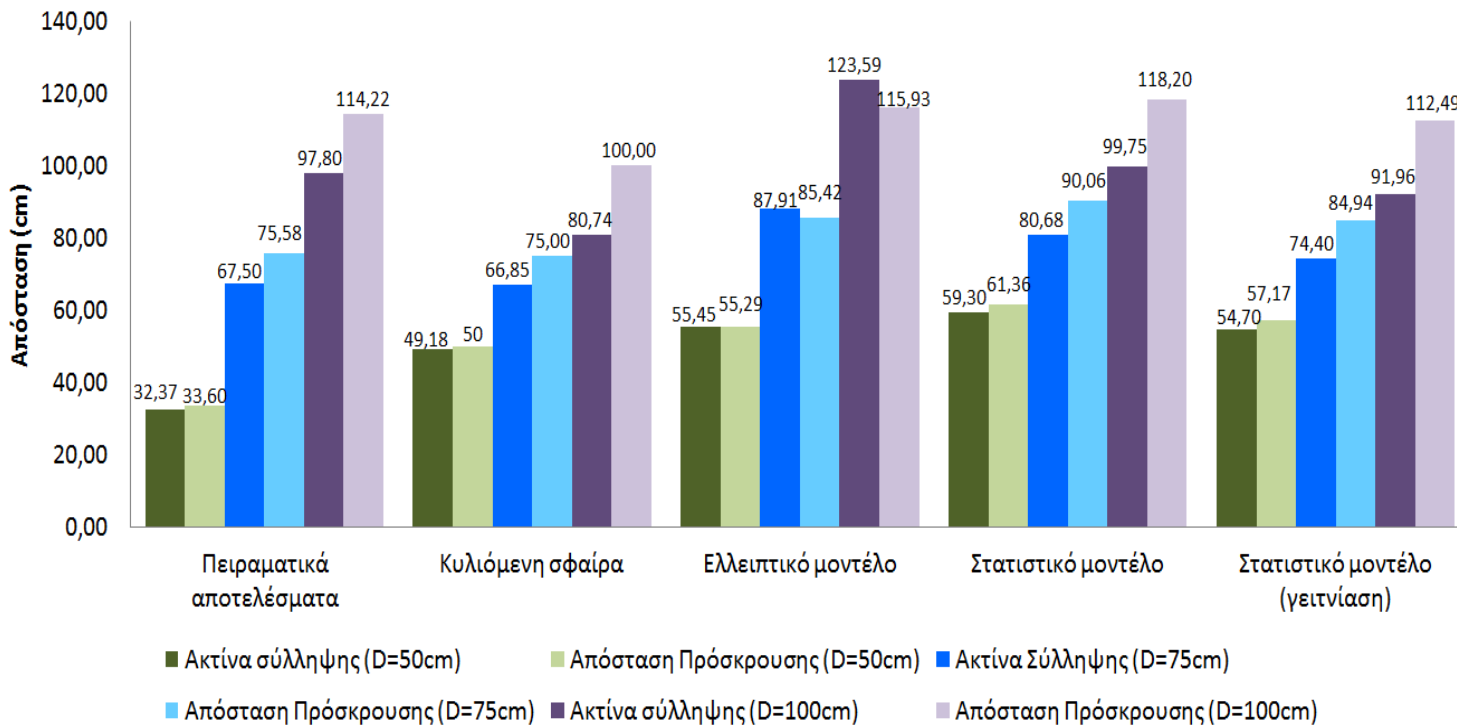
Πίνακας 4:15: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη μέση ακτίνα σύλληψης και τη μέση απόσταση πρόσκρουσης.

## Θετική Πολικότητα

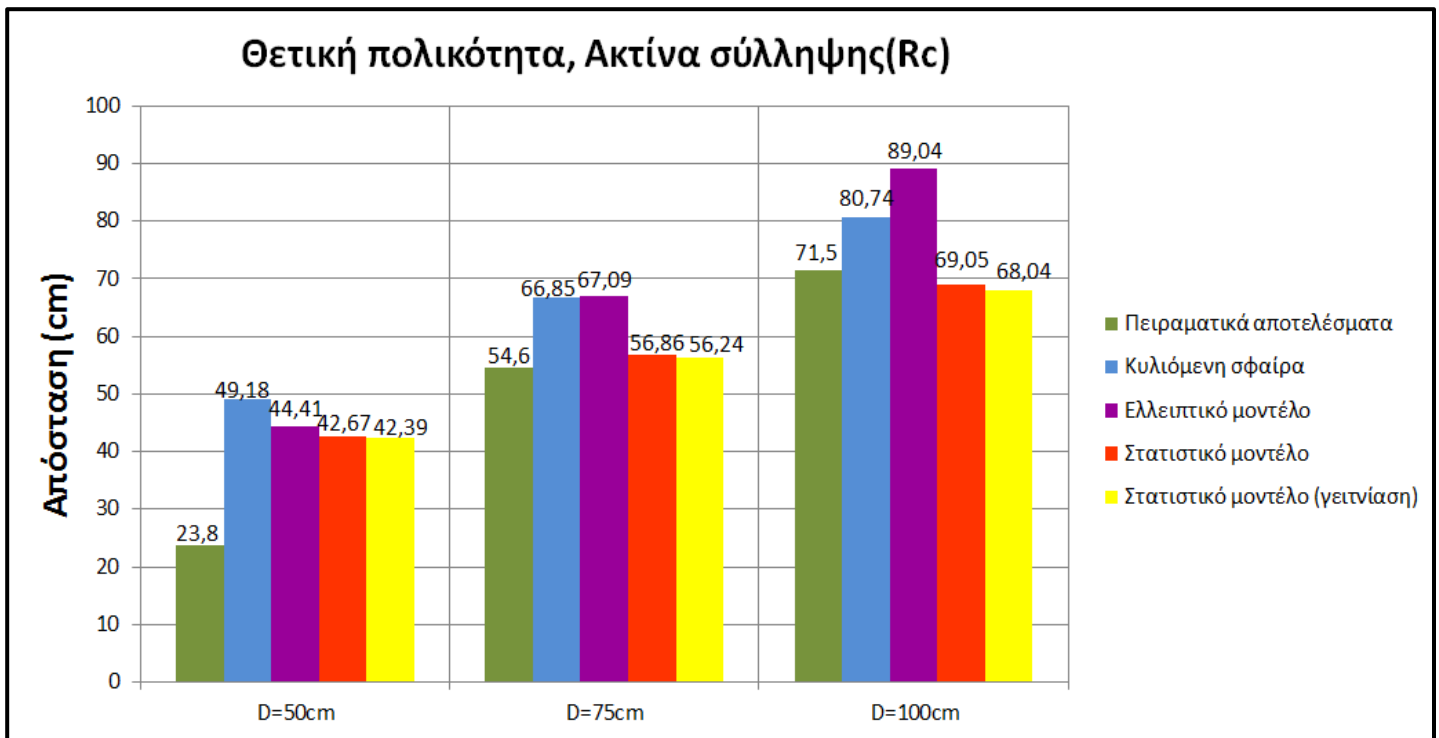


Σχήμα 4.12: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά μέθοδο για θετική πολικότητα.

