



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

## Εργαστηριακή Προσομοίωση Κεραυνοπληξίας Πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**Αικατερίνης Α. Φορούλη**

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2015



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

197

## Εργαστηριακή Προσομοίωση Κεραυνοπληξίας Πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

**Αικατερίνης Α. Φορούλη**

**Καθηγητής:** Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

**Επιβλέπουσα:** Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17<sup>η</sup> Σεπτεμβρίου 2015

.....

Ι. Α. Σταθόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Φ. Β. Τοπαλής  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ι. Φ. Γκόνος  
Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
**Αικατερίνη Α. Φορούλη**

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

Copyright © Αικατερίνη Α.Φορούλη, 2015.

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

Ο κεραυνός είναι ένα αναγνωρίσιμο φυσικό φαινόμενο το οποίο πλήττει συχνά τα πλοία, αποτελώντας κίνδυνο ζημιάς του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, των συστημάτων πλοήγησης και επικοινωνίας. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η βελτίωση των υφιστάμενων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας ή ακόμα και η ανάπτυξη νέων. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη συγκεκριμένων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας και η σύγκρισή τους με τα πειραματικά αποτελέσματα της κεραυνοπληξίας πλοίου. Συγκεκριμένα 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, Φορτισμένη ράβδος, «Τοροειδές».

## **Abstract**

The lightning is an identifiable physical phenomenon that often affects ships, posing a risk of damage to electronic equipment, navigation and communication systems. It is therefore necessary to improve current methods for the estimation of the protection zone or even develop new. The purpose of this thesis is the study of specific protection zone estimation methods and their comparison with the experimental results of lightning ship. Specifically 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 protection area estimation methods.

**Keywords:** Methods of lightning protection, Attractive radius, Striking distance, Disruption voltage, Normal distribution, Charged rod, «Toroidal».

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη πειραματική 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 υπάρχουσών 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 συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία. Επιπρόσθετα, περιγράφονται τα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω κεραυνού και οι επαγόμενες τάσεις και αναλύονται οι αρνητικές επιπτώσεις που αυτές έχουν στα ηλεκτρικά συστήματα και στο σκελετό του πλοίου καθώς επίσης και οι θερμικές συνέπειες στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης.

**Κεφάλαιο 3:** Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διεθνείς κανονισμοί που αφορούν την αντικεραυνική προστασία πλοίων. Αρχικά εισάγονται βασικές έννοιες όπως η ακτίνα σύλληψης και η απόσταση πρόσκρουσης και αναλύονται οι σημαντικότερες μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας, ενώ ακολουθεί μια σύγκριση μερικών από τις μεθόδους αυτές. Τέλος περιγράφονται άλλα συστήματα αντικεραυνικής προστασίας όπως ο αγωγός καθόδου, η πλάκα γείωσης, η ισοδυναμική ζεύξη και επιπλέον προστασίες έναντι και δευτερευόντων αποτελεσμάτων.

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

**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.

## Ευχαριστίες

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, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, το χρόνο που αφιέρωσε, τη συνεχή καθοδήγησή του και το ειλικρινές ενδιαφέρον του για την ακαδημαϊκή μου πορεία. Η σιγουριά της άμεσης ανταπόκρισης σε κάθε προβληματισμό μου και η υποστήριξη του στις επιλογές μου αποτέλεσαν για μένα το κίνητρο να ολοκληρώσω με ενθουσιασμό τις σπουδές μου. Ο κ. Σταθόπουλος είναι ένας από τους πολυτιμότερους καθηγητές και ανθρώπους που συνάντησα στη φοιτητική μου ζωή.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη βοήθεια και τις συμβουλές του που υπήρξαν καθοριστικές στην εξέλιξη της εν λόγω εργασίας. Τον ευχαριστώ θερμότατα για το ενδιαφέρον που μου έδειξε, οι ιδέες και οι γνώσεις του με οδήγησαν με επιτυχία στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής.

Την Κυρία Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για τη συνεχή παρακολούθηση της πορείας της διπλωματικής μου, για την αμέριστη βοήθειά της και για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τους κ. Χρήστο Ηλία και κ. Αριστείδη Γιάννακα, μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την τεχνική υποστήριξη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Τις Κυρίες Νικολέτα Ηλία, Χρύσα Σιγάλα, Βασιλική Κονταργύρη για τις καρποφόρες και συνάμα ευχάριστες συζητήσεις μας και το φιλικό περιβάλλον που δημιούργησαν κατά τη διάρκεια της εργασίας μου στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη και την αγάπη που μου πρόσφεραν, τα αγαπημένα μου αδέρφια για την αμέριστη συμπαράσταση τους και όλους όσους έδωσαν αξία στα πέντε υπέροχα χρόνια της σπουδής μου στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.



# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	v
Abstract .....	vi
Πρόλογος.....	vii
Ευχαριστίες .....	viii
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΚΕΡΑΥΝΟΣ .....</b>	<b>12</b>
1.1. Κεραυνός, ορισμός .....	12
1.2. Ιστορική αναδρομή.....	12
1.3 Ατμοσφαιρικά ιόντα και αγωγιμότητα .....	14
1.4. Το φυσικό φαινόμενο του κεραυνού .....	18
1.4.1. Το ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο .....	18
1.4.2. Μηχανισμοί διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών .....	19
1.4.3. Τύποι και φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων .....	23
1.4.4 Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων.....	29
1.4.5 Ρεύμα – παράμετροι κεραυνού .....	30
1.4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό .....	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΕΡΑΥΝΟΥ- ΠΛΟΙΟΥ.....</b>	<b>33</b>
2.1 Φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την πτώση κεραυνού σε πλοίο .....	33
2.1.1 Σύνδεση κεραυνού-πλοίου .....	33
2.1.2 Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο.....	34
2.1.3 Διάχυση φορτίου στο νερό .....	34
2.1.4 Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου .....	35
2.2 Επιπτώσεις πρόπτωσης κεραυνού σε πλοία .....	36
2.2.1 Αλληλεπίδραση κεραυνικού πλήγματος με τα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων .....	36
2.2.2 Βλάβες στο σκελετό (hull) .....	41
2.2.3 Θερμικές συνέπειες στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης .....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΛΟΙΩΝ .....</b>	<b>48</b>
3.1 Αντικεραυνική προστασία πλοίων: Διεθνείς κανονισμοί.....	48
3.2 Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων .....	49
Σκάφη μη μεταλλικού σκελετού .....	49
Σκάφη μεταλλικού σκελετού .....	49

3.2.1 Τερματικό αέρα (αλεξικέραυνο) .....	50
3.2.2 Αγωγός καθόδου .....	77
3.2.3 Τερματικό γείωσης (πλάκα γείωσης).....	78
3.2.4 Ισοδυναμική ζεύξη.....	81
3.2.5 Επιπλέον προστασία .....	81
3.2.6 Προστασία έναντι δευτερευόντων αποτελεσμάτων .....	82
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....</b>	<b>84</b>
4.1 Πειραματική διάταξη.....	84
4.1.1 Γεννήτρια κρουστικών τάσεων Ε.Μ.Π.....	84
4.1.2 Σύστημα ελέγχου και μετρητικό σύστημα.....	85
4.1.3 Μοντέλο Πλοίου Υπό Κλίμακα .....	87
4.2 Διεξαγωγή πειράματος .....	90
4.2.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	90
4.2.2 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης.....	91
4.3 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μοντέλου πλοίου.....	93
4.3.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	93
4.3.2 Αναγωγή τάσης διάσπασης.....	94
4.3.3 Πειραματικά αποτελέσματα .....	97
4.4 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων –μαθηματικών σχέσεων .....	104
4.5 Διεξαγωγή πειράματος «τοροειδούς»-μοντέλου πλοίου.....	119
4.5.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	119
4.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα .....	121
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ .....</b>	<b>123</b>
5.1 Συμπεράσματα.....	123
5.1.1. Πείραμα ράβδου – μοντέλου πλοίου .....	123
5.1.2. Πείραμα «τοροειδούς» –μοντέλου πλοίου .....	124
5.2 Επόμενη μέρα .....	125
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Ενδεικτικές εικόνες από τη διεξαγωγή του πειράματος.....</b>	<b>127</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας $D=100\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα... ..	127
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας $D=100\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.....	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας $D=75\text{ cm}$ , Θετική Πολικότητα ....	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας $D=75\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα .....	135
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας, $D=50\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα ...	137

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας $D=50\text{cm}$ , Αρνητική Πολικότητα. 140	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ: Απόσταση «τοροειδούς»-μεταλλικής πλάκας $D=75\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα. .... 142	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η: Απόσταση «τοροειδούς»-μεταλλικής πλάκας $D=75\text{cm}$ , Αρνητική Πολικότητα. .... 149	
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	<b>156</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΚΕΡΑΥΝΟΣ

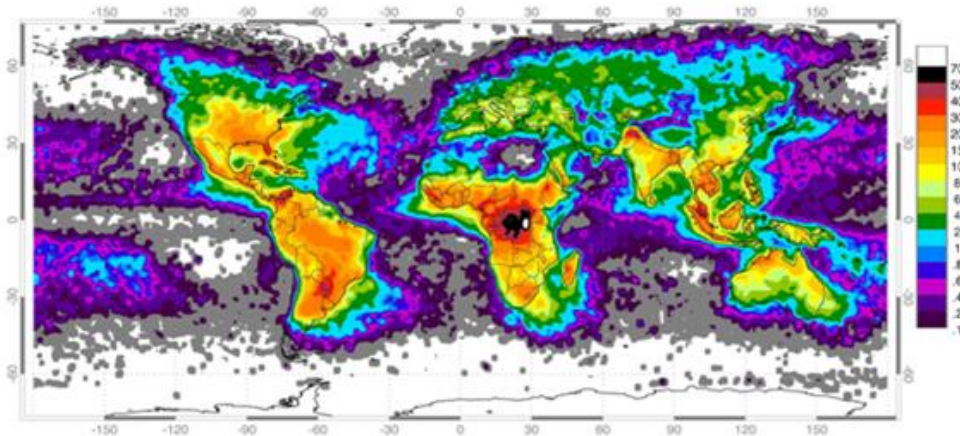
### **1.1. Κεραυνός, ορισμός**

Ο κεραυνός είναι μια ηλεκτρική εκκένωση ατμοσφαιρικής προέλευσης απλή ή πολλαπλή και μπορεί να συμβεί εντός του σύννεφου, μεταξύ δύο σύννεφων και μεταξύ νέφους και γης [1]. Η κεραυνική εκκένωση μπορεί να οριστεί ως μια μορφή ηλεκτρικής διάσπασης, χαρακτηριζόμενη από υψηλό ρεύμα, που συμβαίνει σε πολύ μεγάλα διάκενα. Ο κεραυνός εμφανίζεται όταν κάποια περιοχή της ατμόσφαιρας επιτυγχάνει μια ηλεκτρική φόρτιση αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε τα ηλεκτρικά πεδία που συνδέονται με τη φόρτιση να προκαλούν την ηλεκτρική διάσπαση του αέρα [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 η 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. Ο κεραυνός 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 [3]. Στην εικόνα 1.1 φαίνεται η πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων όπως καταγράφηκε από τη NASA σε μία περίοδο οκτώ ετών. Σύμφωνα με τον χρωματικό κώδικα που χρησιμοποιείται βλέπουμε ότι η πυκνότητα είναι πολύ μεγαλύτερη στις ηπειρωτικές σε σχέση με τις θαλάσσιες περιοχές, ενώ πολλά τμήματα του ωκεανού δεν συνοδεύονται καθόλου από σχετικά στοιχεία.

### **1.2. Ιστορική αναδρομή**

Από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα το σύνθετο φαινόμενο της σύλληψης του κεραυνού έχει αποτελέσει αντικείμενο διεξοδικής έρευνας με σκοπό τα αποτελέσματά της να αποσαφηνίσουν το μηχανισμό εξέλιξης του φαινομένου και να εφαρμοστούν στη σχεδίαση λειτουργικών και αξιόπιστων συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας [1].



Εικόνα 1.1: Πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων 1995-2003[12]

Ο κεραυνός, για χιλιάδες χρόνια, ήταν για τον άνθρωπο πηγή δέους και φόβου και η εμφάνιση των κεραυνών ερμηνευόταν ως σύμβολο θεϊκής οργής και σημάδι κινδύνου. Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος (1706-1790) ,συσχέτισε για πρώτη φορά το μέχρι τότε “άγνωστο” φαινόμενο του κεραυνού με το ηλεκτρικό ρεύμα και την ηλεκτρική εκκένωση. Το 1752, πραγματοποιήθηκε το πείραμά του, κατά το οποίο ύψωσε ένα χαρταετό εν μέσω καταιγίδας για να αποσπάσει ηλεκτρικούς σπινθήρες από το σύννεφα, με το οποίο κατάφερε να αποδείξει την ηλεκτρική φύση του κεραυνού [4]. Στο πείραμά του ο Φραγκλίνος θεώρησε ότι τα σύννεφα είναι φορτισμένα ηλεκτρικά και επομένως ο κεραυνός θα έπρεπε να φέρει ηλεκτρικό φορτίο. Για τον σκοπό αυτό στερέωσε στο πλαίσιο του αετού ένα σύρμα που συνδεόταν μέσω βρεγμένου σπάγκου με ένα κλειδί, το οποίο κρατούσε ο Φραγκλίνος με μια μεταξωτή κορδέλα. Ο ίδιος περιέγραψε αναλυτικά το πείραμά του, προκειμένου να αποφευχθούν οι θανατηφόρες ηλεκτροπληξίες, που δεν έλειπαν από τα πειράματα για τον ηλεκτρισμό: *«Στην άκρη του κάθετου ξύλου (του αετού) πρέπει να στηριχτεί ένα μεταλλικό έλασμα πολύ μυτερό, που να ξεπερνά το ξύλο κατά ένα πόδι. Στην άκρη του σπάγκου, κοντά στο χέρι, πρέπει να δεθεί μια μεταξωτή κορδέλα. Στο σημείο του κόμπου που συνδέει τον σπάγκο με την κορδέλα, πρέπει να τοποθετήσουμε ένα κλειδί. "Πετάμε" τον αετό, όταν βλέπουμε να έρχονται τα σύννεφα της καταιγίδας. Ο άνθρωπος που κρατάει τον σπάγκο πρέπει να βρίσκεται κάτω από το περβάζι μιας πόρτας ή ενός παραθύρου, ή να καλύπτεται με οποιονδήποτε τρόπο ώστε να μείνει στεγνή η μεταξωτή κορδέλα. Πρέπει, επίσης, να προσέξει να μην ακουμπήσει την πόρτα ή το παράθυρο. Μόλις φτάσει πάνω από τον χαρταετό το πρώτο σύννεφο, το μυτερό έλασμα τραβάει την ηλεκτρική φωτιά απ' αυτό, και έτσι ηλεκτρίζεται η όλη διάταξη· οι ελεύθερες ίνες του σπάγκου τεντώνονται προς όλες τις κατευθύνσεις, και έλκονται αν πλησιάσουμε το δάκτυλο μας. Όταν η βροχή διαβρέξει τον χαρταετό και τον σπάγκο, έτσι που να μπορεί να άγει ελεύθερα την ηλεκτρική φωτιά, θα διαπιστώσετε ότι αυτή ρέει ελεύθερα από το κλειδί προς το χέρι σας. Στο κλειδί φορτίζεται το φιαλίδιο (μια πρώιμη μορφή πυκνωτή) , οπότε μπορούμε να πάρουμε ηλεκτρική φωτιά που θα κάψει τα πνεύματα ή θα μας επιτρέψει να*

κάνουμε οποιοδήποτε από τα πειράματα του ηλεκτρισμού —τα οποία εκτελούνται συνήθως με τη βοήθεια μιας σφαίρας ή ενός κυλίνδρου που τρίβουμε. Έτσι, λοιπόν, αποδεικνύεται η σύμφυση του ηλεκτρισμού και του κεραυνού». Το πείραμα θα μπορούσε να αποβεί μοιραίο χωρίς το μεταλλικό κλειδί, το οποίο απορρόφησε το ηλεκτρικό φορτίο και λειτούργησε ως γειωτής. Με αυτόν τον τρόπο βρέθηκε εναλλακτικός τρόπος διοχέτευσης του ρεύματος στη γη και συνεπώς ανακαλύφθηκε το πρώτο αλεξικέραυνο εισάγοντας την αντικεραυνική προστασία στην ανθρώπινη γνώση. Την ίδια χρονιά ο L. Lemonnier, επαναλαμβάνοντας το πείραμα του Φραγκλίνου, διαπίστωσε ότι ακόμη και σε μια ανέφελη και καθαρή ημέρα ο αέρας είναι ηλεκτρικά φορτισμένος.

Αργότερα, το 19ο αιώνα, έγινε σημαντική πρόοδος στην κατανόηση των ιδιοτήτων του κεραυνού όταν εφευρέθηκαν η φωτογραφία και τα φασματοσκοπικά εργαλεία [5].

Το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από τον κεραυνό μετρήθηκε έμμεσα από τον Rockels (1897-1900, Γερμανία). Για τον σκοπό αυτό ο Rockels ανέλυσε το μαγνητικό πεδίο που επάγεται από το ρεύμα που δημιουργεί ο κεραυνός και με αυτόν τον τρόπο έλαβε κατ'εκτίμηση τις τιμές του ρεύματος [6].

Η μελέτη του κεραυνού στις μέρες μας χρονολογείται με την έναρξη των πειραμάτων του C.T.R Wilson, ο οποίος πρώτος χρησιμοποίησε τις μετρήσεις από το ηλεκτρικό πεδίο, για να εκτιμήσει τη δομή των φορτίων της ηλεκτρικής καταιγίδας που εμπλέκεται στις εκκενώσεις του κεραυνού.

Η έρευνα συνεχίστηκε με σταθερά βήματα ως τα τέλη του 1960 όταν η μελέτη του κεραυνού έγινε ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Αυτή η αύξηση ενδιαφέροντος απορρέει από τον κίνδυνο χτυπήματος από κεραυνό που διατρέχουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα των ηλεκτρονικών υπολογιστών και άλλων συσκευών, καθώς επίσης και τα εξελιγμένα όργανα που χρησιμοποιούνται για μετρήσεις και παρατηρήσεις στα αεροδιαστημικά οχήματα, τα αεροπλάνα, τα πλοία και τα κτίρια [7].

### **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:

$$\frac{dQ}{dt} = -aQ \quad (1.1)$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση (1.1) προκύπτει  $Q(t)=Q_0 \cdot e^{-at}$  (1.2) 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,  $\lambda < 2000 \text{ \AA}$  (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 σωματίδια, όπως θετικά φορτισμένοι πυρήνες Ηλίου  $\text{He}^{++}$  (ακτίνες  $\alpha$ ) ή ηλεκτρόνια (ακτίνες  $\beta$ ) και ακτίνες  $\gamma$ , 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 :

$$q = \alpha n^2 + \beta n N \quad (1.3)$$

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  $\beta n N$ , ενώ ο όρος ανασύνδεσης  $\alpha n^2$  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 ( $\sim 10\text{-}15\%$ ) 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 :

$$k_i = (q_i / 2m_i) (1/\bar{U}) \quad (1.4) \quad \text{με} \quad \bar{U} = (3KT/2m_i)^{1/2} \quad (1.5)$$

όπου  $(q_i/m_i)l$  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  $1\text{-}2 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{Vs)}$ , ενώ των μεγάλων είναι  $10^{-8} \text{-} 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{Vs)}$ . 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  $j_i^\pm = k_i^\pm n_i^\pm e E$ , στο ρεύμα που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, υπό την επίδραση του πεδίου  $E$ .

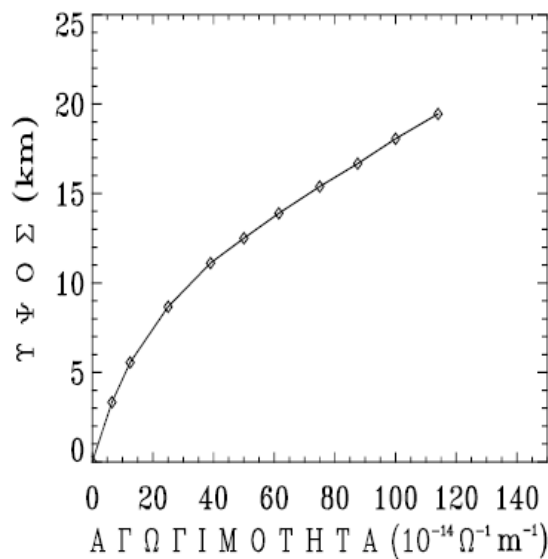
Έτσι η ολική πυκνότητα ρεύματος είναι :



$$J = \sum_i (j_i^+ + j_i^-) = \sum_i (k_i^+ n_i^+ e_i^+ + k_i^- n_i^- e_i^-) E = \lambda E \quad (1.6)$$

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 1.1 δίνει μια εικόνα της μεταβολής της αγωγιμότητας  $\lambda$  με το ύψος, όπου οι τιμές που φαίνονται είναι απλά αντιπροσωπευτικές.



Σχήμα 1.1: Τυπική καμπύλη μεταβολής της ατμοσφαιρικής αγωγιμότητας με το ύψος [9].

Το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του αγωγού, που αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας αυτής, είναι  $E = \sigma / \epsilon_0$ , 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  $Q = \int_s \sigma ds$  (1.7). Υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στο περιβάλλον του αγωγού τα ιόντα κινούνται προς και από τον αγωγό παράγοντας ρεύμα ίσο με:

$$I = -\frac{dQ}{dt} = \int_s J \cdot ds = \int_s \lambda \cdot E ds = \frac{\lambda}{\epsilon_0} \int_s \epsilon_0 \cdot E ds = \frac{\lambda Q}{\epsilon_0} \quad (1.8)$$

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

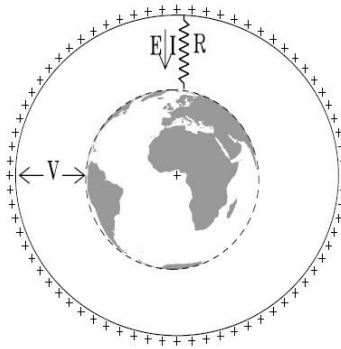
$$Q(t) = Q_0 \exp\left(-\frac{\lambda t}{\epsilon_0}\right) \quad (1.9)$$

Από την σχέση (1.9) 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 [26].

## **1.4. Το φυσικό φαινόμενο του κεραυνού**

### **1.4.1. Το ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο**

Το ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο υπό συνθήκες καλοκαιρίας έχει στην επιφάνεια του εδάφους τιμές μεταξύ 100 και 400 V/m, τιμές που μειώνονται ταχύτατα όσο απομακρυνόμαστε από το έδαφος (αυτό ισχύει για μικρές σχετικά απομακρύνσεις) . Η ανάπτυξη του ως άνω αναφερθέντος ηλεκτρικού πεδίου υπό συνθήκες καλοκαιρίας αποδίδεται στην ύπαρξη ενός στρώματος της ιονόσφαιρας κατειλημμένου με θετικά ηλεκτρικά φορτία, γνωστού ως στρώματος ή ζώνης Heaviside, το οποίο βρίσκεται σε μια μέση απόσταση κοντά στα 100km από την επιφάνεια του εδάφους. Η ζώνη Heaviside τροφοδοτείται με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από τις καταιγίδες που εξελίσσονται διαρκώς γύρω από τη γη. Δεδομένου ότι η επιφάνεια της γης είναι φορτισμένη αρνητικά σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο με κατεύθυνση από την ατμόσφαιρα προς τη γη, ενώ ταυτόχρονα συμπεραίνουμε ότι ουσιαστικά ζούμε μέσα σε ένα πολύ μεγάλης χωρητικότητας ( $\sim 0,05F$ ) σφαιρικό πυκνωτή. Η διεύθυνση και το μέγεθος του παραπάνω πεδίου εξαρτώνται 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 [8],[9].



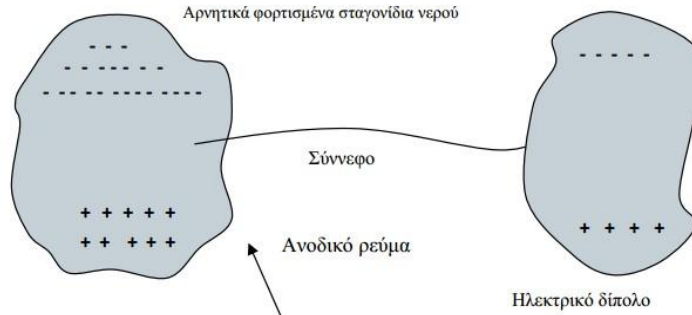
**Εικόνα 1.2:** Ηλεκτρικό ανάλογο του συστήματος γη-ιονόσφαιρα είναι ο σφαιρικός πυκνωτής, εσωτερικός αγωγός του οποίου είναι η επιφάνεια της γης και εξωτερικός η ιονόσφαιρα. Η κατώτερη ατμόσφαιρα αποτελεί το μεταξύ των αγωγών διηλεκτρικό, μέσω του οποίου είναι δυνατή η διαρροή φορτίων που δίνουν το συνεχές ρεύμα από την ιονόσφαιρα στην γη [9].

## 1.4.2. 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 υποθεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων. Τα τρία φαινόμενα είναι το φαινόμενο διασποράς, ισχυράς ψύξεως και διαρρήξεως.

### 1.4.2.1 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, εμφανίζοντα ηλεκτρικό φορτίο, όπως ακριβώς και τα σταγονίδια νερού που γεμίζουν το χώρο κοντά στους καταρράκτες. Με αυτόν το τρόπο το σύννεφο εμφανίζεται σαν ένα ηλεκτρικό δίπολο με το θετικό φορτίο στην κάτω περιοχή του.

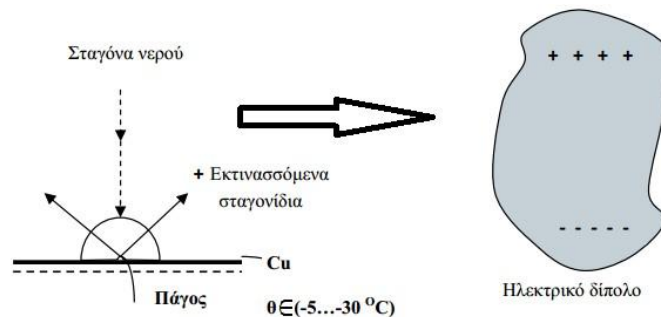


**Εικόνα 1.3:** Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διασποράς [8].

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°C, οδηγούμαστε σε αμφιβολία στο 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 [8].

#### 1.4.2.2 Φαινόμενο ισχυράς ψύξεως

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται καταρχήν το πειραματικό του ανάλογο (εικόνα 1.4) : Σε πλάκα χαλκού υπό θερμοκρασία -5...-30°C, 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 σε 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.

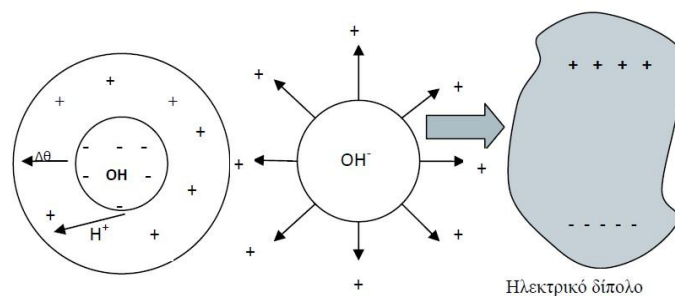


**Εικόνα 1.4:** Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο ισχυράς ψύξεως [8].

Στην περίπτωση του διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του σύννεφου 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 σύννεφου. 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 αμελητέα ηλεκτρικά φορτία πάνω σε αυτήν μόνο όταν οι σταγόνες ύδατος περιλαμβάνουν ίχνη προσμίξεως όπως υδροξείδιο αμμωνίου ( $NH_4OH$ ) [8].

### 1.4.2.3 Φαινόμενο διαρρήξεως

Για να γίνει πιο κατανοητός ο μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων, θεωρούμε έναν κρύσταλλο πάγου όπου το εσωτερικό του (πυρήνας) διατηρείται ακόμη σε υγρή κατάσταση (εικόνα 1.5). 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 κινούνται προς το περίβλημα, στο οποίο προσδίδουν θετικό φορτίο. Τα σχετικά δυσκίνητα ιόντα  $OH^-$  μένουν στον πυρήνα του κρυστάλλου, στον οποίο προσδίδουν αρνητικό φορτίο.



**Εικόνα 1.5:** Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διαρρήξεως

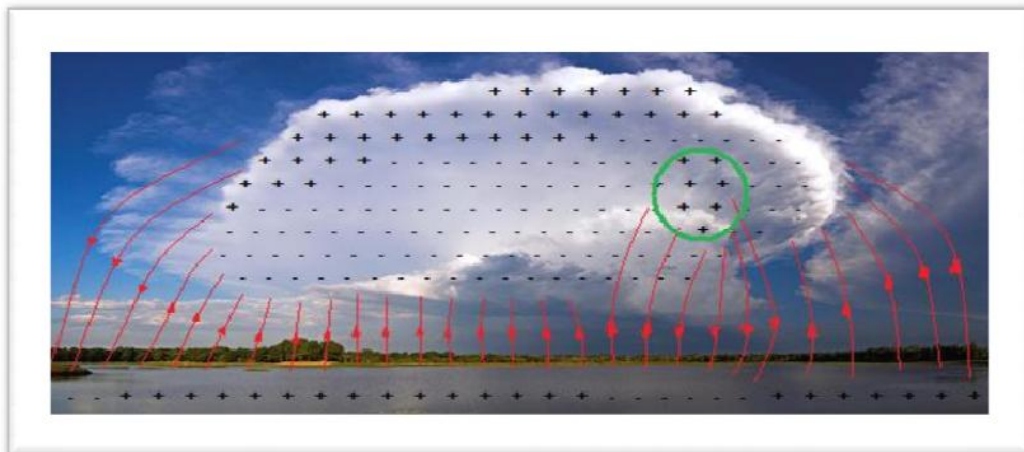
[8].

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 στο σύννεφο, με τα αρνητικά φορτία στη βάση του νέφους.

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

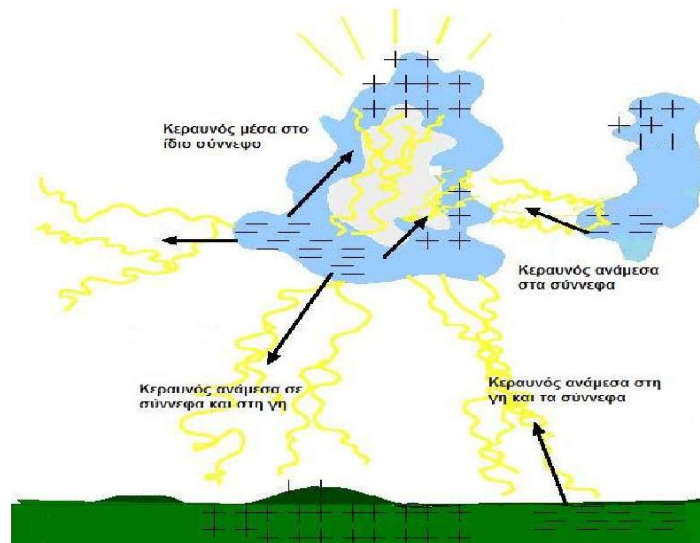
- A) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία τόσο θετικά, όσο και αρνητικά, σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Με λίγα λόγια η φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα σύννεφα κατά κανόνα παρουσιάζουν στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας, που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες Cb και στο πάνω μέρος τους ένα φορτίο θετικής πολικότητας. 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 (εικόνα 1.6) .
- B) Η πυκνότητα και η διασπορά των φορτίων και των δύο πρόσημων 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) [8].



**Εικόνα 1.6:** Κατανομή του φορτίου εντός του νέφους και ηλεκτρικό πεδίο νέφους-γης [10].

### 1.4.3. Τύποι και φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων

#### 1.4.3.1. Τύποι κεραυνικών εκκενώσεων



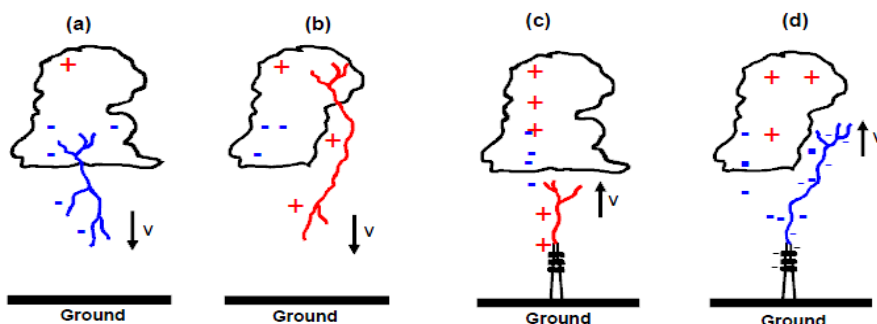
Εικόνα 1.7: Τα είδη των κεραυνών και η κατανομή του φορτίου στα νέφη κατά την διάρκεια μια καταιγίδας [10].

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

#### A) Κεραυνοί μεταξύ νέφους και γης ή και αντίστροφα

Οι κεραυνοί αυτοί παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή κοντά στο νέφος, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, ή κοντά στη Γή, οπότε έχουμε εκκένωση ανερχόμενη. Σαν πολικότητα της εκκένωσης μεταξύ σύννεφου και γης λαμβάνεται η πολικότητα του φορτίου του κάτω μέρους του νέφους που την προκάλεσε [8].

Με βάση την παρατηρούμενη πολικότητα εκκένωσης που καταλήγει στο έδαφος και την κατεύθυνση διάδοσης του αρχικού οχετού, έχουν αναγνωρισθεί τέσσερα διαφορετικά είδη κεραυνών μεταξύ νέφους και εδάφους, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 1.8.



Εικόνα 1.8: Είδη κεραυνών μεταξύ νέφους και εδάφους (a)Αρνητικός κατερχόμενος οχετός (b)Θετικά κατερχόμενος οχετός (c)Θετικά ανερχόμενος οχετός (d)Αρνητικά ανερχόμενος οχετός [29].

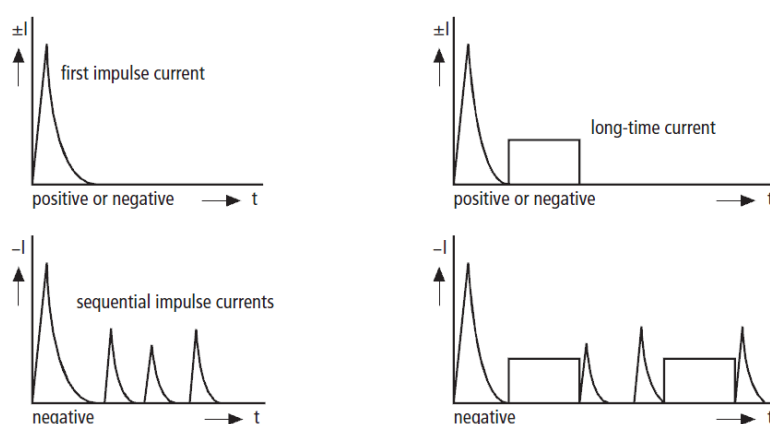
#### 1) Κατερχόμενη αρνητική εκκένωση

2) Ανερχόμενη αρνητική εκκένωση

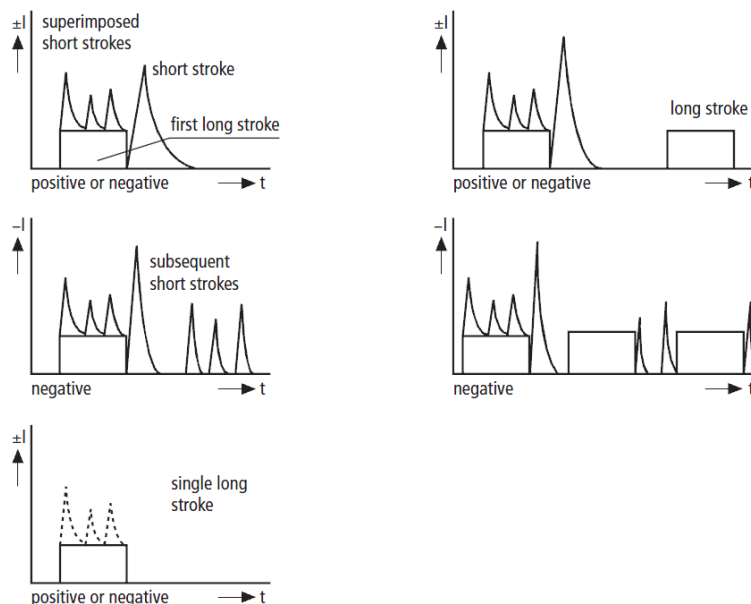
3) Κατερχόμενη θετική εκκένωση

4) Ανερχόμενη θετική εκκένωση.

Πιστεύεται ότι οι κατερχόμενες αρνητικές εκκενώσεις αποτελούν το 90% ή και περισσότερο του παγκόσμιου ποσοστού εκκενώσεων μεταξύ νέφους και εδάφους, και ότι το 10%, ίσως και λιγότερο, αποτελούν οι κατερχόμενες θετικές εκκενώσεις. Οι ανερχόμενες εκκενώσεις (συνήθως οι ανερχόμενοι κερανοί είναι θετικά φορτισμένοι) θεωρείται ότι μπορούν να σχηματιστούν μόνο σε ψηλά αντικείμενα (από 100m και πάνω) ή σε αντικείμενα μέσου ύψους που βρίσκονται σε κορυφές βουνών.



Σχήμα 1.2: Κυματομορφές ρεύματος κατερχόμενων οχενών [28].



Σχήμα 1.3: Κυματομορφές ρεύματος ανερχόμενων οχενών [28].



## **B) Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα**

Οι κεραυνοί μέσα στα νέφη είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος εκφορτίσεως. Στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση δημιουργείται ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές από μερικές εκατοντάδες έως 1000 Amperes. Η διαδικασία συμβαίνει μέσα στο νέφος και έξω από αυτό φαίνεται σαν διαχέουσα λαμπρότητα που τρεμοσβήνει [8], [10].



**Εικόνα 1.9:** Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα [10].

## **Γ)Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα**

Κεραυνοί αυτού του τύπου εκδηλώνονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1km και μικρότερο των 12km. Οι κεραυνοί αυτοί έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου, έως και 40 km [8].



**Εικόνα 1.10:** Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα [10].

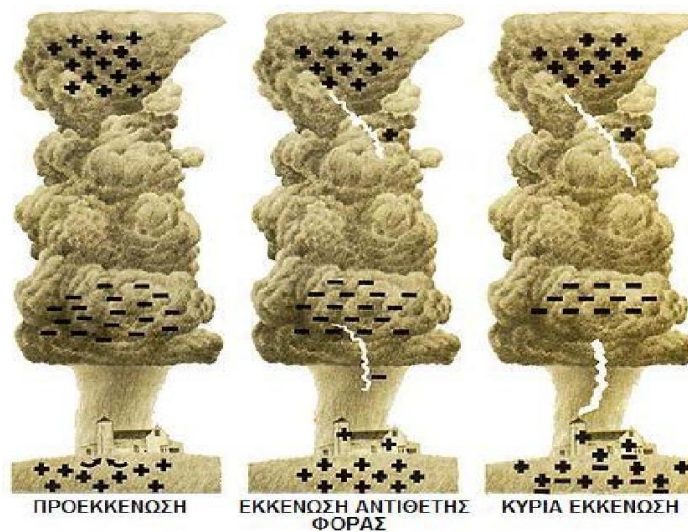
### **1.4.3.2.Οι φάσεις της κεραυνικής εκκένωσης**

Οι φάσεις μια κεραυνικής εκκένωσης είναι τρεις και φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:

#### **A) Προεκκένωση**

Β) Εκκένωση αντίθετης φοράς

Γ) Κύρια εκκένωση

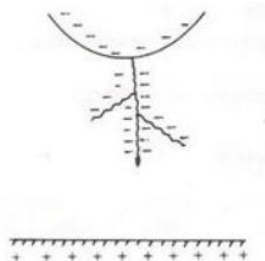


Εικόνα 1.11: Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων (Προεκκένωση-Εκκένωση αντίθετης φοράς-Κύρια εκκένωση) [10].

