



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

**Συμβολή στην αντικεραυνική προστασία πλοίου υπό καταπόνηση
αρνητικής πολικότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ε. Βατίστας

Καθηγητής: Ιωάννης Α. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



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

194

**Συμβολή στην αντικεραυνική προστασία πλοίου υπό καταπόνηση
αρνητικής πολικότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ε. Βατίστας

Καθηγητής: Ιωάννης Α. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2015.

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

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

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π

.....
Δημήτριος Ε. Βατίστας

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

Copyright © Δημήτριος Ε. Βατίστας, 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

Το ζήτημα της αντικεραυνικής προστασίας πλοίων δεν εξετάζεται ενδελεχώς από τους αντίστοιχους διεθνείς κανονισμούς παρότι τα πλοία, όντας τα υψηλότερα αντικείμενα μέσα στη θάλασσα, είναι δυνητικά επιρρεπή σε κεραυνικά πλήγματα. Τα πλήγματα αυτά αποτελούν κίνδυνο, κατά κύριο λόγο για τα ηλεκτρονικά συστήματα του πλοίου, τα οποία ελέγχουν ζωτικές λειτουργίες πλοήγησης και τηλεπικοινωνιών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η σύλληψη κεραυνικών εκκενώσεων από διαφορετικές κατασκευές ενός υπό κλίμακα μοντέλου φορητού πλοίου, μέσω πειραμάτων επιβολής κρουστικής τάσης σε αυτό. Σκοπός είναι η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας κάποιων υφιστάμενων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας στην περίπτωση των πλοίων. Συγκεκριμένα παρατίθενται τα αποτελέσματα για υπερτάσεις αρνητικής πολικότητας και οι συγκρίσεις τους με τις προβλέψεις των θεωρητικών μοντέλων. Τέλος, ακολουθεί ιδιαίτερη συγκριτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων με το στατιστικό μοντέλο, το οποίο παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σύγκλιση με τα πειραματικά αποτελέσματα και ερευνώνται οι παράμετροι που το επηρεάζουν και σχετίζονται με τα φαινόμενα γειτνίασης.

Λέξεις κλειδιά: Αντικεραυνική προστασία πλοίου, Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας, Ακτίνα σύλληψης, Απόσταση πρόσκρουσης, Κανονική κατανομή, Στατιστικό μοντέλο.

Abstract

Lightning protection of ships is not thoroughly inspected by the relevant international regulations despite the fact that ships, since they are the tallest objects on the sea surface, are potentially vulnerable to lightning strikes. These strikes constitute risk of damage, especially for the electronic systems of the ship, which control vital operations such as navigation and telecommunications. In this thesis, the interception of lightning strikes from different parts of a scaled down metal ship is examined through impulse voltage experiments. The aim of these experiments is to investigate the accuracy of certain existing methods for the estimation of the protection zone in case of ships. More specifically, the results for the negative polarity impulses are presented and compared to the estimations of these theoretical methods. In the final stage of this research a comparative study of the experimental results along with the statistic model, as its estimations have the closest proximity to the experimental results, is carried out and some parameters that affect this model and are linked to proximity effects are examined.

Keywords: Ship lightning protection, Methods for the estimation of the protection zone, Attractive radius, Striking distance, Normal distribution, Statistic model

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά το φαινόμενο της κεραυνοπληξίας πλοίων. Στο πλαίσιο αυτής διεξήχθησαν πειράματα κατά τα οποία επιβλήθηκαν κρουστικές τάσεις σε ένα μοντέλο πλοίου υπό κλίμακα. Από τις επιβολές αυτές προέκυψαν πειραματικά η μέση ακτίνα σύλληψης και η μέση απόσταση πρόσκρουσης για διάφορες κατασκευές του πλοίου. Αυτές οι δύο κρίσιμες παράμετροι στη συνέχεια συγκρίνονται με τις θεωρητικές τιμές διάφορων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας ώστε να εξαχθούν κατάλληλα συμπεράσματα. Τέλος, παρατίθεται μια συγκριτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις αντίστοιχες προβλέψεις του στατιστικού μοντέλου.

Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται εισαγωγικές έννοιες που αφορούν το φαινόμενο της κεραυνικής εκκένωσης καθώς και τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα που οδηγούν στην δημιουργία του. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου του κεραυνού. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι μηχανισμοί διαχωρισμού των φορτίων, οι τύποι, οι φάσεις, η πολικότητα και οι παράμετροι ενός κεραυνού καθώς και το ισοδύναμο κύκλωμα του.

Κεφάλαιο 2: Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι κυριότερες διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία. Επιπρόσθετα, αναλύονται οι επιπτώσεις του κεραυνικού πλήγματος που αφορούν βλάβες στο σκελετό του πλοίου και στα ηλεκτρικά του συστήματα, καθώς και οι θερμικές επιπτώσεις στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης.

Κεφάλαιο 3: Το κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος αναλύονται οι έννοιες της απόστασης πρόσκρουσης και της ακτίνας σύλληψης και παρατίθενται οι πιο σημαντικές μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας. Στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση μερικών από αυτές τις μεθόδους. Στο δεύτερο μέρος παρατίθενται τα σημαντικότερα πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων, τόσο εθνικά όσο και διεθνή.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό περιέχονται τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και στη συνέχεια αναλύεται η διαδικασία του πειράματος φορτισμένης ράβδου-μοντέλου πλοίου. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς και συγκριτικά διαγράμματα που περιέχουν τα πειραματικά αποτελέσματα και τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές που προκύπτουν από τις διάφορες μεθόδους εκτίμησης ζώνης προστασίας.

Κεφάλαιο 5: Στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρατίθεται συγκριτική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις προβλέψεις των εξισώσεων του στατιστικού μοντέλου. Στη συνέχεια ακολουθούν τα όποια συμπεράσματα

προέκυψαν από την μελέτη αυτή καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου σύλληψης του κεραυνού.

Στο σημείο αυτό, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν τόσο κατά τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου όσο και κατά τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον κ. Ιωάννη Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τόσο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας όσο και για την στήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Τον κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, Επίκουρο καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την πολύτιμη βοήθειά του, τις λύσεις που έδωσε σε οποιοδήποτε πρόβλημα παρουσιάστηκε και γενικότερα, το εξαιρετικό κλίμα συνεργασίας που υπήρχε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας αυτής.

Την κ. Ελένη Π. Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το χρονικό διάστημα. Η συνεχής παρακολούθηση της πορείας της διπλωματικής μου, οι κάθε είδους παρεμβάσεις της και η βοήθεια που μου παρείχε ήταν καθοριστικής σημασίας για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας αυτής.