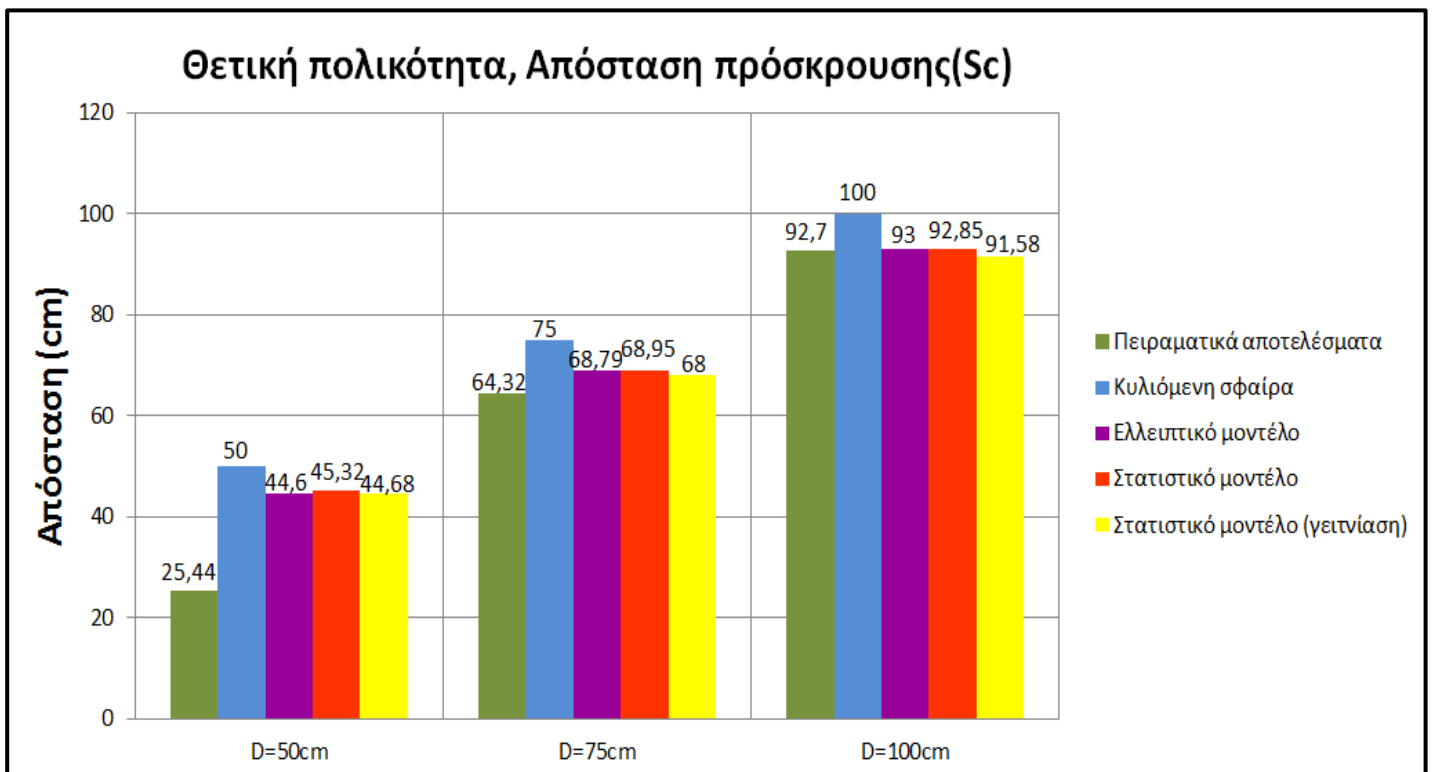
## Αρνητική Πολικότητα



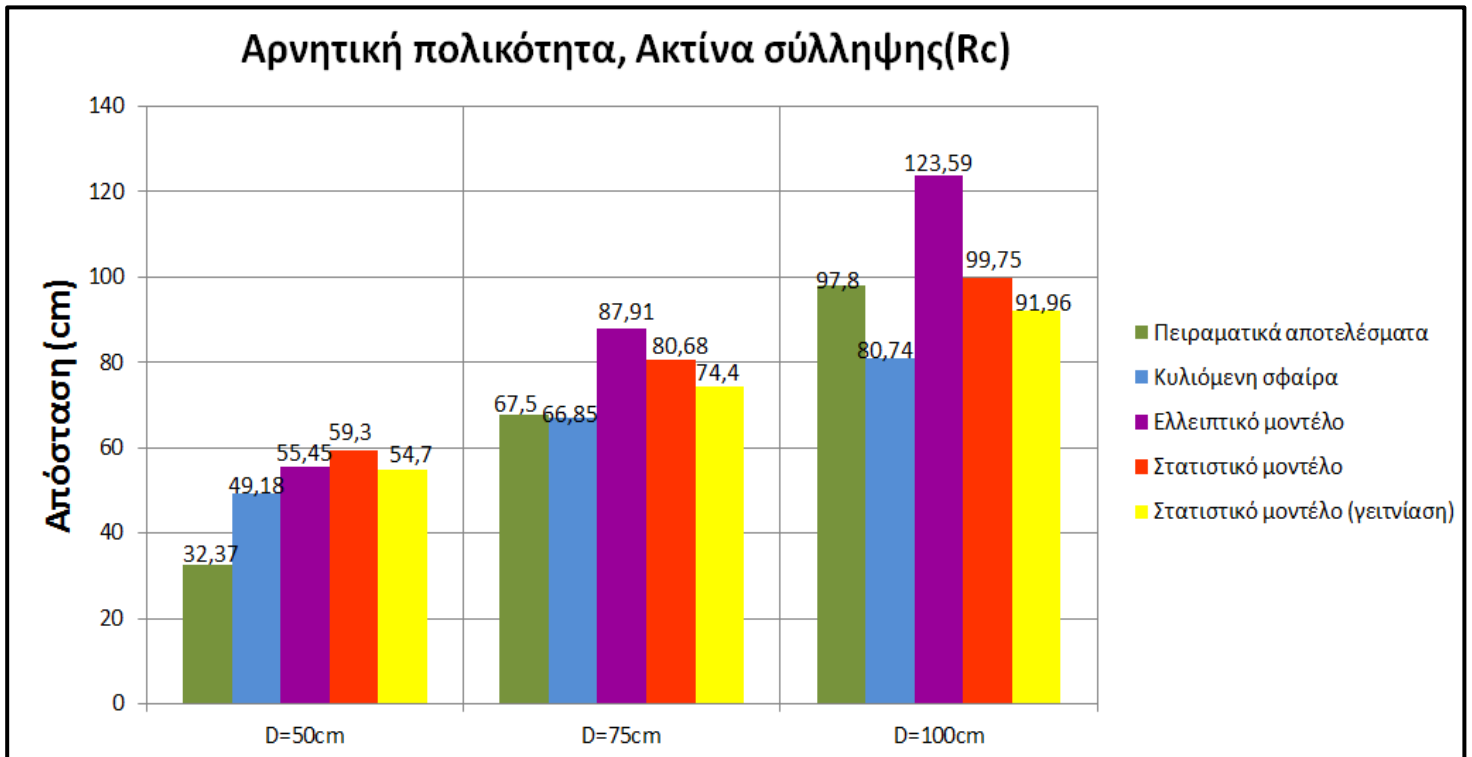
Σχήμα 4.13: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά μέθοδο για αρνητική πολικότητα.



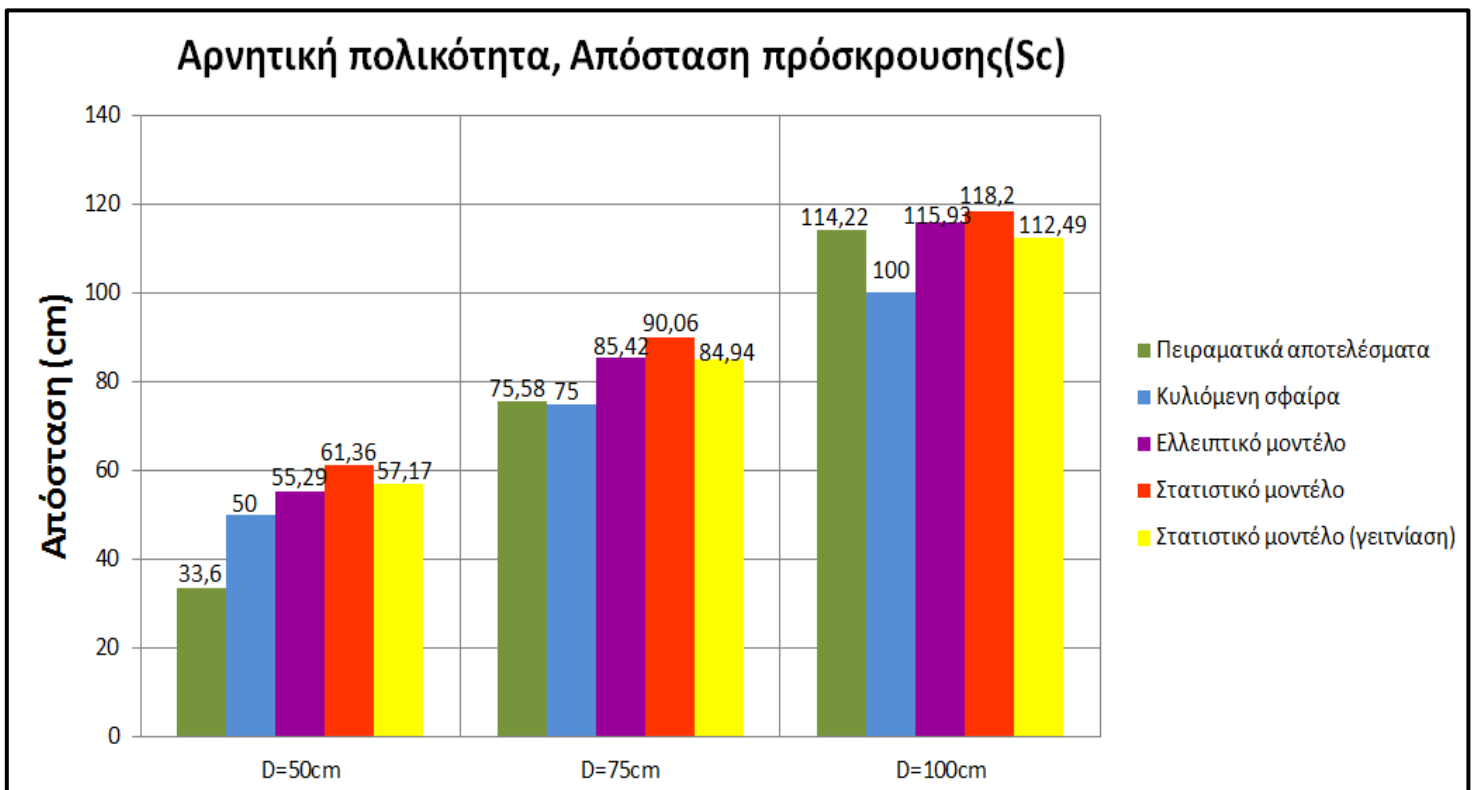
Σχήμα 4.14: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά ύψος φορτισμένης ράβδου. Θετική πολικότητα.



Σχήμα 4.15: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης κατηγοριοποιημένα ανά ύψος φορτισμένης ράβδου. Θετική πολικότητα.



Σχήμα 4.16: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά ύψος φορτισμένης ράβδου. Αρνητική πολικότητα.



Σχήμα 4.17: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης κατηγοριοποιημένα ανά ύψος φορτισμένης ράβδου. Αρνητική πολικότητα.

Για  $D=50\text{cm}$  τόσο σε θετική όσο και σε αρνητική πολικότητα φαίνεται ότι τα πειραματικά μας αποτελέσματα απέχουν αρκετά από τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα των άλλων μεθόδων. Αυτό οφείλεται στο ότι η φορτισμένη ράβδος βρίσκεται υπερβολικά κοντά στο πλοίο, με αποτέλεσμα αυτή να “βλέπει” το πλοίο σαν τη γειωμένη πλάκα πράγμα το οποίο αλλοιώνει τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων. Έτσι τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα πιο πάνω σχήματα για τα ύψη  $D=75\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$  φορτισμένης ράβδου-πλάκας είναι τα ακόλουθα:

Συγκρίνοντας το σχήμα 4.12 με το σχήμα 4.13 φαίνεται ότι οι πειραματικές τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα εν αντιθέσει με αυτές της θετικής πολικότητας. Αυτό επαληθεύεται στο ελλειπτικό και στο στατιστικό μοντέλο με ή χωρίς γειννίαση. Το μοντέλο που διαφέρει είναι αυτό της κυλιόμενης σφαίρας στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν η πολικότητα της κεραυνικής εκκένωσης, εξίσου οι ίδιες τιμές της ακτίνας σύλληψης και απόστασης πρόσκρουσης θετικής και αρνητικής πολικότητας. Επιπρόσθετα, επαληθεύεται ότι στο ελλειπτικό μοντέλο η ζώνης προστασίας που δημιουργείται στην αρνητική πολικότητα είναι μεγαλύτερη από αυτήν της θετικής πολικότητας. Επίσης για το ίδιο μοντέλο η απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-κεραίας είναι πάντα μικρότερη από την απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-πλάκας στην θετική πολικότητα δηλαδή ισχύει  $S < D$ , ενώ για την αρνητική πολικότητα πάντα ισχύει  $S > D$ . Τέλος από τα 2 αυτά γραφήματα φαίνεται ότι η ακτίνα σύλληψης και η απόσταση πρόσκρουσης του στατιστικού μοντέλου με γειννίαση έχουν μικρότερη τιμή από αυτές του μοντέλου χωρίς γειννίαση με μεγαλύτερη διαφορά στην αρνητική πολικότητα και μικρότερη διαφορά στην θετική πολικότητα.