### Α) 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 στην εικόνα 1.12).



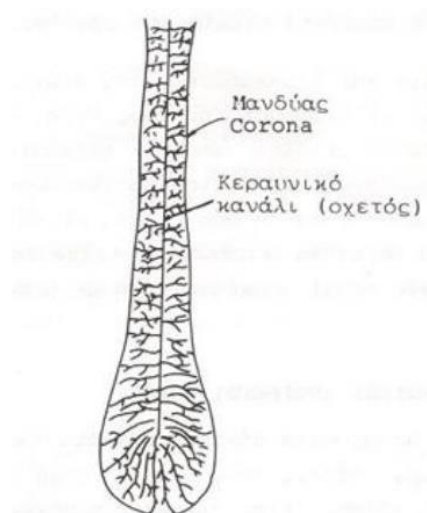
Εικόνα 1.12: Έναρξη εκκένωσης του κεραυνού [8]

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. Έχουμε, κατά συνέπεια, τη δημιουργία υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που σε μια διαδικασία ανακύκλωσης συμβάλλει στην προώθησή του προς τη γη. Έτσι η προεκκένωση, αφού ξεκινήσει, αναπτύσσεται από μόνη της στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου, εφ' όσον τροφοδοτείται από την πλευρά του σύννεφου με μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου.

Ενδέχεται να υπάρξουν διακλαδώσεις του αγωγίμου οχετού, που όμως δεν καταλήγουν σε γεφύρωση του 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 [8].

## **B) Εκκένωση αντίθετης 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 (στεμματοειδούς εκκενώσεως) 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. Καθώς τώρα ο οχετός κατέρχεται στη γη αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο της γης. Έτσι, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί το φαινόμενο Corona, το οποίο 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. Στην εικόνα φαίνεται η μορφή που έχει ο οχετός και ο μανδύας Corona [8].



**Εικόνα 1.13:** Κεραυνικό κανάλι (οχετός) [8].

### Γ) Κύρια εκκένωση

Η κύρια εκκένωση (πλήγμα επιστροφής) είναι η τελευταία φάση της κεραυνικής εκκένωσης. Στη φάση αυτή που πραγματοποιείται με μεγάλη ταχύτητα, έχουμε 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. Η μεγάλη λαμπρότητα του ηλεκτρικού τόξου εξηγεί και το γεγονός ότι ο κεραυνικός οχετός συχνά οδηγεί σε παροδικές θαμβώσεις [9].

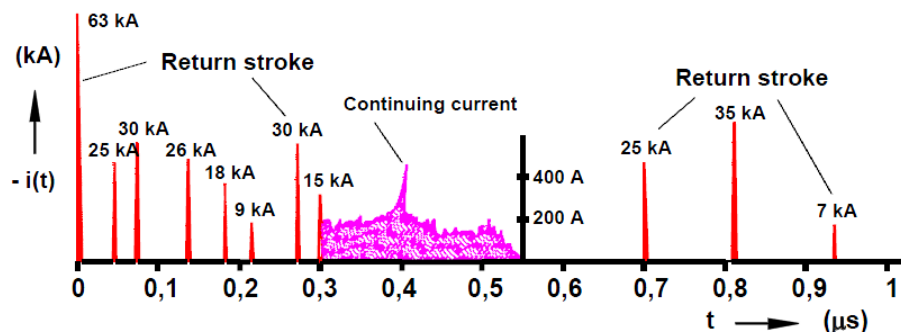
### Επανάληψη φαινομένου ηλεκτρικών εκκενώσεων



**Εικόνα 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 [9].

Η διεργασία της εκκένωσης μπορεί να τελειώσει μετά την κύρια εκκένωση. Συνήθως όμως υπάρχει επανάληψη του φαινομένου μία ή και περισσότερες φορές, με τη νέα εκκένωση να ακολουθεί το ήδη σχηματισμένο και ιονισμένο κανάλι. Σε περίπτωση αρνητικών εκκενώσεων συμβαίνουν, συνήθως, περισσότερες από μια επαναλήψεις του φαινομένου της κύριας εκκένωσης, ενώ αντίθετα σπάνια επαναλαμβάνεται το φαινόμενο

της κύριας εκκένωσης για θετική εκκένωση. Το φαινόμενο της επανάληψης της κύριας εκκένωσης περιγράφεται ως εξής: 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 σχετός προεκκένωσης και φυσικά προτιμά να διαδίδεται μέσω του προϋπάρχοντος ιονισμένου καναλιού με ταχύτητα περίπου ίση με  $2 \cdot 10^6$  m/s. Η δεύτερη αυτή εκκένωση (dart leader), φτάνει στη γη σε 2ms περίπου, και αμέσως ακολουθείται από ένα νέο χτύπημα επιστροφής λιγότερο ισχυρό από το πρώτο. Η εκκένωση (dart leader), σχετός επιστροφής, μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές 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. Ένα ρεύμα διαρκείας ακολουθεί ακριβώς μετά από έναν σχετό επιστροφής [26],[29].



**Σχήμα 1.4:** Ρεύμα από επαναλαμβανόμενο αρνητικό κατερχόμενο σχετό με 11 επαναλήψεις του φαινομένου(σχετός επιστροφής) και ένα ρεύμα διαρκείας [29].

#### 1.4.4 Πολικότητα κεραυνικών εκκενώσεων

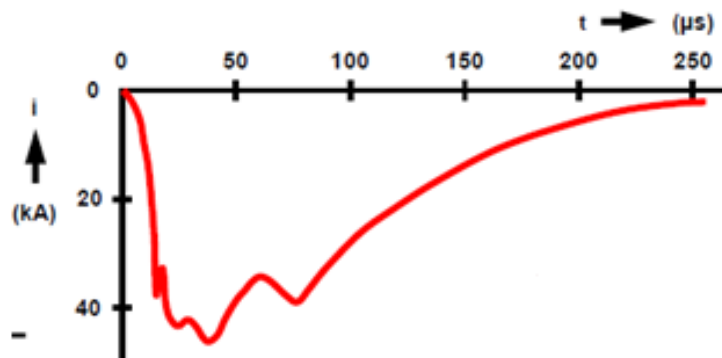
Σαν πολικότητα εκκενώσεως λαμβάνεται η πολικότητα φορτίου του κάτω μέρους του συννεφου που προκάλεσε την εκκένωση. Σύμφωνα με την συνθήκη αυτή το 80% περίπου των κεραυνών είναι αρνητικής πολικότητας. Για την ένταση του ρεύματος του κεραυνού, έπειτα από μελέτη πειραματικών δεδομένων, συμπεραίνουμε τα εξής:

- 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:

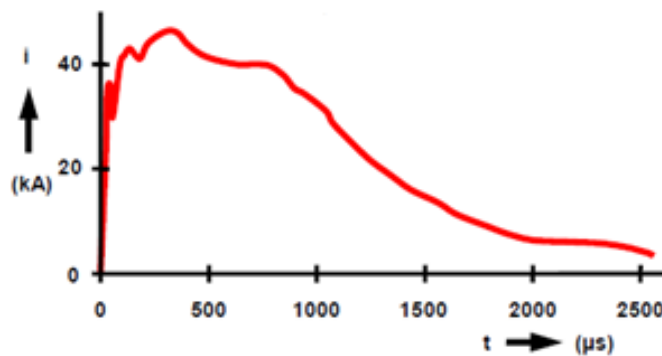
**α) Αρνητικοί κεραυνοί:** Η μορφή του κύματος των ρευμάτων των “αρνητικών κεραυνών” παρουσιάζει ένα αρχικό τμήμα διάρκειας λίγων  $\mu$ s, με μικρή κλίση, ακολουθούμενο από άλλο

τιμήμα πολύ μεγαλύτερης κλίσης (περί τα 40 kA/μs) ως την τιμή κορυφής και τέλος από ένα άλλο τμήμα μεγάλης διάρκειας με ακανόνιστη μορφή [8].



Σχήμα 1.5: Τυπικό παλμογραφήματα ρεύματος αρνητικού κεραυνού κατά Berger [29].

**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 μs) και έχει μέτωπο μικρής κλίσης (γύρω στα 2,5 kA/μs) [8].

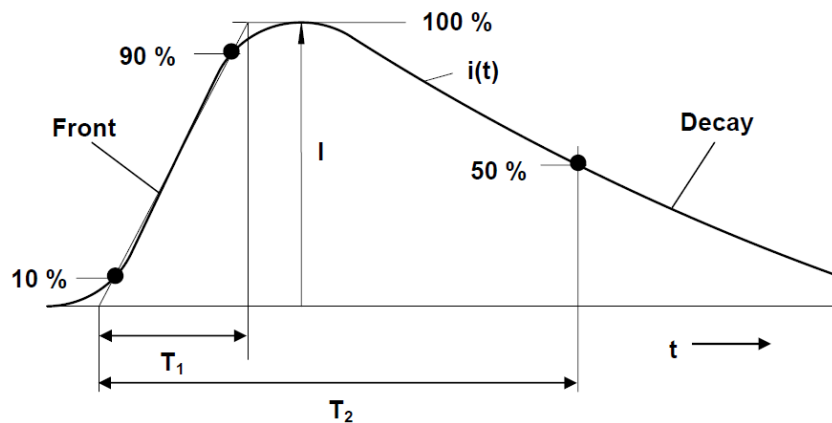


Σχήμα 1.6: Τυπικό παλμογραφήματα ρεύματος θετικού κεραυνού κατά Berger [29].

#### 1.4.5 Ρεύμα – παράμετροι κεραυνού

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 1.7:** 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 συνδυασμού με την ονομαστική αρχή του χρόνου το χρόνο ημίσεως εύρους  $T_2$  [11].

Ο κεραυνός σαν ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους, κάθε μία από τις οποίες έχει ενοχλητικές μέχρι και καταστροφικές συνέπειες για ανθρώπινες ζωές και τεχνικές εγκαταστάσεις:

Α)Μέγιστη τιμή ρεύματος: Προκαλεί υπερπήδηση μονωτήρων, λόγω της ανύψωσης δυναμικού του γειωμένου πυλώνα.

Β)Μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος  $(di/dt)_{max}$ :Καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόχους κυκλωμάτων, οι οποίες τάσεις όταν αναπτύσσονται σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία π.χ. σε συστήματα πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών μπορούν να έχουν δραματικές συνέπειες.

Γ)Το μεταφερόμενο φορτίο  $\int_0^{\infty} i(t)dt$ : Προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

Δ)Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου ρεύματος  $\int_0^{\infty} i(t)^2 dt$ : Είναι ανάλογο της εκλυόμενης από το κεραυνικό πλήγμα ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών η αερίων) [8].

Μερικές χαρακτηριστικές τιμές των παραμέτρων του κεραυνού δίνονται στον πίνακα 1.1

A/A	Παράμετρος	Θετικοί		Αρνητικοί		80%*αρνητικοί κεραυνοί	Μέγιστες μετρούμενες Τιμές
		5%	50%	5%	50%	-20%*θετικοί	
						5%	
1	$\hat{i}(kA)$	80	30	250	35	114	515(PL)
2	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max}$ (kA/μs)	120	40	32	2,4	102	230 (USA,1965)
3	$\int_0^{\infty} i(t)^2 dt$ (kA <sup>2</sup> *s)	0,55	0,055	15	0,65	3,5	19(CH)
4	$\int_0^{\infty} i(t) dt$ (A*s)	40	7,5	350	80	102	400

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές κεραυνικών παραμέτρων από μετρήσεις μέχρι το 1989 [8].

#### 1.4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν τον κεραυνό

Παράγοντες όπως το κλίμα η εποχή και η μορφολογία του εδάφους επηρεάζουν την εκδήλωση του κεραυνού και την έντασή του. Για παράδειγμα σε μια περιοχή με εύκρατο κλίμα τα χαρακτηριστικά του κεραυνού επηρεάζονται από την ορογραφική κατάσταση της περιοχής. Στις ορεινές περιοχές, η ένταση του ρεύματος του κεραυνού, όπως και το σχετικό φορτίο, είναι μικρά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μικρή απόσταση μεταξύ της γης και του νέφους προκαλεί εκκενώσεις στη γη πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία φόρτισης του νέφους και στο ότι το μικρό σχετικά μήκος του αγωγού του κεραυνού έχει σαν επακόλουθο τη συσσώρευση ενός μικρού μόνο φορτίου κατά μήκος αυτού.

Ο αριθμός των εκκενώσεων στις ορεινές περιοχές είναι πάντοτε μεγαλύτερος από εκείνον στις πεδινές. Στις πεδινές περιοχές, όπου η απόσταση νέφους-γης είναι μεγαλύτερη σημειώνονται λιγότερες εκκενώσεις, αλλά με υψηλή ένταση ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σχετικά σπάνια το ηλεκτρικό πεδίο είναι τέτοιο, ώστε να επιτρέπει κεραυνό νέφους-γης. Η μεγάλη ένταση ρεύματος οφείλεται στην παρουσία νεφών πολύ φορτισμένων και οχετών εκκενώσεως μεγάλου μήκους.

Σημαντικό ρόλο στη δημιουργία κεραυνικών εκκενώσεων παίζει και η εποχή. Το καλοκαίρι τα σύννεφα βρίσκονται σε σημαντικό ύψος από το έδαφος, έτσι πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ νεφών. Αυτό έχει σαν συνέπεια μια απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους [8].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΕΡΑΥΝΟΥ- ΠΛΟΙΟΥ

### **2.1 Φαινόμενα που παρατηρούνται κατά την πτώση κεραυνού σε πλοίο**

#### **2.1.1 Σύνδεση κεραυνού-πλοίου**

Το επερχόμενο κεραυνικό χτύπημα ξεκινάει όταν μια στήλη φορτίου, που ονομάζεται οχετός προεκκένωσης, πλησιάζει σε μια απόσταση μερικών δεκάδων μέτρων από το έδαφος. Σε αυτό το σημείο ρεύμα ξεκινά να ρέει προς τον οχετό προεκκένωσης, αλλά και μέσα στο 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 πρώτη 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  $\mu\text{s}$ , αλλά μπορεί να ακολουθείται από ένα συνεχές ρεύμα μερικών εκατοντάδων A που διαρκεί μερικές εκατοντάδες ms. Αν και το ρεύμα αυτό είναι πολύ χαμηλότερης έντασης δύναται να προκαλέσει σημαντικές θερμικές επιπτώσεις στο πλοίο [26].

Δεν υπάρχει επιστημονικά έγκυρος τρόπος να εμποδίσουμε το σχηματισμό αυτού του φορτισμένου ανερχόμενου οχετού. Άρα στόχος της αντικεραυνικής προστασίας είναι να ελαχιστοποιήσει τη ζημιά που θα προκαλέσει ένα κεραυνικό πλήγμα, παρά το να το αποτρέψει από το να συμβεί. Το σκάφος θεωρείται ότι φέρει αντικεραυνική προστασία αν υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ τερματικού αέρα και τερματικού γείωσης [4]. Με τον όρο τερματικό αέρα, αλεξικέραυνο ή γενικότερα αγωγός αντικεραυνικής προστασίας αποδίδεται το υψηλότερο σημείο του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας που έχει ως σκοπό να προσελκύσει τον κεραυνό και να τον διοχετεύσει στο σύστημα γείωσης.

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 οχετός προεκκένωσης βρίσκεται στο πίσω μέρος του πλοίου είναι πολύ πιθανό να χτυπηθούν οι αγωγοί που βρίσκονται στην πρύμνη. 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 [26], [4].

### 2.1.2 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 εκφορτιστεί. 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 [26].

### 2.1.3 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. Επομένως, 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 [26].

#### **2.1.4 Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου**

Παράπλευρη εκκένωση είναι κάθε εκφόρτιση που συμβαίνει κατά τη διάρκεια ενός κεραυνού και περιλαμβάνει το σχηματισμό ενός καναλιού σπινθήρων από οποιαδήποτε πηγή εκτός από αλεξικέραυνα ή ηλεκτρόδια γείωσης. Οι παράπλευρες εκκενώσεις συνήθως εμπλέκουν αγωγούς πάνω στο πλοίο, όπως δεξαμενές νερού, μέλη πληρώματος κλπ.

Γενικά θεωρείται ότι επικρατούν δυο τύποι παράπλευρων εκκενώσεων :

α) παράπλευρες εκκενώσεις που σχηματίζονται στο εσωτερικό του πλοίου μεταξύ αγωγών του πλοίου

β) παράπλευρες εκκενώσεις που σχηματίζονται στο εσωτερικό του πλοίου και τερματίζουν στο νερό [7].

Όταν το ρεύμα του κεραυνού ρέει μέσω του συστήματος προστασίας, μπορεί να υπάρξει παροδική ροή ρεύματος μέσα στο νερό, αλλά κάθε φορτίο που εγχέεται στο νερό μετακινείται γρήγορα προς την επιφάνειά του (όπως καθορίζεται από τον χρόνο χαλάρωσης  $\tau \sim 10ns$  σε θαλασσινό νερό,  $\tau \sim 1ns$  σε γλυκό νερό). Κατά συνέπεια, κάθε ρεύμα που εγχέεται στο νερό μέσα από μια βυθισμένη πλάκα γείωσης πρέπει τελικά να φθάσει στην επιφάνειά του. Καθώς το φορτίο που απομακρύνεται από τον κεραυνό βρίσκεται στην επιφάνεια του νερού, κάθε σπινθήρας που σχηματίζεται είτε ακούσια από ένα μεταλλικό εξάρτημα που

βρίσκεται πάνω στο νερό ,είτε εσκεμμένα από ένα Siedarc™ ηλεκτρόδιο, μπορεί εύκολα να γεφυρώσει την απόσταση από το επιφανειακό φορτίο δημιουργώντας μια παράπλευρη εκκένωση [13].

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 [26], [7]. Για παράδειγμα, παρατηρείται πολύ συχνά μια παράπλευρη εκκένωση ανάμεσα στην αλυσίδα της άγκυρας και το νερό όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 2.1:** Εκτεταμένες βλάβες στο κουφάρι πλοίου λόγω ανάπτυξης παράπλευρων εκκενώσεων μεταξύ της αλυσίδας της άγκυρας και του νερού [14].

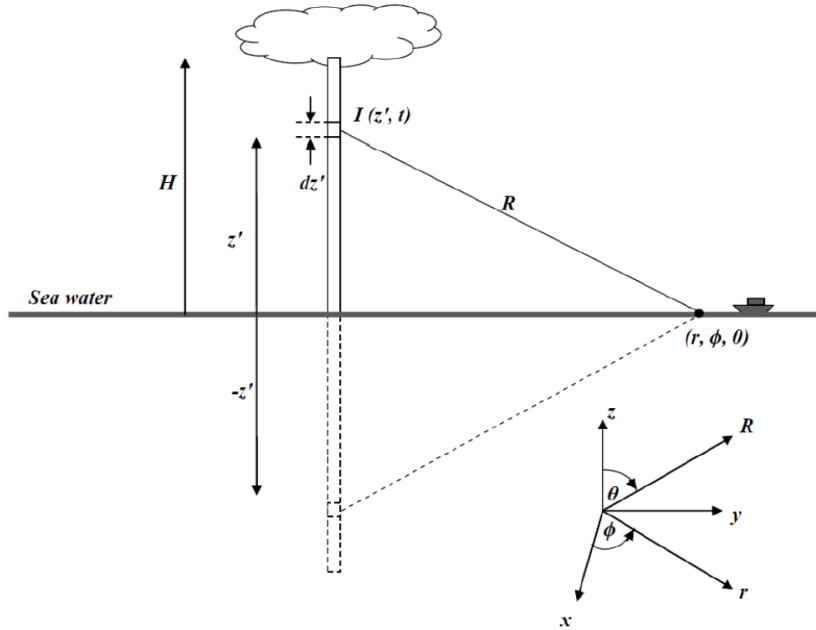
## **2.2 Επιπτώσεις πρόσπτωσης κεραυνού σε πλοία**

### **2.2.1 Αλληλεπίδραση κεραυνικού πλήγματος με τα ηλεκτρικά συστήματα πλοίων**

#### **2.2.1.1 Παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω κεραυνού και επαγόμενες τάσεις.**

Το σύνολο των εξισώσεων που ακολουθεί, σε κυλινδρικές συντεταγμένες, μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στο επίπεδο του εδάφους, που αναπτύσσονται λόγω ενός κατακόρυφου κεραυνικού καναλιού ύψους  $H$ . Οι γεωμετρικοί συντελεστές αυτών των εξισώσεων ορίζονται στην εικόνα 2.2. Οι εξισώσεις

αυτές ισχύουν εφόσον η επιφάνεια του εδάφους μεταξύ του σημείου πτώσης του κεραυνού και του σημείου παρατήρησης είναι τέλεια αγώγιμη (άπειρη αγωγιμότητα) και επίπεδη.



**Εικόνα 2.2:** Γεωμετρικοί συντελεστές που αντιστοιχούν στις εξισώσεις για τον υπολογισμό των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο επίπεδο του εδάφους επί τέλει αγώγιμης επιφάνειας (όπως το θαλασσινό νερό) [15].

$$E(r, \varphi, 0, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \int_h^H \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau dz' + \int_h^H \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) dz' - \int_h^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} dz' \right\} a_z \quad (2.1)$$

$$B(r, \varphi, 0, t) = \frac{\mu_0}{2 * \pi} \left\{ \int_h^H \frac{r}{R^3} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) dz' - \int_h^H \frac{r}{c * R^2} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} dz' \right\} a_\varphi \quad (2.2)$$

Ο πρώτος όρος εντός της αγκύλης της εξίσωσης (2.1) ονομάζεται στατικός (εξαρτάται από την μεταβολή του φορτίου κατά μήκος του καναλιού) και μειώνεται γρήγορα με την απόσταση από την βάση του καναλιού. Ο δεύτερος όρος ονομάζεται επαγωγικός (εξαρτάται από το ρεύμα και το μήκος του καναλιού) και μειώνεται σχετικά αργά. Ο τρίτος όρος ονομάζεται συνιστώσα ακτινοβολίας, μειώνεται σε μικρό ποσοστό με την απόσταση, σε σχέση με τους προηγούμενους όρους και εξαρτάται από την χρονική παράγωγο του ρεύματος του καναλιού σε κάθε ύψος. Η εξίσωση (2.2) περιέχει μόνο τον επαγωγικό όρο και την συνιστώσα ακτινοβολίας. Για την περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής σε αγώγιμα αντικείμενα που βρίσκονται στην κατεύθυνση διάδοσης των πεδίων, οι χρονικές

παράγωγοι των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων ( $dE/dt$  και  $dB/dt$ ) παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο.

Να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) είναι εφαρμόσιμες μόνο όταν η επιφάνεια του εδάφους έχει άπειρη αγωγιμότητα και καθόλου τοπογραφικές ανωμαλίες. Έρευνες έχουν δείξει ότι οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου υφίστανται σημαντική παραμόρφωση και απόσβεση εξαρτώμενη από τη συχνότητα, καθώς τα πεδία μεταδίδονται σε μια επιφάνεια με πεπερασμένη αγωγιμότητα. Η εκλεκτική απόσβεση στις υψηλές συχνότητες επηρεάζει σημαντικά τα πλάτη των χρονικών παραγώγων των πεδίων. Τέτοιες επιπτώσεις είναι κοινές για τα πεδία που δημιουργούνται λόγω κεραυνών είτε μεταξύ σύννεφου και εδάφους είτε μεταξύ γειτονικών σύννεφων.

Η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από μια αρνητική κεραυνική εκκένωση, και έχει διανύσει μια απόσταση  $D$  επί μιας επιφάνειας με πεπερασμένη αγωγιμότητα  $\sigma$ , δίνεται από την σχέση :

$$E_{\sigma} = \left( 0.24 \left\{ \exp \left( \frac{-D}{10^7} \right) + \exp \left( \frac{-D}{50 * 10^7} \right) \right\} + 0.52 \right) E_{\infty} \quad (2.3)$$

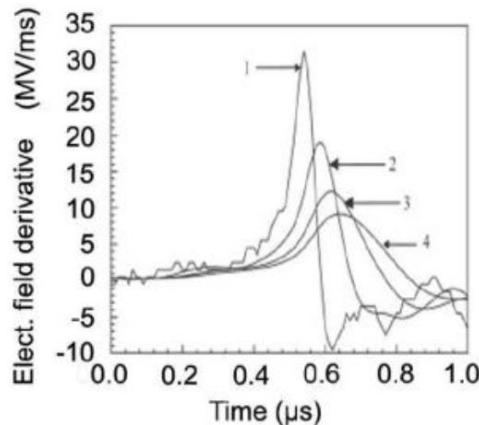
Όπου ο λόγος  $D/\sigma$  μετριέται σε  $m^2/S$ . Τα μεγέθη  $E_{\sigma}$  και  $E_{\infty}$  αντιπροσωπεύουν το ηλεκτρικό πεδίο σε ίδια απόσταση, αλλά για πεπερασμένη και άπειρη αγωγιμότητα αντίστοιχα.

Η εξίσωση (2.3) περιορίζεται για τιμές του  $D$  από 5 έως 300km όπου για το κάτω όριο λαμβάνουμε υπόψη ότι, κάτω από αυτό ο στατικός και επαγωγικός όρος αμελούνται (μόνο η συνιστώσα ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη), και για το πάνω όριο θεωρούμε ότι πάνω από αυτό αμελείται η καμπυλότητα της Γης.

Ας θεωρήσουμε ένα οριζόντιο επίπεδο όπου η αγωγιμότητα του εδάφους είναι της τάξης του  $0.0001S/m$  (κοινή τιμή για ξηρό έδαφος) και η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού είναι  $4.8 S/m$ . Σε απόσταση 5km από το σημείο πτώσης του κεραυνού, ο λόγος του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από την ξηρά ( $E_L$ ) με το αντίστοιχο πάνω από τη θάλασσα ( $E_S$ ) είναι περίπου 0.75 (75%) με βάση την εξίσωση (2.3). Η παράγωγος του ηλεκτρικού πεδίου λόγω του αρχικού οχετού επιστροφής του αρνητικού κεραυνού, πάνω από την επιφάνεια με πεπερασμένη αγωγιμότητα  $(dE/dt)_{\sigma}$  σχετίζεται με την αντίστοιχη για τέλεια αγωγή επιφάνεια  $(dE/dt)_{\infty}$  (σε ίδια απόσταση  $D$ ) από τη εμπειρική εξίσωση:

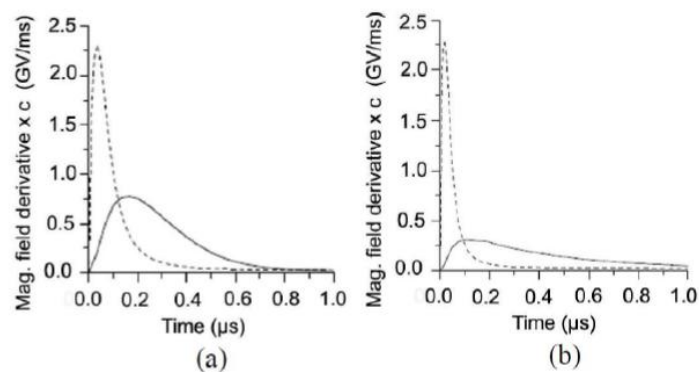
$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{\sigma} = 22.7 \left( \frac{D}{\sigma} \right)^{-0.31} \left( \frac{dE}{dt} \right)_{\infty} \quad (2.4)$$

Η εξίσωση (2.4) δείχνει ότι σε απόσταση 5km από το σημείο χτυπήματος ,η παράγωγος  $\left(\frac{dE}{dt}\right)_\sigma$  είναι λιγότερη του 10% της  $\left(\frac{dE}{dt}\right)_\infty$  για μετάδοση πάνω από επιφάνεια με αγωγιμότητα εδάφους 0.0001S/m. Ακόμα και για αγωγιμότητα 0.001S/m, η  $\left(\frac{dE}{dt}\right)_\sigma$  παραμένει λιγότερο από το 20% της  $\left(\frac{dE}{dt}\right)_\infty$  σε απόσταση 5km. Το σχήμα 2.1 δείχνει πως η παράγωγος του ηλεκτρικού πεδίου του αρχικού αρνητικού σχετού διαφέρει ανάλογα με την απόσταση πάνω από μια επιφάνεια με αγωγιμότητα 0.001S/m.



**Σχήμα 2.1:** Μεταβολή της παραγώγου του ηλεκτρικού πεδίου ενός αρχικού σχετού επιστροφής καθώς διαδίδεται πάνω από επιφάνεια με αγωγιμότητα 0.001S/m: (1) Πεδίο "άπειρης αγωγιμότητας", (2) μετά από 1 km μετάδοσης, (3) μετά από 4km μετάδοσης και (4) μετά από 8 km μετάδοσης [15].

Το σχήμα 2.2. παριστάνει την παράγωγο του μαγνητικού πεδίου (πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός) στο επίπεδο του εδάφους σε απόσταση 1km από το κεραυνικό κανάλι ,ως σύγκριση μεταξύ των μεταδιδόμενων πεδίων πάνω από τέλεια αγωγίμη επιφάνεια και πάνω από επιφάνεια με πεπερασμένη αγωγιμότητα (αγωγιμότητα 0.01S/m και 0.0001S/m). Το σχήμα δείχνει ότι το πλάτος της παραγώγου του μαγνητικού πεδίου μειώνεται σε μια τιμή λιγότερη από το 35% όταν η αγωγιμότητα του επιπέδου αλλάζει από άπειρη σε 0.0001S/m και μειώνεται σε μια τιμή 15% λιγότερη, όταν η αγωγιμότητα αλλάζει από άπειρη σε 0.0001S/m.



**Σχήμα 2.2:** Παράγωγος μαγνητικού πεδίου(πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός)στο επίπεδο του εδάφους σε απόσταση 1km από το κεραυνικό κανάλι. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το πεδίο πάνω από τέλεια αγωγίμο έδαφος και

αντίστοιχα η άλλη γραμμή το πεδίο πάνω από το έδαφος με πεπερασμένη αγωγιμότητα (a) $\sigma=0.0001\text{S/m}$  και (b) $\sigma=0.0001\text{S/m}$  (η σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους έχει ληφθεί υπόψη με την τιμή 5) [15].

Οι παραπάνω υπολογισμοί και αναλύσεις δείχνουν ξεκάθαρα ότι ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμη θάλασσα υποβάλλεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, λόγω ενός κεραυνού, πολύ πιο σημαντικό, από ότι ένα σύστημα που βρίσκεται σε χερσαίο περιβάλλον. Τέλος, επισημαίνεται ότι οι ζημιές σε περιβάλλον γλυκού νερού είναι μεγαλύτερες απ' ότι σε περιβάλλον ανοιχτής θάλασσας γιατί, το νερό χωρίς αλάτι είναι χειρότερος αγωγός από το θαλασσινό νερό.

Τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα που είναι κατασκευασμένα από μη μεταλλικά υλικά ή υλικά με μικρή αγωγιμότητα είναι πιο επιρρεπή σε βλάβες προκαλούμενες από κεραυνό, λόγω του μειωμένου βαθμού θωράκισης. Τα ενσωματωμένα συστήματα πλοήγησης και ραντάρ μεγάλων πλοίων, τα πλαίσια των οποίων είναι κατασκευασμένα εξ ολοκλήρου από μέταλλο, είναι επίσης εκτεθειμένα σε υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία ανεξάρτητα από τη θωράκιση που παρέχεται σε άλλα μέρη των συστημάτων αυτών [15].

### 2.2.1.2 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, γεννήτριες 12V κ.α.



Στην περίπτωση ενός άμεσου κεραυνικού χτυπήματος 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 κτύπημα 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.

Στην περίπτωση που το κεραυνικό χτύπημα δεν είναι άμεσο αλλά προσπίπτει σε μια κοντινή απόσταση από το πλοίο και το ηλεκτρικό σύστημα αυτού, 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.

Κατά τη διάρκεια ενός μακρινού κεραυνικού χτυπήματος από το πλοίο 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.

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 [26].

### **2.2.2 Βλάβες στο σκελετό (hull)**

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 αγωγίμο 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 [16]. 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:

$$R = \frac{1}{2\sigma D} \quad (2.5)$$

Όπου  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα του γλυκού νερού με  $\sigma=10^{-3}(\Omega m)^{-1}$  χωρίς διαλυμένα άλατα και  $D$  η διάμετρος της πλάκας (34cm για τα πρότυπα ISO 1013 και ABYC) .

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην παραπάνω σχέση 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 είναι:

$$R = \ln \left( \frac{2L}{1.36d} \right) \quad (\Omega) \quad (2.6)$$

Πιο συγκεκριμένα, για L=10m και d=9.3mm (για να επιτευχθεί εμβαδό που να συμμορφώνεται με τα πρότυπα ABYC και ISO) πετυχαίνεται αντίσταση 234Ω 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  $\sigma = 4(\Omega m)^{-1}$ , 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.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί η δυναμική συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης που προκύπτει όταν συντελείται διάσπαση στο νερό καθώς το ρεύμα ρέει εκτός της πλάκας γείωσης προς το νερό. Η τιμή της είναι μικρότερη από τη στατική τιμή αντίστασης γείωσης καθώς η ενεργός επιφάνεια της πλάκας γείωσης αυξάνεται σημαντικά.

Ο Πετρόπουλος [31] περιγράφει πως, για ακτινική ροή ρεύματος, το ηλεκτρικό πεδίο ξεπερνά το σημείο διάσπασης για ακτίνες μικρότερες από:

$$r_o = \sqrt{\frac{I}{2\pi\sigma E_b}} \quad (2.7)$$

όπου  $I$  είναι το ρεύμα,  $\sigma$  η αγωγιμότητα της γης και  $E_b$  το ηλεκτρικό πεδίο διάσπασης. Άρα η ενεργός επιφάνεια πλάκας γείωσης είναι αυτή ενός ημισφαιρίου ακτίνας  $r_o$ . Ο Πετρόπουλος σημειώνει ότι μια σφαίρα ακτίνας 5cm σε «αστικά» νερά, δεν προκαλούσε ροές όταν εφαρμοζόταν κρουστική τάση 50kV έτσι ώστε η  $E_b$  να είναι μεγαλύτερη από  $10^6\text{V/m}$ . Στο γλυκό νερό, αντικαθιστώντας όπου  $\sigma = 10^{-3}(\Omega.m)^{-1}$ ,  $I=30\text{kA}$  και  $E_b = 1 * 10^6\text{V/m}$ , παίρνουμε  $r_o = 2.2\text{m}$ . Άρα για μοναδική πλάκα γείωσης έχουμε ενεργό εμβαδό ίσο με  $30\text{m}^2$  που είναι ανεξάρτητο από το πραγματικό εμβαδό της πλάκας.

Η ενεργός αντίσταση ισούται με

$$R=1/2\pi\sigma r_o \quad (2.8)$$

και υπολογίζεται στα 72Ω.

Η μέγιστη τάση είναι 2.2MV που αν και είναι 20 φορές μικρότερη από αυτή που αναπτύσσεται για κυκλική πλάκα εμβαδού  $0,1\text{m}^2$  παραμένει μεγαλύτερη από το όριο των 500kV/m που μπορεί να προκαλέσει τόξο. Για να έχουμε τη χαμηλότερη δυνατή τάση διάσπασης σε μια δυναμική συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης, πρέπει να αρχίσουμε τη ροή από την επιφάνεια γείωσης.

Επίσης, ο Πετρόπουλος κατέληξε στο ότι η επιφάνεια γείωσης που φέρει μυτερά εξογκώματα μειώνει την αντίσταση γείωσης λόγω του φαινομένου της δυναμικής γείωσης για μικρότερα ρεύματα απ' ότι στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε ομαλά και λεία ηλεκτρόδια.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται πλάκα γείωσης σχήματος μακρόστενης λωρίδας τοποθετημένης κατά μήκος του κεντρικού άξονα του σκάφους, για να βρούμε τη δυναμική αντίσταση γείωσης, πρέπει να θεωρήσουμε κατάλληλο προσεγγιστικό μοντέλο εκφόρτισης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, αντί να έχουμε συμπαγή ροή ρεύματος μέσω του αγωγού, οι μελέτες σε ιστιοφόρα με τέτοια πλάκα γείωσης δείχνουν ότι η ροή προκαλείται από μικρό αριθμό διακριτών σημείων που είναι τοποθετημένα ανά τακτά διαστήματα [4],[26].

### 2.2.3 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 αν 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 ελκυσμένης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων ,εναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων)και μετριέται  $Ambere^2 * Seconds(A^2s)$ . 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:

$$W = R \int i^2 dt \text{ [Joule]} \quad (2.9)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας είναι :

$$\Delta\theta = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \left( \frac{(\int i^2 dt) * a * \rho}{q^2 * C_W * \gamma} \right) - 1 \right] \text{ [K]} \quad (2.10)$$

Όπου :

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

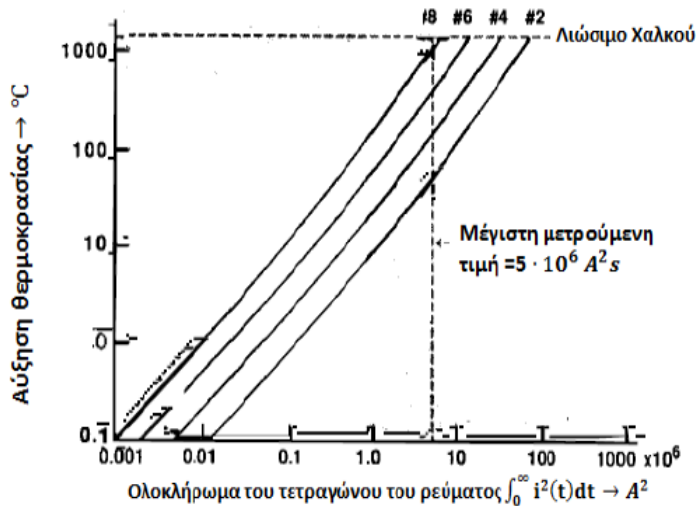
$\rho$ : η ειδική αντίσταση του αγωγού σε [ $\Omega \text{ m}$ ]

$q$ :η διατομή του αγωγού σε [ $\text{m}^2$ ]

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

$C_W$ : ο συντελεστής θερμοχωρητικότητα σε [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ]

Στο σχήμα 2.3 κατά τον Golde φαίνεται πως 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  $5 * 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ . Στο σχήμα 2.3, φαίνεται πως η μέγιστη αυτή τιμή του ολοκληρώματος εμφανίζεται για ένα καθοδικό αγωγό #8 (διαμέτρου  $8.36 \text{ mm}^2$ ) , όπου και επιτυγχάνεται λιώσιμο του χαλκού από τη θερμική καταπόνηση στους 1000 βαθμούς Κελσίου. Για την ίδια μέγιστη τιμή του ολοκληρώματος ( $5 * 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ ) παρατηρείται ότι ο καθοδικός αγωγός #4 (διαμέτρου  $21.2 \text{ mm}^2$ ) φθάνει σε μια θερμοκρασία περίπου των  $100^\circ\text{C}$ , θερμοκρασία μειωμένη κατά ένα παράγοντα δέκα. Για αυτό το λόγο αν είναι επιθυμητή η ανάθεση ενός περιθωρίου ασφαλείας με μέγιστη θερμοκρασία τους  $100^\circ\text{C}$  που δύναται να φθάσει ο αγωγός, προτιμάται καθοδικός αγωγός χαλκού #4 (διαμέτρου  $21.2 \text{ mm}^2$ ).