Όλα τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για την βοήθεια, την στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές τους, και ιδιαίτερα τους κκ. Χρίστο Ηλία και Αριστείδα Γιάννακα για την τεχνική υποστήριξη κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος.

Τον συνάδελφο κ. Μάρκο Γεωργόπουλο, διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, σε συνεργασία με τον οποίο εκτελέστηκε το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την αгаσθή συνεργασία που υπήρξε ανάμεσά μας όλους αυτούς τους μήνες.

Τέλος, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου έχει προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	vi
Abstract.....	vii
Πρόλογος	viii
Κεφάλαιο 1^ο: Κεραυνός	1
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2 Τι είναι κεραυνός.....	2
1.3 Ιόντα και αγωγιμότητα	4
1.4 Πεδίο στην ατμόσφαιρα	8
1.5 Μηχανισμοί διαχωρισμού φορτίων	13
1.5.1 Φαινόμενο διασποράς.....	13
1.5.2 Φαινόμενο ισχυράς ψύξεως	14
1.5.3 Φαινόμενο διαρρήξεως	15
1.6 Τύποι και φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων	16
1.6.1 Κεραυνοί ανάμεσα σε σύννεφα και γη	17
1.6.2 Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα	17
1.6.3 Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα.....	17
1.7 Φάσεις κεραυνικής εκκένωσης	17
1.7.1 Προεκκένωση	18
1.7.2 Εκκένωση αντιθέτου φοράς.....	19
1.7.3 Κύρια εκκένωση	21
1.8 Πολικότητα	22
1.9 Παράμετροι κεραυνού.....	23
1.10 Ισοδύναμο κύκλωμα κεραυνού	24
Κεφάλαιο 2^ο: Αλληλεπίδραση κεραυνού-πλοίου και συνέπειες από κεραυνικό πλήγμα	26
2.1 Διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία	26
2.1.1 Σύνδεση κεραυνού με αλεξικέραυνο.....	26
2.1.2 Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο	26
2.1.3 Διάχυση φορτίου στο νερό	27

2.1.4 Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου	28
2.2 Επιπτώσεις πρόσπτωσης κεραυνού σε πλοία	28
2.2.1 Βλάβες στα ηλεκτρικά συστήματα.....	28
2.2.2 Βλάβες στο σκελετό	29
2.2.3 Θερμικές συνέπειες	30
Κεφάλαιο 3^ο: Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας- Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων	33
3.1 Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας	33
3.1.1 Εισαγωγή.....	33
3.1.2 Μέθοδος κώνου προστασίας.....	33
3.1.3 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας	35
3.1.4 Μέθοδος όγκου συλλογής	37
3.1.5 Μέθοδος δυναμικού του σχετού προεκκένωσης	42
3.1.6 Ελλειπτικό μοντέλο	43
3.1.7 Στατιστικό μοντέλο.....	45
3.1.8 Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας σε πλοία	49
3.2 Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων.....	58
3.2.1 Εισαγωγή.....	58
3.2.2 ISO 10134: Μικρά σκάφη, Ηλεκτρικές συσκευές, Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας.....	60
3.2.3 IEC 60092-507	64
3.2.4 ABYC TE-4	65
3.2.5 Bureau Veritas NR 566	69
3.2.6 DEF STAN 02-51.....	70
Κεφάλαιο 4^ο: Πειραματική προσέγγιση του φαινομένου σύλληψης του κεραυνού	75
4.1 Πειραματική διάταξη.....	75
4.1.1 Διάταξη γεννήτριας κρουστικών τάσεων Ε.Μ.Π.	75
4.1.1.1 Σύστημα φόρτισης συνεχούς τάσης	76
4.1.1.2 Εννιαβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων	76

4.1.1.3 Χωρητικός καταμεριστής.....	78
4.1.1.4 Σύστημα χειρισμού γεννήτριας και καταγραφής κρουστικών τάσεων	78
4.1.2 Μοντέλο πλοίου υπό κλίμακα	79
4.2 Πείραμα ράβδου-μεταλλικής πλάκας	81
4.2.1 Πειραματική διαδικασία	81
4.2.2 Μέθοδος επιπέδων τάσεων.....	81
4.3 Αναγωγή τάσης διάσπασης	82
4.4 Πείραμα ράβδου-πλοίου	84
4.5 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 1 από γειωμένη πλάκα	86
4.6 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 2 από κατασκευή 1	92
4.7 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 6 από κατασκευή 5	99
4.8 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 2 από κατασκευή 3	106
4.9 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 3 από κατασκευή 4	113
Κεφάλαιο 5^ο: Επεξεργασία μετρήσεων και συμπεράσματα	121
5.1 Εισαγωγή	121
5.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων	122
5.3 Συμπεράσματα- Επόμενη μέρα	131
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	134
Παράρτημα Α: Προσέγγιση κατασκευής 1 από γειωμένη πλάκα	134
Παράρτημα Β: Προσέγγιση κατασκευής 2 από κατασκευή 1	137
Παράρτημα Γ: Προσέγγιση κατασκευής 2 από κατασκευή 3	140
Παράρτημα Δ: Προσέγγιση κατασκευής 3 από κατασκευή 4	143
Παράρτημα Ε: Προσέγγιση κατασκευής 6 από κατασκευή 5.....	146
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	149

Κεφάλαιο 1^ο:Κεραυνός

1.1. Ιστορική αναδρομή

Το φαινόμενο του κεραυνού είχε ανέκαθεν εξέχουσα θέση στον πολιτισμό και τη μυθολογία των λαών κυρίως εξαιτίας της μέχρι τότε άγνωστης φύσης του αλλά και της έκτασης των καταστροφών που προκαλούσε. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η χρήση του κεραυνού ως όπλο και μέσο επιβολής του Δία, του “πατέρα των θεών και των ανθρώπων” (σύμφωνα με την αρχαία ελληνική θεογονία). Το κόστος σε ανθρώπινες ζωές και βλάβες ήταν τόσο υψηλό που οδήγησε σε συστηματικότερη μελέτη των κεραυνών, αρχικά ως οιωνοσκοπία και στη συνέχεια από επιστημονική σκοπιά.