Στο σχήμα 4.14 η πειραματική ακτίνα σύλληψης για θετική πολικότητα πλησιάζει τα αποτελέσματα του Τσοβίλη για όλα τα ύψη φορτισμένης ράβδου. Συγκεκριμένα σε ύψος  $D=75\text{cm}$  φορτισμένης ράβδου η πειραματική μέτρηση ήταν  $54,6\text{ cm}$ , τιμή πάρα πολύ κοντά στα  $56,86\text{cm}$  και  $56,24\text{cm}$  του στατιστικού μοντέλου χωρίς γειννίαση και του στατιστικού μοντέλου με γειννίαση αντίστοιχα. Για ύψος φορτισμένης ράβδου  $D=100\text{cm}$  ισχύει το ίδιο όπου η πειραματική ακτίνα σύλληψης βρέθηκε ίση με  $71,5\text{ cm}$ , τιμή η οποία σχεδόν ταυτίζεται με τα αποτελέσματα του στατιστικού μοντέλου και του στατιστικού με γειννίαση ( $69,05\text{cm}$  και

68,04 cm, αντίστοιχα). Επιπρόσθετα, η ακτίνα σύλληψης κυλιόμενης σφαίρας και ελλειπτικού μοντέλου έχουν σχεδόν ίδια τιμή για  $D=75\text{cm}$  και απέχουν περίπου 12cm από τα πειραματικά αποτελέσματα. Για  $D=100\text{cm}$  όμως η διαφορά ελλειπτικού μοντέλου πειραματικής τιμής αυξάνεται ακόμη περισσότερο στα 18cm περίπου, με την ακτίνα σύλληψης κυλιόμενης σφαίρας να βρίσκεται περίπου στη μέση ελλειπτικού μοντέλου – πειραματικής μέτρησης.

Στο σχήμα 4.15 φαίνεται ξεκάρα ότι η απόσταση πρόσκρουσης ελλειπτικού, στατιστικού χωρίς γειτνίαση και στατιστικού με γειτνίαση σχεδόν ταυτίζονται με τα πειραματικά αποτελέσματα για απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-πλάκας  $D=75\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$ . Η μόνη μέθοδος η οποία έχει μια απόκλιση από τα πειραματικά αποτελέσματα και τα άλλα μοντέλα είναι αυτή της κυλιόμενης σφαίρας. Συγκεκριμένα, για τα ύψη  $D=75\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$  οι αποστάσεις πρόσκρουσης της κυλιόμενης σφαίρας από τις πειραματικές τιμές είναι αυξημένες κατά 11cm και 7cm περίπου αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4.16 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά ύψος φορτισμένης ράβδου. Σε ύψος ράβδου-πλάκας  $D=75\text{cm}$  η πειραματική τιμή της ακτίνας σύλληψης συγκλίνει πιο πολύ με αυτή της κυλιόμενης σφαίρας με απόκλιση λιγότερη από 1 cm. Για  $D=100\text{cm}$  η πειραματική μας τιμή σχεδόν ταυτίζεται με την ακτίνα σύλληψης του στατιστικού μοντέλου χωρίς γειτνίαση η οποία βρίσκεται 2cm περίπου μικρότερη. Επιπρόσθετα, όσον αφορά τη μέθοδο του ελλειπτικού μοντέλου όσο αυξάνεται η απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-πλάκας τόσο πιο πολύ αυξάνεται η διαφορά της ακτίνας σύλληψης από όλες τις μεθόδους και τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τέλος, αναφορικά με τα αποτελέσματα του σχήματος 4.17 παρατηρείται ότι για  $D=75\text{cm}$  η μέθοδος η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην πειραματική απόσταση πρόσκρουσης και αποκλίνει σχεδόν μόνο 0.6cm είναι αυτή της κυλιόμενης σφαίρας. Η απόσταση πρόσκρουσης του ελλειπτικού μοντέλου βρίσκεται περίπου 10cm πιο πάνω από την πειραματική τιμή για το ίδιο ύψος. Εν αντιθέσει, η απόσταση πρόσκρουσης του στατιστικού μοντέλου χωρίς γειτνίαση είναι μεγαλύτερη 14cm περίπου, ενώ αυτή του στατιστικού με γειτνίαση είναι περίπου 9 cm μεγαλύτερη από την πειραματική. Αυξάνοντας την απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας στα 100cm φαίνεται ότι η πειραματική μας μέτρηση περιγράφεται αρκετά καλά μέσω του ελλειπτικού μοντέλου, του στατιστικού μοντέλου χωρίς γειτνίαση αλλά και του στατιστικού

μοντέλου με γειτνίαση. Από αυτές η μέθοδος του ελλειπτικού μοντέλου σχεδόν ταυτίζεται με την πειραματική τιμή. Με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας η απόσταση πρόσκρουσης υπολογίστηκε στα 100cm, μειωμένη γύρω στα 14cm από την πειραματική μέτρηση.

Παρακάτω φαίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.16 οι μέθοδοι των οποίων τα θεωρητικά αποτελέσματα είχαν τη πιο μεγάλη σύγκλιση με τις πειραματικές μετρήσεις ενώ στον πίνακα 4.17 οι μέθοδοι των οποίων τα θεωρητικά αποτελέσματα είχαν τη πιο μεγάλη απόκλιση με τις πειραματικές μετρήσεις.

	Θετική πολικότητα		Αρνητική πολικότητα	
	$R_c$	$S_c$	$R_c$	$S_c$
D=75	Στατιστικό μοντέλο (γειτνίαση)	Στατιστικό μοντέλο (γειτνίαση)	Μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας	Μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας
D=100cm	Στατιστικό μοντέλο (χωρίς γειτνίαση)	Στατιστικό μοντέλο (χωρίς γειτνίαση)	Στατιστικό μοντέλο (χωρίς γειτνίαση)	Ελλειπτικό μοντέλο

Πίνακας 4.16: Μέθοδοι των οποίων τα θεωρητικά αποτελέσματα είχαν τη μεγαλύτερη σύγκλιση με τις πειραματικές μετρήσεις

	Θετική πολικότητα		Αρνητική πολικότητα	
	$R_c$	$S_c$	$R_c$	$S_c$
D=75	Ελλειπτικό μοντέλο	Μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας	Ελλειπτικό μοντέλο	Στατιστικό μοντέλο (χωρίς γειτνίαση)
D=100cm	Ελλειπτικό μοντέλο	Μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας	Ελλειπτικό μοντέλο	Μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας

Πίνακας 4.17: Μέθοδοι των οποίων τα θεωρητικά αποτελέσματα είχαν τη μεγαλύτερη απόκλιση με τις πειραματικές μετρήσεις



## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα-Επόμενη μέρα

### 5.1 Συμπεράσματα

Το φαινόμενο σύλληψης του κεραυνού από πλοία διερευνήθηκε εργαστηριακά μέσω πειραμάτων κλίμακας. Η γειωμένη πλάκα αναπαριστά τη θάλασσα, η υπό τάση φορτισμένη ράβδος τον κατερχόμενο οχετό προεκκένωσης, και το μοντέλο πλοίου αναπαριστά ένα εμπορικό πλοίο πραγματικών διαστάσεων. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν για τη μελέτη των μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας και την αποτελεσματικότητα αυτών σε μεταλλικά πλοία συνοψίζονται ως εξής:

- Για  $D=50\text{cm}$  τόσο σε θετική όσο και σε αρνητική πολικότητα φαίνεται ότι τα πειραματικά μας αποτελέσματα απέχουν αρκετά από τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα των άλλων μεθόδων. Αυτό οφείλεται στο ότι η φορτισμένη ράβδος βρίσκεται υπερβολικά κοντά στο πλοίο, με αποτέλεσμα αυτή να “βλέπει” το πλοίο σαν τη γειωμένη πλάκα πράγμα το οποίο αλλοιώνει τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων.
- Με βάση τα ύψη φορτισμένης ράβδου-πλάκας  $D=75\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$ , το στατιστικό μοντέλο (χωρίς γειννίαση) είναι η μέθοδος της οποίας τα αποτελέσματά έχουν τη μεγαλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα τις περισσότερες φορές (3 στις 8). Αντιθέτως, το ελλειπτικό μοντέλο είναι η μέθοδος της οποίας τα αποτελέσματά έχουν τη μεγαλύτερη απόκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα τις περισσότερες φορές (4 στις 8).
- Για θετική πολικότητα τα πειραματικά αποτελέσματα ακτίνας σύλληψης τείνουν να ταυτιστούν για όλα τα ύψη της ράβδου με το στατιστικό μοντέλο χωρίς γειννίαση είτε με το στατιστικό μοντέλο βασιζόμενο σε γειννίαση. Ιδίως για τα ύψη  $D=75\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$  πειραματικά και θεωρητικά αποτελέσματα του στατιστικού μοντέλου με ή χωρίς γειννίαση σχεδόν ταυτίζονται. Επιπρόσθετα, για θετική πολικότητα τα πειραματικά αποτελέσματα απόστασης πρόσκρουσης τείνουν να ταυτιστούν για όλα τα ύψη της ράβδου με το στατιστικό μοντέλο χωρίς γειννίαση είτε με το στατιστικό μοντέλο βασιζόμενο σε γειννίαση είτε με το ελλειπτικό μοντέλο.
- Όσον αφορά στην αρνητική πολικότητα αμφότερες ακτίνα σύλληψης και απόσταση πρόσκρουσης πειραματικών μετρήσεων σε ύψος  $D=75\text{cm}$  φορτισμένης ράβδου-πλάκας, συγκλίνουν πάρα πολύ με αυτές της κυλιόμενης σφαίρας. Αντίθετα, σε ύψος  $D=100\text{cm}$  η

ακτίνα σύλληψης των πειραματικών μας μετρήσεων πλησιάζει περισσότερο από όλες τις μεθόδους αυτή του στατιστικού μοντέλου χωρίς γειτνίαση, ενώ η πειραματική απόσταση πρόσκρουσης προσεγγίζεται καλύτερα από το ελλειπτικό και το στατιστικό μοντέλο με γειτνίαση.

- Οι πειραματικές τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα εν αντιθέσει με αυτές της θετικής πολικότητας. Αυτό επαληθεύεται στο ελλειπτικό και στο στατιστικό μοντέλο με ή χωρίς γειτνίαση. Το μοντέλο που διαφέρει είναι αυτό της κυλιόμενης σφαίρας στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν η πολικότητα της κεραυνικής εκκένωσης, εξίσου οι ίδιες τιμές της ακτίνας σύλληψης και απόστασης πρόσκρουσης θετικής και αρνητικής πολικότητας.