Σχήμα 2.3: Μεταβολή θερμοκρασίας χάλκινων αγωγών σε σχέση με το ολοκλήρωμα  $\int_0^\infty i^2(t)dt$  [ $A^2s$ ] [16].

Αν ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο πληγεί από ένα κεραυνό με ρεύμα  $i$ , η θερμότητα που θα αναπτυχθεί στο σημείο του πλήγματος θα είναι ανάλογη του [18]:

$$u \int i dt = u * q \quad (2.11)$$

όπου:

$u$ , είναι η πτώση τάσης

$q$ , το φορτίο που είναι ανάλογο με το ρεύμα του κεραυνού.

Ο όγκος του μετάλλου που θα τακεί στο σημείο που θα εκφορτιστεί ένα κεραυνικό πλήγμα, δίνεται από την πιο κάτω σχέση:

$$V = \frac{W}{\gamma} * \frac{1}{c_W \Delta\theta + c_S} \quad \text{σε } m^3 \quad (2.12)$$

όπου:

$W$ : η ενέργεια(J) του κεραυνού την στιγμή που πλήττει το συγκεκριμένο σημείο

$\gamma$ : η πυκνότητα του υλικού σε  $Kg/m^3$

$c_W$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού σε  $J/(kg.K)$

$\Delta\theta$ : η διαφορά θερμοκρασίας σε  $oC$

$c_S$ : η ειδική θερμότητα τήξης σε  $J/Kg$

Για την καθοδική τάση  $U_{A,K}$ , ισχύει η σχέση :

$$W=Q* U_{A,K} \quad \text{σε Joule} \quad (2.13)$$

Άρα η εξίσωση (2.12) μετασχηματίζεται στην:

$$\frac{V}{Q} = \frac{U_{A,K}}{\gamma} \frac{1}{c_W \Delta\theta + c_S} \quad (2.14)$$

Αν ένας κεραυνός πλήξει ένα μονωτικό υλικό ή ένα αγωγό, ο οποίος δεν χαρακτηρίζεται από την κατάλληλη διατομή, τότε το σημείο του πλήγματος θα αποκτήσει πολύ ψηλή

θερμοκρασία με συνέπεια την διάτρηση του υλικού ή την ανάφλεξή του. Εάν το μονωτικό υλικό περιέχει ίχνη υγρασίας, όπως συμβαίνει στα μάρμαρα ή κάποιο μη αγώγιμο υλικό, το ρεύμα του κεραυνού θα ρεύσει μέσω των σημείων που παρουσιάζουν την μικρότερη αντίσταση. Όμως έτσι η υγρασία μπορεί, λόγω της μεγάλης αύξησης της θερμοκρασίας, να μετατραπεί σε ατμό, και η πίεση που θα δημιουργηθεί να προκαλέσει θραύση του υλικού.

Μια άλλη σημαντική θερμική συνέπεια ενός κεραυνικού πλήγματος είναι η ανάφλεξη υλικών όπως ξυλείες κτλ, όπως επίσης εκρηκτικών υλών και υγρών καυσίμων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω, καθιστούν επιτακτική τη μελέτη προτύπων και οδηγιών που σκοπεύουν στην ελαχιστοποίηση των βλαβών που προκαλούνται σε σκάφη λόγω ελλιπούς αντικεραυνικής προστασίας και ελαττωματικής ή μη επαρκούς γείωσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΑΝΤΙΚΕΡΑΥΝΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΛΟΙΩΝ

### 3.1 Αντικεραυνική προστασία πλοίων: Διεθνείς κανονισμοί

Τα διεθνή πρότυπα που ασχολούνται με το ζήτημα της αντικεραυνικής προστασίας πλοίων είναι περιορισμένα, ωστόσο υπάρχει πληθώρα εθνικών οργανισμών (εθνικοί νηογνώμονες, διευθύνσεις ηλεκτρικής ασφάλειας κ) που το συμπεριλαμβάνουν στις τεχνικές οδηγίες που εκδίδουν. Ορισμένα από τα σημαντικότερα εξειδικευμένα έγγραφα που συμβάλλουν σε μια ολοκληρωμένη κάλυψη του θέματος της αντικεραυνικής προστασίας, όπως αυτό θα παρουσιασθεί στη συνέχεια είναι τα εξής:

- ISO 10134: 2003 Μικρά σκάφη - Ηλεκτρικές συσκευές - Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας  
Το συγκεκριμένο διεθνές πρότυπο, παρέχει οδηγίες για το σχεδιασμό, την κατασκευή και εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας σε μικρά σκάφη με μήκος μέχρι 24 μέτρα.
- IEC 60092-507 2008-01 Electrical installations in ships – Part 507: Small vessels  
Μεταξύ των κανόνων που έχουν θεσπιστεί από την οργάνωση IEC, εκείνοι της σειράς 60092 ασχολούνται με τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων. Ιδίως το IEC 60092-507 ασχολείται με τα ηλεκτρικά συστήματα του σκάφους και την εγκατάσταση γείωσης.
- Bureau Veritas : Hull Arrangement, Stability and Systems for Ships less than 500 GT, July 2011, Rule Note NR 566 DT R00 E  
Ο οργανισμός Bureau Veritas ιδρύθηκε το 1828 και δραστηριοποιείται σε διάφορους τομείς σχετικούς με την πιστοποίηση, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η ναυτιλία. Πρόκειται ουσιαστικά για το γαλλικό νηογνώμονα.
- ABYC TE-4 07/06: Αντικεραυνική προστασία  
Το κεφάλαιο αυτό, από E-4 που ήταν προηγουμένως, υποβαθμίστηκε σε τεχνικό έγγραφο (TE). Αυτό το τεχνικό έγγραφο εφαρμόζεται σε ιστιοφόρα και ταχύπλοα αν υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας.
- Ministry of Defense, Defense Standard 02-516, July 2003 (DEF STAN 02-51)  
Το πρότυπο αυτό εκδίδεται από την εκτελεστική αντιπροσωπεία του Υπουργείου Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου και περιέχει αναλυτικές πληροφορίες για θέματα



αντικεραυνικής προστασίας για διάφορες κατηγορίες πολεμικών σκαφών. Το γεγονός ότι το πρότυπο αυτό προέρχεται από στρατιωτικές υπηρεσίες το καθιστά πιο κατατοπιστικό στο θέμα της αντικεραυνικής προστασίας πλοίων.

	<b>Αντικεραυνική προστασία</b>
<b>Διεθνείς Οργανισμοί</b>	ISO 10134
	IEC 60092-507
<b>Εθνικοί Οργανισμοί</b>	ABYC TE-4
	Bureau Veritas NR 566
	DEF STAN 02-516

**Πίνακας 3.1:** Ενδεικτικοί κανονισμοί αναφερόμενοι στην αντικεραυνική προστασία πλοίων

### **3.2 Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων**

#### **Σκάφη μη μεταλλικού σκελετού**

Σε σκάφη μη μεταλλικού σκελετού, όπου το υλικό της γάστρας είναι μη αγώγιμο, όλα τα πρότυπα συγκλίνουν στην αναγκαιότητα αντικεραυνικής προστασίας που αποτελείται από:

- Ένα τερματικό αέρα (αλεξικέραυνο) ικανό να λαμβάνει ένα απευθείας κεραυνικό πλήγμα χωρίς να παθαίνει σημαντική βλάβη.
- Έναν αγωγό καθόδου για τη σύνδεση του τερματικού αέρα με το τερματικό γείωσης
- Ένα τερματικό γείωσης (πλάκα γείωσης) που μπορεί να άγει αποτελεσματικά τα υψηλά κεραυνικά ρεύματα στη θάλασσα

#### **Σκάφη μεταλλικού σκελετού**

Περνώντας στην περίπτωση μεταλλικού σκάφους, το γενικό συμπέρασμα είναι ότι τη θέση του καθοδικού αγωγού και της πλάκας γείωσης, παίρνει το ίδιο το σκάφος. Αν στην περίπτωση μη μεταλλικού σκάφους επιδιώκουμε να εξασφαλίσουμε την ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ αυτών των στοιχείων, στο μεταλλικό σκάφος, η ίδια η αγωγιμότητα του υλικού συνδέει αυτόματα τον κεραυνό με το νερό. Στα πρότυπα ISO 10134, IEC 60092-507, ABYC, DEF STAN 02-516 και Bureau Veritas NR 566 γίνεται λόγος για την περίπτωση μεταλλικού σκελετού σκάφους με το πρότυπο ABYC να είναι το μοναδικό που κάνει λόγο για την περίπτωση που το σκάφος είναι κατασκευασμένο από ανθρακονήματα (carbonfibers), κατατάσσοντάς το στην κατηγορία των μη μεταλλικών σκαφών.

### 3.2.1 Τερματικό αέρα (αλεξικέραυνο)

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο με τον όρο τερματικό αέρα, αλεξικέραυνο ή γενικότερα αγωγός αντικεραυνικής προστασίας αποδίδεται το υψηλότερο σημείο του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας που έχει ως σκοπό να προσελκύσει τον κεραυνό και να τον διοχετεύσει στο σύστημα γείωσης.

Τα σκάφη με μη μεταλλικό σκελετό πρέπει να φέρουν αγωγό αντικεραυνικής προστασίας, το κατώτερο μέρος του οποίου πρέπει να είναι συνδεδεμένο στο τερματικό γείωσης (πλάκα γείωσης).

Το τερματικό αέρα πρέπει να αποτελείται από αγωγή ράβδο κατασκευασμένη από χαλκό, κράμα χαλκού ή ανοξείδωτο ατσάλι, εκτός εάν τοποθετείται σε αλουμινένιο κατάρτι, οπότε και πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο είδος αλουμινίου.

Μεταλλικά κατάρτια και δομικά στοιχεία μπορούν να αποτελούν το σημείο στήριξης και ταυτόχρονα τον καθοδικό αγωγό. Μάλιστα το DEF STAN 02-516 θεωρεί αλουμινένιο κατάρτι εμβαδού 100mm<sup>2</sup> επαρκή καθοδικό αγωγό. Τα μέσα σταθεροποίησης του τερματικού αέρα στο κατάρτι πρέπει να παρουσιάζουν αντίσταση όχι μεγαλύτερη από αυτήν του κύριου καθοδικού αγωγού. Αν το κατάρτι αποτελείται από μη μεταλλικό υλικό, ο σχετικός καθοδικός αγωγός πρέπει, να είναι όσο το δυνατόν ευθύς, να είναι ασφαλώς προσδεμένος στο κατάρτι, να εκτείνεται τουλάχιστον 150mm πάνω από το κατάρτι, να καταλήγει σε τερματικό αέρα, και να οδηγείται όσο το δυνατόν πιο άμεσα στη σύνδεση γείωσης.

- Τα σκάφη που δεν φέρουν μόνιμο κατάρτι πρέπει να προστατευτούν με προσωρινό αντικεραυνικό κατάρτι που θα εγείρεται όταν υπάρχουν οι ενδείξεις ότι είναι πιθανό να συμβεί κεραυνοπληξία. Το προσωρινό κατάρτι, πρέπει να είναι όσο το δυνατόν κοντά στο γεωμετρικό κέντρο του σκάφους αλλά μπορεί και να απέχει από αυτό υπό την προϋπόθεση ότι η ζώνη προστασίας καλύπτει ολόκληρο το σκάφος
- Τα ψηλά καλώδια που διατρέχονται παράλληλα με τον καθοδικό αγωγό πρέπει να εσωκλείονται στο κατάρτι όπου αυτό είναι δυνατόν για να αποφεύγονται επαγόμενες τάσεις. Τα κατάρτια συνθετικής κατασκευής πρέπει να διατηρούν μόνιμες μεταλλικές συνδέσεις χαμηλής αντίστασης μεταξύ όλων των μερών
- Σε σκάφη με μεταλλικό σκελετό που φέρουν μη μεταλλικά κατάρτια πρέπει να παρέχεται αγωγός αντικεραυνικής προστασίας. Το κατώτερο μέρος του αγωγού αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να συνδεθεί στο μεταλλικό σκελετό του πλοίου.
- Αγείωτα ή μη αγωγή αντικείμενα/υπερδομές που προεξέχουν από τα αντικεραυνικά κατάρτια μπορούν να προστατευθούν με έναν αγωγό γείωσης που θα καταλήγει σε τερματικό αέρα πάνω από το εκάστοτε αντικείμενο.

Τα τερματικά αέρα πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε η προκύπτουσα ζώνη προστασίας να καλύπτει ολόκληρο το σκάφος και πιο συγκεκριμένα όλα τα μέρη του

σκάφους πάνω από το επίπεδο του καταστρώματος. Εάν δεν αρκεί η χρήση ενός μόνο τερματικού αέρα, πρέπει να προστεθούν επιπλέον αλεξικέραυνα ώστε να σχηματιστούν αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες προστασίας που τελικά να εμπεριέχουν ολόκληρο το σκάφος.

Στα πρότυπα ISO 10134 και ABYC γίνεται αναφορά σε προτεινόμενη μέθοδο προσδιορισμού της ζώνης προστασίας, η οποία απουσιάζει πλήρως από το αντίστοιχο πρότυπο IEC 60092-507. Σύμφωνα με τον κανονισμό ABYC ένας γειωμένος αγωγός, ή αντικεραυνικό κατάρτι ύψους έως 30m, γενικά ελκύει το απευθείας κεραυνικό πλήγμα που διαφορετικά θα έπεφτε εντός ενός κωνικού χώρου. Η κορυφή αυτού του χώρου είναι το ανώτερο σημείο του αγωγού ή του καταρτιού αντικεραυνικής προστασίας, ενώ η βάση αυτού του χώρου είναι ένας κύκλος πάνω στην επιφάνεια του νερού με ακτίνα ίση με το ύψος του καταρτιού ή του αγωγού που αναφέρθηκε προηγουμένως. Η ζώνη προστασίας που προκύπτει από οποιαδήποτε επαλληλία καταρτιών ή άλλων υπερυψωμένων, αγωγίμων, γειωμένων αντικειμένων άνω των 30m μπορεί να προσδιοριστεί γραφικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας. Για το ISO 10134 το ύψος μετάβασης από τη μέθοδο του κώνου προστασίας στη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας είναι τα 15m όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

	<b>ABYC</b>	<b>ISO 10134</b>
<b>Ύψος έως 15m</b>	Κώνος προστασίας 1:1	Κώνος προστασίας 1:1
<b>Ύψος πάνω από 15m</b>	Κώνος προστασίας 1:1	Κυλιόμενη σφαίρα
<b>Ύψος έως 30m</b>	Κώνος προστασίας 1:1	Κυλιόμενη σφαίρα
<b>Ύψος πάνω από 30m</b>	Κυλιόμενη σφαίρα	Κυλιόμενη σφαίρα

**Πίνακας 3.2:** Μέθοδος προστασίας ανά ύψος καταρτιού

Ακολουθούν ορισμένα στοιχεία για τις δύο μεθόδους προσδιορισμού της ζώνης προστασίας.

### **3.2.1.1 Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας**

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 [26].

Για να προσδιορίσουμε την περιοχή που θέλουμε να καταστήσουμε θεωρητικά απρόσβλητη από κεραυνικά πλήγματα έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες και αναλύονται παρακάτω. Η προκύπτουσα ζώνη προστασίας πρέπει να καλύπτει ολόκληρο το σκάφος και πιο συγκεκριμένα όλα τα μέρη του σκάφους πάνω από το επίπεδο του καταστρώματος. Εάν δεν αρκεί η χρήση ενός μόνο τερματικού αέρα, πρέπει να προστεθούν επιπλέον αλεξικέραυνα ώστε να σχηματιστούν αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες προστασίας που τελικά να εμπεριέχουν ολόκληρο το σκάφος.

Για την κατανόηση και περιγραφή των μεθόδων για την εκτίμηση της ζώνης προστασίας που δημιουργεί ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας 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.

### **3.2.1.1.1 Μέθοδος κώνου προστασίας (Cone Protection Method – CPM)**

Η μέθοδος του κώνου προστασίας (Cone Protection Method – CPM) είναι η απλούστερη και παλαιότερη ως προς το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο (EGM) που χρησιμοποιεί, με ιστορία πάνω από 200 χρόνια [4]. Ο προστατευόμενος όγκος που παρέχεται από ένα αλεξικέραυνο ή μια κατακόρυφη ράβδο θεωρείται ότι έχει τη μορφή ενός φανταστικού ορθού κυκλικού κώνου με κορυφή την απόληξη της κατακόρυφης ράβδου. Η μέθοδος στηρίζεται στη διαπίστωση ότι ο κεραυνός προτιμάει να συνδεθεί με το υψηλότερο δυνατό σημείο (εν προκειμένω το αλεξικέραυνο) παρά με οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο που βρίσκεται εντός του κώνου. Ουσιαστικά σχηματίζουμε έναν κλωβό Faraday [20] μέσα στον οποίο εσωκλείουμε το σκάφος [4]. 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.

Ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της απόστασης διάσπασης ( $R_s$ ) και της οριζόντιας απόστασης προστασίας ( $d$ ):

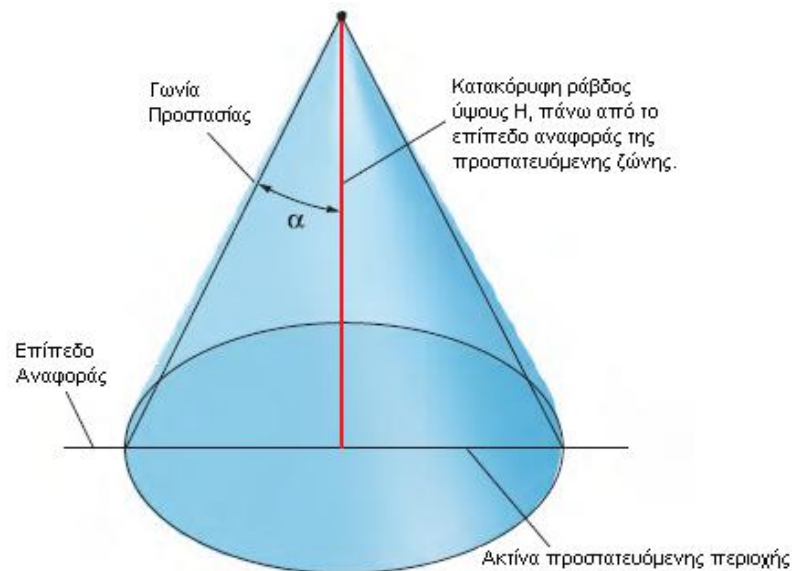
$$R_s = 2H \quad (3.1)$$

$$d = H \quad (3.2)$$

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

Η γωνία προστασίας 'α' ορίζεται ως η γωνία ανάμεσα στην κατακόρυφη ράβδο και στην επιφάνεια του κώνου. Για αναλογία προστασίας 1:1, δηλαδή όταν ο λόγος της απόστασης της κορυφής του αλεξικέραυνου ( $H$ ) ως προς την οριζόντια απόσταση προστασίας ( $d$ ) ισούται με

μονάδα, τότε χρησιμοποιείται κώνος προστασίας  $45^\circ$ , ενώ για αναλογία 2:1, δηλαδή όταν ο λόγος της απόστασης της κορυφής του αλεξικέραυνου (H) ως προς την οριζόντια απόσταση προστασίας (d) ισούται με δύο, τότε χρησιμοποιείται κώνος προστασίας  $60^\circ$ . 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.



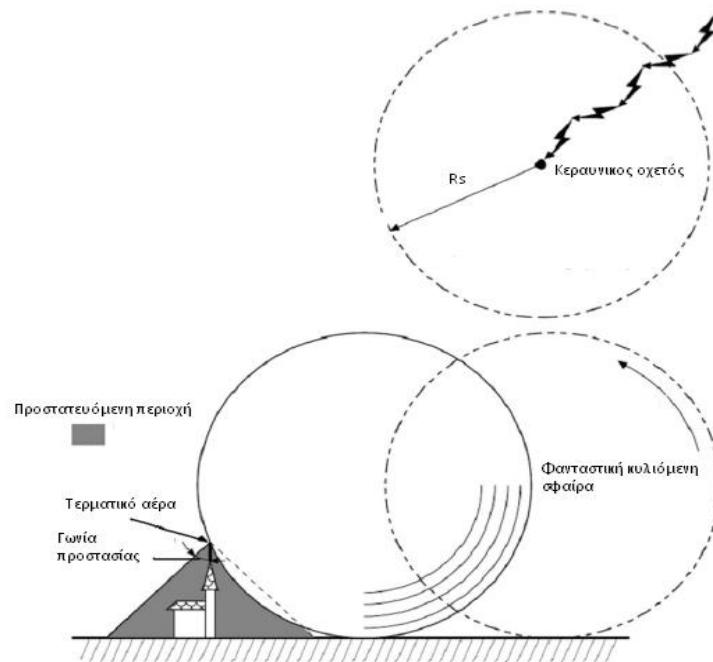
**Εικόνα 3.1:** Ζώνη προστασίας συστήματος αντικεραυνικής προστασίας με τη μέθοδο της γωνίας προστασίας με κατακόρυφη ράβδο [32].

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. Γι αυτό και η συγκεκριμένη μέθοδος συνίσταται για τον υπολογισμό της ζώνης προστασίας σε κατασκευές απλής σχετικά γεωμετρίας.

### 3.2.1.1.2 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας (Rolling Sphere Method, RSM)

Στη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας η άκρη του κατερχόμενου οχετού 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 κυλίνεται 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 [19].



Εικόνα 3.2: Ζώνη προστασίας συστήματος αντικεραυνικής προστασίας με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας [33].

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

$$D = 10 \cdot I_p^{0.65} \quad (3.3)$$

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

$$R = \sqrt{2 \cdot H \cdot D - H^2} \quad (3.4)$$

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

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

$$L = 2 * \sqrt{2 * D * h - h^2} \quad (3.5)$$

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 :

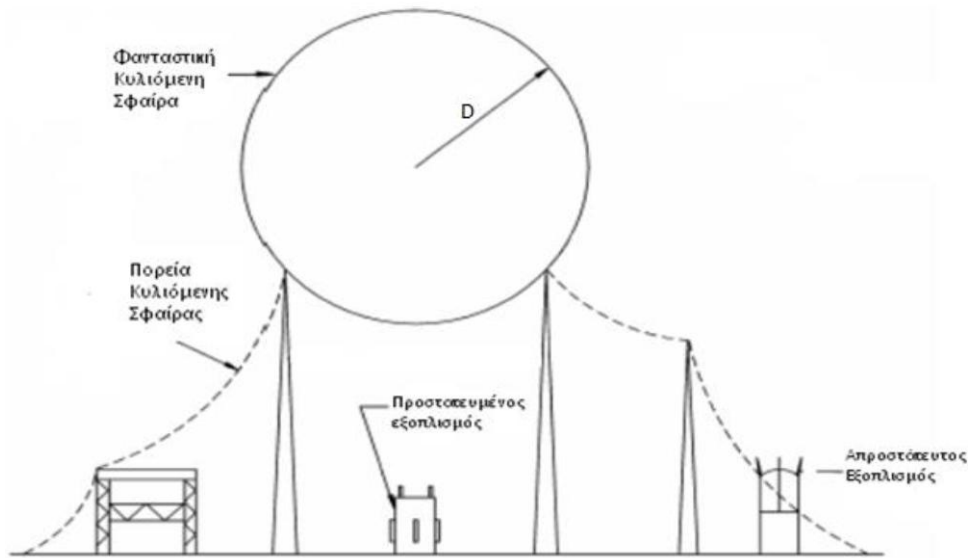
$$p = D - \sqrt{D^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (3.6)$$

Όπου

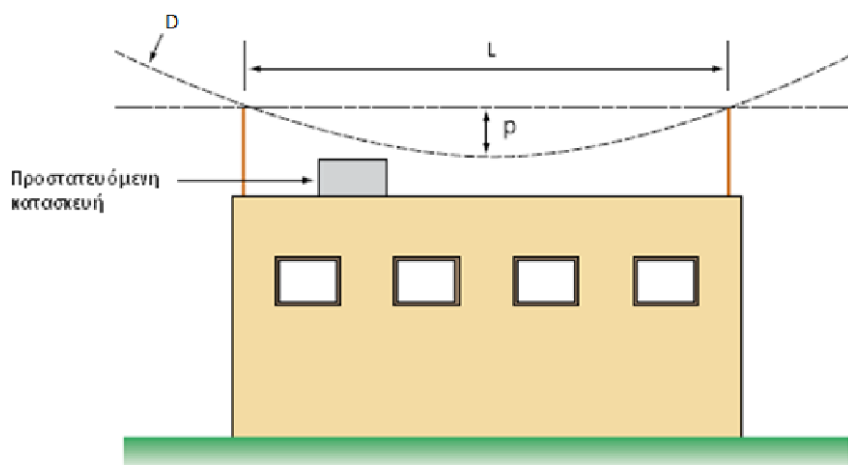
$p$ : η απόσταση διείσδυσης (m)

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

$D$ : η απόσταση πρόσκρουσης (m)



Εικόνα 3.3: Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας με περισσότερα από ένα τερματικά αέρα [19].



Εικόνα 3.4: Απόσταση διείσδυσης με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας ανάμεσα σε δυο κατακόρυφες ράβδους [21].

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 λαμβάνεται υπόψη μόνο το ρεύμα του κεραυνού [26]. Στην μέθοδο αυτή παραβλέπεται το φυσικό κριτήριο για την έναρξη του ανοδικού οχητού σύνδεσης, δηλαδή η σπουδαιότητα του ύψους της κατασκευής και της γεωμετρίας του αλεξικέραυνου [30]. Χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές όταν χρησιμοποιούμε περισσότερα του ενός αλεξικέραυνα. Συνηθέστερα χρησιμοποιείται σε συστήματα προστασίας μεγάλων κτηρίων ή συστοιχίας οικοδομημάτων με υψομετρικές διαφορές, όμως χρησιμοποιείται και στη σχεδίαση συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας σε μεγαλύτερα σκάφη [4]. Τέλος, η μέθοδος αυτή δε μπορεί να αποτελέσει τη βάση για επιστημονικές μελέτες [26].

### **3.2.1.1.3 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:

$$D = 0.8 * [(H + 15) * I_p]^{2/3} \quad (3.7.α)$$

$$R = \sqrt{2 * H * D - H^2} \quad (3.7.β)$$

Όπου :

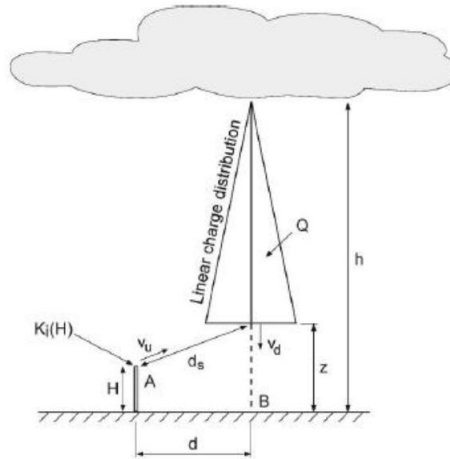
H: το ύψος του αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου του ύψους της κατασκευής από το έδαφος

I: το μέγιστο ρεύμα του οχητού 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 υπόψη ένα συντελεστή  $K_i$  ο οποίος είναι ο λόγος του επαυξημένου ηλεκτρικού πεδίου στην κορυφή της κατασκευής ( $E_T$ ) προς το περιβάλλον πεδίο ( $E_A$ ). 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 στην εικόνα 3.5.



**Εικόνα 3.5:** Μοντέλο προσέγγισης καθοδικού οχετού σε κατασκευή που βρίσκεται σε παράλληλη απόσταση  $x$  [22].

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 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 συνδέεται με το φορτίο με τη σχέση:  $I_p = 10.6 * Q^{0.7}$
- 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 μετά από μια σειρά εργαστηριακών ερευνών. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, 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 τη 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 συμβεί πρώτο και για ποια θέση του καθοδικού οχετού.

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

- Σημείο A (κατασκευή)

$$\text{Συνολική ένταση πεδίου: } E_T = K_f \cdot E_A \quad (3.8)$$

Όπου:

$$E_A = \frac{Q}{\pi \epsilon x^2 \left(\frac{h-z}{x}\right)^2} \left[ \frac{\left(\frac{h-z}{x}\right)}{\sqrt{1+\left(\frac{z}{x}\right)^2}} + \sinh^{-1} \frac{z}{x} - \sinh^{-1} \frac{h}{x} \right] \quad (3.9)$$

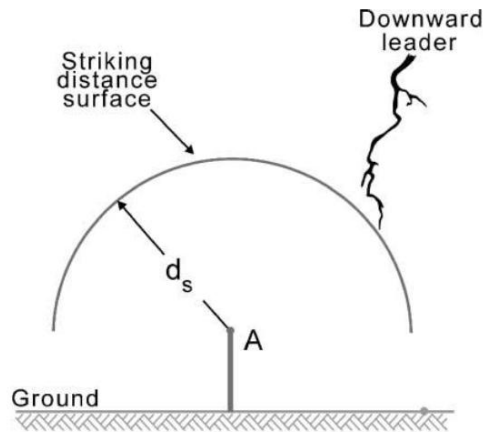
Ο Eriksson εξήγαγε την παραπάνω σχέση αφού υπέθεσε ότι το φορτίο ανά μονάδα μήκους αυξάνεται γραμμικά κατά μήκος του οχετού (από το σύννεφο προς την άκρη του) και ότι  $z > H$  και  $H \leq x$ . Ένας ανερχόμενος οχετός θα ξεκινήσει εάν  $E_t \geq E_m$ .

- Σημείο B (έδαφος)

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

$$E_B = \frac{Q}{\pi \epsilon (h-z)^2} \left[ \frac{h-z}{z} + \ln \left( \frac{z}{h} \right) \right] \quad (3.10)$$

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 στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 3.6:** Επαναληπτικοί υπολογισμοί οι οποίοι εφαρμόζουν το κριτήριο έναρξης οχετού δημιουργώντας μια “επιφάνεια απόστασης διάσπασης” πάνω από το σημείο A [22].

Η επίτευξη του αναγκαίου 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  $E_m = E_B$ . 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 οχετού ως  $u_u$  το κριτήριο αυτό ανάγεται σε :

$$\frac{D-z_m}{u_u} \leq \frac{z-z_m}{u_d} \quad (3.11)$$

Ως εκ τούτου, ο λόγος ταχυτήτων  $K_v = \frac{u_d}{u_u}$  είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας για το μοντέλο. Αν η απόσταση  $z_m$  είναι μικρή σε σχέση με την απόσταση πρόσκρουσης η σχέση (3.11) 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 3.5 στη σχέση (3.11) προκύπτει :

$$x = \sqrt{\left(\frac{z_m*(K_v-1)+z}{K_v}\right)^2 - (z-H)^2} \quad (3.12)$$

Εάν  $u_u = u_d$  και  $z_m \ll D$  η σχέση (3.11) δίνει  $D=z$  και η σχέση (3.12) απλοποιείται σε:

$$z = \frac{x^2+H^2}{2H} \quad (3.13)$$

Με βάση τη λιγότερο συντηρητική (αλλά ακριβέστερη προσέγγιση) στην οποία ο ανερχόμενος οχετός χρειάζεται να διασχίσει μια απόσταση  $\{D - (z - z_m)\}$  λόγω της καθόδου του κατερχόμενου οχετού ισχύει η ακόλουθη σχέση :

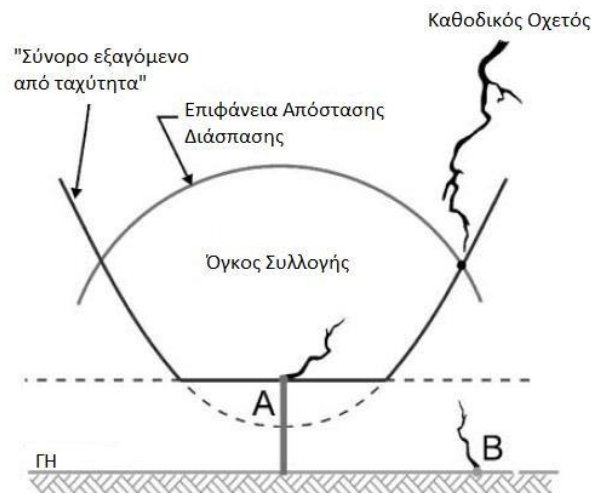
$$\frac{\{D - (z - z_m)\}}{u_u} \leq \frac{z - z_m}{u_d} \quad (3.14)$$

Αν η απόσταση  $z_m$  είναι πολύ μικρή σε σχέση με την απόσταση πρόσκρουσης η σχέση (3.14) γράφεται :  $D = z * (1 + 1/K_v)$ . Αντικαθιστώντας τη σχέση  $D = \sqrt{(z - H)^2 + x^2}$  από το σχήμα 3.5 στη σχέση (3.14) προκύπτει :

$$x = \sqrt{\left(\frac{(z - z_m) * (1 + K_v)}{K_v}\right)^2 - (z - H)^2} \quad (3.15)$$

Για μεγάλες τιμές του  $K_v$  και υποθέτοντας  $z_m \ll D$ , η σχέση για την απόσταση (x) τείνει να γίνει αυτή της σχέσης (3.13).

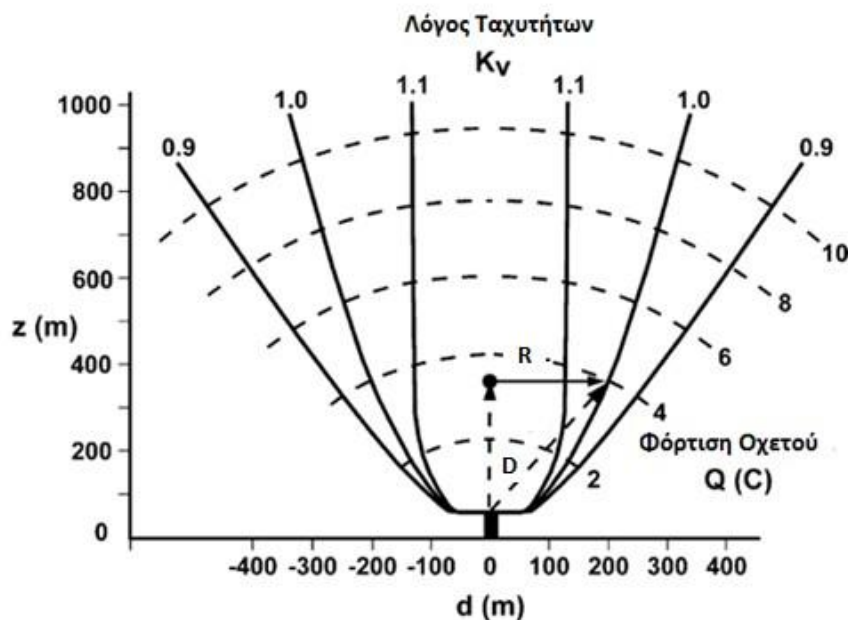
Για μία κατασκευή δεδομένου ύψους H τα σημεία (x,z) ικανοποιώντας την σχέση (3.13) χαράσσουν έναν παραβολικό όγκο που βρίσκεται πάνω από την κατασκευή. Για άλλη μια φορά τα σημεία αυτά λαμβάνονται μέσα από μια σειρά επαναληπτικών υπολογισμών για διαφορετικές θέσεις του καθοδικού οχετού. Η περιοχή αυτή αναφέρεται σαν “σύνορο εξαγόμενο από ταχύτητα” (velocity-derived boundary). Το αποτέλεσμα ενός τέτοιου υπολογισμού απεικονίζεται στην πιο κάτω εικόνα:



**Εικόνα 3.6:** 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 [22].

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 συλληχθεί 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 στην εικόνα 3.7 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  $K_v = u_d/u_w$ , αν και η ευαισθησία σε αυτή 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.



**Εικόνα 3.7:** Όγκος συλλογής μιας κατασκευής ύψους 30m για διαφορετικές φορτίσεις κατερχόμενων οχετών και διαφορετικό λόγο ταχυτήτων [22].

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 [26].

### 3.2.1.1.4 Μέθοδος δυναμικού του οχετού προεκκένωσης- 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 εξής:

$$q = -C * V \quad (3.16)$$

Για τον υπολογισμό του δυναμικού ( $V$ ) του κεραυνού από τη σχέση (3.16) 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:

$$C = \frac{2*\pi*\epsilon}{\ln\left(\frac{Z}{m}\right)} \quad (3.17)$$

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

$$m = \frac{q}{3 * 10^6 * \pi * \epsilon} \quad (3.18)$$

Από τις σχέσεις (3.16), (3.17), (3.18) προκύπτει ότι το δυναμικό του κεραυνού ισούται με :

$$V = -\frac{q}{2*\pi*\epsilon} * \ln\left(\frac{3*10^6*\pi*\epsilon*Z}{q}\right) \quad (3.19)$$

Τελικά η απόσταση πρόσκρουσης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$D = \frac{V}{750}, \text{ σε μέτρα} \quad (3.20)$$

Το δυναμικό του κεραυνού υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.19) όπου  $q$  είναι το φορτίο ανά μονάδα μήκους του κεραυνικού καναλιού μετρούμενου 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 5000m.Η εκτιμώμενη απόσταση πρόσκρουσης τελικά απλοποιείται ως:

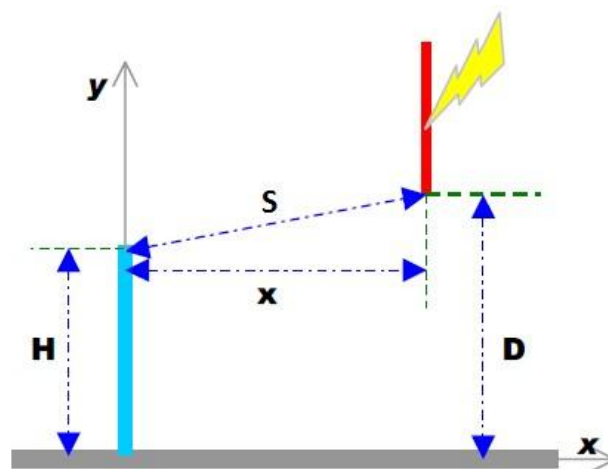
$$D = \frac{q}{41.7 * 10^{-3}} * \ln \left( \frac{q}{41.7 * 10^{-3}} * \left( \frac{1}{2Z} \right) \right) \quad (3.21)$$

### 3.2.1.1.5 Ελλειπτικό μοντέλο

Το 2007 ο S.Grzybowski και η ομάδα του, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου της Πολιτείας του Μισισσιπιπή, παρουσίασαν ένα ελλειπτικό μοντέλο για την εκτίμηση της απόστασης πρόσκρουσης και της ακτίνας σύλληψης μιας ράβδου Franklin σε ένα μοντέλο πλοίου [23]. Η ζώνη προστασίας προσδιορίζεται από το ρεύμα του κεραυνού, το ύψος του αλεξικέρανου (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 αλεξικέρανου ( $S$ ) όπως απεικονίζονται στην εικόνα 3.8 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 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:



Εικόνα 3.8: Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της απόστασης διάσπασης μιας ράβδου Franklin [23].