Η πρώτη καταγεγραμμένη επιστημονική προσέγγιση χρεώνεται στον Αριστοτέλη, ο οποίος τον τέταρτο αιώνα προ Χριστού εξέφρασε τη θεώρηση πως γενέτειρα των κεραυνών αποτελεί η συγκρουση νεφών. Αμερικανός Benjamin Franklin ήταν ο πρώτος που συνέδεσε το φαινόμενο του κεραυνού με το ηλεκτρικό ρεύμα και την ηλεκτρική εκκένωση. Το 1752, ο σαρανταεξάχρονος τότε Franklin πρότεινε ένα πείραμα με αγωγίμες ράβδους, οι οποίες θα οδηγούσαν το κεραυνικό ρεύμα σε μία φιάλη Leyden, τον πρόγονο του σημερινού πυκνωτή. Ο σκοπός του πειράματος ήταν η απόδειξη ότι τα καταιγιδοφόρα νέφη φέρουν ηλεκτρικό φορτίο. Το Μάιο του 1752 στο Marly-la-Ville της Γαλλίας ο Thomas-Francois Dalibard διενέργησε το πείραμα και επιβεβαίωσε τη θεωρία παρατηρώντας δημιουργία σπινθηρισμών από τη ράβδο κατά τη διάρκεια καταιγίδας. Στην προσπάθεια να



Σχήμα 1.1: Ο Βενιαμίν Φρανκλίνος και το πείραμα του

αναπαράγει τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος ο Georg Wilhelm Richmann απεβίωσε το 1753 στην Αγία Πετρούπολη της Ρωσίας.

Παρατηρώντας τον κίνδυνο του πειράματος, ο Franklin αποφάσισε να χρησιμοποιήσει έναν χαρταετό αντί της αγώγιμης ράβδου. Σε αντίθεση με τη ράβδο, ο χαρταετός μπορούσε να πετάξει παντού και σε μεγάλο υψόμετρο. Τον Ιούνιο του 1752, στη Φιλαδέλφεια των Ηνωμένων Πολιτειών έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια καταιγίδας ένα από τα διασημότερα πειράματα της σύγχρονης ιστορίας. Ο Franklin, με τη βοήθεια του γιου του William, ένωσε τον χαρταετό μέσω ενός μεταξωτού σχοινιού σε ένα κλειδί. Το κλειδί ήταν βραχυκυκλωμένο με μία φιάλη Leyden μέσω ενός μεταλλικού σύρματος. Μέσω μίας στεγνής μεταξωτής κορδέλας, η οποία ήταν δεμένη στο κλειδί, ο Franklin διατηρούσε τον έλεγχο της διάταξης παραμένοντας μονωμένος από τα ηλεκτρικά φορτία. Ο κεραυνός “χτύπησε” τον χαρταετό αλλά χωρίς να προκαλέσει κάποια ηλεκτροπληξία λόγω της μόνωσης που παρείχε η στεγνή κορδέλα. Παρόλα αυτά όταν ο Franklin πλήσιασε το ελεύθερο χέρι του προς το κλειδί, υπήρξε διάσπαση του διακένου και ρεύμα πέρασε από το σώμα του, αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη στατικού ηλεκτρισμού [1].

Επακολούθως του έργου του Franklin δεν υπήρξε καμία περαιτέρω επιστημονική εξέλιξη πάνω στον κλάδο μέχρι και τα τέλη του 19ου αιώνα, όταν οι φωτογραφικές και φασματοσκοπικές μέθοδοι έγιναν διαθέσιμες για τη μελέτη του φαινομένου. Οι πρώτοι υπολογισμοί του ρεύματος του κεραυνού έγιναν από το Γερμανό επιστήμονα Rockels το 1897 μέσω ανάλυσης του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου. Στα επόμενα χρόνια, και συγκεκριμένα το 1956, ο C.T.R. Wilson διατύπωσε την πρώτη ολοκληρωμένη θεωρία σχετικά με τον ατμοσφαιρικό ηλεκτρισμό και με τα πειράματά του οριοθετήθηκε η έρευνα του φυσικού φαινομένου μέχρι και την εποχή μας. Το αντικείμενο της αντικεραυνικής προστασίας έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές στην δεκαετία του 1960 κυρίως λόγω της ανάγκης προστασίας έναντι πληγμάτων κεραυνού των διαστημικών οχημάτων καθώς και λόγω των βελτιωμένων μέσων μέτρησης και παρατήρησης του φαινομένου που προσέφερε η διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Η τελευταία έχει επιτρέψει στις μέρες μας τη τεχνητή πρόκληση κεραυνών για ερευνητικούς σκοπούς και έχει οδηγήσει σε ολοκληρωμένα συστήματα ανίχνευσης πτώσης κεραυνών, τα οποία έχουν εγκατασταθεί σε πολλές προηγμένες τεχνολογικά χώρες. Ήδη σχεδιάζεται να τεθεί ανιχνευτής σε γεωστατική τροχιά με σκοπό να ανιχνεύει τις καταιγίδες που συνοδεύονται από κεραυνούς πάνω από μεγάλες περιοχές της επιφάνειας της γης [17].

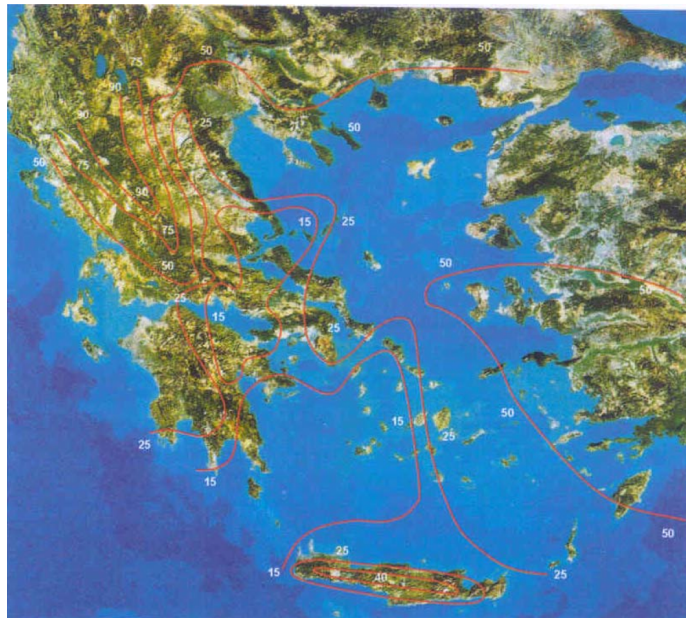
1.2. Τι είναι ο κεραυνός

Ο κεραυνός είναι μία μεταβατική, υψηλού ρεύματος ηλεκτρική εκκένωση, το μήκος της οποίας μπορεί να είναι αρκετά χιλιόμετρα. Κεραυνοί δημιουργούνται κατά τη διάρκεια καταιγίδων εξαιτίας της συγκέντρωσης θετικών και αρνητικών ηλεκτρικών φορτίων σε διαφορετικές περιοχές. Έτσι έχουμε δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου και όταν η ένταση του φτάσει στην κρίσιμη τιμή της, ξεσπά ο κεραυνός με διάσπαση του αέρα και δημιουργία

σπινθήρα. Οι κεραυνοί λαμβάνουν χώρα κυρίως σε νέφη τύπου cumulonimbus (σωρειτομελανίων) και μπορούν να ξεσπάσουν μέσα στο ίδιο νέφος, ανάμεσα σε διαφορετικά νέφη αλλά και ανάμεσα σε νέφος και έδαφος. Ενώ παραπάνω από τις μισές εκκενώσεις συμβαίνουν ανάμεσα σε νέφη, οι κεραυνοί ανάμεσα σε νέφος και γη έχουν μελετηθεί πιο ενδελεχώς κυρίως λόγω την πρακτικής σημασίας τους. Εκτός αυτού οι εκκενώσεις κάτω από το επίπεδο των νεφών μπορούν να φωτογραφηθούν και να καταγραφούν από μετρητικά όργανα πιο εύκολα [4].