## 5.2 Επόμενη μέρα

Για την επέκταση των μεθολογιών και συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας προτείνονται οι ακόλουθες εισηγήσεις:

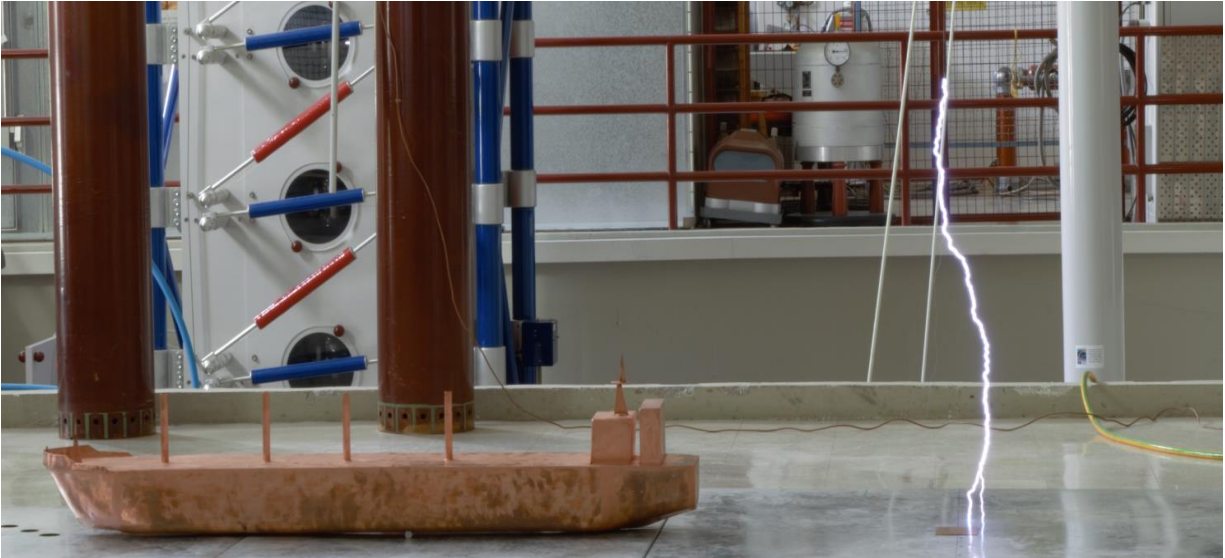
- Θα πρέπει να διερευνηθούν περισσότερα σημεία στο μοντέλο πλοίου ώστε να υπάρχει μια πληθώρα αποτελεσμάτων η οποία θα συντελέσει στην πιο ακριβή εξαγωγή συμπερασμάτων. Επίσης θα μπορούσε να ενταχθεί ένα τορροειδές στην πειραματική διάταξη το οποίο θα προσομοιώνει το νέφος.
- Οι εξισώσεις για την ακτίνα σύλληψης και απόσταση πρόσκρουσης του ελλειπτικού μοντέλου από τον S.Grzybowski προέκυψαν μέσω πειραματικών δοκιμών σε ακίδες τύπου Franklin. Η απόσταση της φορτισμένης ράβδου από τη γειωμένη πλάκα που χρησιμοποίησε ο S.Grzybowski ήταν από 100cm έως 250cm για θετική πολικότητα και από 100cm έως 150 για αρνητική πολικότητα. Στα πειράματά μας το εύρος του ύψους της φορτισμένης ράβδου ήταν από 50cm έως 100cm και για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η μελέτη μεγαλύτερων υψών για πιο άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα.
- Επιπρόσθετα, ο S.Grzybowski και η ερευνητική του ομάδα κατάφεραν να βελτιώσουν τις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις της ακτίνας σύλληψης και απόστασης πρόσκρουσης του ελλειπτικού μοντέλου. Έτσι προέκυψαν νέες εξισώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν την παράμετρο του ρεύματος του κεραυνού. Για αυτό το λόγο κρίνεται αναγκαία η μελέτη των

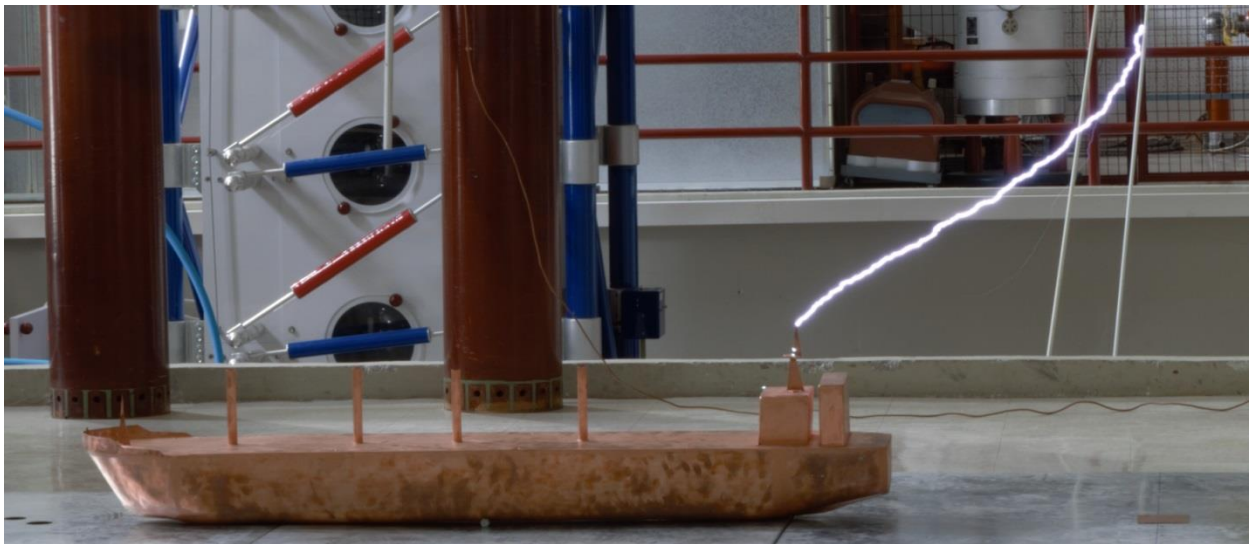
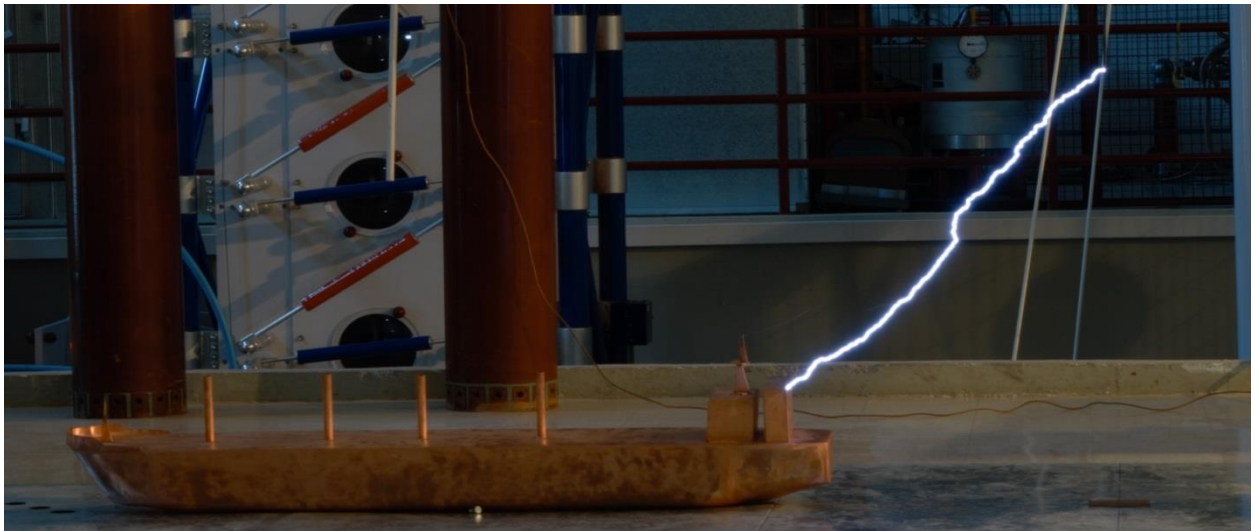
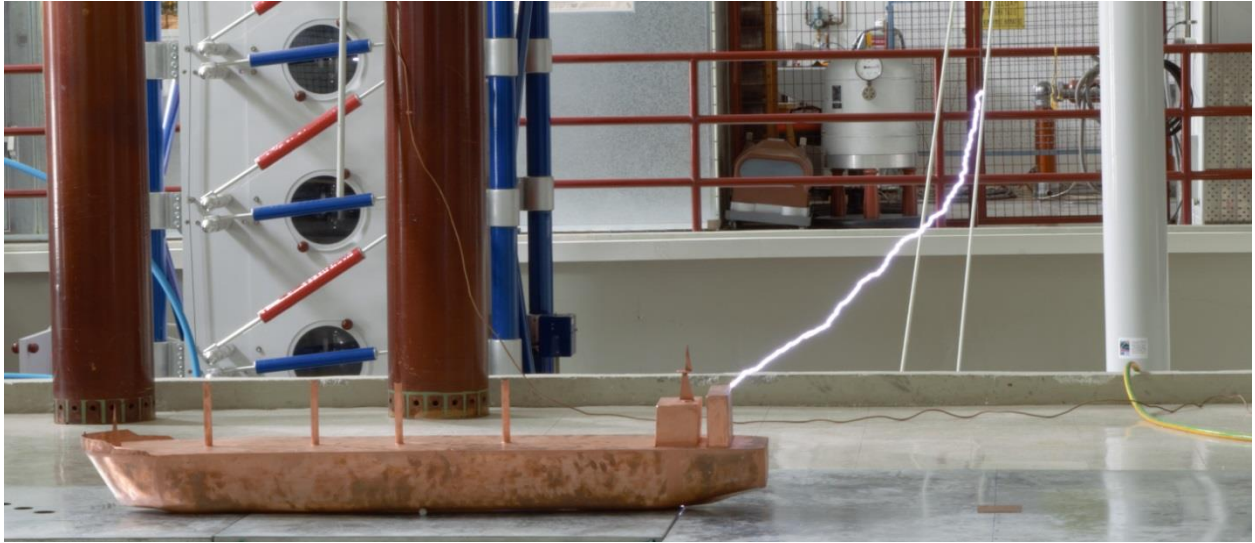
νέων εξισώσεων αυτών εντάσσοντας το ρεύμα ηλεκτρικής εκκένωσης σε μελλοντική διπλωματική εργασία.

- Η γεννήτρια κρουστικών τάσεων θα μπορούσε να τροποποιηθεί σε γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων ώστε να μελετηθεί η κατανομή του κρουστικού ρεύματος στο πλοίο.