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 (1.2/50μs). 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 cm), η απόσταση διάσπασης της φορτισμένης ράβδου από το έδαφος  $D$  (σε cm) και η πολικότητα της κρουστικής τάσης. Οι εξισώσεις που πρόέκυψαν [23] για τον υπολογισμό της απόστασης διάσπασης  $S$  (σε cm), για κεραυνό θετικής πολικότητας (σχέση 3.22) και αρνητικής πολικότητας (σχέση 3.23), είναι :

$$S = D * \left( 0.8 * e^{\frac{0.125 * H}{D}} + 0.17 \right) \quad (3.22)$$

$$S = D \left( 1 + 0.24 * e^{-\left(\frac{H}{D}\right)} \right) \quad (3.23)$$

Στη σχέση (3.23) η απόσταση πρόσκρουσης  $S$  είναι μεγαλύτερη από την απόσταση πρόσκρουσης  $D$  και η απόσταση  $S$  αυξάνεται με αύξηση της απόστασης  $D$ . Στη σχέση (3.22) 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 (3.22) και (3.23) 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 [24]. Αυτή η απόσταση ( $\alpha_o$ ) ορίζει την ακτίνα σύλληψης στο ελλειπτικό μοντέλο που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha_o = D * \sqrt{\frac{S^2 - (D-H)^2}{D^2 - (D-H)^2}} \quad (3.24)$$

Η απόσταση πρόσκρουσης εξαρτάται από το ύψος της ράβδου και από το ρεύμα του κεραυνού παρόλο που στις σχέσεις (3.22) και (3.23) 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 3.25) και αρνητικής πολικότητας (σχέση 3.26):

$$S = 9.8959 * I_p^{0.7251} + 1.7872 * H^{-0.6092} \quad (3.25)$$

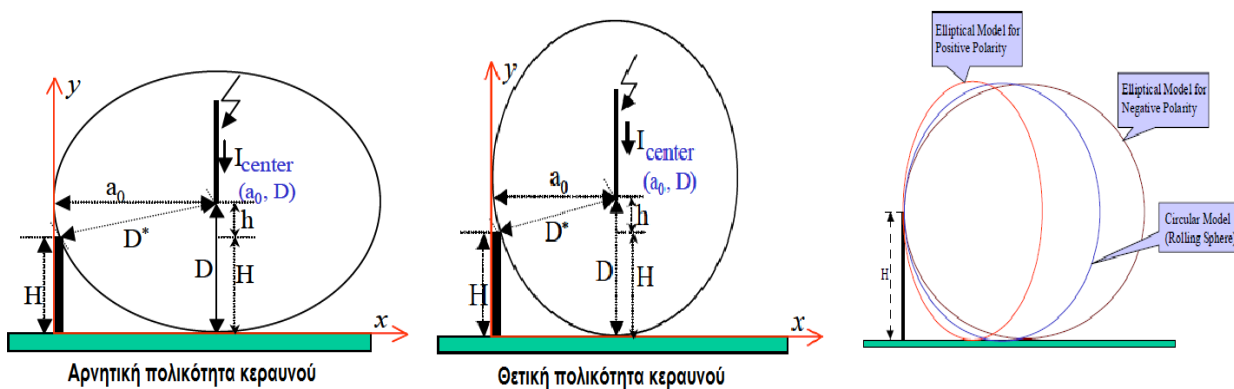
$$S = 6.0519 * I_p^{0.6228} + 0.0027 * H^{0.7029} \quad (3.26)$$

Λαμβάνοντας υπόψη 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. Η παρακάτω εικόνα 3.9 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 έδαφος. Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9, η ζώνη προστασίας είναι μικρότερη για κεραυνό θετικής πολικότητας ενώ είναι μεγαλύτερη για κεραυνό αρνητικής πολικότητας.



Εικόνα 3.9: Ελλειπτικά μοντέλα με βάση την πολικότητα του κεραυνού και σύγκριση των ζωνών προστασίας [23].

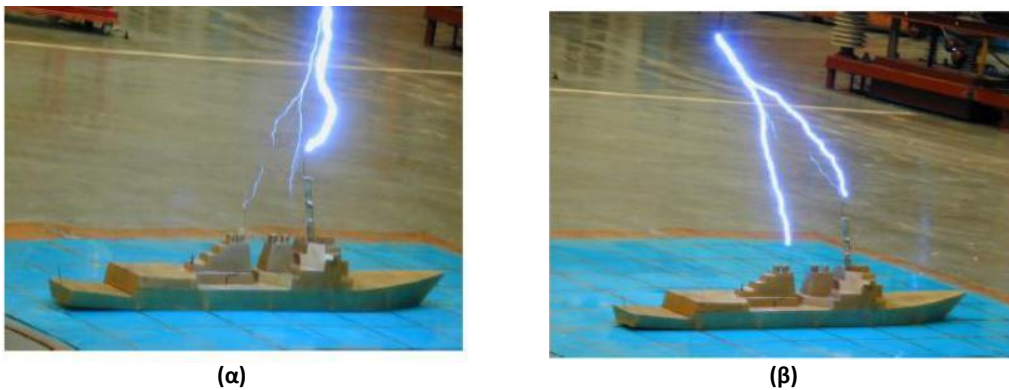
Παρακάτω παρουσιάζεται το πείραμα που πραγματοποίησε ο S. Grzybowski και η ομάδα του.

### Μελέτη της ζώνης προστασίας του ελλειπτικού μοντέλου σε πλοίο

Για τη μελέτη της ζώνης προστασίας του ελλειπτικού μοντέλου, έγινε προσομοίωση κεραυνού με κρουστική τάση 1.2/50  $\mu$ s σε ένα μοντέλο πλοίου. Η απόσταση μεταξύ της άκρης της ηλεκτρισμένης ράβδου (που αντιπροσωπεύει τον καθοδικό οχετό) και του επιπέδου του νερού επιλέχθηκε 1m και 3m αντίστοιχα, η οποία σε κλίμακα 1:100 αντιπροσωπεύει την απόσταση διάσπασης μεταξύ του καθοδικού οχετού και του επιπέδου του νερού σε 100m και 300m αντίστοιχα.

Στη περίπτωση κεραυνού τοποθετημένου 1m πάνω από την επιφάνεια του νερού, παρατηρήθηκε ότι: το αλεξικέραυνο συλλαμβάνει κεραυνικά πλήγματα θετικής και αρνητικής πολικότητας, όταν το άκρο του κεραυνού βρίσκεται πάνω απ' το αλεξικέραυνο και σε περιοχή γύρω απ' αυτό (εικόνα 3.10.α). Μετακινώντας το άκρο του κεραυνού πιο πίσω ή στο πλάι του αλεξικέραυνου, αυτό συλλαμβάνει μόνο κάποια από τα πλήγματα. Οι κεραυνοί χτυπάνε διαφορετικά αντικείμενα με βάση τη θέση του άκρου τους. Με άλλα λόγια εξαρτάται από την απόσταση διάσπασης. Γενικά τα αντικείμενα πλήττονται μεμονωμένα,

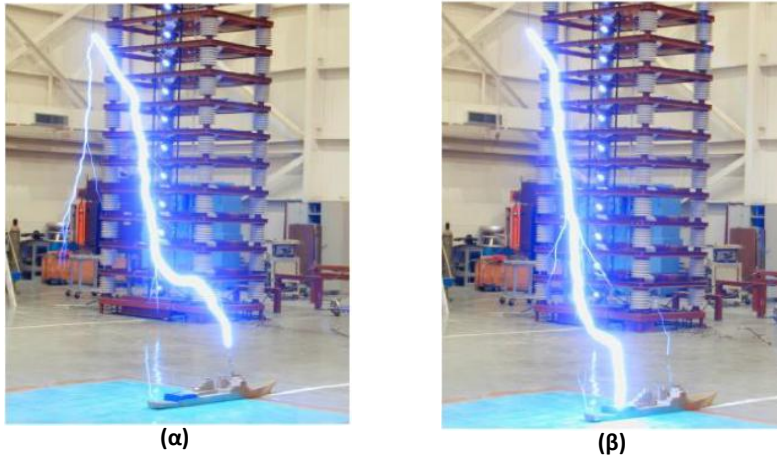
αλλά μερικές φορές δύο αντικείμενα μπορεί να χτυπηθούν ταυτόχρονα, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.10.β. [23].



**Εικόνα 3.10:** Κεραυνός καταλήγει (α) στο αλεξικέραυνο του μοντέλου πλοίου και (β) στο αλεξικέραυνο και σε προστατευόμενο αντικείμενο [23].

Στη περίπτωση κεραυνού τοποθετημένου 3m πάνω από την επιφάνεια του νερού, παρατηρήθηκε ότι ο κεραυνός κατέληγε με μεγαλύτερη πιθανότητα στο αλεξικέραυνο. Η ζώνη προστασίας για απόσταση διάσπασης 3m είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για 1m. Συγκρίνοντας τη ζώνη προστασίας για θετικούς και αρνητικούς κεραυνούς, παρατηρήθηκε ότι η ζώνη προστασίας είναι μικρότερη για θετική παρά για αρνητική πολικότητα κεραυνού. Τα περισσότερα από τα αρνητικά κεραυνικά χτυπήματα, πάνω από 3m από την επιφάνεια του νερού, κατέληξαν στο αλεξικέραυνο. Αυτά που παράχθηκαν αρκετά πίσω από το αλεξικέραυνο κατέληξαν στο αντικείμενο που βρισκόταν στην πίσω μεριά του πλοίου.

Για θετικό κεραυνό, όταν αυτός ήταν τοποθετημένος από την πλευρά του πλοίου και πίσω από αυτό, τα κεραυνικά χτυπήματα κάποιες φορές κατέληξαν στο αλεξικέραυνο (εικόνα 3.11.α) και κάποιες άλλες σε διάφορα αντικείμενα (εικόνα 3.11.β), ανάλογα με την πλευρά του πλοίου στην οποία είχε ξεκινήσει ο ανοδικός οχετός. Το σύνολο των θετικών κεραυνών παρουσίασαν πολλά παρακλάδια, που αναπτύχθηκαν προς διάφορα αντικείμενα. Επίσης στην περίπτωση των θετικών κεραυνών, αναπτύχθηκαν και κάποιοι δυνατοί ανοδικοί οχετοί από πολλά αντικείμενα. Αυτό φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Το σημείο όπου ο κεραυνός θα χτυπήσει αποφασίζεται από τον ανοδικό οχετό. Στην περίπτωση αρνητικού κεραυνού, ανοδικοί οχετοί παρατηρούνται μόνο από το αλεξικέραυνο, οι οποίοι όμως δεν είναι τόσο έντονοι και μακριοί όπως στη περίπτωση του θετικού κεραυνού. [23]

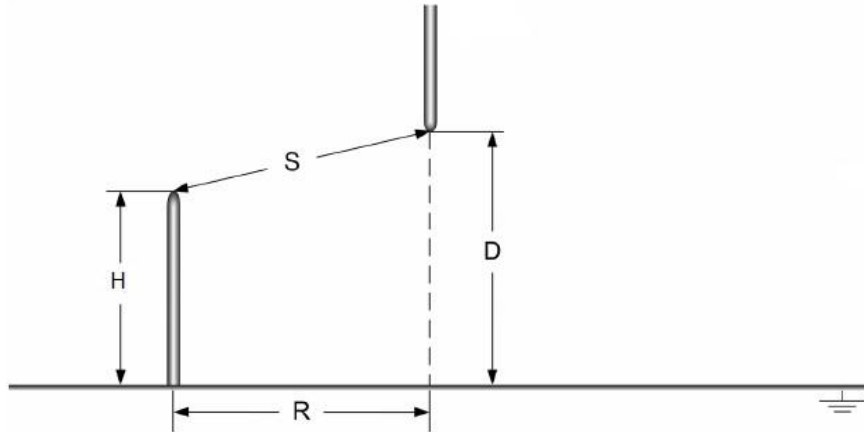


**Εικόνα 3.11:** Θετικός κεραυνός καταλήγει (α) στο αλεξικέραυνο του μοντέλου πλοίου και (β) σε προστατευόμενο αντικείμενο. Ανάπτυξη ανοδικών οχρών από διάφορα αντικείμενα [23].

### 3.2.1.1.6 Στατιστικό μοντέλο

Σύμφωνα με τον Τσοβίλη [1] 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 αλεξικέραυνο, το ρεύμα, τα φαινόμενα γειννίασης και την πιθανότητα σύλληψης του κεραυνού. 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  $U_s$  επιβαλλόταν κατά τη διεξαγωγή πειραμάτων φορτισμένης ράβδου, μιας μεταλλικής γειωμένης πλάκας και μιας γειωμένης ράβδου, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.12. 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. 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%.



**Εικόνα 3.12:** Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης. H: ύψος γειωμένης ράβδου, D: απόσταση πρόσκρουσης στη γη, S: απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης-γειωμένης ράβδου, R: ακτίνα σύλληψης [1].

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:

$$R_C = D * \left[ c_1 * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + c_2 \right] \quad (3.27)$$

$$S_C = D * \left[ a * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b \right] \quad (3.28)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $c_1, c_2, a, b$  φαίνονται στον Πίνακα 3.3

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

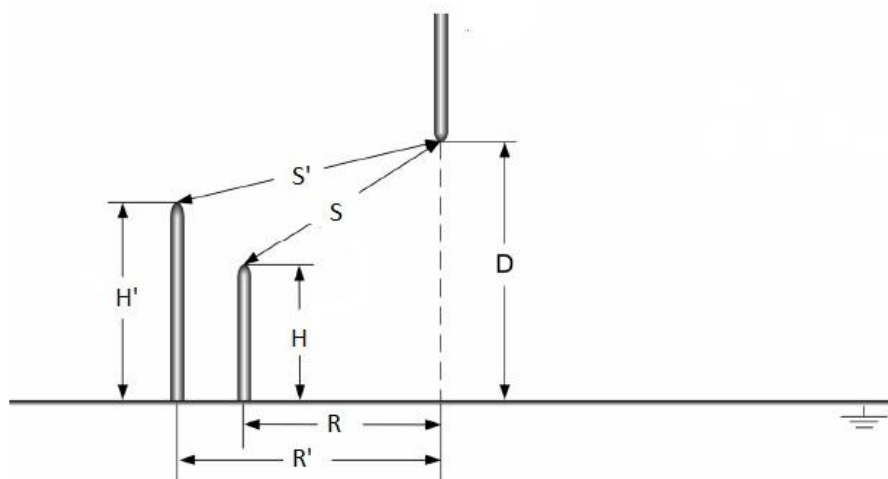
**Πίνακας 3.3:** Οι τιμές των συντελεστών  $c_1, c_2, a, b$  των εξισώσεων 3.27 και 3.28 [1].

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 στην εικόνα 3.13:



Εικόνα 3.13: Σχηματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης για τη διερεύνηση φαινομένων γειννίασης [1].

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. Επιβαλλόταν 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 ράβδος είναι  $0.5(1-p)$  (πιθανότητα αστοχίας). Έτσι η πλευρική απόσταση της ψηλής ράβδου από τη φορτισμένη ράβδος που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης ίση με 33%, ονομάζεται κρίσιμη ακτίνα σύλληψης ( $R_{cn}$ ) για την περίπτωση 2 γειωμένων ράβδων. Λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις γειννίας 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 (3.27) , (3.28):

$$R_{cn} = \lambda * R_c \quad (3.29)$$

$$S_{cn} = \lambda * S_c \quad (3.30)$$

Ο συντελεστής  $\lambda$  παίρνει τις πιο κάτω τιμές [1]:

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

Πίνακας 3.4: Οι τιμές του συντελεστή  $\lambda$  που προέκυψαν από επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων [1].

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το συγκεκριμένο πείραμα είναι:

- Η παρουσία γειννιάζουσας 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 την 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 ράβδος αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα σε περίπτωση γειννίας όπως και συμβαίνει στο μοντέλο του 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 γειννιάζουσα 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:

$$R_c = D * \left[ a_1 * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + a_2 \right] \quad (3.31)$$

$$S_C = D * \left[ b_1 * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b_2 \right] \quad (3.32)$$

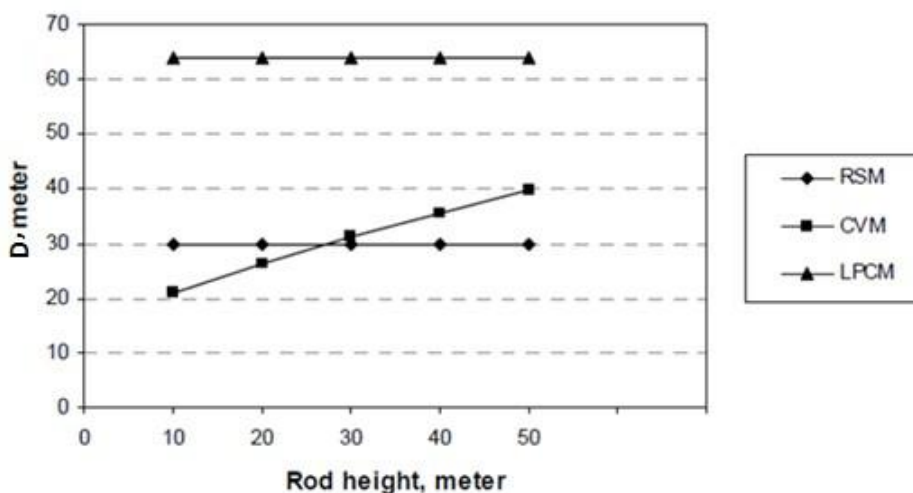
Οι τιμές των συντελεστών  $\alpha_1, \alpha_2, b_1, b_2$  φαίνονται στον Πίνακα 3.5:

Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
Θετική πολικότητα		Αρνητική πολικότητα	Θετική πολικότητα		Αρνητική πολικότητα
$b_1$	- 0.032	0.0266	$\alpha_1$	0.2416	0.2516
$b_2$	0.8873	1.1486	$\alpha_2$	0.8958	1.1439

Πίνακας 3.5: Οι τιμές των συντελεστών  $\alpha_1, \alpha_2, b_1, b_2$  των εξισώσεων 3.31 και 3.32 [1].

### 3.2.1.2 Σύγκριση των μεθόδων αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία

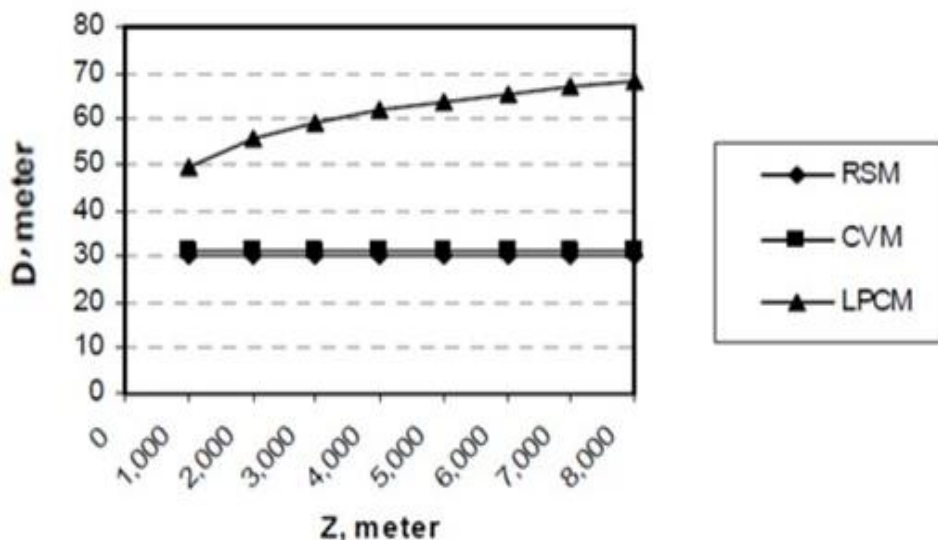
Το σχήμα 3.1 δείχνει την απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους RCM, CVM και LPCM σε συνάρτηση με το ύψος του αλεξικέραυνου (H) στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το ύψος του καταρτιού πλοίου. Το ρεύμα κεραυνού επιλέχθηκε στα 5.4 kA και αντιστοιχεί σε επίπεδο προστασίας II και έχει τιμή 0.38mC/m για το φορτίο ανά μονάδα μήκους. Η απόσταση βάσης σύννεφου 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 [25].



Σχήμα 3.1: Η απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους RCM, CVM και LPCM συναρτήσει του ύψους του αλεξικέραυνου για  $Z=5000m$  και  $I_p=5.4 kA$  [25].

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 μεθόδου RSM είναι σταθερή και δεν μεταβάλλεται αφού το ρεύμα του κεραυνού είναι σταθερό στα 5.4kA. Αυτό δικαιολογείται λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (3.7.α). Το ίδιο ισχύει και για την απόσταση διάσπασης της μεθόδου LPCM έχοντας υπόψη τη σχέση (3.21) και ότι το φορτίο ( $q$ ) και το μήκος του κεραυνικού καναλιού ( $Z$ ) είναι σταθερά χωρίς κάποια μεταβολή.

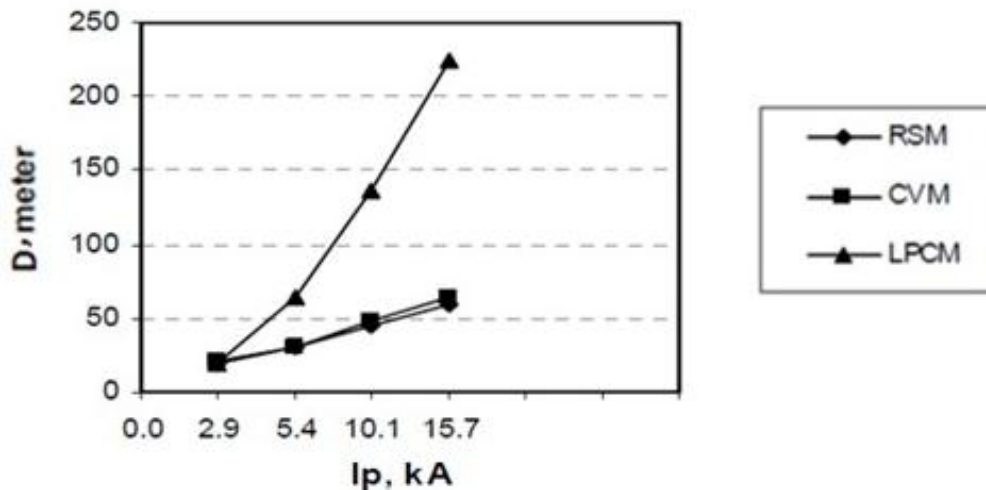
Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται και για τις τρεις μεθόδους η απόσταση πρόσκρουσης ( $D$ ) συναρτήσει του μήκους του κεραυνικού καναλιού ( $Z$ ). Το ύψος του αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου του ύψους του καταρτιού είναι 30m και το ρεύμα κεραυνού είναι 5.4kA. Από το πιο κάτω σχήμα φαίνεται ότι η απόσταση πρόσκρουσης ποικίλει όταν μεταβάλλεται το ύψος  $Z$  μόνο για τη μέθοδο LPCM. Η παράμετρος αυτή δεν περιέχεται στις άλλες δύο μεθόδους.



**Σχήμα 3.2:** Απόσταση πρόσκρουσης ( $D$ ) συναρτήσει του μήκους του κεραυνικού καναλιού ( $Z$ ) για  $H=30m$  και  $I_p=5.4 kA$  [25].

Το σχήμα 3.3 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.





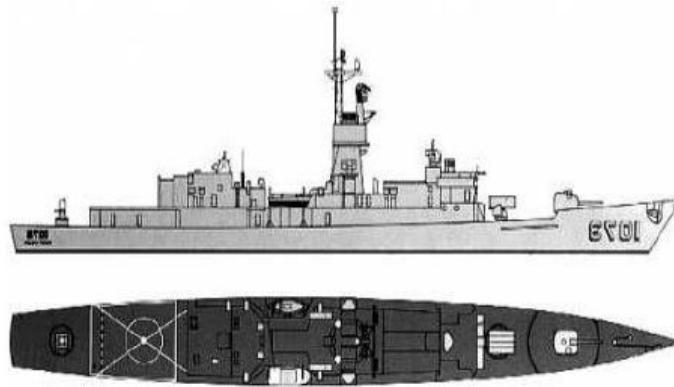
**Σχήμα 3.3:** Απόσταση πρόσκρουσης (D) συναρτήσει του ρεύματος κεραυνού για H=30m και Z=5000m [25].

Από τα πιο πάνω σχήματα (3.1-3.3) 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 [25].

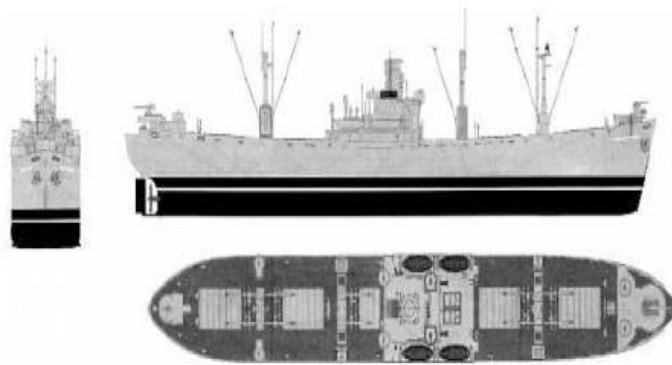
Πιο κάτω ακολουθούν πέντε διαφορετικά είδη πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν γραφικές παραστάσεις οι οποίες περιέχουν δεδομένα για την απόσταση πρόσκρουσης (D), την ακτίνα σύλληψης (R) και τον αριθμό των αλεξικέραυνων που πρέπει να είναι εξοπλισμένα πέντε διαφορετικά είδη πλοίων:



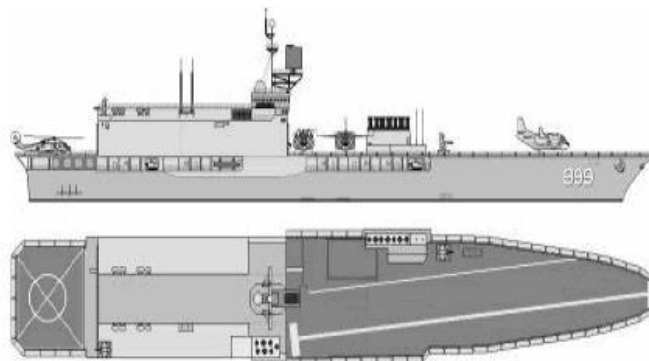
**Εικόνα 3.14:** Μεσαιο Πολεμικό Πλοίο [25].



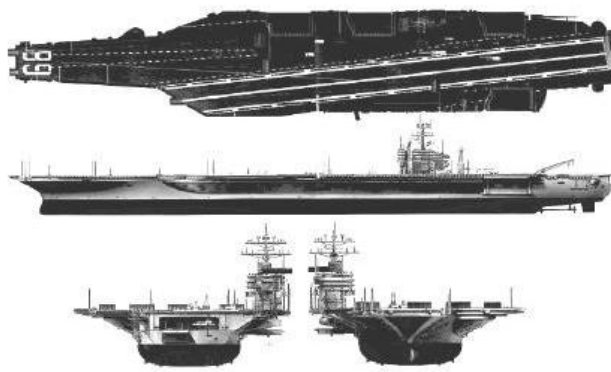
Εικόνα 3.15: Φρεγάτα [25].



Εικόνα 3.16: Εμπορικό πλοίο [25].

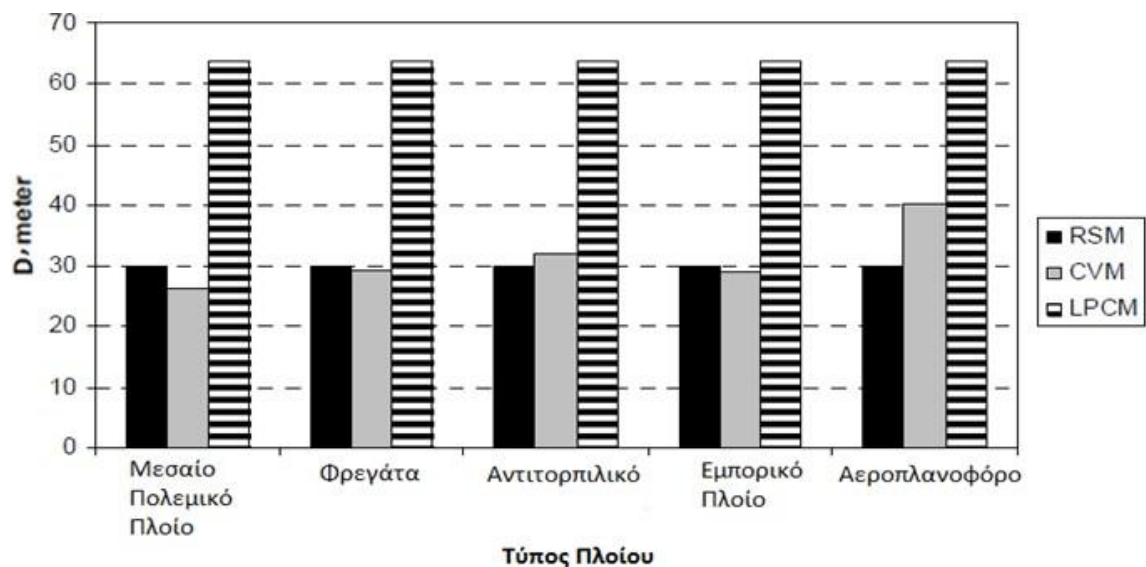


Εικόνα 3.17: Αντιτορπικό [25].



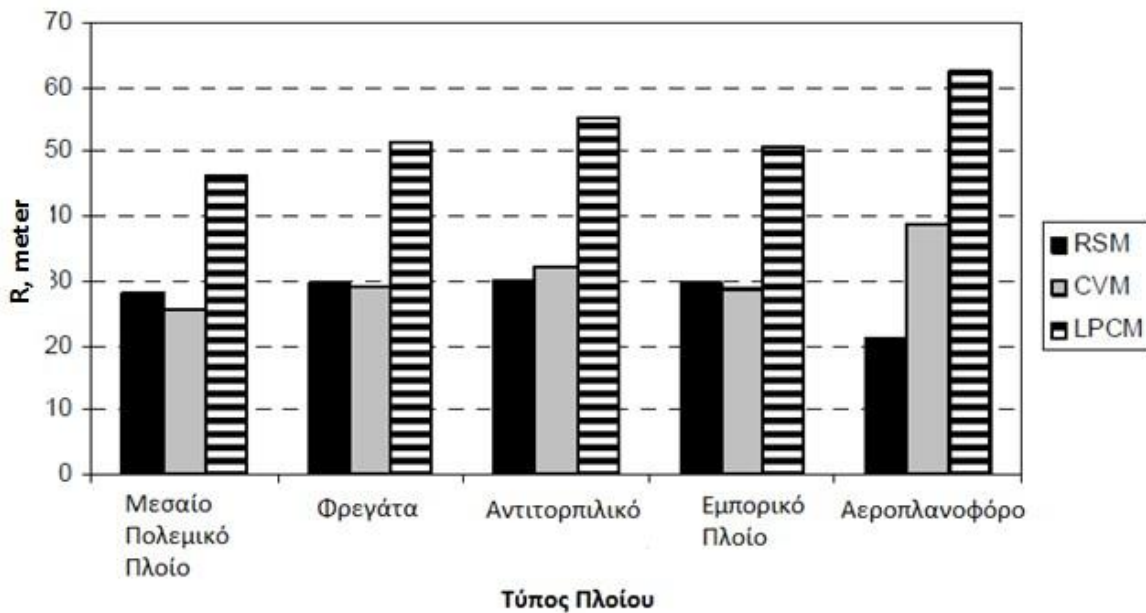
Εικόνα 3.18: Αεροπλανοφόρο [25].

Το σχήμα 3.4 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.



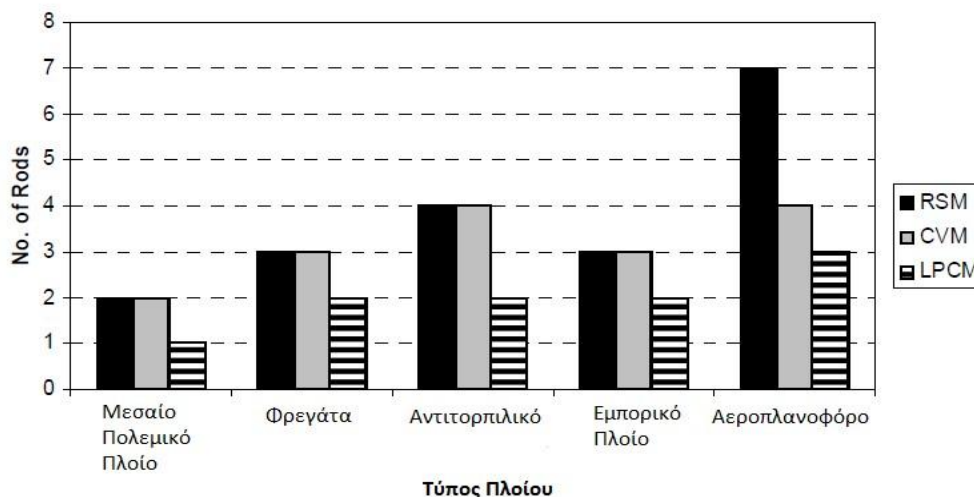
Σχήμα 3.4: Απόσταση πρόσκρουσης για κάθε είδος πλοίου.  $I_p=5.4kA$  και  $Z=5000m$  [25].

Το σχήμα 3.5 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 3.5: Ακτίνα σύλληψης για κάθε είδος πλοίου.  $I_p=5.4\text{kA}$  και  $Z=5000\text{m}$  [25].

Τέλος, το σχήμα 3.6 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 3.6: Αριθμός αλεξικέραυνων για κάθε είδος πλοίου.  $I_p=5.4kA$  και  $Z=5000m$  [25].

### 3.2.2 Αγωγός καθόδου

Με τον όρο αυτό γίνεται πρωτίστως λόγος για τον κύριο αντικεραυνικό αγωγό που εγκαθίσταται, για να συνδέσει το τερματικό αέρα ή το κατάρτι αντικεραυνικής προστασίας με την πλάκα αντικεραυνικής γείωσης. Υπάρχει ωστόσο και ένα σύστημα δευτερευόντων αγωγών που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση αγωγίμων προσαρμογών στον κύριο αγωγό καθόδου ή στο τερματικό αντικεραυνικής γείωσης.

Ο κανονισμός ABYC δίνει λεπτομερείς οδηγίες ως προς το υλικό και τη διατομή των αγωγών καθόδου.

- Συγκεκριμένα κάθε κύριος αγωγός πρέπει να έχει αντίσταση όχι μεγαλύτερη από αυτήν αγωγού χαλκού  $21.2mm^2$  (#4AWG) ίδιου μήκους, ενώ κάθε δευτερεύων αγωγός, πρέπει να έχει αντίσταση όχι μεγαλύτερη από αυτήν αγωγού χαλκού  $13.3mm^2$  (#6AWG) ίδιου μήκους.
- Οι αγωγοί πρέπει να είναι από επικασσιτερωμένο πολύκλωνο χαλκό, τύπου II για αγωγό  $21.2mm^2$  ή λιγότερο και πολύκλωνο χαλκό Τύπου III για αγωγό  $21.2mm^2$  ή μεγαλύτερο και σε συμμόρφωση με τους κανονισμούς ABYC E-11.
- Ο κύριος αγωγός δεν πρέπει να αποτελείται από χάλκινη λωρίδα, ενώ λωρίδες που χρησιμοποιούνται ως δευτερεύοντες αγωγοί δεν πρέπει να έχουν μεγαλύτερη αντίσταση από το αντίστοιχο σύρμα και πρέπει να έχουν ελάχιστο πάχος  $0.8mm$ .
- Επίσης, τελικοί υποδοχείς και συνδέσεις από πλέγμα ανοξείδωτου χάλυβα, αυξάνουν την πιθανότητα ψηλής αντίστασης και θα πρέπει να αποφεύγονται.

Το πρότυπο IEC 60092-507 και οι οδηγίες του Bureau Veritas NR 566 συμφωνούν στο ότι οι αγωγοί καθόδου της αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από

χάλκινο αγωγό διατομής τουλάχιστον 70 mm<sup>2</sup>. Οι αγωγοί πρέπει να τοποθετηθούν σε μια επαφή από χαλκό με διάμετρο όχι μικρότερη από 12mm<sup>2</sup> και θα πρέπει να προεξέχει από την κορυφή του καταρτιού για τουλάχιστον 300mm. Το κατώτερο άκρο του καλωδίου πρέπει να συνδεθεί στη γείωση. Οι αγωγοί καθόδου των αλεξικέραυνων πρέπει να βρίσκονται έξω από το σκάφος. Η διαδρομή τους θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθεία, αποφεύγοντας μικρές καμπύλες απότομες αλλαγές πορείας.

Όλοι οι κανονισμοί συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι προκειμένου να εξασφαλιστεί το αγωγή μονοπάτι μεταξύ του αλεξικέραυνου και του νερού για την επαρκή εκφόρτιση κεραυνικών ρευμάτων, το σύστημα πρέπει να αποτελείται από αγωγούς που να είναι απαραίτητα κάθετοι και ευθείς. Η διαδρομή του καθοδικού αγωγού πρέπει να αποφεύγει επικίνδυνες περιοχές (δεξαμενές και χώρους αποθήκευσης πυρομαχικών) και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθεία (με ελάχιστη ακτίνα κάμψης δέκα φορές την αντίστοιχη διάμετρο του αγωγού σύμφωνα με το DEF STAN 02-516). Ο αγωγός πρέπει να είναι ασφαλώς προσδεμένος στη δομή του σκάφους σε όλο το μήκος της διαδρομής. Διάφοροι τύποι ενώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά μήκος της διαδρομής αρκεί να ικανοποιούν ορισμένα κριτήρια:

- Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται συγκολλημένες συνδέσεις
- Τα καλώδια πρέπει να τερματίζουν σε κατάλληλα συγκολλημένες προεξοχές.
- Το αγωγή μονοπάτι κάθε σύνδεσης δεν πρέπει να διασφαλίζεται από τις βίδες και τους σφικτήρες που συγκρατούν τις αγωγίμες περιοχές των μερών του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Το εμβαδό των αγωγίμων περιοχών στις συνδέσεις δεν πρέπει να είναι μικρότερο των 100mm<sup>2</sup> χαλκού ή αλουμινίου.
- Οι συνδέσεις πρέπει να είναι ανθεκτικές στη διάβρωση.
- Πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα για συνδέσεις μεταξύ ασύμβατων μετάλλων.
- Η ακεραιότητα των συνδέσεων πρέπει να επιβεβαιώνεται μετρώντας την αντίσταση μεταξύ του τερματικού αέρα και του τερματικού γείωσης (το πολύ στα 0.02Ω σύμφωνα με το DEF STAN)

Ένα γενικό μέτρο ασφάλειας προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι πλευρικές εκκενώσεις και η επαγωγή υψηλής τάσης στην καλωδίωση του σκάφους, είναι οι αγωγοί αντικεραυνικής προστασίας να μην δρομολογούνται σε μικρή απόσταση και παράλληλα με την καλωδίωση του σκάφους.

### **3.2.3 Τερματικό γείωσης (πλάκα γείωσης)**

Σε μη μεταλλικά πλοία το κατώτερο μέρος των αγωγών του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να συνδέεται σε μεταλλική επιφάνεια (πλάκα ή εναλλακτικά λωρίδα γείωσης) από αγωγή υλικό συμβατό με το θαλασσινό νερό, (χαλκό, κράμα χαλκού, ανοξείδωτο ατσάλι, αλουμίνιο ή μόλυβδο) τέτοιο ώστε να αποφεύγεται η ηλεκτροχημική διάβρωση λόγω εγγύτητας με οποιοδήποτε άλλο μεταλλικό αντικείμενο,

όπως η προπέλα. Η πλάκα αυτή πρέπει να είναι ασφαλώς προσδεμένη στο εξωτερικό μέρος του σκελετού του πλοίου σε θέση που προορίζεται για αυτό το σκοπό και που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο γραμμή σε συνθήκες μικρής φόρτωσης του πλοίου, ούτως ώστε να είναι βυθισμένη υπό οποιοσδήποτε συνθήκες πλεύσης. Πρέπει να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο ευθεία κάτω από το τερματικό αέρα, για να ελαχιστοποιηθούν οι οριζόντιες διαρροές του κύριου καθοδικού διασυνδεδετικού αγωγού. Όλες οι συνδέσεις στην πλάκα/ λωρίδα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθείς και σύντομες. Η πλάκα αυτή δεν πρέπει να βάφεται ή να καλύπτεται με οποιονδήποτε τρόπο.