Η διαφορά δυναμικού που προκαλεί έναν κεραυνό είναι πολλά εκατομμύρια Volt και η ένταση του προκαλούμενου ρεύματος δεκάδες χιλιάδες Amper. Η διάρκεια του κεραυνού είναι μικρότερη από ένα δευτερόλεπτο και αυτός είναι ο κύριος λόγος που ισχύ τους δεν μπορεί να αξιοποιηθεί. Το πλάτος του δημιουργούμενου σπινθήρα φτάνει το πολύ μερικές δεκάδες εκατοστά. Παρόλα αυτά αναπτύσσει θερμοκρασία κοντά στους 10.000 βαθμούς Κελσίου ενώ προκαλεί έντονο ιονισμό στα μόρια του αέρα τα οποία εκπέμπουν φως (το φαινόμενο της αστραπής). Επειδή το φως ταξιδεύει πολύ πιο γρήγορα από τον ήχο, μπορούμε με κατάλληλες μεθόδους να υπολογίσουμε κατά προσέγγιση την απόσταση του σημείου που βρισκόμαστε από το σημείο που εκδηλώθηκε η πτώση κεραυνού.

Τα ισχυρά ρεύματα του κεραυνού μπορούν να προκαλέσουν τόσο φυσικές καταστροφές, όσο και σοβαρές βλάβες στις ηλεκτρικές γραμμές και να καταστρέψουν απροστάτευτες εγκαταστάσεις. Ο κεραυνος που χτυπά άνθρωπο είναι πολύ πιθανό να



Σχήμα 1.2: Οι ισοκεραυνικές καμπύλες στο χάρτη της Ελλάδος

προκαλέσει το θάνατο. Κάθε μέρα στον πλανήτη μετρώνται πάνω από 40.000 καταιγίδες οι οποίες δημιουργούν σχεδόν 10.000.000 κεραυνούς [5].

Για τη μελέτη της συχνότητας κεραυνών ορίστηκε το μέγεθος της κεραυνικής στάθμης. Κεραυνική στάθμη συγκεκριμένου τόπου είναι το πλήθος των ημερών καταιγίδος που αντιστοιχούν στον συγκεκριμένο τόπο μέσα σε ένα χρόνο. Ισοκεραυνική καμπύλη ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν την ίδια κεραυνική στάθμη. Μέγιστη θεωρείται παγκοσμίως η κεραυνική στάθμη στην πόλη Καμπάλα της Ουγκάντα (240) [3].

1.3. Ιόντα και αγωγιμότητα

Ο ατμοσφαιρικός αέρας δεν αποτελεί τέλειο μονωτή. Αυτό συμβαίνει καθώς περιέχει ελεύθερα θετικά και αρνητικά ιόντα των οποίων η αριθμητική πυκνότητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά. Έτσι αν θεωρήσουμε a τον συντελεστή εκφόρτισης, ένας φορτισμένος αγωγός στην ατμόσφαιρα εκφορτίζεται με ρυθμό

$$\frac{dQ}{dt} = -a \cdot Q \quad (1.1)$$

Αν ολοκληρώσουμε αυτή τη σχέση παίρνουμε την εξής σχέση για το φορτίο

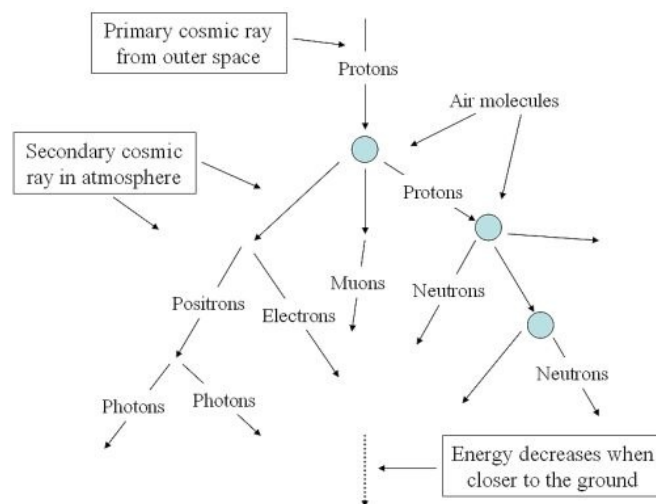
$$Q(t) = Q_0 \cdot \exp(-a \cdot t) \quad (1.2)$$

Για τον ιονισμό των μορίων και των ατόμων στην ανώτερη ατμόσφαιρα και τη δημιουργία της Ιονόσφαιρας, υπεύθυνη είναι η ηλιακή υπεριώδης ακτινοβολία με μήκος κύματος μικρότερο από 2000 Å. Η ακτινοβολία αυτή δεν φτάνει στην τροπόσφαιρα καθώς απορροφάται από τα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα. Για την παραγωγή ιόντων στην τροπόσφαιρα υπεύθυνες είναι οι ραδιενεργές ουσίες που αποσυντίθενται στην ατμόσφαιρα και τον φλοιό της γης καθώς και οι κοσμικές ακτίνες. Ο πυρήνας των ραδιενεργών στοιχείων είναι ασταθής και τείνει προς την ευστάθεια μέσω διάσπασης. Κατά τη διάσπαση αυτή απελευθερώνονται μεταξύ άλλων και πυρήνες He^{++} (ακτίνες α), ηλεκτρόνια (ακτίνες β) και ακτίνες γ . Οι ακτίνες γ είναι αρκετά ενεργητικές ώστε να προκαλούν δευτερογενή ιονισμό.

Στην αύξηση των ιόντων στην ατμόσφαιρα συντελούν εκτός από τις φυσικές ραδιενεργές ουσίες και τα ραδιενεργά κατάλοιπα από δοκιμές πυρηνικών όπλων, τα οποία παραμένουν στην ατμόσφαιρα για αρκετό χρόνο πρώτου επιστρέψουν στην επιφάνεια της γης. Η παρουσία τους στην ατμόσφαιρα προκαλεί ατμοσφαιρικό ιονισμό κυρίως λόγω των ακτίνων β και γ .