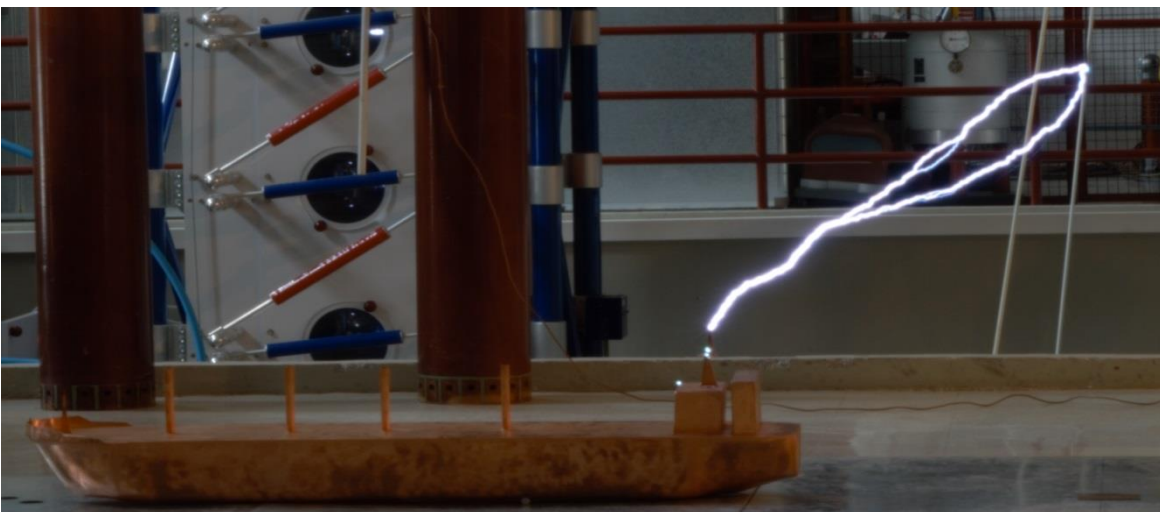
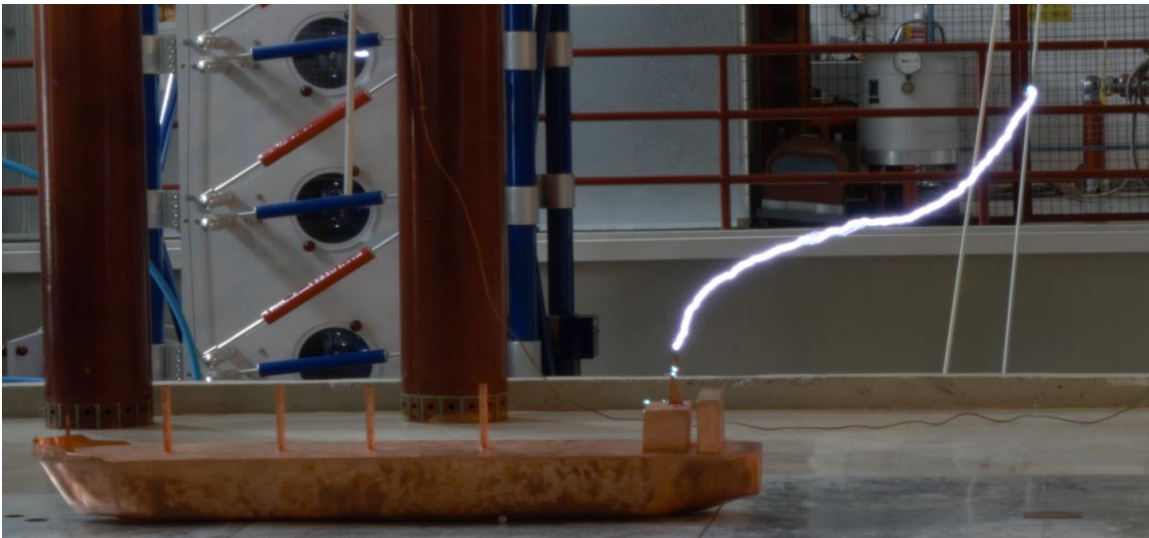
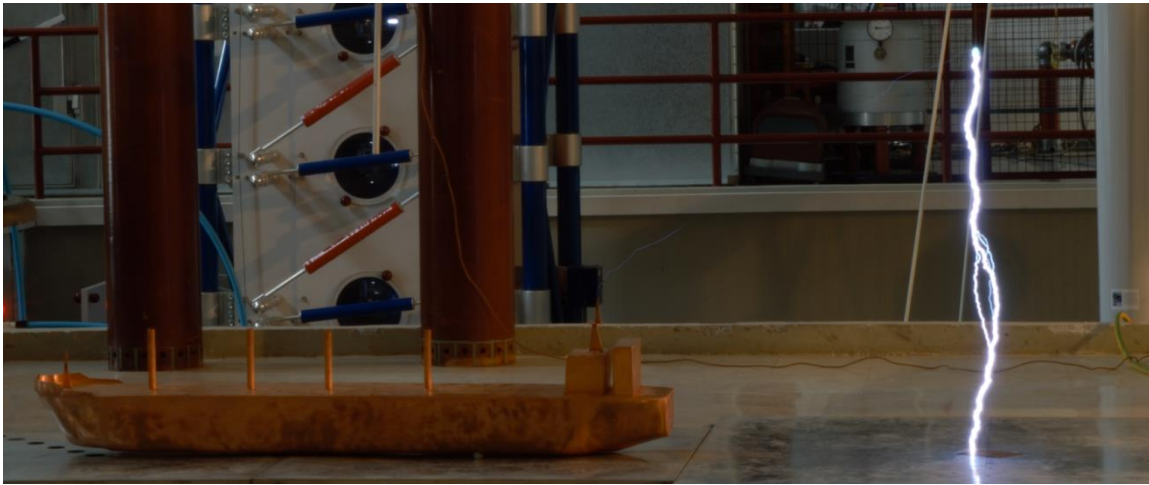
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Δείγμα εικόνων από τη διεξαγωγή του πειράματος**

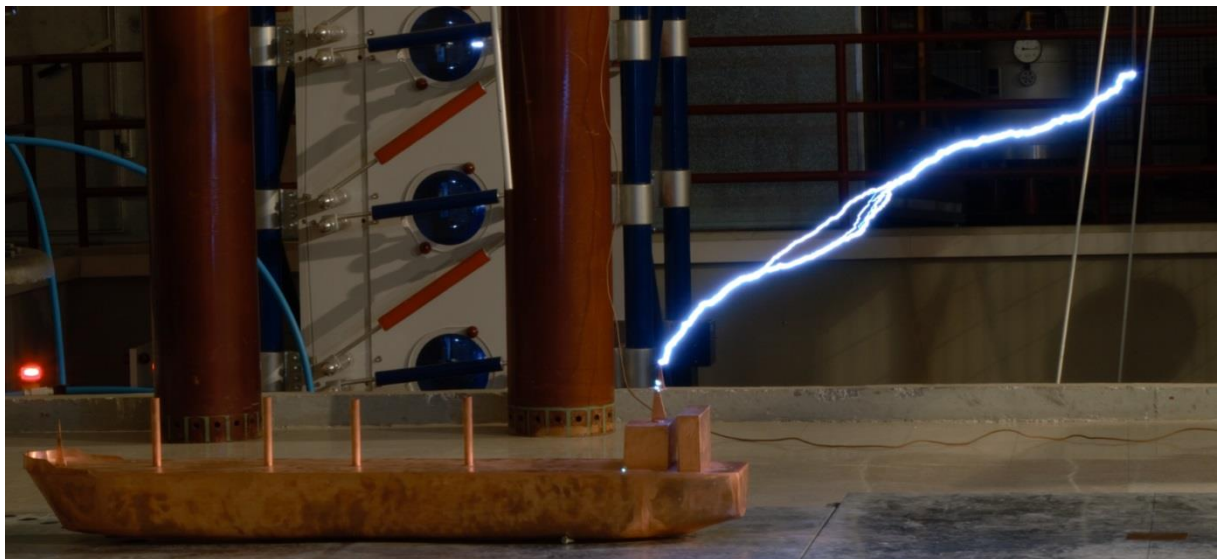
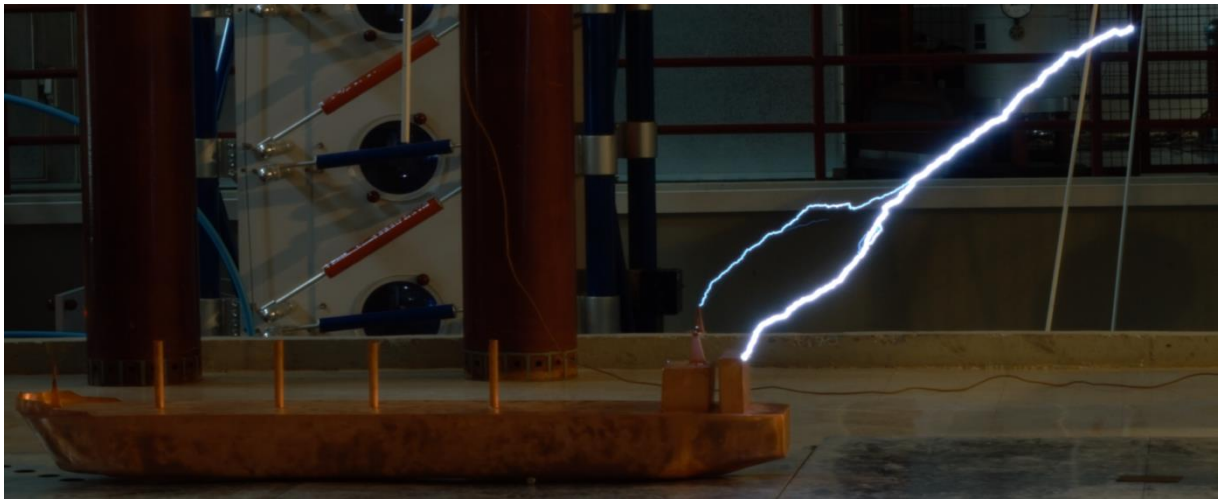
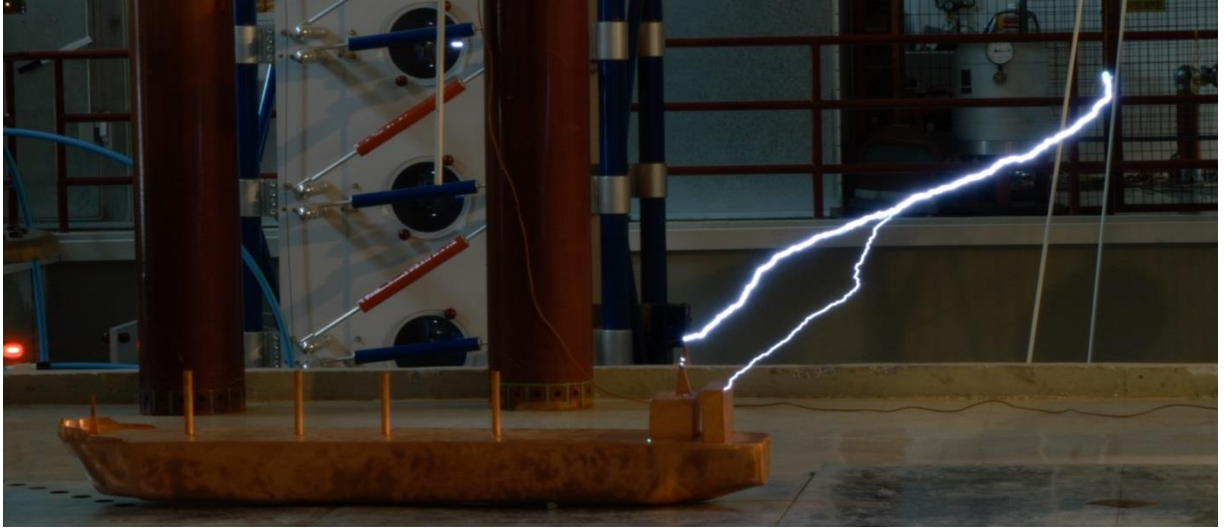
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Ύψος φορτισμένης ράβδου  $D=100\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα.**