Ένα σημαντικό θέμα είναι ο διαχωρισμός των τερματικών γείωσης ανάλογα με το αν αυτά χρησιμοποιούνται για την αντικεραυνική προστασία ή για κοινή ηλεκτρική χρήση. Η πλάκα που προορίζεται για αμιγώς ηλεκτρική χρήση πρέπει να είναι ξεχωριστή από την πλάκα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας εκτός από το πρότυπο DEF STAN 02-516 που δίνει τη δυνατότητα να συμβεί το αντίθετο, το πρότυπο IEC 60092-507 που δεν αναφέρεται καν επ' αυτού και το πρότυπο ABYC το οποίο επιτρέπει κοινή πλάκα γείωσης για ράδιο και αντικεραυνική προστασία. (Μάλιστα, στον κανονισμό της Διεύθυνσης Ηλεκτρικής Ασφάλειας Νορβηγίας ο διαχωρισμός αυτός ποσοτικοποιείται και αναφέρεται ότι οι πλάκες πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά τουλάχιστον 1 μέτρο).

- Λαμβάνοντας υπόψη ότι η έναρξη της διάχυσης του κεραυνικού ρεύματος στο νερό, διευκολύνεται περισσότερο από αιχμηρές άκρες και γωνίες παρά από επίπεδες επιφάνειες, ορισμένοι κανονισμοί συνιστούν οι αιχμές της εξωτερικής πλάκας ή λωρίδας γείωσης να είναι αιχμηρές, εκτεθειμένες και όχι υδατοστεγώς σφραγισμένες ή στρογγυλεμένες στην περιοχή συγκόλλησης σε αντίθεση με την ιδεατή περίπτωση κυκλικής πλάκας, στρογγυλεμένης στις άκρες (DEF STAN).
- Ορισμένοι κανονισμοί επιτρέπουν τη χρήση μεταλλικών επιφανειών όπως οι προπέλες, οι άξονες, τα πηδάλια κλπ. με το κατάλληλο εμβασμό, ως τερματικά κεραυνικής γείωσης μόνο όπου το κατάρτι αντικεραυνικής προστασίας βρίσκεται πάνω από τα υποθαλάσσια μεταλλικά αντικείμενα που λειτουργούν ως γείωση αντικεραυνικού συστήματος. Ο αγωγός σύνδεσης πρέπει να είναι τουλάχιστον αντίστοιχος με τον κύριο αγωγό.

Αν εξασφαλίζεται η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του μεταλλικού σκελετού και του καταρτιού ή άλλης μεταλλικής υπερδομής κατάλληλου ύψους τότε δεν χρειάζεται καμία περαιτέρω πρόβλεψη αντικεραυνικής προστασίας πέρα από την εγκατάσταση τερματικών αέρα. Το ρόλο της πλάκας γείωσης αναλαμβάνει η ίδια η μεταλλική γάστρα του πλοίου. Στον Πίνακα 3.7 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι βασικές διαστάσεις των τριών στοιχείων ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, (αλεξικέραυνο, αγωγοί καθόδου, πλάκα γείωσης) σύμφωνα με τις απαιτήσεις των αντίστοιχων κανονισμών.

	DEF STAN	ABYC	IEC 60092-507	Bureau Veritas
Γείωση ηλεκτρικού συστήματος	Δυνατότητα κοινής χρήσης μιας πλάκας γείωσης	-	Δεν Προσδιορίζεται	Ξεχωριστή πλάκα γείωσης από αντικεραυνική προστασία
Γείωση ράδιο		Κοινή πλάκα για ράδιο και αντικεραυνική προστασία	-	Ξεχωριστό σύστημα ζεύξης για ράδιο
Γείωση αντικεραυνικής προστασίας			Πλάκα αντικεραυνικής προστασίας για μη μεταλλικά σκάφη	Πλάκα αντικεραυνικής προστασίας για μη μεταλλικά σκάφη

Πίνακας 3.6: Διαχωρισμός τερματικών γείωσης

	IEC 60092-507	ISO 10134	DEF STAN 02-516	ABYC	Bureau Veritas
Αγωγοί καθόδου (mm <sup>2</sup> )	>70	21	75	21.2	>70
Διάμετρος Αλεξικέραυνου (mm)	-	-	12	9.5 για Cu 12.7 για Al	-
Ελάχιστη εξοχή αλεξικέραυνου από το κατάρτι (mm)	300	150mm για μη μεταλλικό κατάρτι	300	152	300
Ελάχιστο εμβαδό πλάκας γείωσης (m <sup>2</sup> )	0.25	0.1	0.25	0.1	0.25
Ελάχιστο πάχος πλάκας γείωσης (mm)	-	5	7	5	-
Ελάχιστο μήκος πλάκας γείωσης (m)	-	4	0.4	-	-
Ελάχιστο πλάτος πλάκας γείωσης (mm)	-	20	-	-	-
Αγωγοί ζεύξης (mm <sup>2</sup> )	16	13	-	13.3	-

Πίνακας 3.7: Βασικές διαστάσεις στοιχείων συστήματος αντικεραυνικής προστασίας



### 3.2.4 Ισοδυναμική ζεύξη

Στα πρότυπα ISO 10134 και ABYC εντοπίζονται κάποια ζητήματα που απουσιάζουν στο αντίστοιχο IEC και για τα οποία γίνονται αναφορές σε πρότυπα τα οποία ασχολούνται με επίγεια συστήματα αντικεραυνικής προστασίας. Ένα από αυτά τα ζητήματα είναι αυτό της ισοδυναμικής ζεύξης. Γενικά αναφέρεται ότι οι μεγάλες μεταλλικές μάζες, εσωτερικές ή εξωτερικές, πρέπει να ενώνονται στην εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας με χάλκινο αγωγό κατάλληλων διαστάσεων. Στον κανονισμό ABYC γίνεται λόγος για τον ισοδυναμικό δίαυλο, ο οποίος τοποθετείται κοντά στην πλάκα γείωσης. Οι ισοδυναμικές ζεύξεις έχουν ως σκοπό να εξαφανίσουν τις διαφορές δυναμικού που εντοπίζονται ανάμεσα στα μεταλλικά μέρη και τις γειώσεις με τις οποίες αυτά συνδέονται και του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, αποφεύγοντας τον κίνδυνο εμφάνισης επικίνδυνων τάσεων ή δευτερευόντων εκφορτίσεων προς μεταλλικά μέρη του σκάφους.

### 3.2.5 Επιπλέον προστασία

Αν υπάρχουν μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα (δεξαμενές, βίντσια, καζάνια κτλ) εντός ορισμένης ακτίνας (2m ISO 10134, 1.8m ABYC) από οποιοδήποτε αγωγό γείωσης αντικεραυνικής προστασίας, μπορεί να υπάρξει μεγάλη πιθανότητα να αναπτυχθούν πλευρικές εκκενώσεις από τον αγωγό γείωσης προς το κοντινότερο σημείο του μεταλλικού αντικειμένου. Προς αποφυγή ζημιών από τέτοιου είδους πλευρικές εκκενώσεις, πρέπει να εγκατασταθεί διασυνδεδετικός αγωγός αντικεραυνικής ζεύξης (τουλάχιστον ισοδύναμος με 13mm<sup>2</sup> χαλκού κατά το ISO 10134). Επιπλέον σχετικές συστάσεις μπορούν να βρεθούν στο πρότυπο IEC 60092-352. Επιπρόσθετα στα μεγάλα μεταλλικά σώματα του σκάφους μπορεί να περιλαμβάνονται άμβωνες πλώρης και πρύμνης, πηδάλια πλοήγησης, οριζόντια κάγκελα, κουπαστές, καμινάδες, ηλεκτρικά βίντσια, κρεμαστάρια λέμβων, μεταλλικές καταπακτές, μεταλλικές καμάρες, πυργίσκοι, μηχανές, δεξαμενές νερού και καυσίμων και βάσεις τιμονιού.

- Κάθε μεταλλικό περίβλημα και βάση πρέπει να συνδεθεί απευθείας στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με τουλάχιστον δευτερεύοντα αγωγό. Κανονικά, τα μεταλλικά περιβλήματα γειώνονται στο σκελετό του πλοίου, αλλά στα μη μεταλλικά σκάφη πρέπει να εγκατασταθεί ένα σύστημα αγωγών που να χρησιμοποιείται στη ζεύξη του εξοπλισμού με τη βυθισμένη πλάκα γείωσης. Παρότι η αντικεραυνική πλάκα γείωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως κύρια πλάκα γείωσης στο σκάφος, το σύστημα ζεύξης πρέπει να συνδέεται μόνο στην αντικεραυνική πλάκα γείωσης.
- Για την προστασία του εξοπλισμού, όπου είναι δυνατόν, πρέπει αυτός να εσωκλείεται σε μεταλλικούς θαλάμους, οι οποίοι θα συνδέονται με το σύστημα αντικεραυνικής γείωσης με αγωγό διατομής τουλάχιστον 8.39mm<sup>2</sup>. Επίσης πρέπει να εγκαθίστανται συσκευές

καταστολής υπερτάσεων σε όλες τις καλωδιώσεις που εισέρχονται ή εξέρχονται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.

### 3.2.6 Προστασία έναντι δευτερευόντων αποτελεσμάτων

Ακόμα και αν το κεραυνικό πλήγμα συνδεθεί ικανοποιητικά και μεταφερθεί ασφαλώς στη θάλασσα, εξακολουθούν να υπάρχουν κίνδυνοι λόγω των δευτερευόντων αποτελεσμάτων που προκαλούνται από τη ροή του ρεύματος μέσα στο σκάφος και στο νερό πλησίον της γειωτικής πλάκας. Αυτοί οι κίνδυνοι μπορεί να είναι μοιραίοι αν οι τάσεις παράξουν σπινθήρες στον αέρα που βρίσκεται εντός των δεξαμενών καυσίμων.

Οι δευτερεύουσες τάσεις μπορεί να είναι ωμικές πτώσεις τάσης ή επαγόμενες τάσεις από ροή που σχετίζεται με τη ροή κεραυνικού ρεύματος. Στη δεύτερη περίπτωση, το επαγωγικό ζεύγος μπορεί να βρίσκεται μεταξύ αγωγών του κυκλώματος προκαλώντας διαφορική τάση ή μεταξύ σημείων κάθε αγωγού.

Το DEF STAN 02-516 είναι αρκετά κατατοπιστικό σχετικά με την αντιμετώπιση των φαινομένων από επαγόμενες υπερτάσεις. Προτείνεται ένα σύνολο ενεργειών προσεκτικής σχεδίασης προκειμένου να εξασφαλισθεί ότι οποιαδήποτε επαγόμενη τάση μπορεί να συγκρατηθεί σε τιμές κάτω των 2kV και ότι ο εξοπλισμός μπορεί να αντέξει τους παλμούς τάσης στους οποίους μπορεί να υποβληθεί. Οι τάσεις αυτές μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με το σχεδιασμό κυκλωμάτων γείωσης, με τη σωστή χωροθέτηση των αγωγίμων κυκλωμάτων, με πλαισιωμένα-θωρακισμένα καλώδια και με τη χρήση μόνωσης και προστατευτικών διατάξεων για τον εξοπλισμό.

Αναλυτικότερα η προστασία έναντι των δευτερευόντων αποτελεσμάτων ενός κεραυνικού πλήγματος επιτυγχάνεται διασφαλίζοντας ότι:

- i. Η μόνωση μεταξύ των μερών είναι επαρκής για να αντέχει τάσεις που μπορεί να εμφανιστούν μεταξύ τους.
- ii. Η τοποθέτηση αγωγίμων κυκλωμάτων όπως καλώδια και σωλήνες πρέπει να αποφεύγει μεγάλους επαγωγικούς βρόχους μειώνοντας τις επαγόμενες τάσεις.
- iii. Τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα «θωρακίζονται» με τη χρήση ηλεκτρικών πλαισίων και προστατευτικών διατάξεων όπως διακένων σπινθηρισμού.
- iv. Υπάρχει επαρκής ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ όλων των παρακείμενων μεταλλικών δομών και μερών.

Όταν μαγνητική ροή λόγω κεραυνικών ρευμάτων σχετίζεται με ένα βρόχο, τότε επάγονται τάσεις σε αυτόν. Καθώς ο βρόχος δεν είναι απαραίτητα εξ' ολοκλήρου μεταλλικός, οι τάσεις συγκεντρώνονται στη μη μεταλλική περιοχή και μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρική διάσπαση. Τα μεταλλικά μέρη του βρόχου δεν είναι απαραίτητα καλώδια, αλλά μπορεί να είναι σωλήνες ή άλλα μεταλλικά αντικείμενα της δομής. Η χωροθέτηση των

αγώγιμων κυκλωμάτων πρέπει να είναι κατάλληλη για να αποφευχθεί ή να μειωθεί η επαγόμενη τάση και για να βοηθηθεί η πρόβλεψη επαρκών επιπέδων μόνωσης. Η σύνδεση της ροής συμβαίνει στο βρόχο που σχηματίζεται μεταξύ του καθοδικού αγωγού και οποιουδήποτε ηλεκτρικού κυκλώματος που βρίσκεται κοντά στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Η επαγόμενη τάση εξαρτάται από το εμβαδό του βρόχου, ενώ η ισχύς διάσπασης εξαρτάται από τα διάκενα αέρα. Για να αποφευχθούν σπινθήρες, αν μέρη του κυκλώματος εξ ανάγκης πλησιάζουν τον καθοδικό αγωγό, τότε πρέπει αυτή η απόσταση να είναι όσο πιο μικρή γίνεται, για να ελαχιστοποιηθεί το εμβαδό του βρόχου καθώς και η τάση διάσπασης μεταξύ κοντινών αντικειμένων.

- Θωρακισμένα δωμάτια ή κλωβοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προστασία μεγαλύτερου εξοπλισμού έτσι ώστε τα κυκλώματα να βρίσκονται εκτός πεδίου μαγνητικής ροής. (Στην περίπτωση που η χρήση θωράκισης για σκοπούς αντικεραυνικής προστασίας έρχεται σε αντίθεση με τους σκοπούς της προστασίας από ραδιοπαρεμβολές, τότε πρέπει να δίνεται προτεραιότητα στο δεύτερο).
- Σε μη μεταλλικά σκάφη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιφερειακές πλάκες γείωσης στις δεξαμενές καυσίμων για να μειώσουν τοπικά τη συσσώρευση φορτίου εμποδίζοντας το σχηματισμό εσωτερικών σπινθήρων λόγω διάσπασης.
- Τα ηλεκτρικά κυκλώματα του ράδιο ή του ραντάρ που βρίσκονται στον αέρα και που μπορεί να υποστούν κεραυνικό πλήγμα, πρέπει να προστατεύονται από μια μη γραμμική συσκευή (σπινθηριστή ή συσκευή καταστολής μεταβατικών υπερτάσεων). Διαφορετικά, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα γείωσης σε περιόδους κεραυνικής δραστηριότητας.

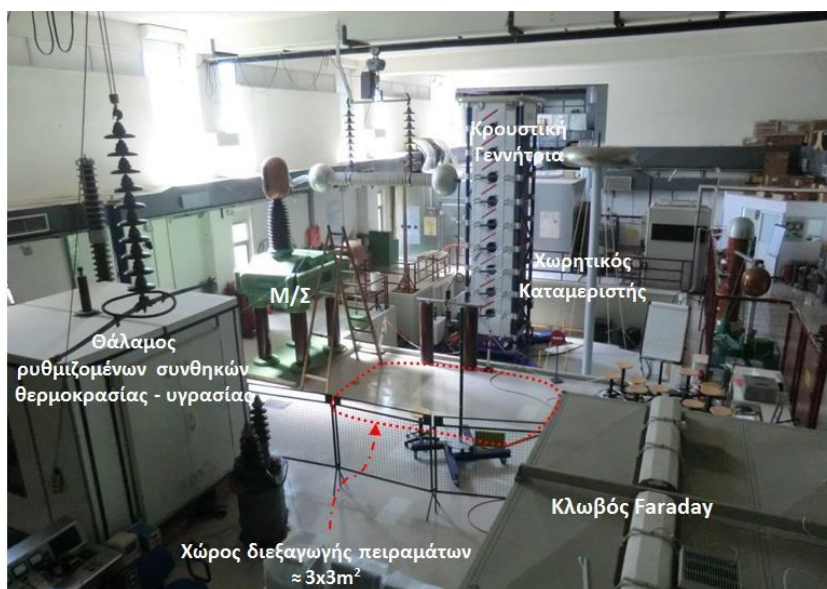
Όσον αφορά τις διατάξεις προστασίας από υπερτάσεις (SPDs), δεν υπάρχουν συγκεκριμένες συστάσεις για την εγκατάστασή τους σε πλοία, εκτός από τις γενικές απαιτήσεις της σειράς προτύπων IEC 62305: "Προστασία εγκαταστάσεων από κεραυνούς". Ειδικά τα τμήματα IEC 62305-3 και IEC 62305-4 καθορίζουν την εγκατάσταση των SPDs εντός των ζωνών αντικεραυνικής προστασίας, ιδιαίτερα σε σημεία μετάβασης και με ιδιαίτερη έμφαση στη διαστασιολόγηση μεταξύ του SPD και του εξοπλισμού υπό προστασία. Η επιλογή και εγκατάσταση κατάλληλα διαστασιολογημένης προστασίας με SPDs πρέπει να συμμορφώνονται επίσης με το πρότυπο IEC 61643 - 12 και IEC 60364-5-53 για συστήματα ισχύος και με το IEC 61643-22 για συστήματα τηλεπικοινωνιών και σημάτων. Τα εγκατεστημένα SPDs θα πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις δοκιμών που συμμορφώνονται με το πρότυπο IEC 61643-1 για τα συστήματα ισχύος και με το IEC 61643-21 για συστήματα τηλεπικοινωνιών και σημάτων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

### 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 στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Χώρος διεξαγωγής πειράματος

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

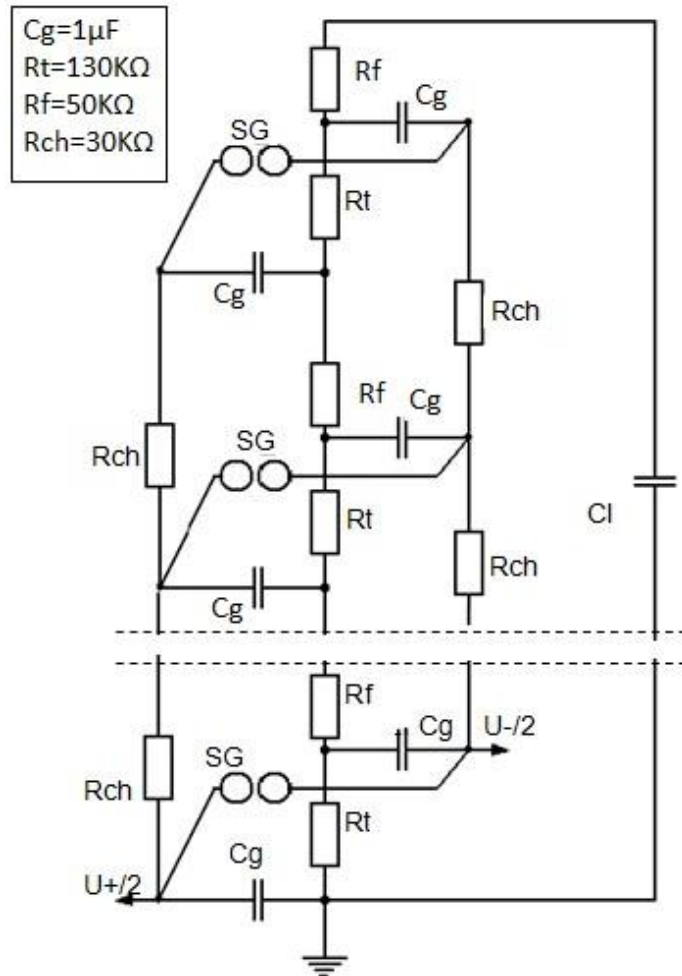
#### 4.1.1 Γεννήτρια κρουστικών τάσεων Ε.Μ.Π

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 συνδυασμό ενός πυκνωτή υψηλής τάσεως  $C_1=930\text{nF}$  και ενός πυκνωτή χαμηλής τάσης  $C_2=450\text{pF}$ . Έτσι ο χωρητικός καταμεριστής τάσης έχει λόγο καταμερισμού ίσο με  $K = \frac{C_1+C_2}{C_1} = 2068$ . Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα της εννιαβάθμιας γεννήτριας APITZ/CRATOS [23].



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. Στην εικόνα 4.3 απεικονίζεται η βασική οθόνη λογισμικού του συστήματος ελέγχου CRATOS.



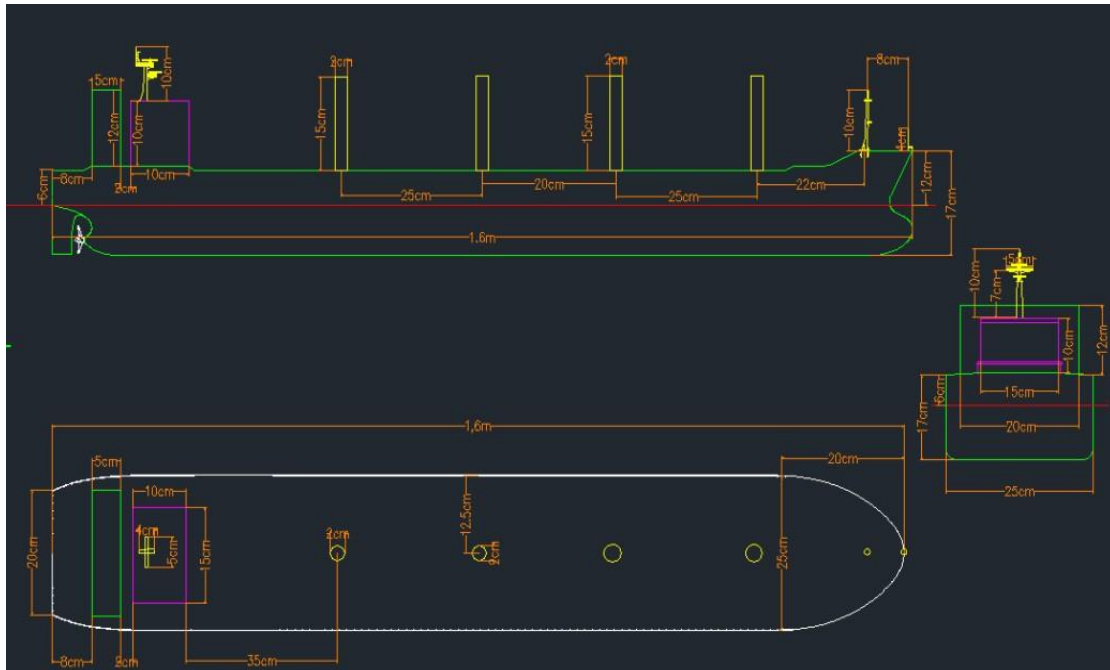
Εικόνα 4.3: Βασική οθόνη λογισμικού του συστήματος ελέγχου CRATOS [34].

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.

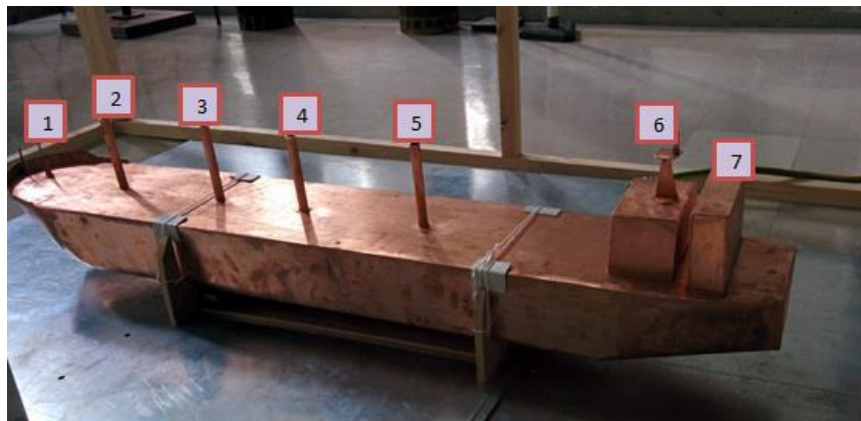
### 4.1.3 Μοντέλο Πλοίου Υπό Κλίμακα

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 στην εικόνα 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 οχετού. Η ράβδος αυτή είναι μήκους 50 cm και έχει διάμετρο 5mm. Τέλος στο χώρο διεξαγωγής του πειράματος υπάρχει μια κατασκευή στήριξης για μετέπειτα χρήση ενός μεταλλικού πλέγματος που θα προσομοιώνει το νέφος. Το μεταλλικό πλέγμα τοποθετείται πάνω σε ξύλινο ορθογωνικό πλαίσιο και οι άκρες του διαμορφώνονται ώστε να σχηματίζουν καμπύλη δίκην τοροειδούς, γι’ αυτό και εφεξής στην παρούσα εργασία το πλέγμα για λόγους ευκολίας θα αποκαλείται «τοροειδές». Η ξύλινη κατασκευή στήριξης για την ανάρτηση του «τοροειδούς» έχει διαστάσεις 3m x 1,5m x 2m. 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. Το μεταλλικό «τοροειδές» κατασκευάστηκε από πλέγμα (με τετραγωνικό μάτι 1,5cm x 1,5cm) και τοποθετήθηκε (για την αποφυγή φαινομένων άκρων και εκκενώσεων από τις ακμές) πάνω σε ξύλινο (μονωτικό) πλαίσιο διαστάσεων 2m x 1,5m. Οι διαστάσεις επελέγησαν έτσι ώστε να καλύπτεται ολόκληρη η επιφάνεια του μοντέλου του πλοίου και να υπάρχει θεωρητικά η δυνατότητα να πληγεί οποιοδήποτε σημείο της διάταξης. Η έξοδος της κρουστικής γεννήτριας συνδέθηκε στο μέσο του πλέγματος. Όλα αυτά απεικονίζονται στις εικόνες 4.5 έως 4.8.



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



**Εικόνα 4.5:** Μοντέλο πλοίου στο οποίο φαίνονται αριθμημένες οι κατασκευές 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





**Εικόνα 4.6:** Στην εικόνα φαίνονται το μοντέλο πλοίου, η μεταλλική πλάκα, η ράβδος και η ξυλοκατασκευή για το «τοροειδές».



**Εικόνα 4.7:** Στο σχήμα φαίνονται το μοντέλο πλοίου, η μεταλλική πλάκα, η ράβδος και η ξυλοκατασκευή με το «τοροειδές».

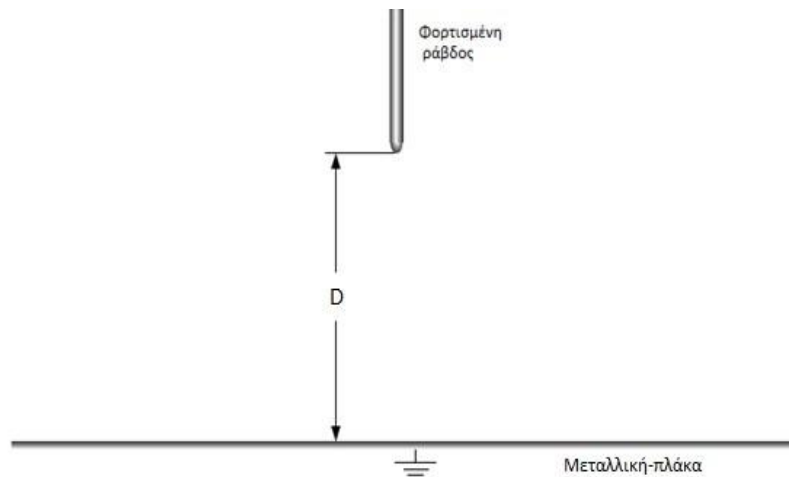


**Εικόνα 4.8:** Στο σχήμα φαίνονται το μοντέλο πλοίου, η μεταλλική πλάκα, η ράβδος και η ξυλοκατασκευή με το «τοροειδές».

## **4.2 Διεξαγωγή πειράματος**

### **4.2.1 Διαδικασία μετρήσεων**

Στο αρχικό στάδιο του πειράματος μελετήθηκαν τα διάκενα ράβδου-πλάκας χωρίς το μοντέλο πλοίου όπως φαίνεται στην εικόνα 4.9. Το στάδιο αυτό έχει ήδη εκτελεστεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία[26] αλλά για λόγους πληρότητας παρατίθεται και εδώ αναλυτικά η διαδικασία. Συγκεκριμένα, η φορτισμένη ράβδος καταπονείται με κανονική εξωτερική κρουστική υψηλή τάση (ΚρΥΤ) κυματομορφής 1.2/50  $\mu\text{s}$  μέσω της εννιαβάθμιας κρουστικής γεννήτριας APITZ/CRATOS του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ.



**Εικόνα 4.9:** 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 τοποθετείται διαδοχικά πάνω από τη γειωμένη πλάκα σε ύψος  $D=0.5\text{m}$ ,  $D=0.75\text{m}$ ,  $D=1\text{m}$  τόσο για θετική 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 το 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 της 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:

$$p(U) = \frac{1}{z\sqrt{2} * \pi} * \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(U-U_{50})^2}{(2z^2)}} dU \quad (4.1)$$

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).

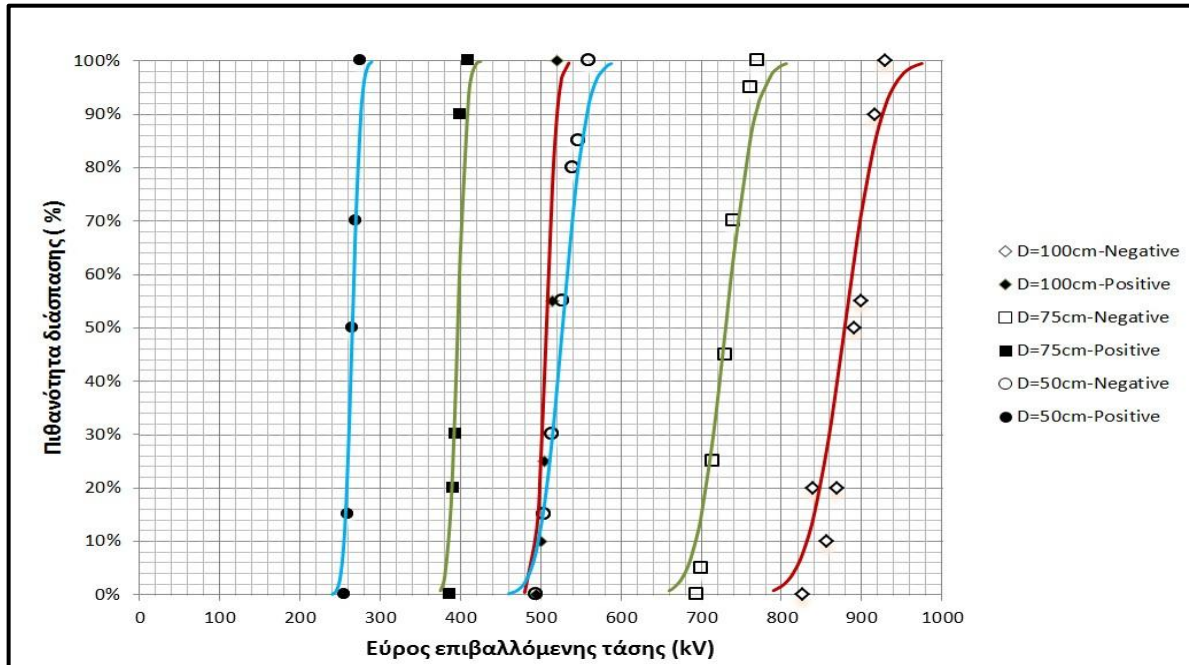
Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης χρησιμοποιείται η μέθοδος των επιπέδων τάσεων όπου και αυτή περιγράφεται αναλυτικά πιο κάτω:

#### 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 συσχέτισή τους μέσω του γραφήματος κανονικής κατανομής, προκύπτουν η 50% τάση διάσπασης,  $U_{50}$ , και η συμβατική τυπική απόκλιση,  $z$ .

Για να έχει αξιοπιστία η μέθοδος αυτή πρέπει ο αριθμός των ανά επίπεδο επιβολών τη 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 δυο διαδοχικές επιβολές.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα βρέθηκαν οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης (σχήμα 4.1) οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Από τις καμπύλες αυτές βρέθηκαν οι τάσεις διάσπασης  $U_s$  (πίνακας 4.1) για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα που αντιστοιχούν σε πιθανότητα διάσπασης 97.5%.



Σχήμα 4.1: 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 4.1: Τάσεις διάσπασης  $U_s$  για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα, όπως προέκυψαν από τις κατανομές διάσπασης του Σχήματος 4.1

### 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 διαφορετικές αποστάσεις φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας:  $D=0.50m$ ,  $D=0.75m$ ,  $D=1m$  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 κατασκευή υπ' αριθμόν 4 και συγκεκριμένα στο γερανό φορτίου 4 του μοντέλου του πλοίου όπως απεικονίζεται στην εικόνα 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 του γερανού φορτίου συνολικού ύψους  $H=31.5\text{cm}$  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 του γερανού φορτίου 4 που 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 στον γερανό 4. Δηλαδή η φορτισμένη ράβδος ήταν πάντα σε ένα σταθερή απόσταση ( $D=50\text{cm}$  ή  $D=75\text{cm}$  ή  $D=100\text{cm}$ ) από την πλάκα ενώ το μοντέλο πλοίου μετακινούνταν 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 γερανού υπ αριθμό 4 στην οποία με 50% πιθανότητα η εκκένωση κατέληγε στον γερανό 4 (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 απόσταση πρόσκρουσης  $S_c$  από το πυθαγόρειο θεώρημα.

### 4.3.2 Αναγωγή τάσης διάσπασης

Οι τάσεις διάσπασης που αντιστοιχούν σε πιθανότητα 97.5% (πίνακας 4.1) έχουν αναχθεί σε διορθωμένες τάσεις διάσπασης (πίνακας 4.3) 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 το λόγο αυτό 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 (4.2)-Πίνακα(4.2). 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, βλέπε σχέση (4.3)-Πίνακα(4.3).

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

$$U_o = \frac{U_s}{k_1 * k_2} \quad (4.2)$$

$$U_s = U_o * k_1 * k_2 \quad (4.3)$$

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

$k_2$ : Ο συντελεστής διόρθωσης υγρασίας.

Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας	Πρότυπη τάση διάσπασης $U_o$ σύμφωνα με IEC 60060-1	
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
D=50cm	265 kV	527 kV
D=75cm	397 kV	730 kV
D=100cm	507 kV	879kV

Πίνακας 4.2: Πρότυπες τάσεις διάσπασης  $U_o$  σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-1.

Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας	Διορθωμένη τάση διάσπασης $U_s$ σύμφωνα με IEC 60060-1	
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
D=50cm	285,7 kV	576,3 kV
D=75cm	404,5 kV	786,4 kV
D=100cm	511 kV	949,1kV

Πίνακας 4.3: 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 (4.4) και ο εκθέτης  $m$  δίνεται στην ενότητα 4.3.2.3:

$$k_1 = \delta^m \quad (4.4)$$

Όπου :

$$\delta = \frac{b}{b_o} * \frac{273 + t_o}{273 + t} \quad (4.5)$$

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 ( $\delta$ ):

$$k_2 = k^m \quad (4.6)$$

Όπου :

$$k = 1 + 0,010 * \left( \frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad \text{για} \quad \frac{g}{m^3} \leq \frac{h}{\delta} \leq 15 * \frac{g}{m^3} \quad (4.7)$$

#### 4.3.2.3 Εκθέτες $m$ και $w$

Οι εκθέτες  $m$  και  $w$  υπολογίζονται μέσω της σχέσης (4.8) και του σχήματος 4.2

$$g = \frac{U_B}{500 * L * \delta * k} \quad (4.8)$$

Όπου:

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

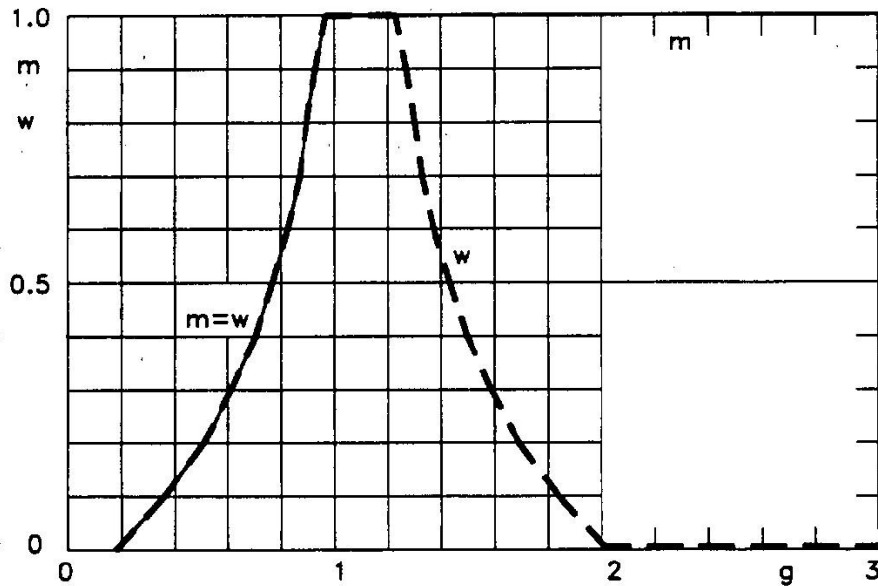
L: Μήκος διακένου σε m.

$\delta$ : 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 4.2 αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής g από τη σχέση (4.8).



Σχήμα 4.2: 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 (4.4-4.9). Με βάση τα αποτελέσματα αυτά βρέθηκαν οι καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της ηλεκτρικής εκκένωσης από το γερανό 4 οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή (σχήμα 4.3).

D= 50 cm, Θετική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και γερανού (κατασκευή no.4 προσέγγιση από no.5) R→[cm]	Πίεση: 998 mbar						Υγρασία: (51%) 11,738 g/m <sup>3</sup>						Θερμοκρασία: 25°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
14 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
13.5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	X	1/20	5%
13 cm	√	√	X	X	X	X	X	X	X	√	X	√	X	X	√	X	√	√	X	X	7/20	35%
12.5 cm	√	X	X	√	X	X	X	√	√	X	√	X	X	√	√	√	√	X	X	X	9/20	45%
12 cm	√	√	X	X	√	X	√	X	X	√	√	√	√	X	X	√	√	√	X	X	11/20	55%
11 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.4: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=50cm

D= 50 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και γερανού (κατασκευή no.4 προσέγγιση από no.5) R→[cm]	Πίεση: 998 mbar						Υγρασία: (50%) 11,508 g/m <sup>3</sup>						Θερμοκρασία: 25°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
13.5 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
12.5 cm	X	√	X	√	√	√	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	√		6/20	30%
12 cm	X	X	√	√	X	√	√	√	X	X	X	√	√	√	X	X	√	X	√	X	10/20	50%
11.5 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	X	√	√	X	17/20	85%
11 cm	√	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	19/20	95%
10.5 cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.5: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=50cm.