Εκτός των προαναφερθέντων, σημαντική αιτία αύξησης των ιόντων της ατμόσφαιρας αποτελούν οι κοσμικές ακτίνες υψηλής ενέργειας. Οι κοσμικές ακτίνες φτάνουν στο περιβάλλον της γης από το σύμπαν και δημιουργούν ιόντα μέσω κρούσεων με τα ατμοσφαιρικά αέρια. Οι κοσμικές ακτίνες χαμηλότερης ενέργειας απορροφούνται 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 $1.5/\text{cm}^3/\text{s}$. Καθώς το μαγνητικό πεδίο της γης κατευθύνει τις κοσμικές ακτίνες προς τους γεωμαγνητικούς πόλους, η παραγωγή ιόντων αυξάνει με το γεωμαγνητικό πλάτος. Τα πρωτογενή ιόντα που παράγονται από την ακτινοβολία είναι

ιονισμένα μόρια αέρα και ηλεκτρόνια, τα οποία ακολουθούν κατόπιν διάφορα στάδια κατά τα οποία αντιδρούν ή προσκολλώνται σε άλλα μόρια και δημιουργούν φορτισμένα συγκροτήματα από 15-20 μόρια.



Σχήμα 1.3: Η πορεία κοσμικής ακτίνας

Τα μικρά θετικά και αρνητικά ιόντα μπορούν αλληλοεξουδετερώσουν τα φορτία τους. Έτσι στην πραγματικότητα επικράτει μία κατάσταση ισορροπίας, κατά την οποία ο αριθμός των ιόντων που δημιουργούνται μέσω ραδιενεργών διασπάσεων και κοσμικής ακτινοβολίας, ισούται με τον αριθμό των ιόντων που εξουδετερώνονται. Η εξουδετέρωση ιόντων γίνεται είτε μέσω επανασύνδεσης με ιόντα αντίθετου φορτίου είτε μέσω προσκόλλησης σε αιωρήματα αντίθετου φορτίου. Η ισορροπία παραγωγής και απωλειών εκφράζεται από τη σχέση

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

όπου q είναι ο ολικός ρυθμός παραγωγής ανά μονάδα όγκου και μονάδα χρόνου, n είναι η συγκέντρωση μικρών ιόντων,

N η συγκέντρωση αιωρημάτων,

α ο συντελεστής ανασύνδεσης (υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, STP, $\alpha = 1.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$) και β ο συντελεστής προσκόλλησης, ($\beta = 3 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$, STP).

Εάν τα α, β, N και q είναι γνωστά από μετρήσεις, τότε η συγκέντρωση των μικρών ιόντων μπορεί να βρεθεί. Κοντά σε πόλεις όπου το N φτάνει $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$, οι απώλειες των μικρών ιόντων οφείλονται κυρίως στον όρο βnN , ενώ ο όρος ανασύνδεσης αn^2 είναι πιο σημαντικός σε υπαίθριες περιοχές και πάνω από θάλασσες. Η συγκέντρωση των μικρών ιόντων αυξάνει με το ύψος από $\sim 6 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ στο επίπεδο της θάλασσας, έως $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ σε ύψος $\sim 15 \text{ km}$. Αυτό οφείλεται στην δραστική μείωση της συγκέντρωσης των αιωρημάτων λόγω ύψους και στην αύξηση της παραγωγής λόγω ενίσχυσης του αποτελέσματος των κοσμικών ακτίνων. Ο αριθμός των θετικών ιόντων είναι κατά ένα ποσοστό ($\sim 10 - 15\%$) μεγαλύτερος από τον αριθμό των αρνητικών ιόντων, έτσι ώστε στην κατώτερη ατμόσφαιρα 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 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 $\kappa_i = u_i / E$. Η κινητικότητα κ_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 :

$$\kappa_i = (q_i / 2m_i) \cdot (l / \bar{u}) \quad \text{όπου} \quad \bar{u} = (3KT / 2m_i)^{1/2} \quad (1.4)$$

όπου (q_i / m_i) είναι ο λόγος φορτίου/μάζας του ιόντος,

l η μέση ελεύθερη διαδρομή,

\bar{u} η μέση ταχύτητα της θερμικής κίνησης του,

K η σταθερά Boltzmann και

T η θερμοκρασία του ιοντικού αερίου.

Η κινητικότητα των μικρών ιόντων στον αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας είναι $1-2 \times 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{Vs)}$, ενώ των μεγάλων είναι $10^{-8} - 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{Vs)}$. 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

$$u_i^{\pm} = \kappa_i^{\pm} \cdot E \quad (1.5)$$

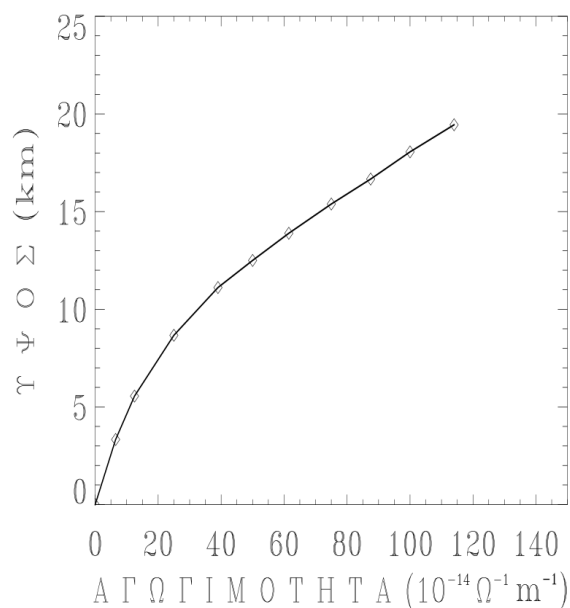
Κάθε ιόν i^{\pm} φέρει ένα φορτίο e και συνεπώς τα ιόντα τύπου i^{\pm} με συγκέντρωση n_i^{\pm} , συνεισφέρουν ποσότητα $j_i^{\pm} = \kappa_i^{\pm} \cdot n_i^{\pm} \cdot eE$, στο ρεύμα που μεταφέρεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου, υπό την επίδραση του πεδίου E . Έτσι η ολική πυκνότητα ρεύματος είναι

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

όπου η ποσότητα λ ορίζεται ως η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ατμοσφαιρικού αέρα ως εξής

$$\lambda = \sum_i (\kappa_i^+ n_i^+ e_i^+ + \kappa_i^- n_i^- e_i^-) = 1/r \quad (1.7)$$

Ο όρος $1/r$ ορίζεται ως η αντιστασιμότητα του ατμοσφαιρικού αέρα.



Σχήμα 1.4: Καμπύλη μεταβολής της ατμοσφαιρικής αγωγιμότητας με το ύψος

Η αγωγιμότητα λ αυξάνει με το ύψος λόγω της αύξησης της κινητικότητας κ με το ύψος, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της μέσης ελεύθερης διαδρομής αλλά και στη μείωση της θερμοκρασίας. Με το ύψος αυξάνει επίσης και η συγκέντρωση των μικρών

ιόντων λόγω κυρίως της μείωσης της συγκέντρωσης N των μεγάλων αιωρημάτων. 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 (1.3.2) δίνει μια εικόνα της μεταβολής της αγωγιμότητας λ με το ύψος, όπου οι τιμές που φαίνονται είναι απλά αντιπροσωπευτικές.