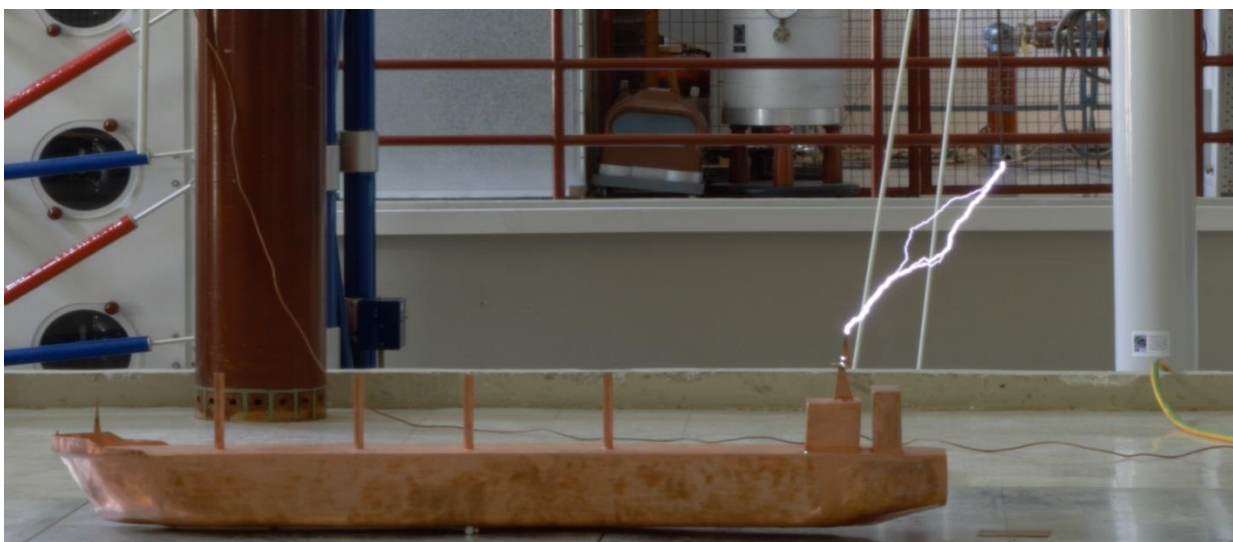


**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Ύψος φορτισμένης ράβδου  $D=100$  cm, Αρνητική Πολικότητα.**

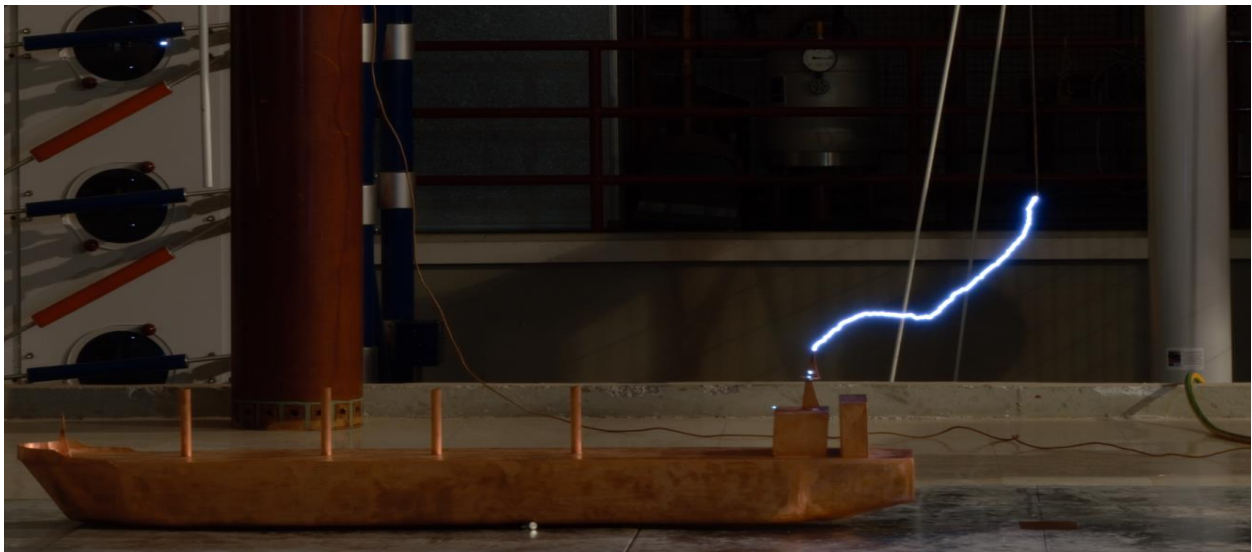
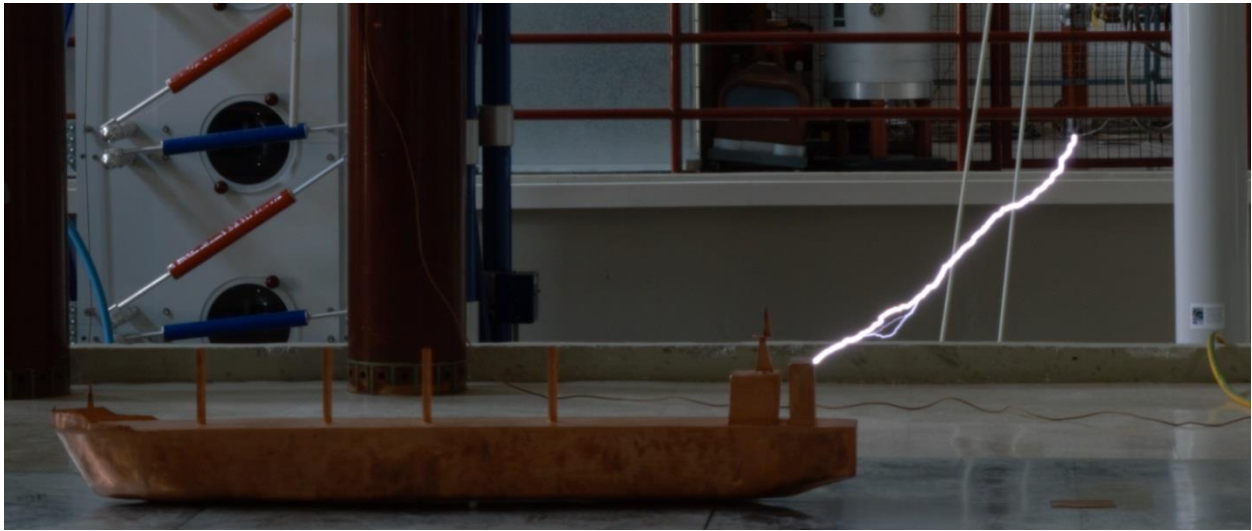
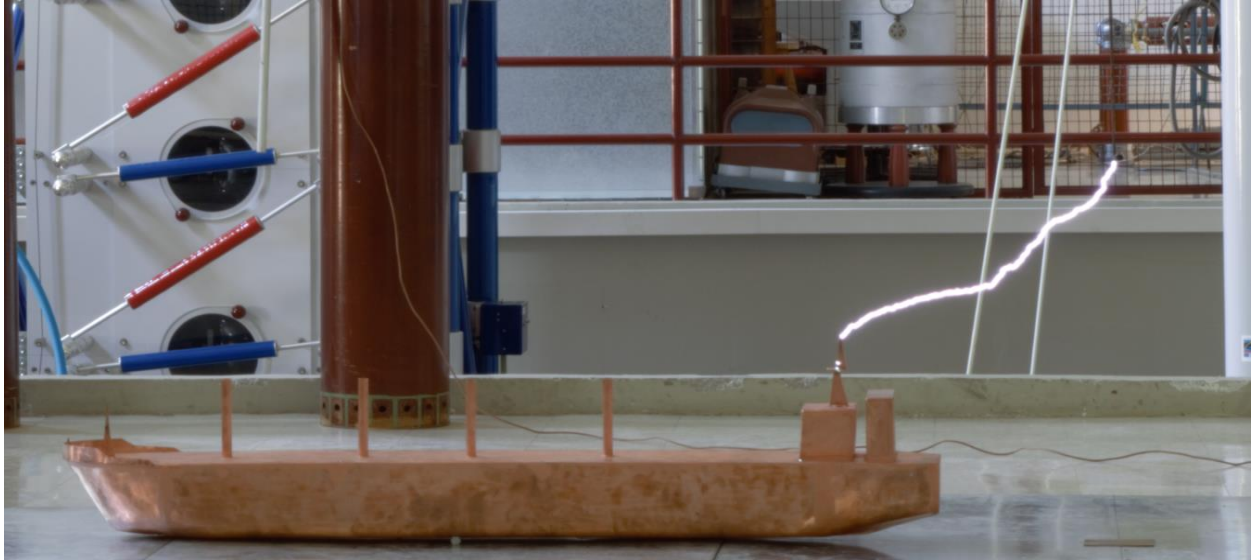