D=75 cm, Θετική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και γερανού  (κατασκευή no.4 προσέγγιση από no.5)  R→[cm]	Πίεση: 991 mbar						Υγρασία: (45%)  10,357 g/m <sup>3</sup>						Θερμοκρασία: 25°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
16 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
15 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	X	1/20	5%
14 cm	X	X	X	√	X	X	√	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	3/20	15%
12.5 cm	√	√	X	X	√	X	√	X	X	X	X	√	X	√	X	√	X	X	√	X	8/20	40%
10 cm	X	√	X	X	X	√	√	X	√	√	√	X	√	√	√	X	√	X	√	√	12/20	60%
7 cm	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	18/20	90%
6cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.6: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=75cm

D=75 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και γερανού  (κατασκευή no.4 προσέγγιση από no.5)  R→[cm]	Πίεση: 991 mbar						Υγρασία: (41%)  9,436 g/m <sup>3</sup>						Θερμοκρασία: 25°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
17 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
15 cm	X	X	√	X	X	X	X	X	√	X	√	X	X	√	X	X	X	X	X	X	4/20	20%
12.5 cm	X	X	√	√	X	√	√	X	√	√	√	√	√	X	X	√	√	X	√	X	12/20	60%
10 cm	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	√	√	√	√	18/20	90%
8cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

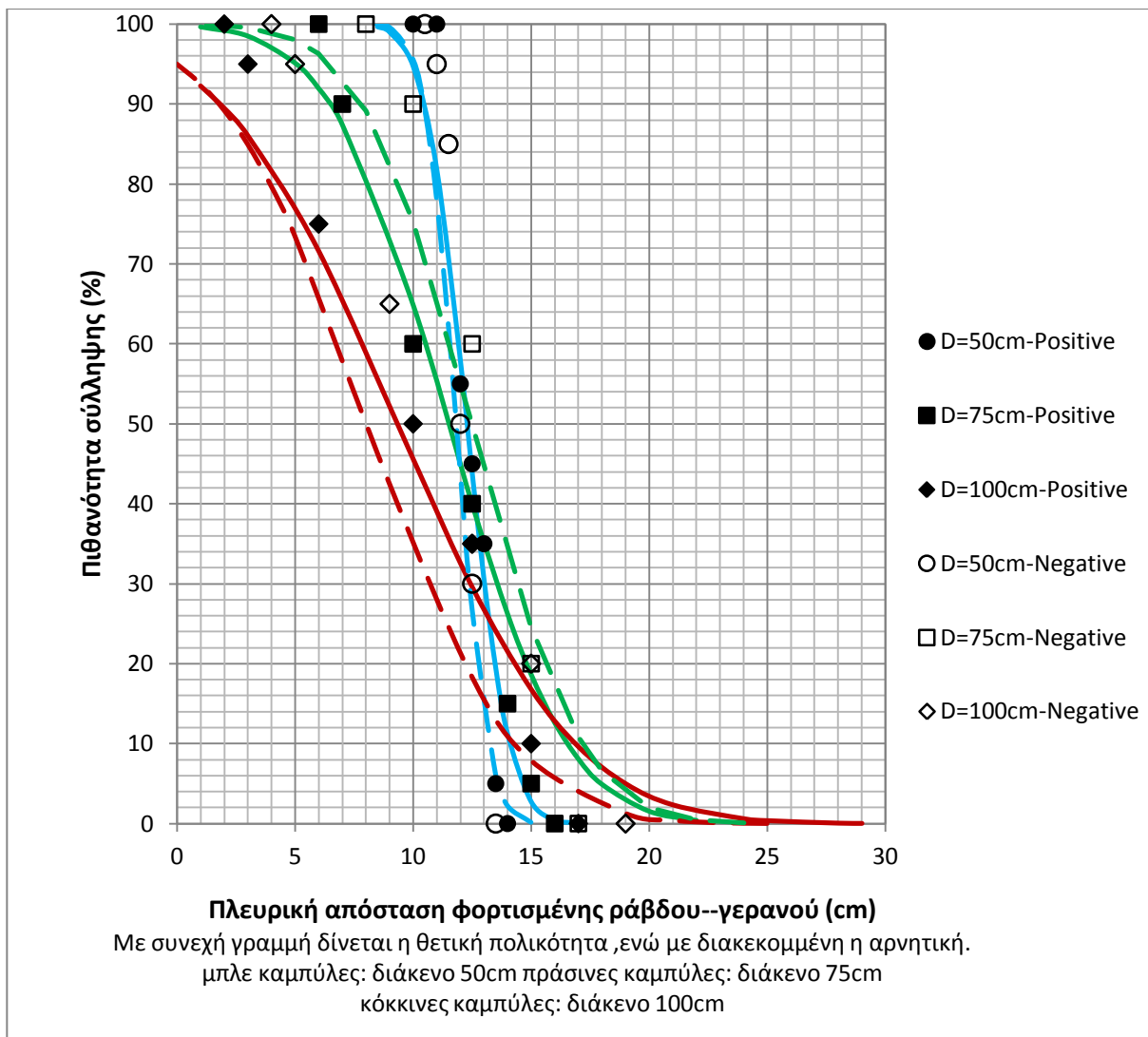
Πίνακας 4.7: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=75cm.

D=100 cm, Θετική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και γερανού  (κατασκευή no.4 προσέγγιση από no.5)  R→[cm]	Πίεση: 993 mbar					Υγρασία: (37%)  7,603 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
17 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
15 cm	X	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	√	X	X	X	X	X	X	X	X	2/20	10%
12.5 cm	√	√	√	√	X	X	X	X	X	X	√	√	X	X	X	√	X	X	X	X	7/20	35%
10 cm	X	√	X	√	X	X	X	√	√	X	X	√	√	X	√	X	√	√	X	√	10/20	50%
6 cm	√	X	X	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	X	15/20	75%
3 cm	√	X	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√	19/20	95%
2cm	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	20/20	100%

Πίνακας 4.8: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική πολικότητα και απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=100cm

D=100 cm, Αρνητική Πολικότητα																						
Πλευρική απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου και γερανού  (κατασκευή no.4 προσέγγιση από no.5)  R→[cm]	Πίεση: 990 mbar					Υγρασία: (44%)  9,571 g/m <sup>3</sup>					Θερμοκρασία: 24°C					Πλήθος συλλήψεων  (d <sub>i</sub> )	Πιθανότητα σύλληψης  (P(U <sub>i</sub> ))					
	Σύλληψη: ν										Αστοχία : X											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			16	17	18	19	20
19 cm	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0/20	0%
15 cm	X	X	X	X	X	ν	X	X	ν	X	X	X	X	X	ν	ν	X	X	X	X	4/20	20%
12.5 cm	X	X	X	X	X	X	ν	X	X	X	ν	ν	ν	X	ν	X	X	ν	X	ν	7/20	35%
9 cm	ν	ν	X	X	ν	X	ν	X	ν	ν	ν	ν	ν	ν	X	ν	X	X	ν	ν	13/20	65%
5 cm	ν	ν	ν	ν	X	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	19/20	95%
4cm	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	ν	20/20	100%

Πίνακας 4.9: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=100cm



**Σχήμα 4.3:** Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από τον γερανό του μοντέλου πλοίου οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

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

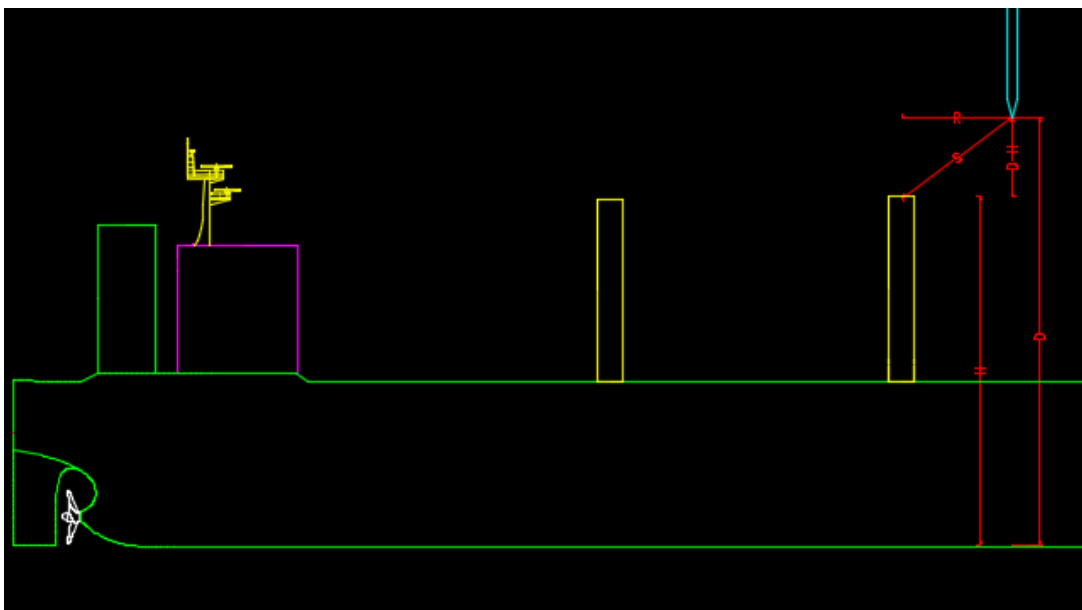
- Οι καμπύλες πιθανότητας σύλληψης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή. Η πιθανότητα σύλληψης αυξάνεται με τη μείωση της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης ράβδου-γερανού φορτίου 4.
- Η καμπύλη πιθανότητας σύλληψης αρνητικής πολικότητας αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκρινόμενη με την καμπύλη πιθανότητας σύλληψης θετικής πολικότητας για απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας D=75cm.
- Η καμπύλη πιθανότητας σύλληψης θετικής πολικότητας αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή και τυπική απόκλιση συγκρινόμενη με την καμπύλη πιθανότητας σύλληψης αρνητικής πολικότητας για αποστάσεις φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας: D=50cm, D=100cm.

Επίσης παρατηρώντας τις κανονικές κατανομές σύλληψης του σχήματος 4.3 προκύπτει ότι: για κάθε επιμέρους D, η θετική και η αρνητική πολικότητα σχεδόν ταυτίζονται (μόνο στα 75cm είναι πιο εμφανής η διαφορά, με την (-) πολικότητα να δίνει διακριτά μεγαλύτερη  $R_C$ ). Οι κατανομές είναι πολύ απότομες ιδίως για τα μικρότερα διάκενα (αύξηση του D προκαλεί διαπλάτυνση της κατανομής και ελαφριά μετατόπισή της προς την εξεταζόμενη ράβδο 4). Το εύρος τιμών τους, όπως είναι αναμενόμενο, είναι συγκεντρωμένο στο χώρο μεταξύ των δύο ράβδων. Εξάιρεση αποτελούν οι κατανομές για  $D=100\text{cm}$  που λαμβάνουν τιμές πιθανότητας σύλληψης  $>95\%$  για αρνητικές πλευρικές αποστάσεις, δηλαδή για να επιτευχθεί 100% σύλληψη θα πρέπει η ράβδος ΥΤ να βρεθεί εκτός του χώρου των δύο ισοϋψών ράβδων, αριστερά της ράβδου 4. Αυτό ποιοτικά σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το διάκενο, τόσο αυξάνει η επίδραση της μίας ράβδου στην άλλη, καθώς ο κατερχόμενος οχετός τις "βλέπει" ως ισοπίθανα ενδεχόμενα εξαρτώμενα και από την απόσταση διάσπασης.

#### 4.4 Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων -μαθηματικών σχέσεων

Η ζητούμενη μέση ακτίνα σύλληψης ( $R_C$ ) που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης 50% της ηλεκτρικής εκκένωσης στον γερανό 4 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 την εικόνα 4.10 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:

$$S_C = \sqrt{(R_C)^2 + (D - H)^2} \quad (4.9)$$



**Εικόνα 4.10:** Σχηματικό διάγραμμα κατασκευής υπ' αριθμόν 4. R: ακτίνα σύλληψης, D: απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής 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**

$$S = D \quad (4.10)$$

$$R = \sqrt{2 \cdot H \cdot D - H^2} \quad (4.11)$$

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**

$$S = D * \left( 0.8 * e^{\frac{0.125 * H}{D}} + 0.17 \right) \quad (4.12)$$

$$S = D \left( 1 + 0.24 * e^{-\left(\frac{H}{D}\right)} \right) \quad (4.13)$$

Η σχέση (4.12) αντιστοιχεί σε θετική πολικότητα ενώ η σχέση (4.13) σε αρνητική πολικότητα.

$$R = \alpha_o = D * \sqrt{\frac{S^2 - (D - H)^2}{D^2 - (D - H)^2}} \quad (4.14)$$

❖ **Στατιστικό μοντέλο**

$$R_C = D * \left[ c_1 * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + c_2 \right] \quad (4.15)$$

$$S_C = D * \left[ a * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b \right] \quad (4.16)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $c_1, c_2, a, b$  φαίνονται στον Πίνακα 4.10

Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική Πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
a	-0.032	0.065	c <sub>1</sub>	0.235	0.272
b	0.90	1.24	c <sub>2</sub>	0.90	1.24

Πίνακας 4.10: Οι τιμές των συντελεστών c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, a, b των εξισώσεων 4.15 και 4.16[1]

#### ❖ Στατιστικό μοντέλο -Γεινίαση

$$R_C = D * \left[ a_1 * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + a_2 \right] \quad (4.17)$$

$$S_C = D * \left[ b_1 * \ln\left(\frac{H}{D}\right) + b_2 \right] \quad (4.18)$$

Οι τιμές των συντελεστών α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> φαίνονται στον Πίνακα 4.11:

Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
b <sub>1</sub>	-0.032	0.0266	α <sub>1</sub>	0.2416	0.2516
b <sub>2</sub>	0.8873	1.1486	α <sub>2</sub>	0.8958	1.1439

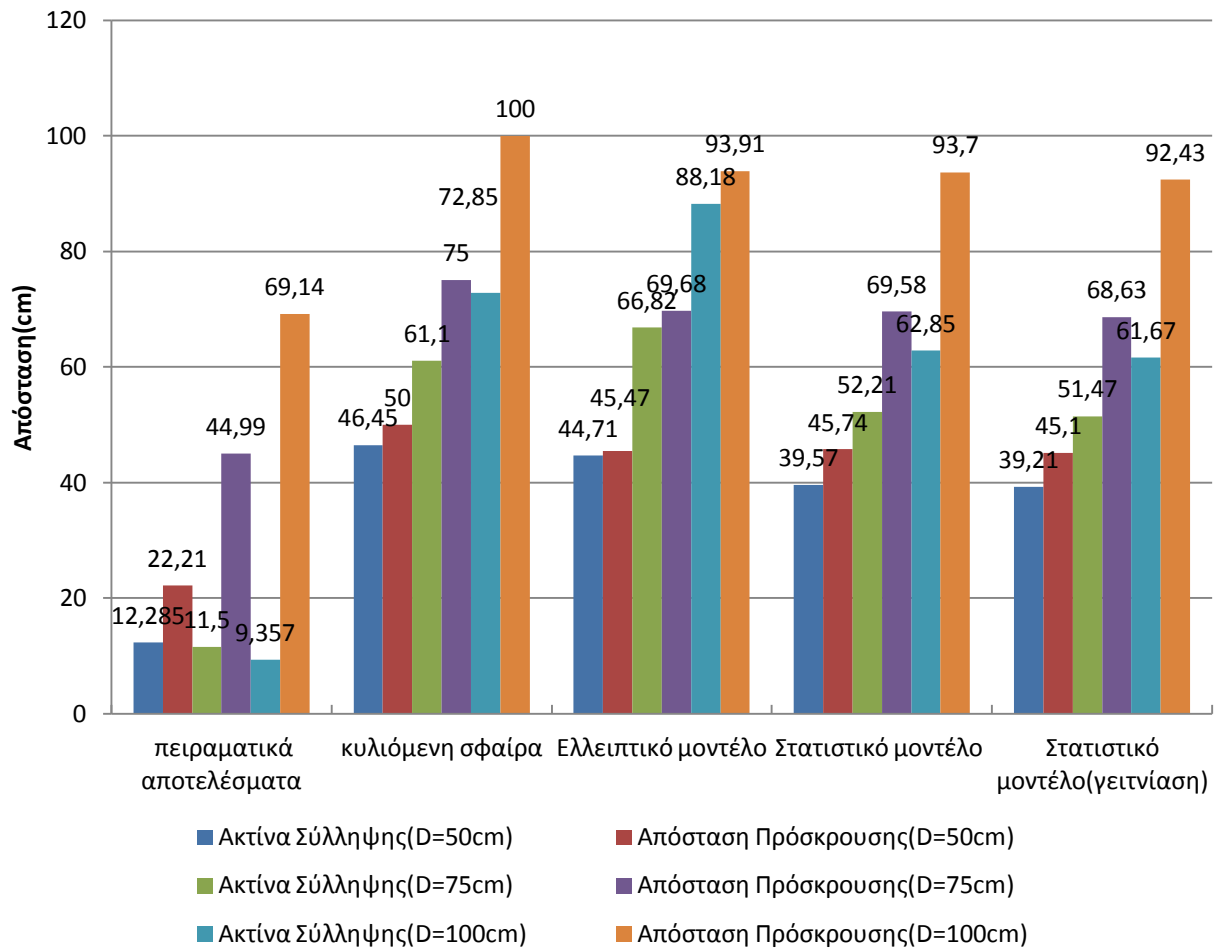
Πίνακας 4.11: Οι τιμές των συντελεστών α<sub>1</sub>, α<sub>2</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> των εξισώσεων 4.17 και 4.18

Τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν για τη μέση απόσταση πρόσκρουσης και τη μέση ακτίνα σύλληψης έχουν συμπληρωθεί στον πίνακα 4.12. Επίσης στα σχήματα 4.4 και 4.5 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 απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας (σχήματα. 4.6-4.9) ώστε με αυτό τον τρόπο να καταστεί δυνατή μια άμεση σύγκριση και να μπορέσουν να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Διάκενο		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	46,45	50	44,71	45,47	39,57	45,74	39,21	45,10	12,285	22,21
	75	61,10	75	66,82	69,68	52,21	69,58	51,47	68,63	11,5	44,99
	100	72,85	100	88,18	93,91	62,85	93,70	61,67	92,43	9,357	69,14
Αρνητική Πολικότητα	50	46,45	50	57,34	56,39	55,72	60,50	51,38	56,82	11,835	21,96
	75	61,10	75	92,24	86,83	75,30	88,77	69,42	84,41	12,5	45,26
	100	72,85	100	131,06	117,51	92,58	116,49	85,33	111,79	8,083	68,98

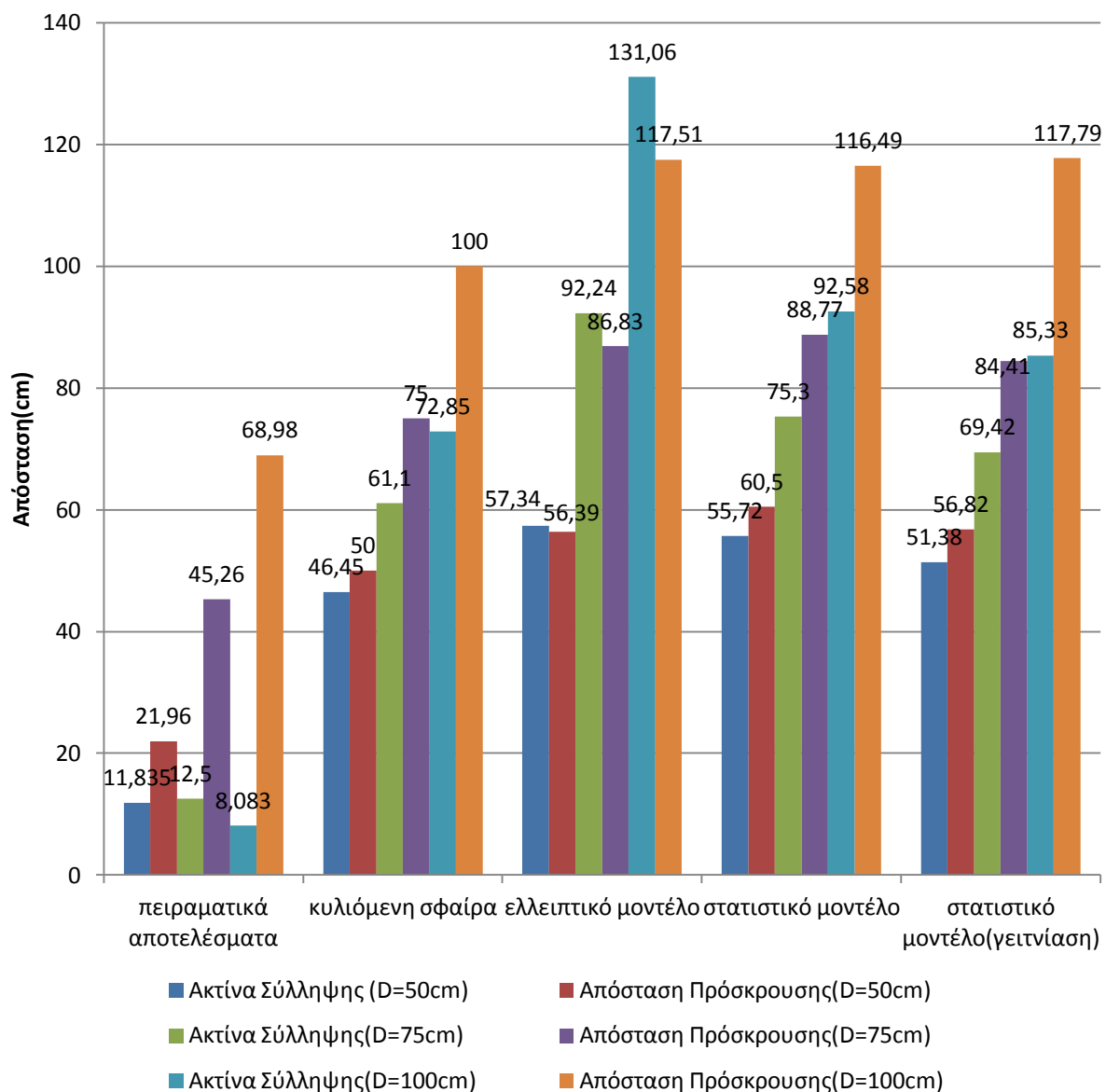
**Πίνακας 4.12:** Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη μέση ακτίνα σύλληψης και τη μέση απόσταση πρόσκρουσης. Τα θεωρητικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας.

## Θετική πολικότητα

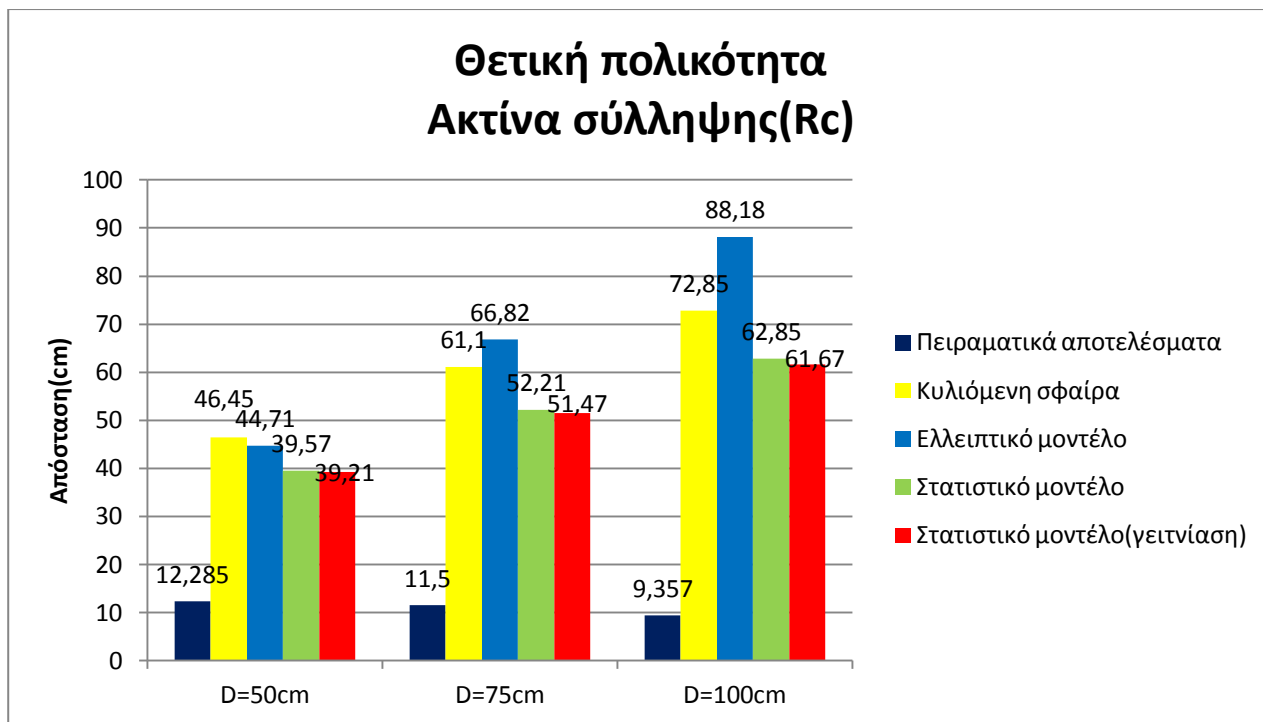


Σχήμα 4.4: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά μέθοδο για θετική πολικότητα.

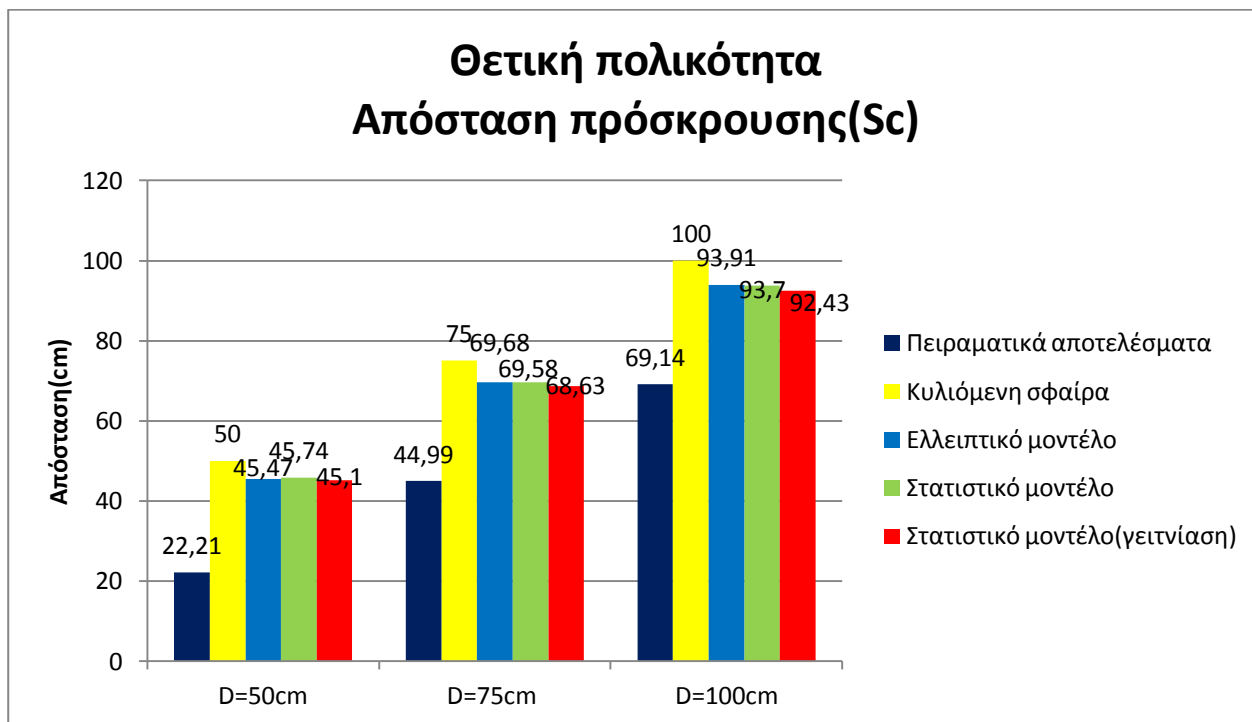
## Αρνητική Πολικότητα



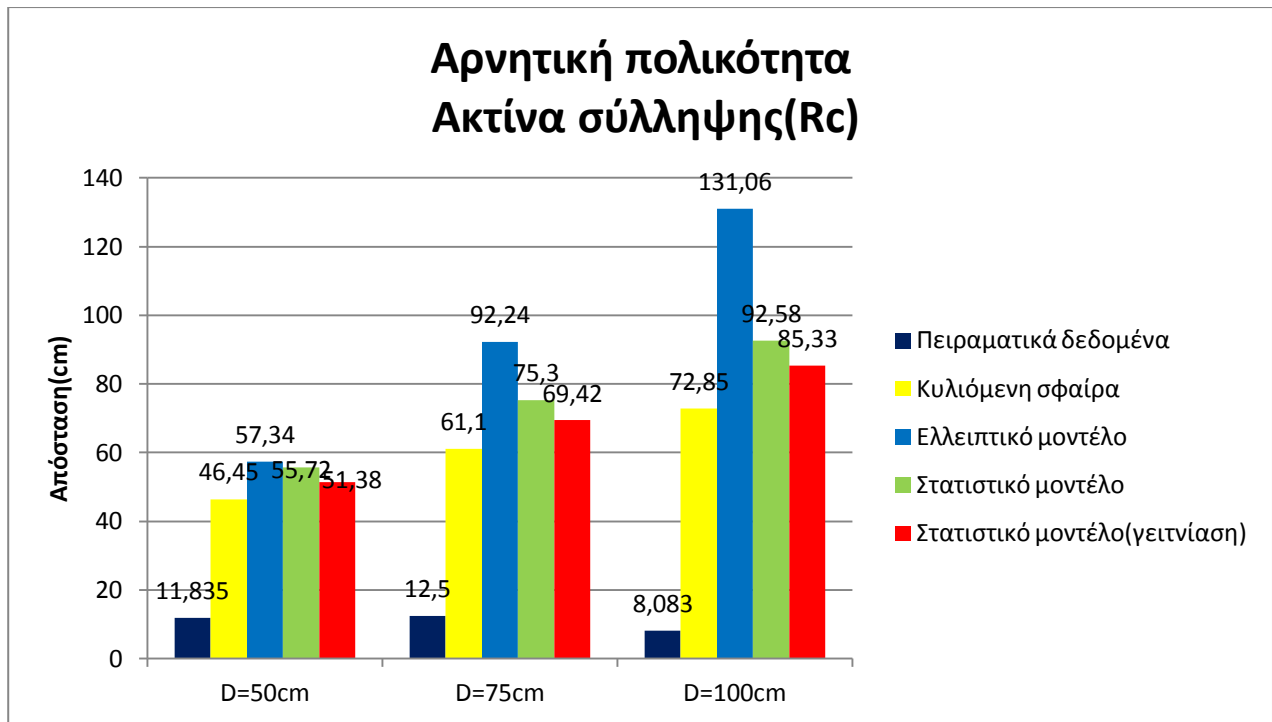
Σχήμα 4.5: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά μέθοδο για αρνητική πολικότητα.



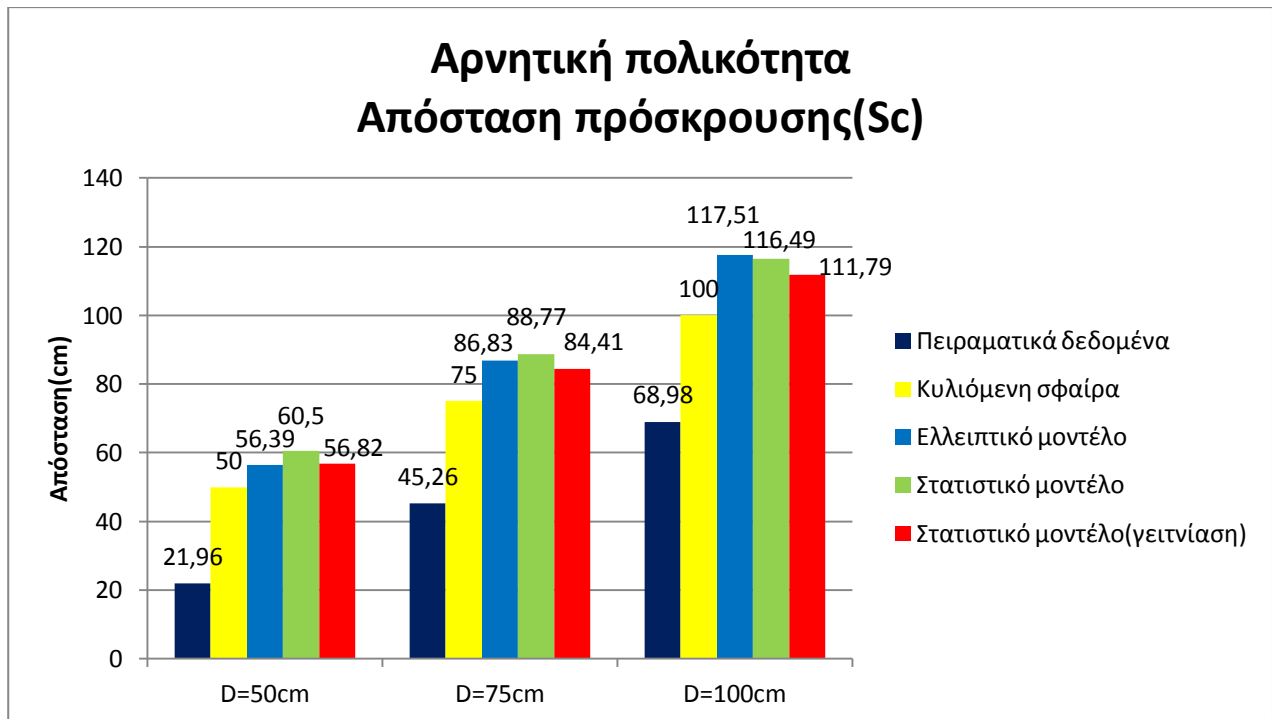
**Σχήμα 4.6:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας. Θετική πολικότητα.



**Σχήμα 4.7:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας. Θετική πολικότητα.



**Σχήμα 4.8:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας. Αρνητική πολικότητα.



**Σχήμα 4.9:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι τα πειραματικά μας αποτελέσματα απέχουν αρκετά από τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα όλων των μεθόδων. Αυτό εν μέρει οφείλεται στο ότι η σύγκριση γίνεται με θεωρητικά μοντέλα που αναφέρονται σε ζώνη

προστασίας μεμονωμένης ψηλής ράβδου, ενώ οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν μεταξύ δύο ισοϋψών ράβδων. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθεί κάποιο καινούργιο μοντέλο εκτίμησης της ζώνης προστασίας για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Συγκεκριμένα, η σχέση για την απόσταση διείσδυσης  $p$  της εικόνας 3.4 λέει ουσιαστικά ότι αντικείμενα ύψους το πολύ  $(H-p)$  τοποθετημένα στο μέσο μεταξύ των ράβδων είναι προστατευμένα (δηλαδή έχουν 50% πιθανότητα σύλληψης, αφού όλα τα μοντέλα -πλην του στατιστικού- δίνουν εξισώσεις για 50% πιθανότητα σύλληψης). Δε διευκρινίζεται, όμως, ποια είναι η πιθανότητα σύλληψης από τις ψηλές ράβδους, ούτε πώς κατανέμονται οι πιθανότητες στην περιοχή μεταξύ των δύο ράβδων, κάτι που εξετάζεται στο παρόν πείραμα. Η σχέση αυτή υπονοεί ότι ανεξαρτήτως  $L$ ,  $D$  η 50% πιθανότητα σύλληψης για κάθε ψηλή ισοϋψή ράβδο είναι στο μέσο, στη θέση  $L/2$ . Στην περίπτωσή μας όμως, οι πειραματικές  $R_c$  (50%) είναι μετατοπισμένες από το μέσο, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις πλησιέστερα προς τη ράβδο 4, με αυτό να φαίνεται πιο έντονα για το μεγάλο διάκενο των 100cm. Επομένως, χρειάζεται επιπλέον διερεύνηση για τη διατύπωση κατάλληλου μοντέλου.

Παράλληλα, η μεγάλη απόκλιση πειραματικών-θεωρητικών τιμών οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι οι υπολογισμοί έχουν γίνει χρησιμοποιώντας την απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας, δηλαδή ως αφετηρία το επίπεδο της λαμαρίνας της θάλασσας. Στην πραγματικότητα όμως δεν είχαμε καμία αστοχία πάνω στη "θάλασσα", όλες οι εκκενώσεις γίνονταν μεταξύ των ράβδων και άρα ο κεραυνός στην περίπτωσή μας βλέπει ως επίπεδο γης το επίπεδο του καταστρώματος. Στα επόμενα θα υπολογίσουμε τις αποστάσεις φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος, δηλαδή έχουμε ως αναφορά το κατάστρωμα και θα προχωρήσουμε σε νέες συγκρίσεις.

Συγκρίνοντας το σχήμα 4.4 με το σχήμα 4.5 φαίνεται ότι οι πειραματικές τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα εν αντιθέσει με αυτές της θετικής πολικότητας για απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $D=75\text{cm}$ , ενώ για  $D=50\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$  οι πειραματικές τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στη θετική πολικότητα σε σύγκριση με αυτές της αρνητικής πολικότητας. Σε γενικές γραμμές όμως τα πειραματικά αποτελέσματα δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις για θετική και αρνητική πολικότητα. Στα θεωρητικά μοντέλα όμως, αν εξαιρέσουμε το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας, οι τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα συγκρινόμενες με αυτές της θετικής πολικότητας για όλα τα ύψη φορτισμένης ράβδου. Το μοντέλο που διαφέρει είναι αυτό της κυλιόμενης σφαίρας στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η πολικότητα της κεραυνικής εκκένωσης, οπότε προκύπτουν οι ίδιες τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης στη θετική και αρνητική πολικότητα. 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-γερανού 4 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 δύο αυτά γραφήματα φαίνεται ότι η ακτίνα σύλληψης και η απόσταση πρόσκρουσης του στατιστικού μοντέλου με γειτνίαση έχουν μικρότερη τιμή από αυτές του μοντέλου χωρίς γειτνίαση με μεγαλύτερη διαφορά στην αρνητική πολικότητα και μικρότερη διαφορά στην θετική πολικότητα.

Στο σχήμα 4.6 η ακτίνα σύλληψης κυλιόμενης σφαίρας, ελλειπτικού μοντέλου, στατιστικού μοντέλου με και χωρίς γειτνίαση έχουν κοντινές τιμές για  $D=50\text{cm}$ , με την τιμή της ακτίνας σύλληψης υπολογισμένης με το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας να είναι περίπου ίση με αυτήν του ελλειπτικού μοντέλου (46,45cm και 44,71cm αντίστοιχα) και την τιμή της ακτίνας σύλληψης υπολογιζόμενης με το στατιστικό μοντέλο να είναι σχεδόν ίδια με την τιμή της ακτίνας που προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο χωρίς γειτνίαση (39,57cm και 39,21cm αντίστοιχα). Για  $D=75\text{cm}$  οι τιμές για την ακτίνα σύλληψης κυλιόμενης σφαίρας και ελλειπτικού μοντέλου είναι πάλι κοντινές μεταξύ τους (61,1cm και 66,81cm αντίστοιχα), διαφέρουν όμως περισσότερο σε σύγκριση με τις τιμές για  $D=50\text{cm}$  από τις τιμές της ακτίνας για το στατιστικό μοντέλο χωρίς και με γειτνίαση. Για  $D=75\text{cm}$  οι τιμές της ακτίνας για το στατιστικό μοντέλο χωρίς και με γειτνίαση είναι και πάλι σχεδόν ταυτόσημες (52,21cm και 51,47cm αντίστοιχα). Για  $D=100\text{cm}$  η διαφορά της τιμής της ακτίνας μεταξύ κυλιόμενης σφαίρας και ελλειπτικού μοντέλου αυξάνεται, όπως και η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο μοντέλων και των στατιστικών μοντέλων. Τα δύο στατιστικά μοντέλα (χωρίς και με γειτνίαση) εξακολουθούν να δίνουν ακτίνα σύλληψης παραπλήσιας τιμής και απέχουν περίπου 12cm από τα πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα διαφέρουν για όλες τις αποστάσεις  $D$  από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές και η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση  $D$ .