Πίσω στο παράδειγμα του φορτισμένου αγωγού που αποφορίζεται στην ατμόσφαιρα, το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνεια του είναι $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$, όπου ϵ_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού, $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (farad/m) και σ η πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια του αγωγού.

Συνεπώς το ολικό φορτίο στον αγωγό είναι $Q = \int_S \sigma ds$ (1.3.8). 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 $\tau = \epsilon_0/\lambda$. Έτσι γίνεται εμφανής η σημασία της αγωγιμότητας και του ηλεκτρικού πεδίου της ατμόσφαιρας στην παραγωγή φορτίων στα νέφη και άρα στη δημιουργία κεραυνών [7].

1.4. Πεδίο στην ατμόσφαιρα

Στην ατμόσφαιρα υπάρχει πάντα ένα ηλεκτρικό πεδίο σαν αποτέλεσμα του καθαρού ελεύθερου φορτίου στην ατμόσφαιρα και στην επιφάνεια της γης. Το ηλεκτρικό πεδίο στην ατμόσφαιρα είναι ηλεκτροστατικής φύσης και μεταβάλλεται ευρύτατα, χωρικά και χρονικά. Η μέση τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στην ατμόσφαιρα πλησίον της επιφάνειας της γης είναι ~ -120 V/m με κατεύθυνση προς τη γη. Τοπικά και χρονικά όμως η διεύθυνση και το μέγεθος του πεδίου εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (νεφοκάλυψη, τύπο νεφών, ανέμους, βροχοπτώσεις, ηλεκτρικές καταιγίδες, αιωρήματα κλπ). Γι'αυτό όταν αναφερόμαστε στο ατμοσφαιρικό ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να διευκρινίζουμε τι είδους ατμοσφαιρικές συνθήκες επικρατούν. Έτσι έχουμε:

- 1) πεδίο καλού καιρού (fair weather field) όταν λιγότερο από 4/10 του ουρανού είναι νεφοσκεπές και οι άνεμοι δεν είναι ισχυροί και
- 2) πεδίο διαταραγμένου καιρού (disturbed weather field) στις άλλες περιπτώσεις. Τυπικό παράδειγμα διαταραγμένου καιρού είναι, όταν επικρατούν καταιγίδες.

Μετρήσεις του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους δείχνουν ότι το πεδίο μεταβάλλεται τοπικά και χρονικά, αλλά κατά μέσο όρο έχει μέτρο 120 V/m και κατευθύνεται προς τη γη. Δηλαδή,

$$E_o = -120\hat{z} \text{ (V/m)} \quad (1.10)$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το πεδίο κατευθύνεται προς τη γη, από όπου και συμπεραίνεται ότι η γη είναι αρνητικά φορτισμένη.

Εφαρμόζοντας το νόμο του Gauss και λαμβάνοντας υπόψη ότι η γη είναι ένας καλός αγωγός, βρίσκουμε την πυκνότητα του καθαρού φορτίου, σ , στην επιφάνεια της γης,

$$\sigma = -\epsilon_0 E_o = \frac{Q}{4\pi R_e^2} \quad (1.11)$$

όπου, Q είναι το ολικό φορτίο και

$R_e = 6.37 \times 10^6$ m η μέση ακτίνα της γης

Αντικαθιστώντας την παραπάνω τιμή του E_o βρίσκουμε ότι η μέση τιμή της πυκνότητας καθαρού ηλεκτρικού φορτίου στην επιφάνεια της γης είναι $\sigma = -1.06 \times 10^{-9}$ C/m². (Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε 660000 ηλεκτρόνια ανά τετραγωνικό εκατοστό γήινης επιφάνειας.) Πολλαπλασιάζοντας με την επιφάνεια της γης, βρίσκουμε ότι το συνολικό καθαρό φορτίο στην γη είναι

$$Q = -4\pi R_e^2 \sigma = -5.09 \times 10^{14} \text{ m}^2 \times 1.06 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2 = -5.4 \times 10^5 \text{ C} \quad (1.12)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο είναι καθαρά ηλεκτροστατικό και συνεπώς μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει ενός δυναμικού V δηλαδή $E = -\text{grad}V$. Αγνοώντας τη χρονική μεταβολή, αν $V(x,y,z)$ είναι η τιμή του δυναμικού στο σημείο (x,y,z) τότε ισχύει

$$E_x = -\partial V/\partial x, E_y = -\partial V/\partial y, E_z = -\partial V/\partial z \quad (1.13)$$

Στην περίπτωση του καλού καιρού, η κατακόρυφη συνιστώσα E_z είναι πολύ μεγαλύτερη από τις οριζόντιες, οι οποίες ως πρακτικά αμελητέες μπορούν να αγνοηθούν, έτσι ώστε να έχουμε

$$E = E_z = -\partial V/\partial z \quad (1.14)$$

δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο είναι συνάρτηση μόνο της κατακόρυφου συνιστώσας z .

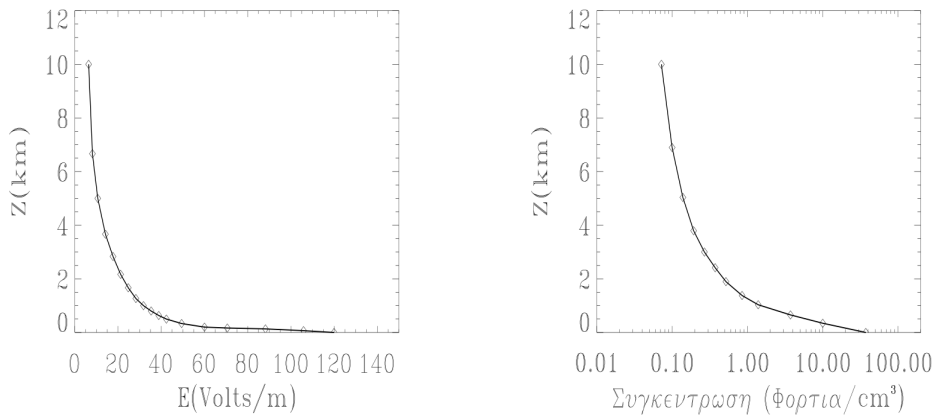
Η σχέση μεταξύ του (dE/dz) και της πυκνότητας του καθαρού φορτίου ρ δίνεται από την εξίσωση του Poisson

$$-\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{dE}{dz} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.15)$$

Ακόμα σύμφωνα με το νόμο του Gauss το συνολικό θετικό φορτίο που περιέχεται στο στρώμα μεταξύ της επιφάνειας και του ύψους z_1 , με μηδενικό πεδίο $E(z_1)=0$, ισούται με το αρνητικό φορτίο της επιφάνειας της γης, δηλαδή

$$E(z_1) = 0 = E_0 + \frac{1}{\epsilon_0} \int_0^{z_1} \rho dz \Rightarrow \sigma = -\epsilon_0 E_0 = \int_0^{z_1} \rho dz \quad (1.16)$$

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται η σχέση του πεδίου και της πυκνότητας θετικού φορτίου με το ύψος.