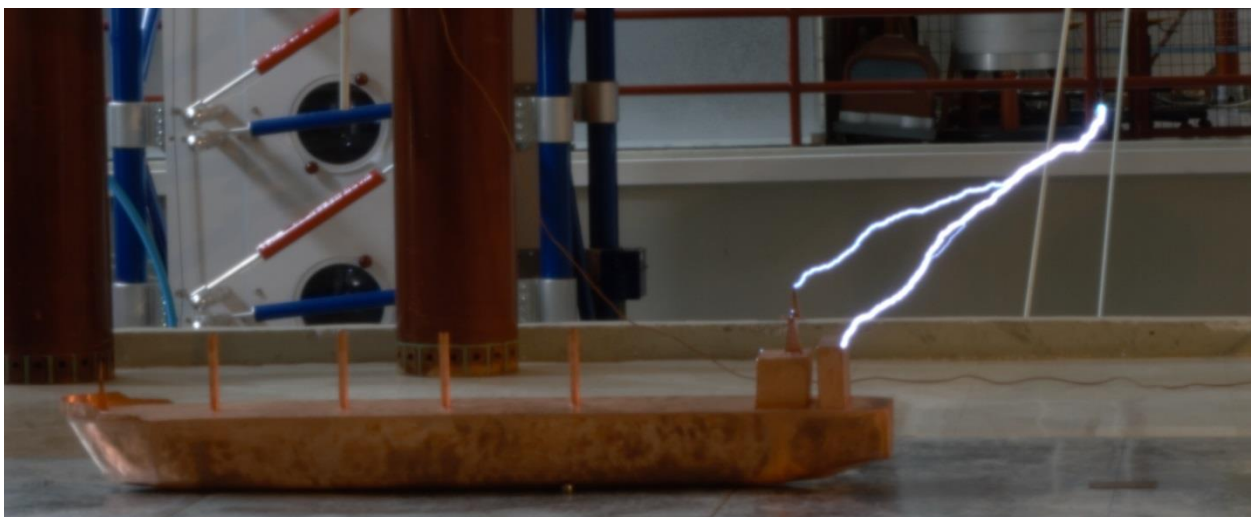
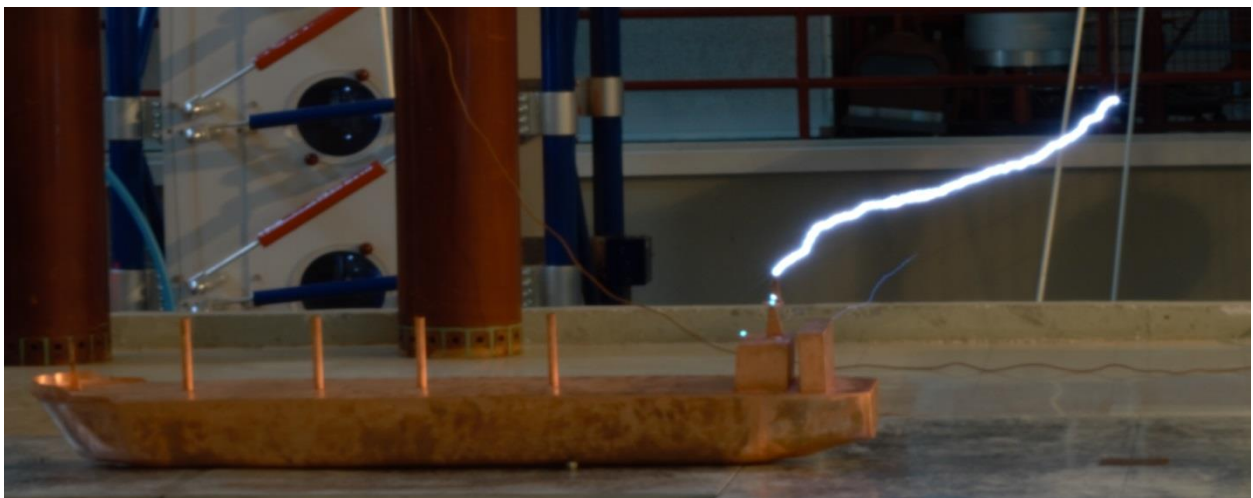
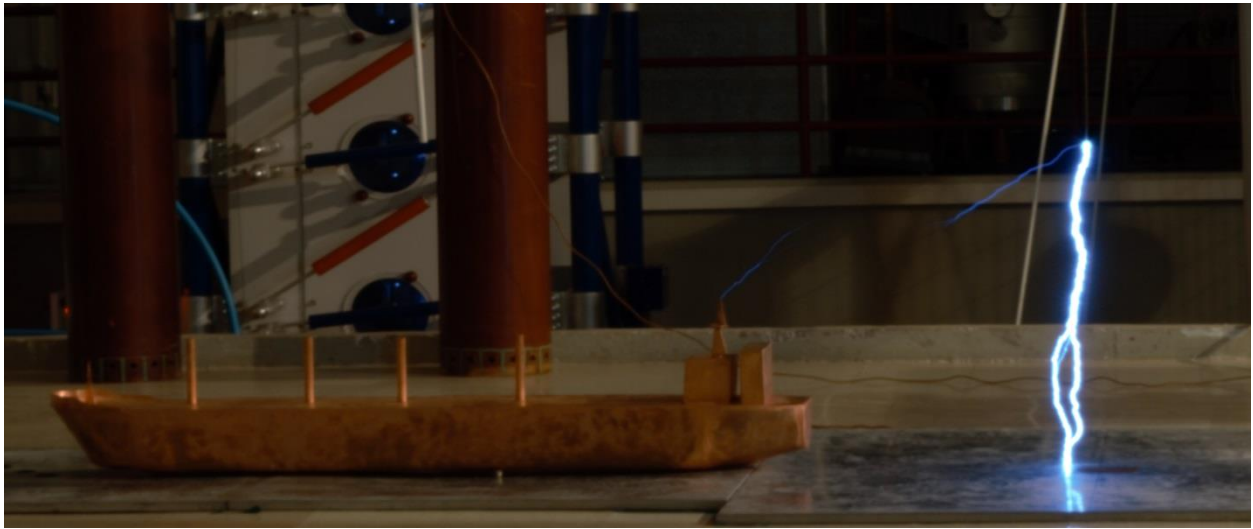
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Ύψος φορτισμένης ράβδου  $D=75$  cm, Θετική Πολικότητα.**

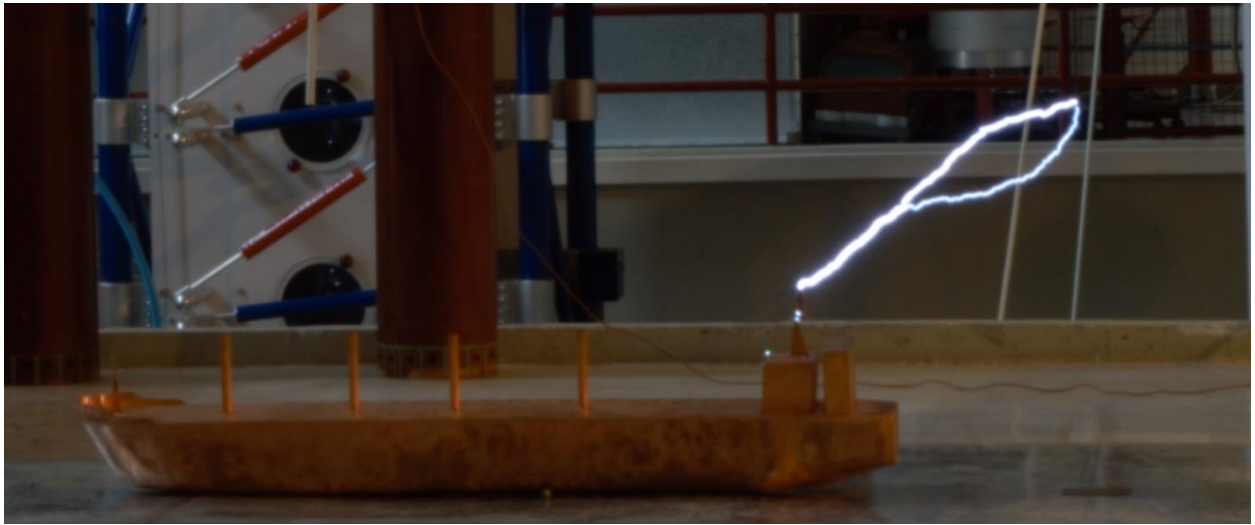
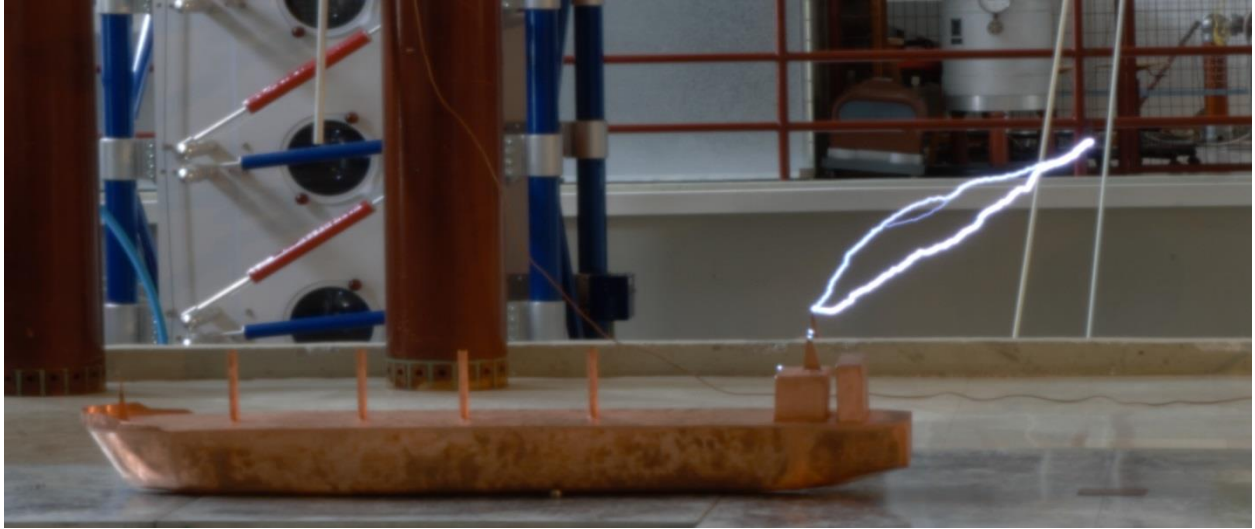






**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Ύψος φορτισμένης ράβδου  $D=75\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.**