Στο σχήμα 4.7 φαίνεται ότι η απόσταση πρόσκρουσης ελλειπτικού μοντέλου, στατιστικού χωρίς γειτνίαση και στατιστικού με γειτνίαση μοντέλου σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ μικρή απόκλιση από τα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζει η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέχουν και πάλι αρκετά από τις θεωρητικές τιμές, ωστόσο η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την απόσταση πρόσκρουσης είναι μικρότερη από αυτήν για την ακτίνα σύλληψης (σχήμα 4.6). Η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών είναι σχεδόν σταθερή με την απόσταση  $D$ .

Στο σχήμα 4.8 βλέπουμε και πάλι τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων για την ακτίνα σύλληψης μεταξύ στατιστικού μοντέλου χωρίς και με γειτνίαση. Για  $D=50\text{cm}$  όλα τα θεωρητικά μοντέλα δίνουν παραπλήσιες τιμές για την ακτίνα σύλληψης. Όσο αυξάνεται η απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-πλάκας ( $D$ ) τόσο πιο πολύ αυξάνεται η διαφορά της ακτίνας σύλληψης από όλες τις μεθόδους και τα πειραματικά αποτελέσματα.

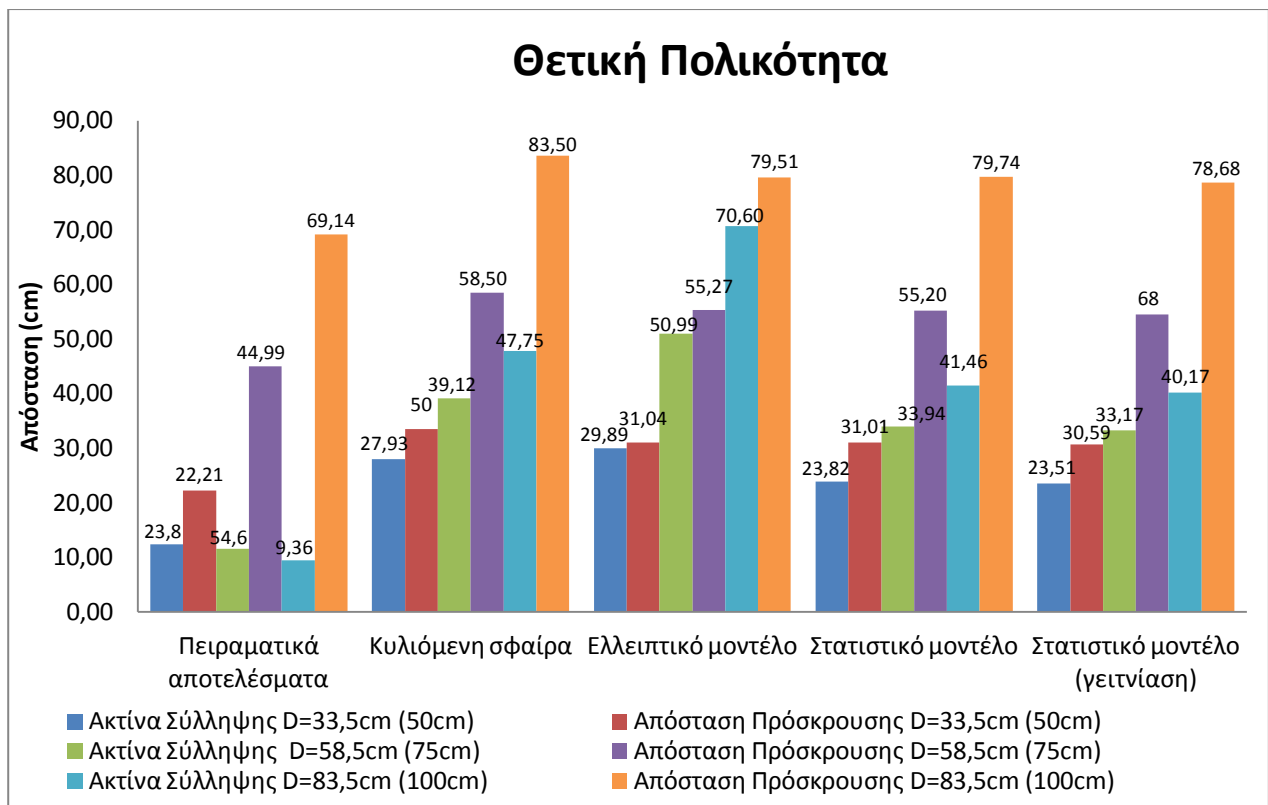
Στο σχήμα 4.9 φαίνεται ότι η απόσταση πρόσκρουσης ελλειπτικού μοντέλου, στατιστικού χωρίς γειτνίαση και στατιστικού με γειτνίαση μοντέλου σχεδόν ταυτίζονται

μεταξύ τους, ενώ μικρή απόκλιση από τα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζει η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέχουν και πάλι αρκετά από τις θεωρητικές τιμές, ωστόσο η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την απόσταση πρόσκρουσης είναι μικρότερη από αυτήν για την ακτίνα σύλληψης (σχήμα 4.8). Η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών παραμένει τώρα σταθερή με την απόσταση D.

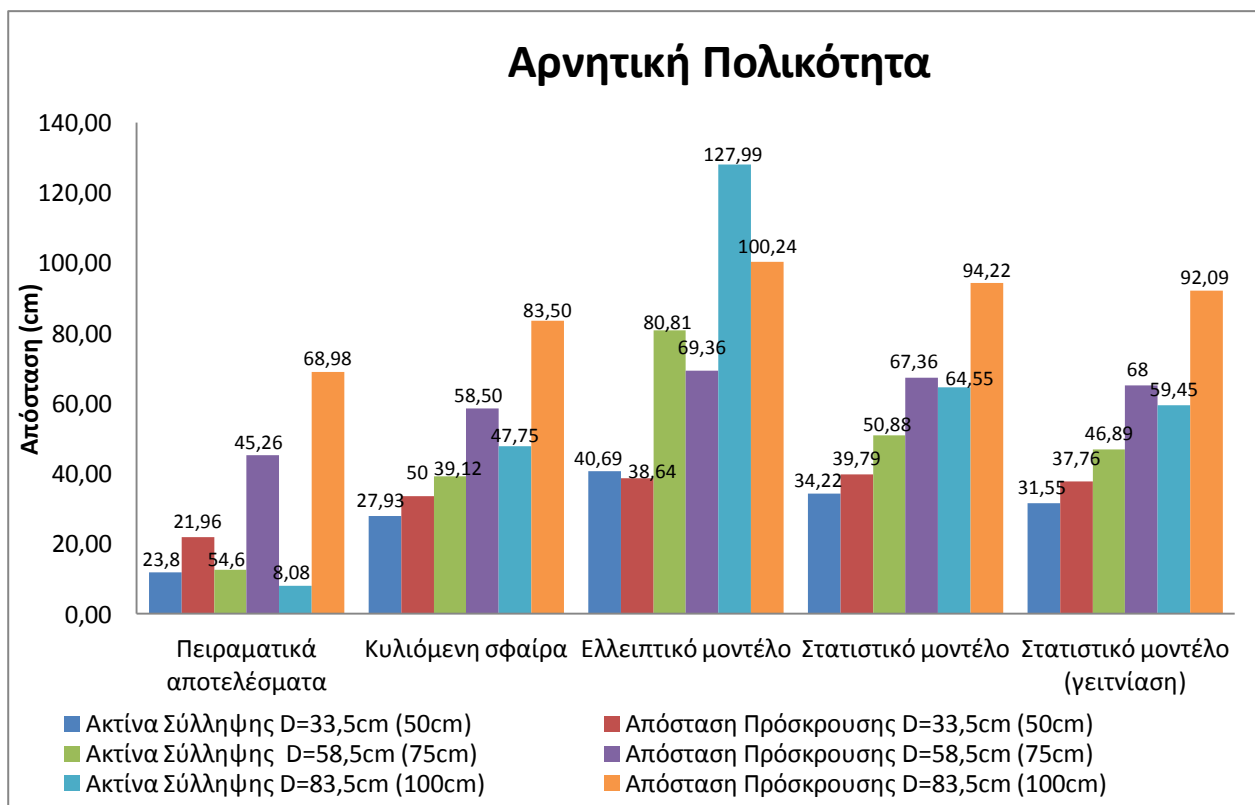
Όπως επισημάνθηκε παραπάνω η μεγάλη απόκλιση πειραματικών-θεωρητικών τιμών οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι οι υπολογισμοί έχουν γίνει χρησιμοποιώντας την απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας, δηλαδή ως αφετηρία το επίπεδο της λαμαρίνας της θάλασσας. Όμως ο κεραυνός στην περίπτωση μας βλέπει ως επίπεδο γης το επίπεδο του καταστρώματος και επομένως για να οδηγηθούμε σε σωστότερα συμπεράσματα ξαναγίνονται οι υπολογισμοί του πίνακα 4.12 λαμβάνοντας υπόψη τα εξής: Η γάστρα έχει ύψος περίπου 16,5cm. Αφαιρούμε από το H του φουγάρου και από τις τιμές των διακένων D=50cm/75cm/100cm τα 16,5cm του πλοίου για να υπολογιστούν οι αντίστοιχες αποστάσεις φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος H=15cm, D=33,5cm/58,5cm/83,5cm. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και σχήματα.

Διάκενο	Θεωρητικά αποτελέσματα									Πειραματικά αποτελέσματα	
	Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας		Ελλειπτικό μοντέλο		Στατιστικό Μοντέλο		Στατιστικό μοντέλο (γεινίαση)		Μέση ακτίνα σύλληψης (R <sub>C</sub> )	Μέση απόσταση πρόσκρουσης (S <sub>C</sub> )	
	D(cm)	R(cm)	S(cm)	R(cm)	S(cm)	R(cm)	S(cm)	R(cm)			S(cm)
Θετική πολικότητα	33,5	27,93	33,5	29,89	31,04	23,82	31,01	23,51	30,59	12,285	22,21
	58,5	39,12	58,5	50,99	55,27	33,94	55,20	33,17	54,45	11,5	44,99
	83,5	47,75	83,5	70,60	79,51	41,46	79,74	40,17	78,68	9,357	69,14
Αρνητική Πολικότητα	33,5	27,93	33,5	40,69	38,64	34,22	39,79	31,55	37,76	11,835	21,96
	58,5	39,12	58,5	80,81	69,36	50,88	67,36	46,89	65,08	12,5	45,26
	83,5	47,75	83,5	127,99	100,24	64,55	94,22	59,45	92,09	8,083	68,98

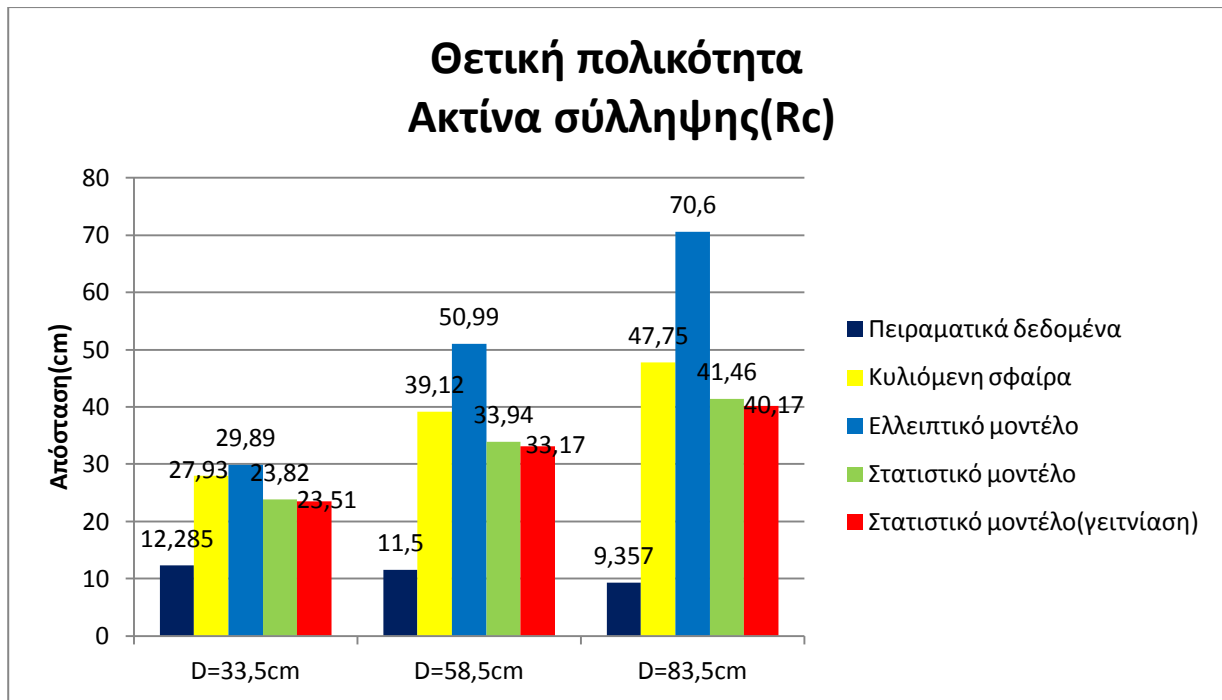
**Πίνακας 4.13:** Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη μέση ακτίνα σύλληψης και τη μέση απόσταση πρόσκρουσης. Τα θεωρητικά αποτελέσματα υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την απόσταση φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος.



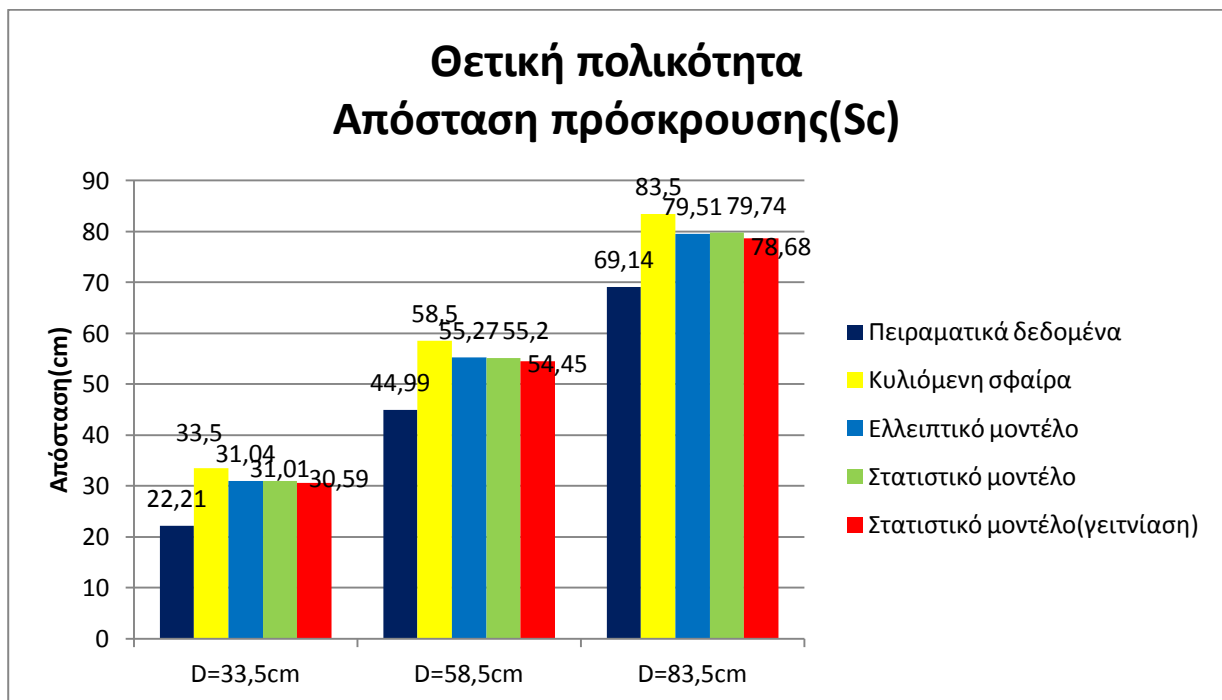
Σχήμα 4.10: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά μέθοδο για θετική πολικότητα.



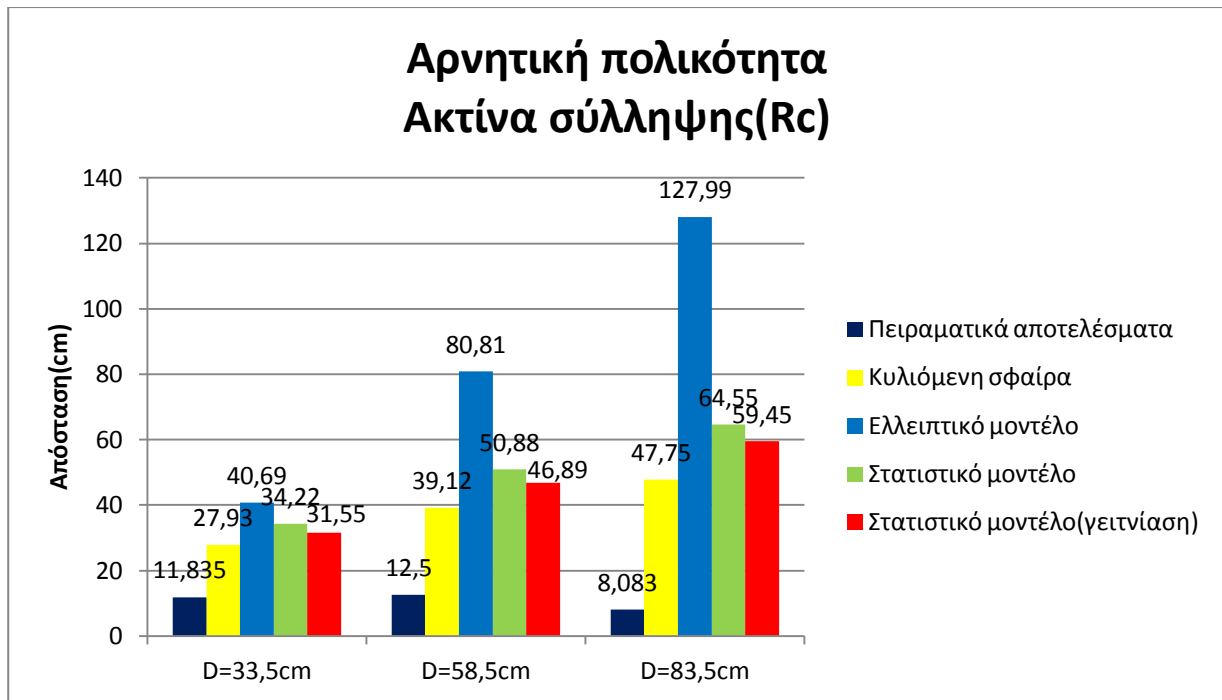
Σχήμα 4.11: Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά μέθοδο για αρνητική πολικότητα.



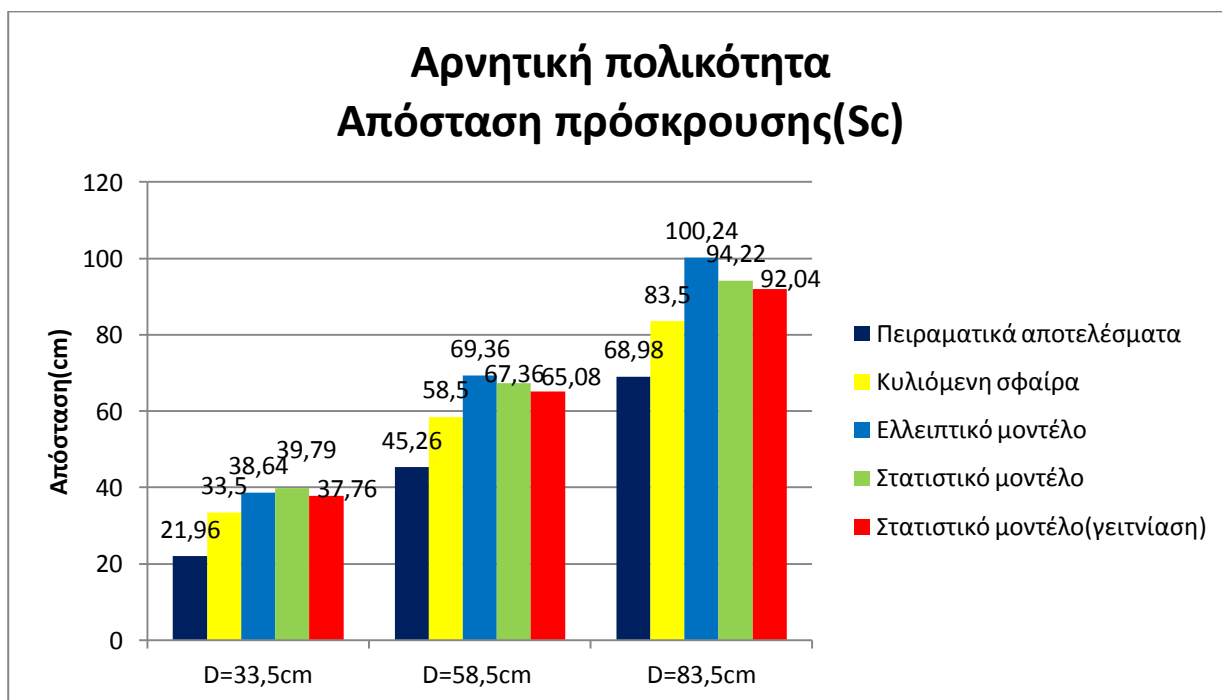
**Σχήμα 4.12:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος. Θετική πολικότητα.



**Σχήμα 4.13:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος. Θετική πολικότητα.



**Σχήμα 4.14:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης κατηγοριοποιημένα ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα.



**Σχήμα 4.15:** Γράφημα στηλών με συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα.

Από τα παραπάνω διαγράμματα αρχικά συμπεραίνουμε ότι μειώνονται οι αποκλίσεις πειραματικών-θεωρητικών τιμών, όπως και περιμέναμε. Για την ακτίνα σύλληψης

εξακολουθούν τα μοντέλα να δίνουν μεγάλες αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές, αλλά για την απόσταση πρόσκρουσης είναι πολύ μεγάλη η βελτίωση της διαφοράς πειραματικών-θεωρητικών αποτελεσμάτων ειδικά στη θετική πολικότητα.

Τα συμπεράσματα που αφορούν μόνο τις πειραματικές τιμές είναι ίδια με την προηγούμενη ανάλυση, όπου χρησιμοποιήσαμε ως αφετηρία για τα ύψη το επίπεδο της λαμαρίνας της θάλασσας. Συγκρίνοντας το σχήμα 4.10 με το σχήμα 4.11, όπως και πριν, παρατηρούμε ότι στα θεωρητικά μοντέλα, αν εξαιρέσουμε το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας, οι τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα συγκρινόμενες με αυτές της θετικής πολικότητας για όλα τα ύψη φορτισμένης ράβδου. Το μοντέλο που διαφέρει είναι αυτό της κυλιόμενης σφαίρας στο οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η πολικότητα της κεραυνικής εκκένωσης, οπότε προκύπτουν οι ίδιες τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης στη θετική και αρνητική πολικότητα. 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 γεινίαση έχουν μικρότερη τιμή από αυτές του μοντέλου χωρίς γεινίαση με μεγαλύτερη διαφορά στην αρνητική πολικότητα και μικρότερη διαφορά στην θετική πολικότητα.

Στο σχήμα 4.12 η ακτίνα σύλληψης κυλιόμενης σφαίρας, ελλειπτικού μοντέλου, στατιστικού μοντέλου με και χωρίς γεινίαση έχουν κοντινές τιμές για  $D=33,5\text{cm}$ , με την τιμή της ακτίνας σύλληψης υπολογιζόμενης με το στατιστικό μοντέλο να είναι σχεδόν ίδια με την τιμή της ακτίνας που προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο χωρίς γεινίαση (23,82cm και 23,51cm αντίστοιχα). Γενικά για όλα τα  $D$  οι τιμές ακτίνας σύλληψης υπολογιζόμενης με το στατιστικό μοντέλο είναι σχεδόν ίδια με την τιμή της ακτίνας που προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο χωρίς γεινίαση. Για  $D=58,5\text{cm}$  και  $D=83,5\text{cm}$  η τιμή της ακτίνας σύλληψης ελλειπτικού μοντέλου διαφέρει αρκετά από τα άλλα τρία θεωρητικά μοντέλα που έχουν παραπλήσιες μεταξύ τους τιμές. Τα πειραματικά αποτελέσματα διαφέρουν για όλες τις αποστάσεις  $D$  από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες τιμές και η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση  $D$ .

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται ότι η απόσταση πρόσκρουσης ελλειπτικού μοντέλου, στατιστικού χωρίς γεινίαση και στατιστικού με γεινίαση μοντέλου σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ μικρή απόκλιση από τα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζει η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέχουν και πάλι από τις θεωρητικές τιμές, ωστόσο η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την απόσταση πρόσκρουσης είναι μικρότερη από αυτήν για την ακτίνα σύλληψης (σχήμα 4.12). Η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών παραμένει σχεδόν σταθερή με την απόσταση  $D$ .

Στο σχήμα 4.14 βλέπουμε και πάλι τη μικρή διαφορά των αποτελεσμάτων για την ακτίνα σύλληψης μεταξύ στατιστικού μοντέλου χωρίς και με γειννίαση, η οποία όμως είναι μεγαλύτερη από τη θετική πολικότητα, όπως προαναφέραμε. Για  $D=33,5\text{cm}$  τα θεωρητικά μοντέλα δίνουν παραπλήσιες τιμές για την ακτίνα σύλληψης. Όσο αυξάνεται η απόσταση πρόσκρουσης ράβδου-καταστρώματος ( $D$ ) τόσο πιο πολύ αυξάνεται η διαφορά της ακτίνας σύλληψης μεταξύ όλων των μεθόδων και από πειραματικά αποτελέσματα.

Στο σχήμα 4.15 φαίνεται ότι η απόσταση πρόσκρουσης ελλειπτικού μοντέλου, στατιστικού χωρίς γειννίαση και στατιστικού με γειννίαση μοντέλου σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, ενώ μικρή απόκλιση από τα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζει η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέχουν και πάλι από τις θεωρητικές τιμές, ωστόσο η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την απόσταση πρόσκρουσης είναι πολύ μικρότερη από αυτήν για την ακτίνα σύλληψης (σχήμα 4.14). Η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών παραμένει σχεδόν σταθερή με την απόσταση  $D$ .

## **4.5 Διεξαγωγή πειράματος «τοροειδούς»-μοντέλου πλοίου**

### **4.5.1 Διαδικασία μετρήσεων**

Αρχικά το μοντέλο πλοίου τοποθετείται στη μεταλλική γειωμένη πλάκα, όπου καταπονείται υπό κρουστικές τάσεις για απόσταση «τοροειδούς»-φορτισμένης πλάκας:  $D=0.75\text{m}$  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 μέρας που έγινε το πείραμα. Στο κεφάλαιο 4.3.2 αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την αναγωγή της τάσης διάσπασης. Επισημαίνουμε σε αυτό το σημείο, ότι σε αντιστοιχία προς το πείραμα ράβδου-πλοίου, όπου η εφαρμοζόμενη  $U_s$  είναι τέτοια ώστε να είναι δυνατή η διάσπαση του διακένου ράβδου-πλάκας, να είναι δηλαδή εφικτή η εκκένωση στην επιφάνεια της λαμαρίνας, θα έπρεπε και εδώ να ακολουθηθεί μια διαδικασία εύρεσης της τάσης διάσπασης του διακένου «τοροειδής»-πλάκα (μοιάζει με το ομογενές διάκενο πλάκα-πλάκα). Απόπειρες κρούσεων (για αποστάσεις  $D$  μεταξύ 50cm 100cm) οδήγησαν σε εξαιρετικά μεγάλες τάσεις διάσπασης, στα όρια λειτουργίας της κρουστικής γεννήτριας. Για να αντιμετωπιστεί αυτός ο τεχνικός περιορισμός και δεδομένου ότι με την προσθήκη του πλοίου το πραγματικό διάκενο μειώνεται κατά πολύ και ουσιαστικά προκύπτει μια διάταξη τύπου πλάκα - ράβδος, αποφασίστηκε για την εκάστοτε απόσταση  $D$  «τοροειδούς»-μεταλλικής πλάκας να εφαρμοστεί η  $U_s$  του αντίστοιχου διακένου ράβδος-πλάκα. Με αυτή την προσέγγιση δεν είναι απόλυτα εγγυημένη η δυνατότητα διάσπασης στη

λαμαρίνα της "θάλασσας", όμως εξασφαλίζεται ότι είναι δυνατή η εκκένωση σε όλα τα σημεία του μοντέλου του πλοίου, τουλάχιστον πάνω από το επίπεδο του καταστρώματος.

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε στο πείραμα με το «τοροειδές» είναι η εξής: Με σταθερή επιβαλλόμενη τάση διάσπασης,  $U_s$ , η οποία αντιστοιχεί σε πιθανότητα διάσπασης ίση με 97.5% και σταθερή απόσταση πρόσκρουσης (D) φορτισμένου «τοροειδούς» εφαρμόζονται 20 επιβολές τάσης μεταξύ του φορτισμένου «τοροειδούς» και πλοίου. Στο πείραμα ράβδου-πλάκας, προσομοιώνεται το τελικό στάδιο της εκκένωσης με χρήση μιας ράβδου Υ.Τ. στη θέση του κατερχόμενου οχετού, οπότε το σημείο του πλήγματος και η μελέτη της ζώνης προστασίας καθορίζεται από τη σχετική θέση και τη γεωμετρία και η σύλληψη της εκκένωσης μπορεί να θεωρηθεί ελεγχόμενη και κατευθυνόμενη. Η χρήση «τοροειδούς» είναι προκειμένου να προσομοιωθεί η ύπαρξη των νεφών καταιγίδας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας που δημιουργούν ένα πολύ ισχυρό (μακροσκοπικά σχεδόν ομογενές) ηλεκτρικό πεδίο. Στη διάταξη αυτή, η σύλληψη δεν είναι κατευθυνόμενη, δεν είναι προκαθορισμένη η θέση του κατερχόμενου οχετού. Αντιθέτως, στις περισσότερες περιπτώσεις ξεκινά ανερχόμενος οχετός από κάποιο σημείο του μοντέλου (όπου είναι τοπικά ενισχυμένο το ηλεκτρικό πεδίο) το οποίο στη συνέχεια καθορίζει το σημείο εκκίνησης του κατερχόμενου οχετού από το πλέγμα του «τοροειδούς». Έτσι, κύριος σκοπός του πειράματος με το «τοροειδές» είναι να παρατηρήσουμε σε ποιο σημείο γίνεται το πλήγμα που προκαλείται από το ηλεκτρικό πεδίο του νέφους.

Τέλος, αναφέρουμε ότι αρχικά έγιναν δοκιμαστικές κρούσεις με μεγαλύτερο «τοροειδές» που κάλυπτε ολόκληρη την επιφάνεια της λαμαρίνας, ώστε να καθίσταται δυνατή η κατάληξη της εκκένωσης στη γειωμένη λαμαρίνα, αλλά πέρα από τις εξαιρετικά μεγάλες τάσεις διάσπασης προέκυψαν και επιπρόσθετα πρακτικά εμπόδια. Επιφανειακές εκκενώσεις μέσα από τις εγκοπές αέρα της ξυλοκατασκευής και η κατάληξη της εκκένωσης πάντοτε στον αγωγό γείωσης της λαμαρίνας οδήγησαν σε αναγκαστική μείωση των διαστάσεων του «τοροειδούς».

Η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε τελικά στο πείραμα με το «τοροειδές» φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.11.





Εικόνα 4.11: Στο σχήμα φαίνονται το μοντέλο πλοίου ,η γειωμένη μεταλλική πλάκα και το «τοροειδές».

#### 4.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Ακολουθώντας τη διαδικασία μετρήσεων ,που περιγράφηκε στο τμήμα 4.5.1, τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταγραφεί στον ακόλουθο πίνακα (4.14):

Μετρήσεις με «τοροειδές» D=75cm								
Πίεση : 990 mbar	Υγρασία: (44%) 11.965 g/m <sup>3</sup>	Θερμοκρασία : 28°C						
Επιβαλλόμενη τάση	Θετική πολικότητα	407,3kV						
	Αρνητική πολικότητα	778kV						
Αριθμός κατασκευής		1	2	3	4	5	6	7
Πλήθος πληγμάτων ανά κατασκευή	Θετική πολικότητα	0/20	0/20	0/20	0/20	0/20	4/20	16/20
	Αρνητική πολικότητα	0/20	0/20	0/20	0/20	0/20	20/20	0/20

Πίνακας 4.14: Πίνακας πειραματικών μετρήσεων για θετική και αρνητική πολικότητα και απόσταση πρόσκρουσης «τοροειδούς»-πλάκας D=75cm

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

- Για θετική πολικότητα και απόσταση  $D=75\text{cm}$  η πλειονότητα των εκκενώσεων (16/20) καταλήγουν στην υπερκατασκευή 7, που αναπαριστά τις καπνοδόχους του μηχανοστασίου, ενώ μόλις 4/20 πλήγματα δέχεται η υπερκατασκευή 6, δηλαδή οι χώροι ναυσιπλοΐας και διαμονής του πληρώματος, όπου στην κορυφή βρίσκεται η κεραία του πλοίου και έχει το μεγαλύτερο ύψος στο πλοίο.
- Για αρνητική πολικότητα και απόσταση  $D=75\text{cm}$  το σύνολο των εκκενώσεων (20/20) καταλήγουν στην υπερκατασκευή 6, που είναι και η ψηλότερη κατασκευή του πλοίου.

Από τις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος (δείγμα των οποίων παρουσιάζεται στα παραρτήματα Ζ,Η) παρατηρούμε ότι στη θετική πολικότητα δεν υπάρχει κανένας διπλός οχετός, ενώ στην αρνητική πολικότητα υπάρχουν τέσσερις περιπτώσεις εμφάνισης οχετών που τερματίζουν σε πολλαπλά σημεία του «τοροειδούς» (κατά κύριο λόγο διπλοί ανερχόμενοι οχετοί).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΟΜΕΝΗ ΜΕΡΑ

### 5.1 Συμπεράσματα

#### 5.1.1. Πείραμα ράβδου – μοντέλου πλοίου

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:

- ❖ Τα πειραματικά μας αποτελέσματα απέχουν αρκετά από τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα όλων μεθόδων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο ότι η σύγκριση γίνεται με θεωρητικά μοντέλα που αναφέρονται σε ζώνη προστασίας μεμονωμένης ψηλής ράβδου, ενώ οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν μεταξύ δύο ισοϋψών ράβδων. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι υπάρχει ανάγκη να αναπτυχθεί κάποιο καινούργιο μοντέλο εκτίμησης της ζώνης προστασίας για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Επίσης, η μεγάλη απόκλιση πειραματικών-θεωρητικών τιμών οφείλεται σε ένα μεγάλο βαθμό στο γεγονός ότι οι υπολογισμοί έχουν γίνει χρησιμοποιώντας ως αφετηρία το επίπεδο της λαμαρίνας της θάλασσας, όμως ο κεραυνός στην περίπτωσή μας βλέπει ως επίπεδο γης το επίπεδο του καταστρώματος.
- ❖ Ξανακάνοντας τους υπολογισμούς με αναφορά το επίπεδο του καταστρώματος βλέπουμε να μειώνονται οι αποκλίσεις πειραματικών-θεωρητικών τιμών. Για την ακτίνα σύλληψης τα μοντέλα εξακολουθούν να δίνουν μεγάλες αποκλίσεις από τις πειραματικές τιμές, αλλά για την απόσταση πρόσκρουσης είναι πολύ μεγάλη η βελτίωση της διαφοράς θεωρητικών-πειραματικών αποτελεσμάτων ειδικά στη θετική πολικότητα.
- ❖ Για την ακτίνα σύλληψης η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών αυξάνεται καθώς αυξάνεται η απόσταση D.
- ❖ Στην περίπτωση της απόστασης πρόσκρουσης η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών είναι σχεδόν σταθερή με την απόσταση D.

- ❖ Η διαφορά μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για την απόσταση πρόσκρουσης είναι μικρότερη από αυτήν για την ακτίνα σύλληψης τόσο για τη θετική, όσο και για την αρνητική πολικότητα.
- ❖ Οι πειραματικές τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα σε σύγκριση με αυτές της θετικής πολικότητας για απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $D=75\text{cm}$ , ενώ για  $D=50\text{cm}$  και  $D=100\text{cm}$  οι πειραματικές τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στη θετική πολικότητα σε σύγκριση με αυτές της αρνητικής πολικότητας. Σε γενικές γραμμές όμως τα πειραματικά αποτελέσματα δεν έχουν μεγάλες αποκλίσεις για θετική και αρνητική πολικότητα. Στα θεωρητικά μοντέλα όμως, αν εξαιρέσουμε το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας, οι τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης είναι μεγαλύτερες στην αρνητική πολικότητα συγκρινόμενες με αυτές της θετικής πολικότητας για όλες τις αποστάσεις φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας. Στο μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας δεν λαμβάνεται υπόψη η πολικότητα της κεραυνικής εκκένωσης, εξίσου οι ίδιες τιμές της ακτίνας σύλληψης και απόστασης πρόσκρουσης θετικής και αρνητικής πολικότητας.

### 5.1.2.Πείραμα «τοροειδούς» –μοντέλου πλοίου

Το φαινόμενο σύλληψης του κεραυνού από πλοία διερευνήθηκε εργαστηριακά μέσω πειραμάτων κλίμακας. Η γειωμένη πλάκα αναπαριστά τη θάλασσα, το υπό τάση φορτισμένο «τοροειδές» χρησιμοποιείται προκειμένου να προσομοιωθεί η ύπαρξη των νεφών καταιγίδας πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας που δημιουργούν ένα πολύ ισχυρό (μακροσκοπικά σχεδόν ομογενές) ηλεκτρικό πεδίο και το μοντέλο πλοίου αναπαριστά ένα εμπορικό πλοίο πραγματικών διαστάσεων. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις συνοψίζονται ως εξής:

- ❖ Για θετική πολικότητα και απόσταση «τοροειδούς»-μεταλλικής πλάκας  $D=75\text{cm}$  η πλειονότητα των εκκενώσεων (16/20) καταλήγουν στην υπερκατασκευή 7 που αναπαριστά τις καπνοδόχους του μηχανοστασίου, ενώ μόλις 4/20 πλήγματα δέχεται η υπερκατασκευή 6, δηλαδή οι χώροι ναυσιπλοΐας και διαμονής του πληρώματος, όπου στην κορυφή βρίσκεται η κεραία του πλοίου.
- ❖ Για αρνητική πολικότητα και απόσταση  $D=75\text{cm}$  το σύνολο των εκκενώσεων (20/20) καταλήγουν στην υπερκατασκευή 6 που είναι και η ψηλότερη κατασκευή του πλοίου.
- ❖ Από τις φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά τη διεξαγωγή του πειράματος (δείγμα των οποίων παρουσιάζεται στο παράρτημα Z) παρατηρούμε ότι στη θετική πολικότητα δεν εμφανίζεται κανένας διπλός οχετός, ενώ στην αρνητική πολικότητα

υπάρχουν τέσσερις περιπτώσεις εμφάνισης οχρών που τερματίζουν σε πολλαπλά σημεία του «τοροειδούς» (κατά κύριο λόγο διπλοί ανερχόμενοι οχετοί).