Σχήμα 1.6: α. Μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου με το ύψος β. Μεταβολή της πυκνότητας καθαρού ηλεκτρικού φορτίου με το ύψος

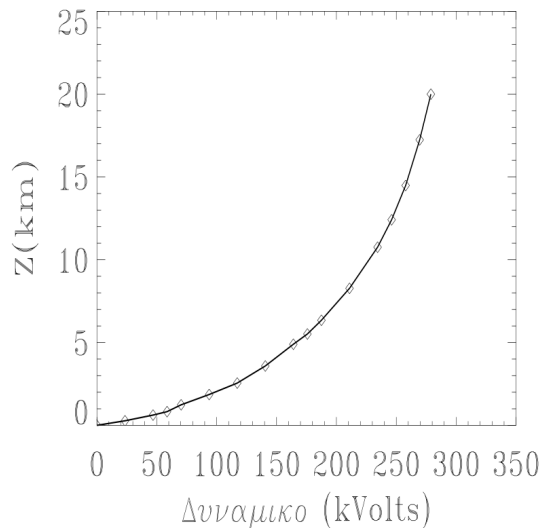
Όσον αφορά τη μεταβολή του ηλεκτρικού δυναμικού V στην ατμόσφαιρα, η γη σαν καλός αγωγός αποτελεί μια ισοδυναμική επιφάνεια την οποία παίρνουμε και σαν επιφάνεια αναφοράς, έτσι ώστε

$$V(z=0)=V_0=0 \quad (1.17)$$

Ολοκληρώνοντας την (1.17) παίρνουμε

$$V(z) = -\int_0^z E dz \quad (1.18)$$

Το E είναι μεγάλο κοντά στο έδαφος, αρνητικό και ελαττώνεται γρήγορα με το ύψος τείνοντας στο μηδέν, έτσι το δυναμικό V αυξάνεται γρήγορα στην αρχή και να τείνει σταδιακά προς μία σταθερή τιμή όπως φαίνεται στο σχήμα (1.7).



Σχήμα 1.7: Μεταβολή του δυναμικού στην ατμόσφαιρα συναρτήσει του ύψους

Από την ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου σε μία αγώγιμη ατμόσφαιρα, συμπεραίνουμε ότι υπάρχει ρεύμα πυκνότητας $j = \lambda E$ με κατεύθυνση προς τη γη. Το ρεύμα αυτό ελαττώνει (ουδετεροποιεί) το επιφανειακό φορτίο της γης και κατά συνέπεια και το ηλεκτρικό πεδίο στην επιφάνειά της, που σε μια χρονική στιγμή δίνεται σύμφωνα με την εξίσωση Gauss

$$E(t) = \sigma(t) \epsilon_0 \quad (1.19)$$

Η μεταβολή του πεδίου E με το χρόνο είναι

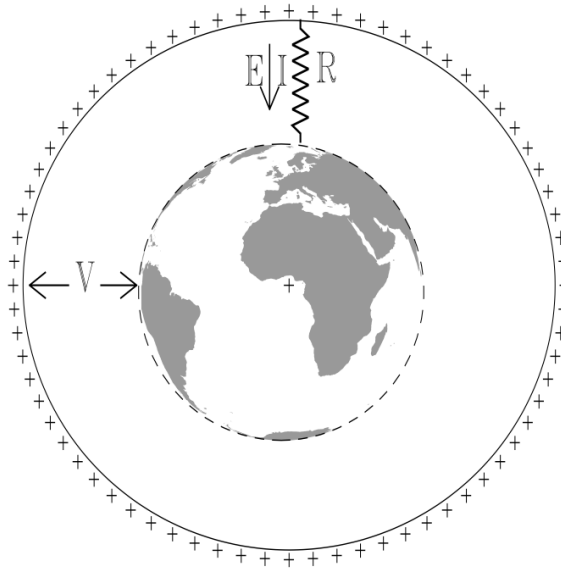
$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{d\sigma}{dt} = -\frac{1}{\epsilon_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{Q}{\Delta s} \right) = -\frac{1}{\epsilon_0} j = -\frac{1}{\epsilon_0} \lambda E \quad (1.20)$$

όπου το αρνητικό σημείο υπεισέρχεται γιατί το φορτίο μειώνεται με το χρόνο. Από την (1.20) προκύπτει

$$E(t) = -z E_0 \exp\left(-\frac{\lambda}{\epsilon_0} t\right) = -z E_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.21)$$

όπου $E = 120$ (V / m) και $\tau = (\epsilon / \lambda)$.

Εναλλακτικά, για συνθήκες καλού καιρού, η ηλεκτρική κατάσταση στην ατμόσφαιρα μπορεί να προσομοιωθεί με ένα σφαιρικό πυκνωτή με εσωτερικό αγωγό τη γη και εξωτερικό την ανώτερη ατμόσφαιρα (Σχήμα). Θεωρούμε ότι η μεταξύ των αγωγών ατμόσφαιρα έχει κάποια μικρή αγωγιμότητα λ . Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο σφαιρικός πυκνωτής είναι φορτισμένος, και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σφαιρικών αγωγών του πυκνωτή είναι $V = 300 \times 10^3$ Volts.



Σχήμα 1.8: Το ηλεκτρικό ανάλογο του συστήματος γη-ιονόσφαιρα

Ξέροντας την αγωγιμότητα λ και το πεδίο E , μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος ανά μονάδα επιφάνειας και τη διαρροή μέσω της ατμόσφαιρας,

$$j = \lambda E = 2.25 \times 10^{-14} \text{ } (\text{Mho} / \text{m}) \times 120 \text{ } (V / \text{m}) = 2.7 \times 10^{-12} \text{ } A / \text{m}^2 \quad (1.22)$$

Αφού η ολική επιφάνεια της γης είναι $S \approx 5 \times 10^{14} \text{ m}^2$, το ολικό ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή είναι

$$I = jS = 2.7 \times 10^{-12} \text{ } (A / \text{m}^2) \times 5 \times 10^{14} \text{ m}^2 = 1350 \text{ } A \quad (1.23)$$

Ενώ το ολικό φορτίο στον πυκνωτή είναι

$$Q = \sigma S = 5 \times 10^{14} \times 1.1 \times 10^{-9} = 5.5 \times 10^5 \text{ } C \quad (1.24)$$