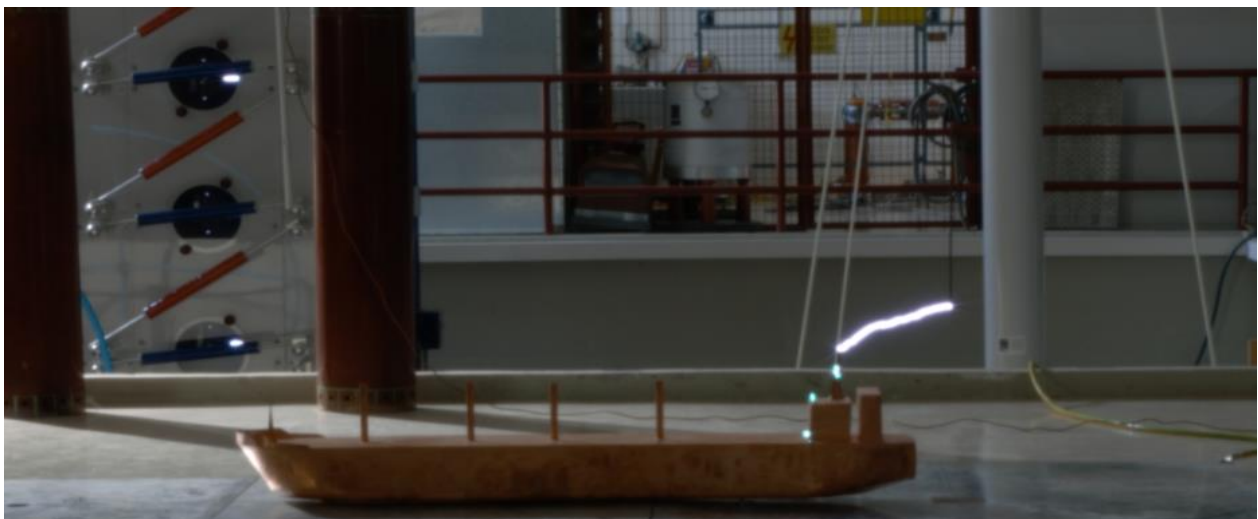
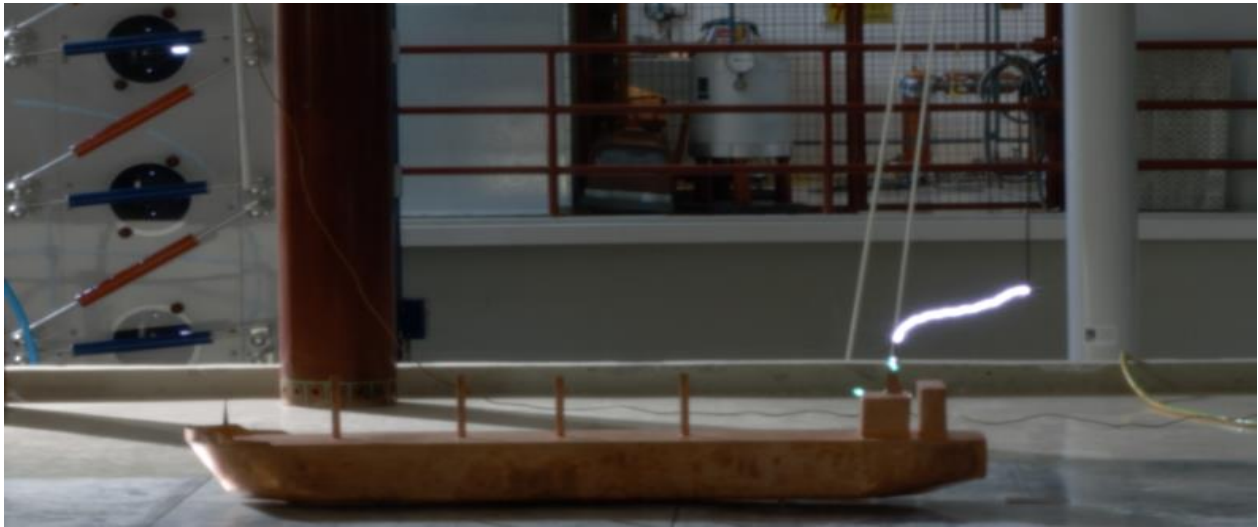


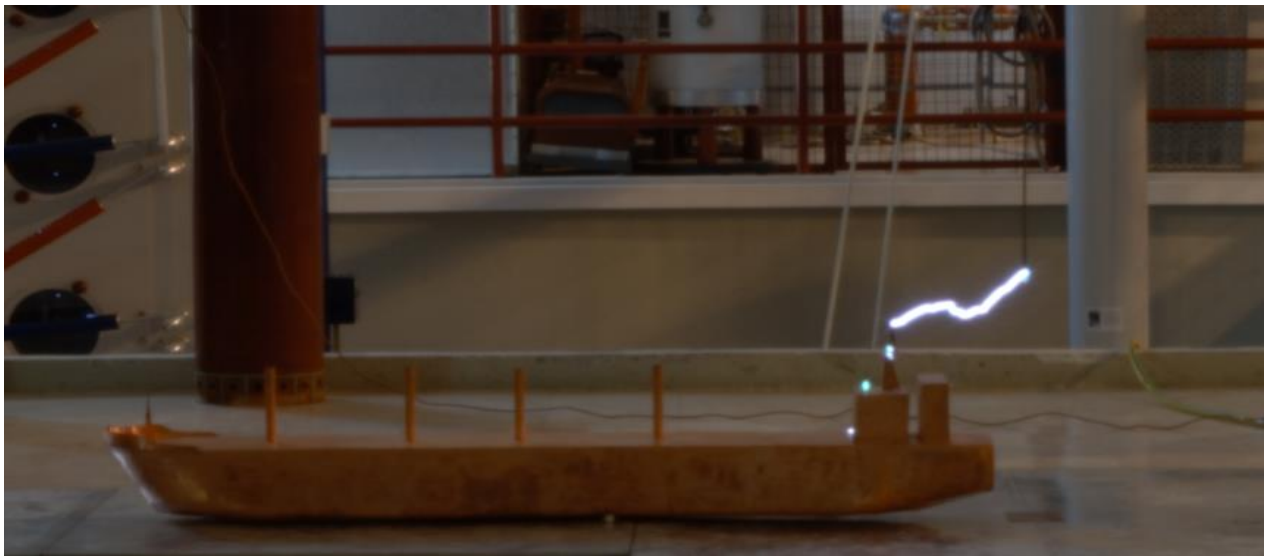
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Ύψος φορτισμένης ράβδου,  $D=50\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα.**





**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ: Ύψος φορτισμένης ράβδου  $D=50\text{cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.**





## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Martin A. Uman, "The lightning discharge", International Geophysics Series, Volume 39
- [2] <http://www.meteo.gr> , Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών – Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος
- [3] Χρήστος Χαλδούπης, "Εισαγωγικά στοιχεία ατμοσφαιρικής φυσικής", Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2009
- [4] Ι.Α. Σταθόπουλος, "Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, Οκτώβριος 1989
- [5] Πληροφορίες από <http://www.iqelectric.com/keravnos.htm>
- [6] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Lightning physics and effects", University of Florida, 2003
- [7] Εικόνες από <http://www.google.com>
- [8] C. Gomes and M. Z. A. Ab Kadir, "Protection of naval systems against electromagnetic effects due lightning", Progress in Electromagnetics Research, Vol. 113, pages 333-349, 2011
- [9] Martin A. Uman, "The Art and Science of Lightning Protection", University of Florida, 2008
- [11] BS EN/IEC 62305 Lightning protection standard, Σεπτέμβριος 2006
- [12] P.Y. Okyere, Ph.D & George Eduful, "Evaluation of Rolling Sphere Method Using Leader Potential Concept: A Case Study", University of Science and Technology Kumasi-Ghana
- [13] H. D. Betz, U. Shumann, P. Laroche, "Lightning: Principles, Instruments and Applications, 2009
- [14] N. Szedenik, "Rolling sphere -method or theory", Journal of Electrostatics, pages 51-51, 345-350, 2001
- [15] ERITECH, "Lightning Protection Handbook Designing to the IEC 62305 Series of Lightning Protection Standards"
- [16] A. A. Hossam-Eldin, Ehab A.M. Omran, "Maritime Structures and Ships Lightning Protection", Electrical Engineering Department Alexandria University, Egypt
- [17] F. D'Alessandro, J.R. Gumley, "A Collection Volume Method for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning", Journal of Electrostatics pages: 279-302, 2001
- [18] A. A. Hossam-Eldin, Ehab A.M. Omran "New Concept for Lightning Protection of Ships: The Leader Potential Concept Method", Electrical Engineering Department Alexandria University, Egypt
- [19] <http://www.marinelightning.com/>
- [20] Even M. Thomson, "A New Concept for Lightning Protection of Boats, Protect a Boat like a Building", Ph.D., 2007
- [21] Ronald W. Hotchkiss, Senior Member, IEEE and Andrea T. Haa, Member, IEEE, "Electric Ship Surge Environment", Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07



- [22] Ewen M.Thomson, "A Critical Assessment of the U.S. Code for the Lightning Protection of Ships", IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility, Vol.33, No.2, May 1991
- [23] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων ΕΜΠ, " Συμπληρωματικές Σημειώσεις Υψηλών Τάσεων", Αθήνα, Οκτώβριος 2012
- [24] S. Grzybowski, "Experimental Evaluation of Lightning Protection Zone used on Ship", Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07, IEEE 21-23 May 2007, Arlington USA, pages:215 - 220
- [25] S. Grzybowski, Y.Song, "Experimental Study of Rod Height and Impulse Polarity Impact on the Protection Zone", Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP'2004), Avignon, France, 13-16 September, 2004, pages: 372-377
- [26] Θωμάς Ε. Τσοβίλης, "Μοντέλο σύλληψης κεραυνού και εφαρμογές του σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας", Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη, 2010
- [27] High Voltages Test Techniques, IEC 60060-1, 1989
- [28] Yang Song, "Study of the lightning protection zone of the Franklin rod", Msc Thesis, Mississippi State University, Mississippi, August 2004
- [29] P.N Mikropoulos, T.E Tsovilis, "Striking Distance and Interception Probability", Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume:23 , Issue:3) pages: 1571 – 1580
- [30] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Statistical Method for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.20, pages: 202-211
- [31] D. P. Agoris, V. P. Charalambakos, E. Pyrgloti, S. Grzybowski, "A Computational Approach on the Study of Franklin Rod Height Impact on Striking Distance Using a Stochastic Model", Journal of ELECTROSTATICS, ELSEVIER, Vol.60, 2004, pages: 175-181
- [32] E. Pyrgloti, C. Menemenlis, "Factors Affecting the Discharge Parameters of Small Positive Rod-Plane Gaps in Atmospheric Air, ETEP vol. 2. No. 3, May/June 1992