## 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.
- ❖ Σημαντική θα ήταν η από κοινού αξιολόγηση με τις μετρήσεις για τις υπόλοιπες υπερκατασκευές του πλοίου.
- ❖ Θα πρέπει να διερευνηθούν επιπλέον αποστάσεις «τοροειδούς» –μεταλλικής πλάκας (D=50 cm, D=100cm) στο αντίστοιχο πείραμα, ώστε να καταλήξουμε σε περισσότερα και ακριβέστερα συμπεράσματα.
- ❖ 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 της απόστασης φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας ήταν από 50cm έως 100cm και για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η μελέτη μεγαλύτερων αποστάσεων για πιο άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα.
- ❖ Στο στατιστικό μοντέλο οι συντελεστές γειτνίασης που έχουν ως τώρα διατυπωθεί αναφέρονται στη τοποθέτηση κοντής γειτνιάζουσας ράβδου στην κρίσιμη ακτίνα, ενώ στο πείραμά μας είναι δεδομένες-σταθερές οι αποστάσεις και οι κοντές ράβδοι δεν είναι τοποθετημένες στην κρίσιμη ακτίνα. Επομένως πρέπει να μελετηθεί μια βελτίωση των συντελεστών γειτνίασης του στατιστικού μοντέλου.
- ❖ Επιπλέον, το πείραμά μας κατέδειξε την ανάγκη διατύπωσης ενός νέου μοντέλου για ισοϋψείς ράβδους που θα λαμβάνει υπόψη το ύψος H, την απόσταση L και την πιθανότητα σύλληψης.
- ❖ 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.

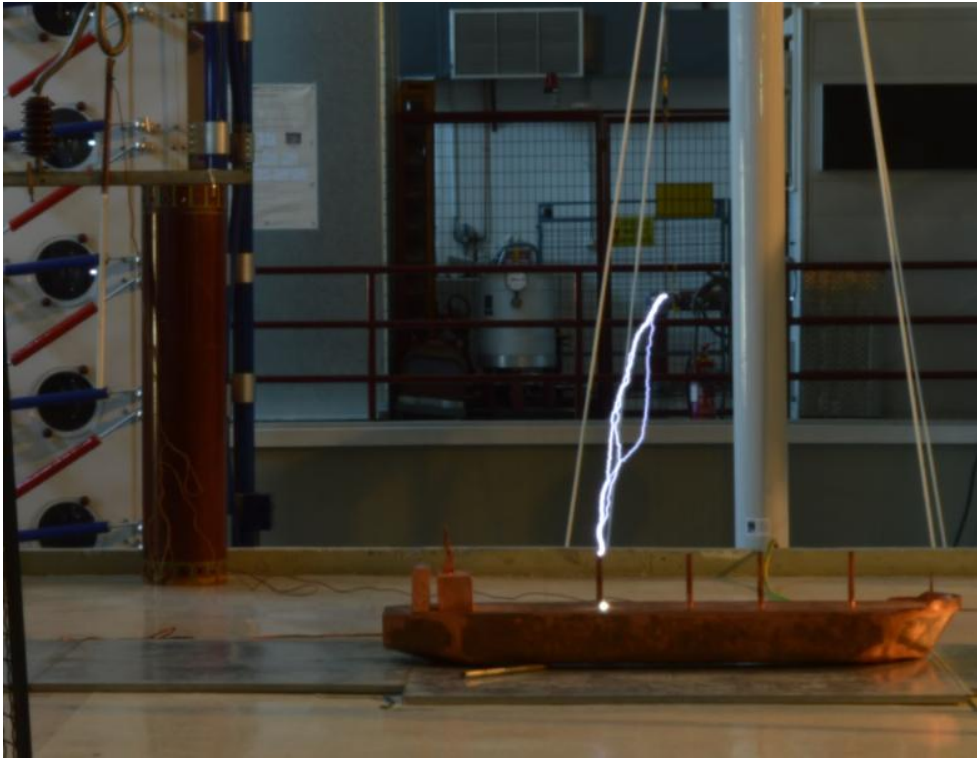
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Ενδεικτικές εικόνες από τη διεξαγωγή του πειράματος**

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $D=100\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα**





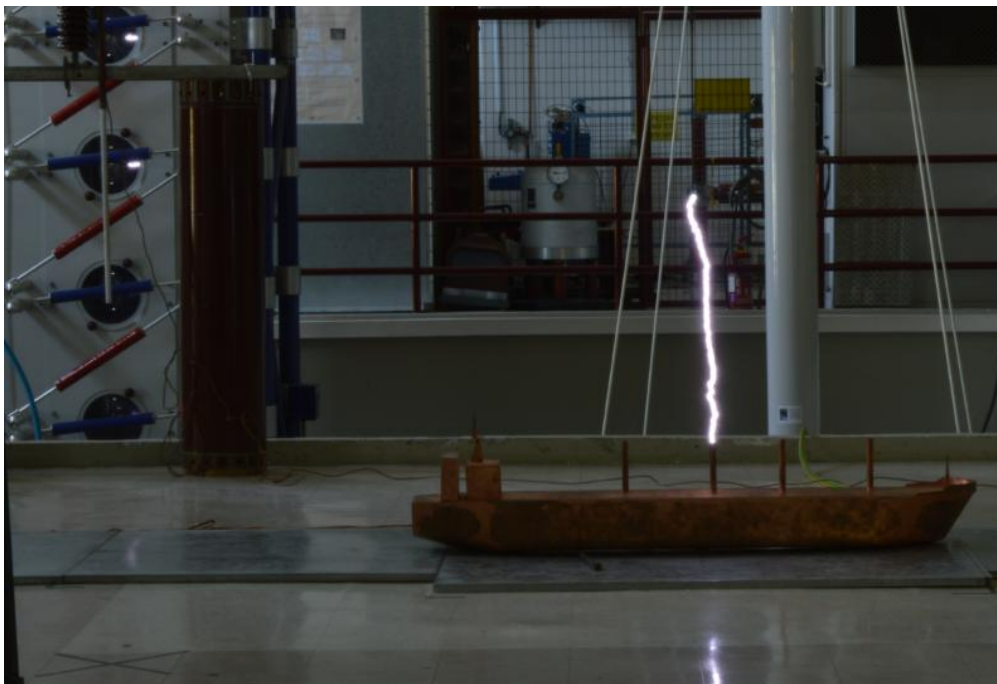




**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $D=100\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.**





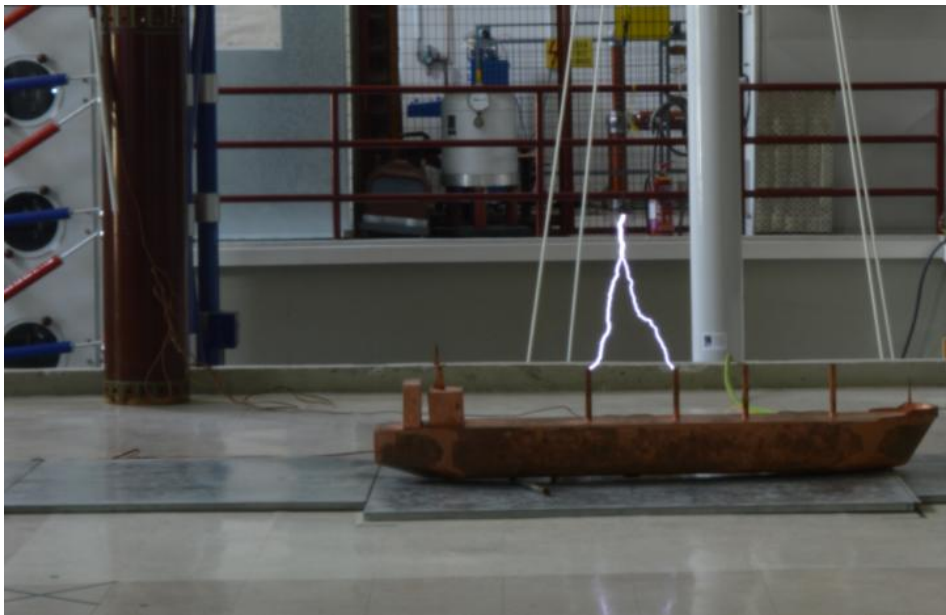




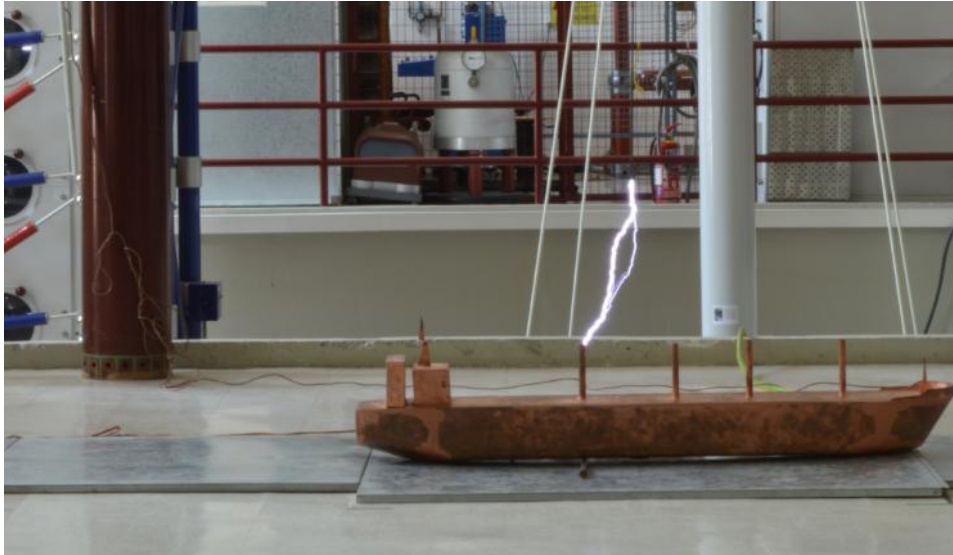
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $D=75\text{ cm}$ , Θετική Πολικότητα.**







**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  
 $D=75\text{ cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.**





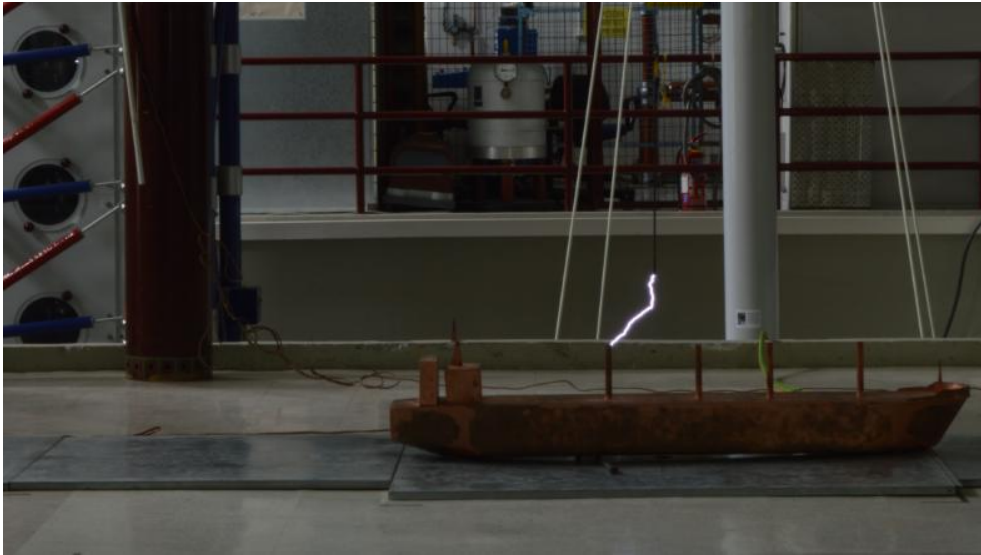




***ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας,  
D=50cm, Θετική Πολικότητα.***







**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ: Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  
 $D=50\text{cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.**

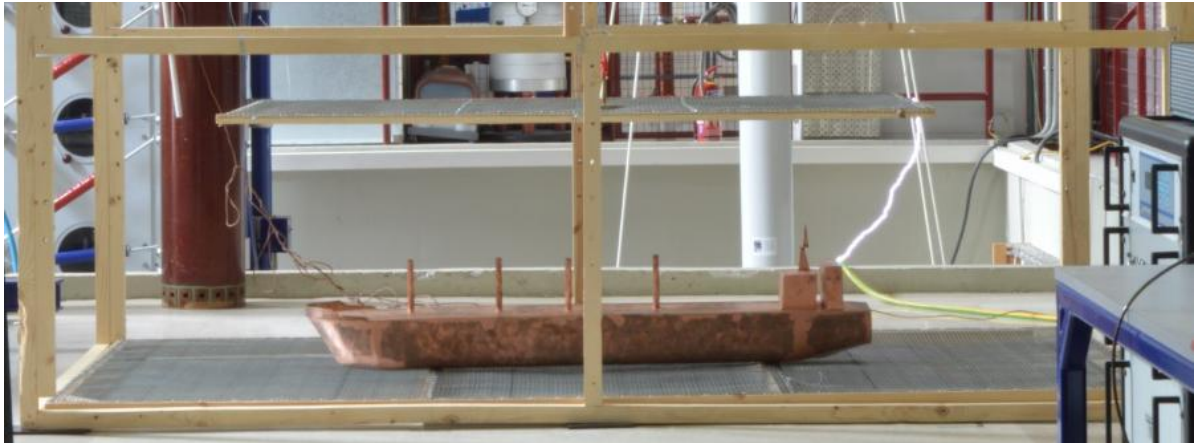


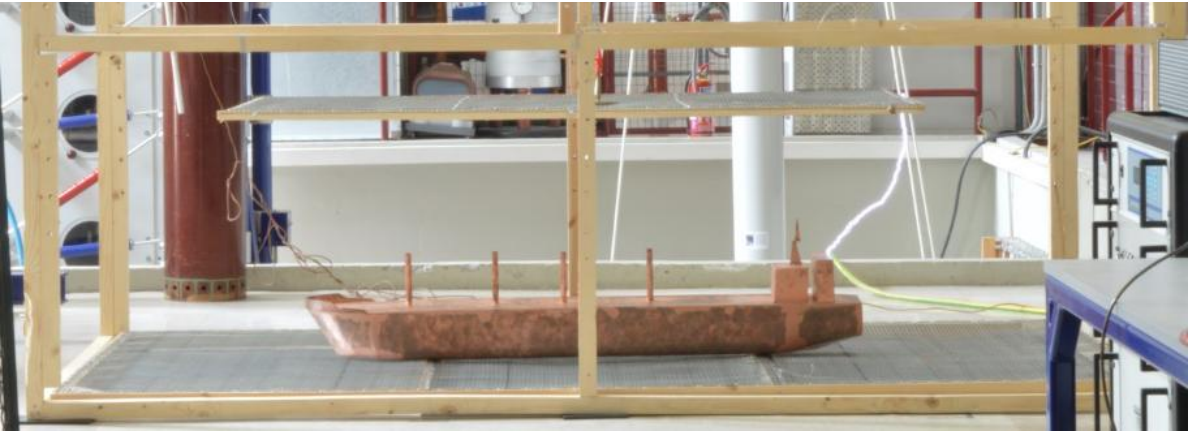




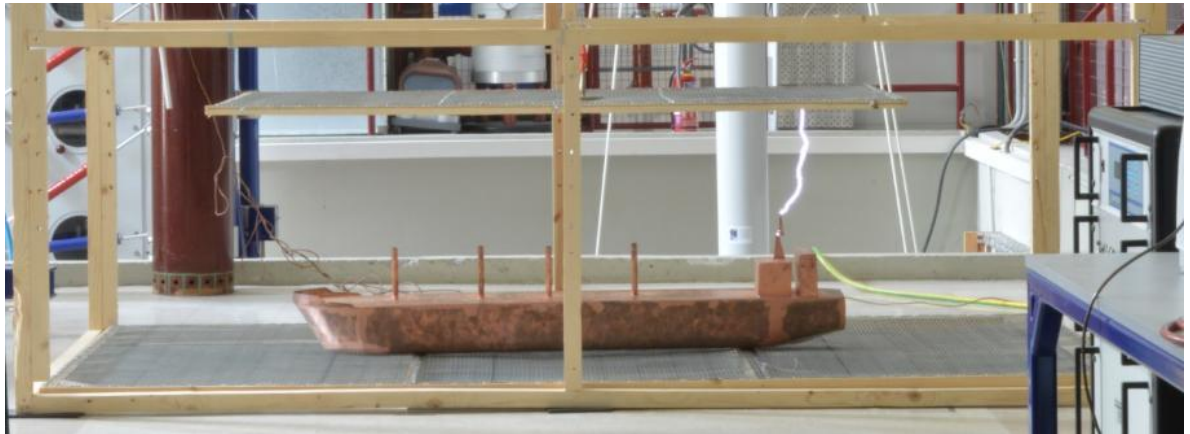
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ: Απόσταση «τοροειδούς»-μεταλλικής πλάκας  $D=75\text{cm}$ , Θετική Πολικότητα.**

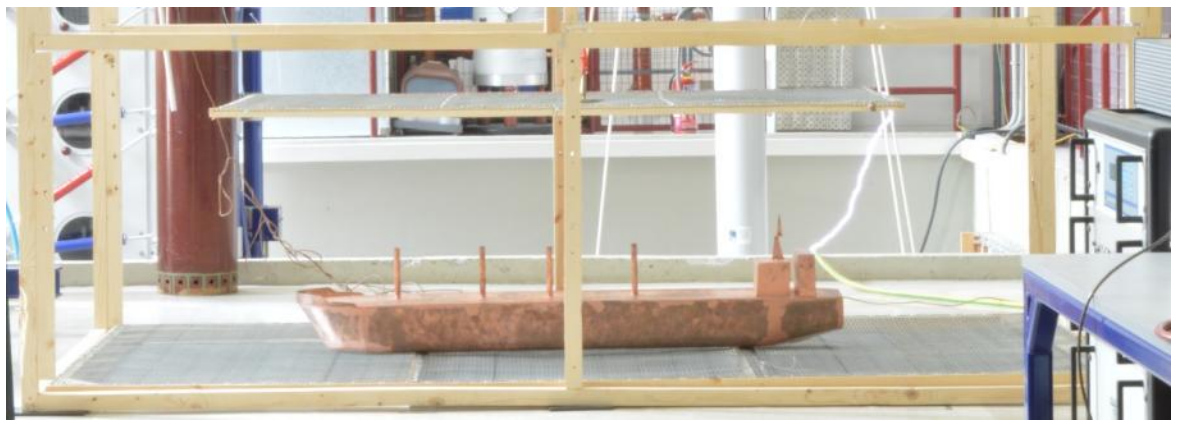


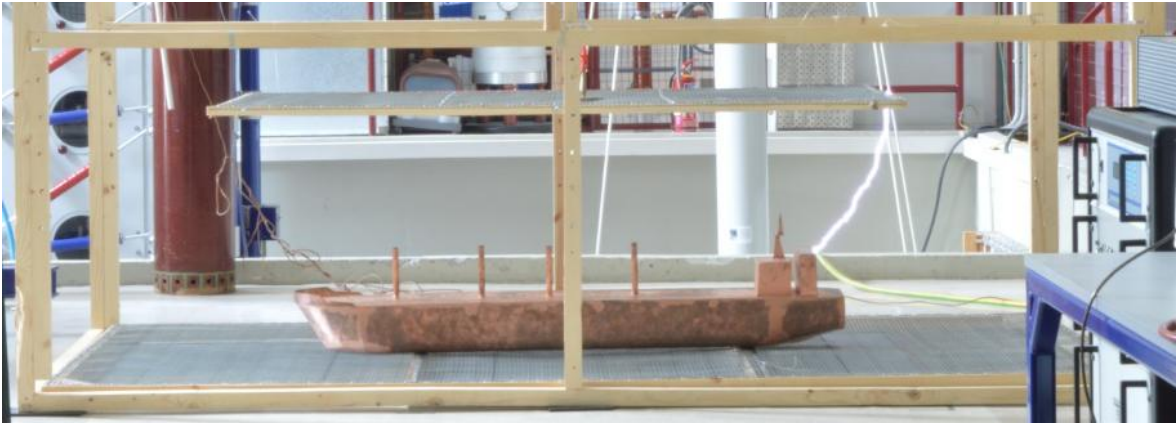








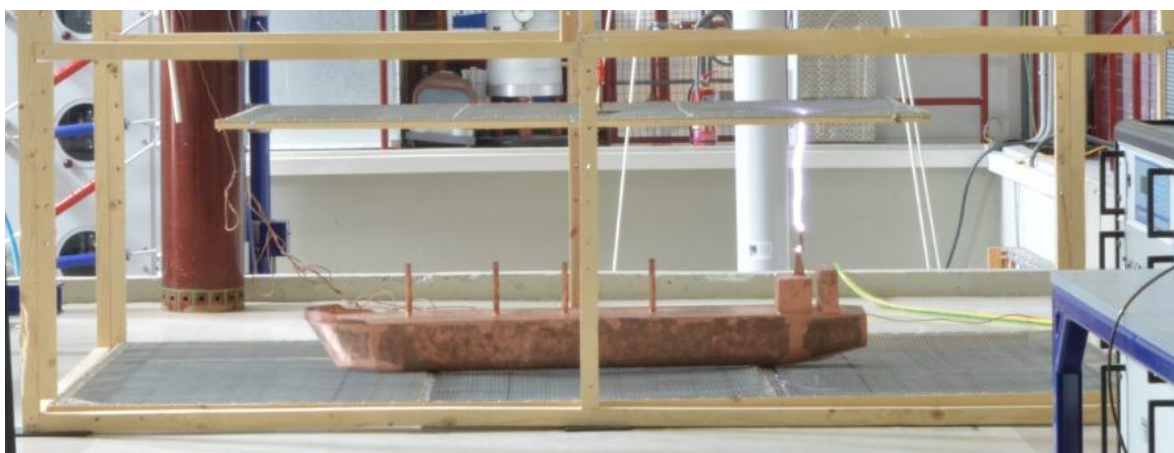


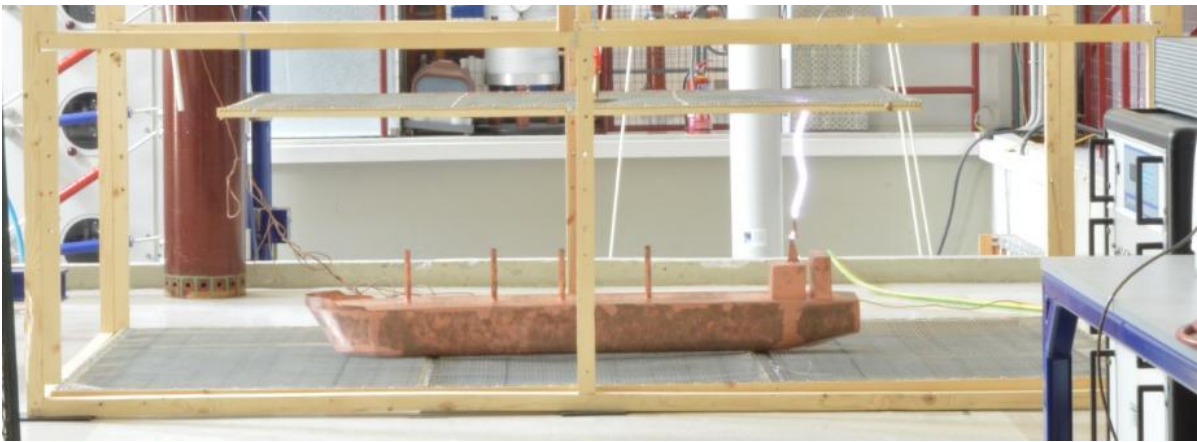




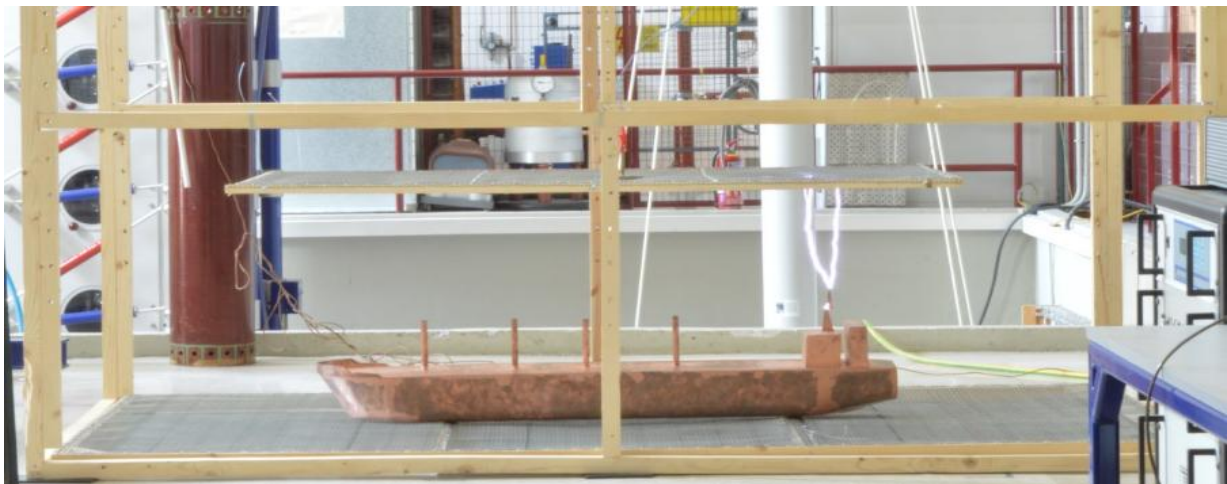
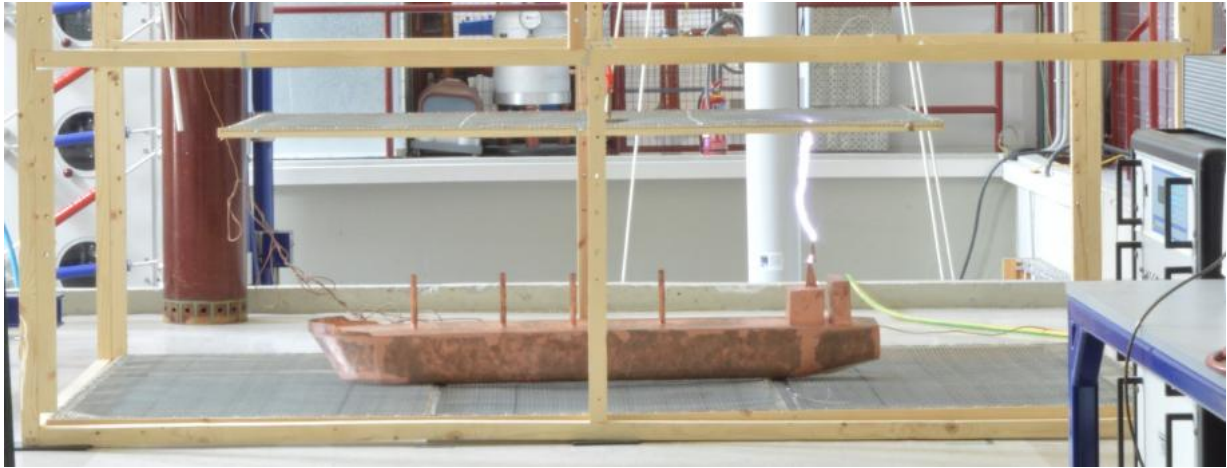


**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η: Απόσταση «τοροειδούς»-μεταλλικής πλάκας  $D=75\text{cm}$ , Αρνητική Πολικότητα.**

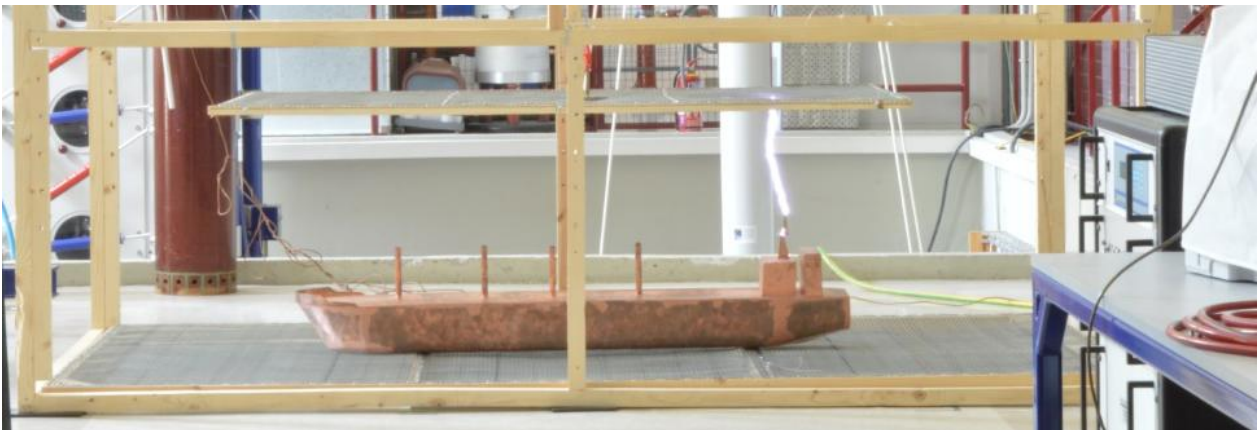


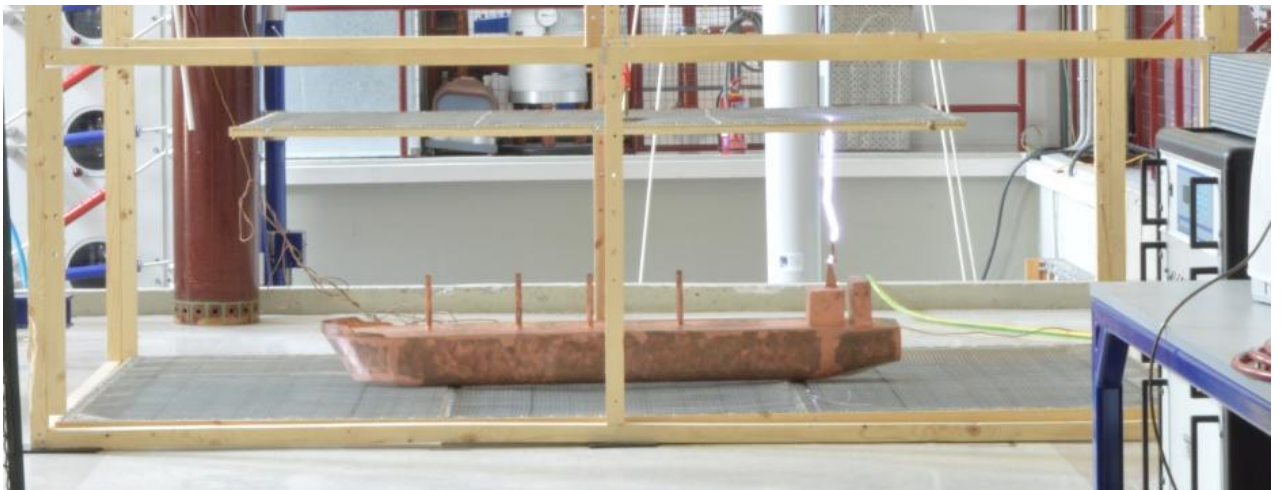
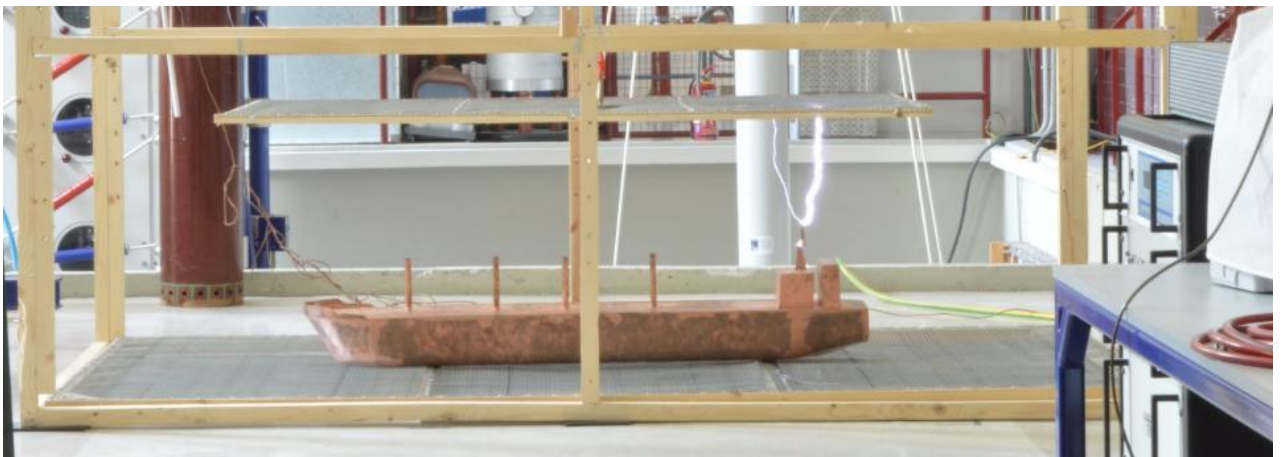


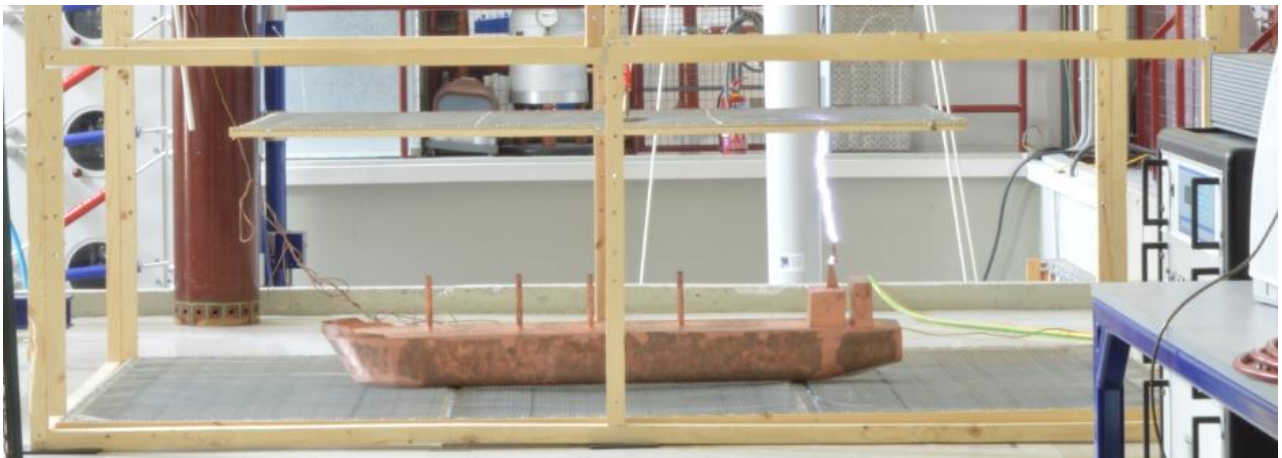












## Βιβλιογραφία

- [1] Θωμάς Ε. Τσοβίλης, "Μοντέλο σύλληψης κεραυνού και εφαρμογές σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας", Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη, 2010
- [2] Πληροφορίες από την ιστοσελίδα της Ελέμκο, [www.elemko.gr](http://www.elemko.gr)
- [3] Πληροφορίες από <http://iqelectric.com/ti-einai-o-keraynos/>
- [4] Ιωάννης Κ. Κριμιτζάς "Μέθοδοι γείωσης και αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2013
- [5] Πληροφορίες από:  
<http://tvxs.gr/news/%CF%84%CE%B1%CE%BE%CE%AF%CE%B4%CE%B9%CE%B1-%CF%83%CF%84%CE%BF-%CF%87%CF%81%CF%8C%CE%BD%CE%BF/%CE%BF-%CE%B2%CE%B5%CE%BD%CE%B9%CE%B1%CE%BC%CE%AF%CE%BD-%CF%86%CF%81%CE%B1%CE%B3%CE%BA%CE%BB%CE%AF%CE%BD%CE%BF%CF%82-%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CE%AF-%CF%84%CE%BF-%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CF%83%CE%B7%CE%BC%CE%BF-%CF%80%CE%B5%CE%AF%CF%81%CE%B1%CE%BC%CE%B1-%CE%BC%CE%B5-%CF%84%CE%BF%CE%BD-%CF%87%CE%B1%CF%81%CF%84%CE%B1%CE%B5%CF%84%CF%8C>
- [6] V.A. Rakov and M. A. Uman, Lightning Physics and Effects, Cambridge 2003
- [7] Ευθύμιος Αλέξανδρος Β. Βλαχοκώστας "Μελέτη Αντικεραυνικής Προστασίας Πλοίων", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2009
- [8] Ι.Α. Σταθόπουλος, "Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων", Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, Οκτώβριος 1989
- [9] Χρήστος Χαλδούπης, "Εισαγωγικά στοιχεία ατμοσφαιρικής φυσικής", Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2009
- [10] Μιχάλης Δ. Θεοδοσίου, "Ανάπτυξη λογισμικού για αντικεραυνική προστασία κτηρίων", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2009
- [11] 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
- [12] Πληροφορίες από την ιστοσελίδα της NASA  
<http://www.nasa.gov/centers/marshall/multimedia/video/2006/video06-112.html>
- [13] [www.marinelightning.com](http://www.marinelightning.com)

- [14] Even M.Thomson , ‘‘A New Concept for Lightning Protection of Boats, Protect a Boat like a Building’’, Ph.D., 2007
- [15] Protection of Naval Systems against electromagnetic effects due to lightning, C.Gomes and M.Z.A.Ab Kadir, Centre of Excellence on Lightning Protection, Department of Electrical and Electronics Engineering, Universiti Putra Malaysia.
- [16] 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
- [17] ERITECH, ‘‘Lightning Protection Handbook Designing to the IEC 62305 Series of Lightning Protection Standards’’
- [18] «Σχεδιασμός Προστασίας Κατασκευών από Κεραυνούς» Ελευθερία Πυργιώτη Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός.
- [19] P.Y. Okyere, Ph.D & George Edeful, ‘‘Evaluation of Rolling Sphere Method Using Leader Potential Concept: A Case Study’’, University of Science and Technology Kumasi-Ghana
- [20] <http://www.physics.gla.ac.uk/~kskeldon/PubSci/exhibits/E3/>
- [21] ERITECH, ‘‘Lightning Protection Handbook Designing to the IEC 62305 Series of Lightning Protection Standards’’
- [22] 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
- [23] S. Grzybowski, ‘‘Experimental Evaluation of Lightning Protection Zone used on Ship’’, IEEE, 2007
- [24] S. Grzybowski, Y.Song, ‘‘Experimental Study of Rod Height and Impulse Polarity Impact on the Protection Zone’’, Mississippi State University
- [25] Prof. 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
- [26] Ανδρέας Χ.Αλεξάνδρου ‘‘Κεραυνοπληξία πλοίου: Πειραματική διερεύνηση, μέσω δοκιμών σε μοντέλα υπό κλίμακα’’, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, 2014
- [27] High Voltages Test Techniques, IEC 60060-1, 1989
- [28] DEHN+SÖHNE-LIGHTNING PROTECTION GUIDE, Germany, September 2007

- [29] F.Heidler, W.Zischank, Z.Flisowski, Ch.Bouquegneau, C.Mazzetti “Parameters of lightning current given in IEC 62305-Bachround, Experience and Outlook”University of the Federal Armed Forces Munich, EIT 7, Neubiberg, 2008
- [30] Καλογιαννάκης Αντώνιος του Γεωργίου, «Μελέτη της αλληλεπίδρασης του κεραυνικού πλήγματος με τη σιδηρο-μεταλλική κατασκευή πλοίων», Διπλωματική Εργασία, Πάτρα, 2011
- [31] Γ.Μ. Πετρόπουλος, Χαρακτηριστικά αντιστάσεων γης σε υψηλές τάσεις, 1948
- [32] BS EN/IEC 62305 Lightning protection standard, Σεπτέμβρης 2006
- [33] H. D. Betz, U.Shumann, P. Laroche, “Lightning: Principles, Instruments and Applications, 2009
- [34] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων ΕΜΠ, “ Συμπληρωματικές Σημειώσεις Υψηλών Τάσεων”, Αθήνα, Οκτώβριος 2012