και η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{5.5 \times 10^5 \text{ } C}{3 \times 10^5 \text{ } V} = 1.8 \text{ } F \quad (1.25)$$

Από το νόμο του Ohm, η ολική αντίσταση της ατμόσφαιρας είναι

$$R = \frac{V}{I} = \frac{3 \times 10^5}{1350} = 222 \text{ } \text{Ohm} \quad (1.26)$$

Λόγω της διαρροής φορτίων, ο πυκνωτής θα εκφορτιστεί σύμφωνα με τη σχέση

$$Q(t) = Q_0 \exp(-t / RC) \quad (1.27)$$

με σταθερά χρόνου

$$\tau = RC = 222 \text{ } \text{Ohm} \times 1.8 \text{ } F = 400 \text{ } \text{sec} \quad 7 \text{ min περίπου} \quad (1.28)$$

Συνοψίζοντας, το φορτίο της γης παραμένει σχεδόν σταθερό, γεγονός που συνεπάγεται την ύπαρξη κάποιου ισχυρού μηχανισμού ηλεκτρογεννήτριας που συνεχώς φορτίζει τη γη σε σχέση με την ατμόσφαιρα. Δηλαδή υπάρχει ένας μηχανισμός που μεταφέρει αρνητικά φορτία προς τη γη, με ρυθμό ίσο με 1350 Cb/s. Αυτός ο μηχανισμός φόρτισης του πυκνωτή ατμόσφαιρα-γη, σχετίζεται άμεσα με τις κεραυνο-καταιγίδες, που λαμβάνουν χώρα ανά τον κόσμο με ρυθμό μερικών εκατοντάδων ανά πάσα στιγμή.

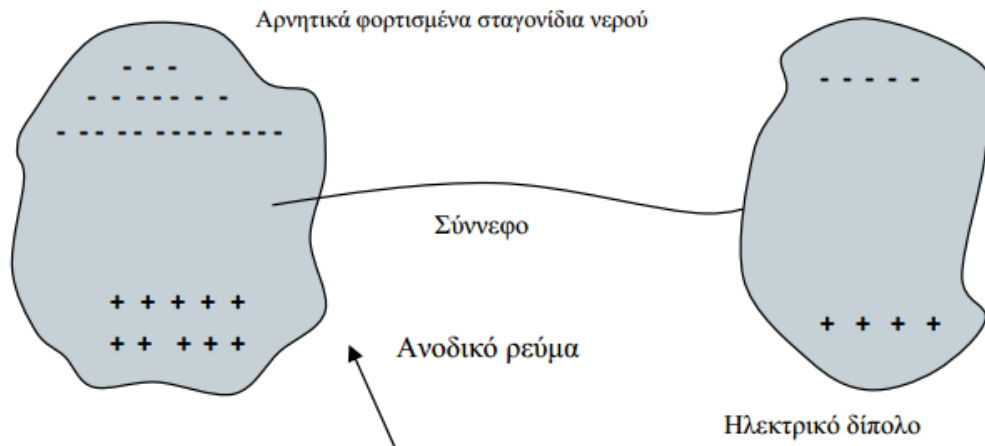
Η συνεχής φόρτιση του συστήματος ατμόσφαιρα-γη είναι γνωστή ως **βασικό πρόβλημα του ατμοσφαιρικού ηλεκτρισμού**, για την εξήγηση του οποίου πολλές θεωρίες είχαν προταθεί, χωρίς όμως μεγάλη επιτυχία. Η κατανόησή ήλθε αρκετά αργότερα, όταν άρχισαν να γίνονται ηλεκτρικές μετρήσεις μέσα σε καταιγιδοφόρα νέφη, τα οποία αποδείχτηκε ότι ενεργούν σαν μεγάλες ηλεκροστατικές γεννήτριες [7].

1.5. Μηχανισμοί διαχωρισμού φορτίων

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 τα φαινόμενα διασποράς, ισχυράς ψύξεως και διαρρήξεως.

1.5.1 Φαινόμενο διασποράς

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



Σχήμα 1.9: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διασποράς [3]

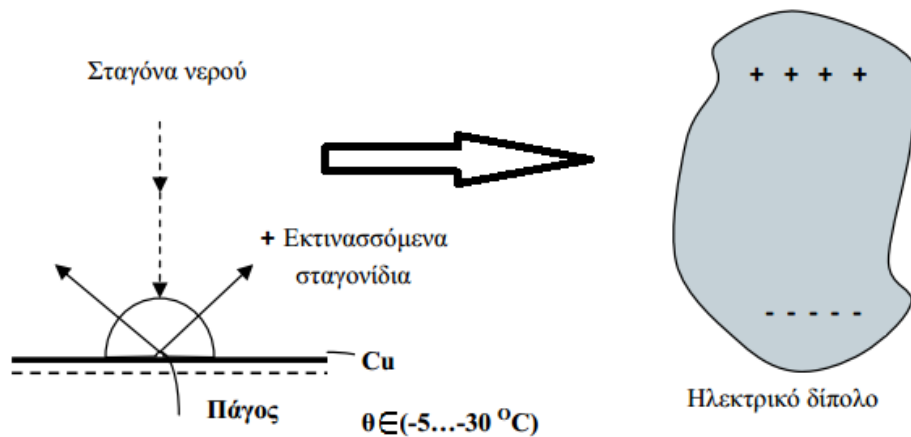
Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 80% των κεραυνών που κατευθύνονται στη γη προέρχονται από σύννεφα που είναι αρνητικά φορτισμένα στην κάτω περιοχή τους, καθώς επίσης κι ότι η διασπορά σταγονιδίων νερού είναι δυνατή μόνο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 0°C, τίθεται σε αμφιβολία κατά πόσο ένας τέτοιος μηχανισμός θα μπορούσε να ερμηνεύσει ικανοποιητικά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του νέφους έστω και σ'ένα ποσοστό 20% του συνόλου [3].

1.5.2 Φαινόμενο ισχυράς ψύξεως

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

Στην περίπτωση του διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του συννέφου το ρόλο της "ψυχρής" πλάκας αναλαμβάνουν κρύσταλλοι πάγου, οι οποίοι, κατευθυνόμενοι λόγω του βάρους τους προς τα κάτω, μεταφέρουν προς την αντίστοιχη περιοχή του νέφους το αρνητικό τους φορτίο, ενώ τα εκτινασσόμενα προς τα πάνω σταγονίδια φορτίζουν θετικά το πάνω μέρος του συννέφου. Μ'αυτόν τον τρόπο εξηγείται η δημιουργία ηλεκτρικού διπόλου (στο σύννεφο), που παρουσιάζει τα αρνητικά φορτία στο κάτω μέρος του. Παραδοχή του αναφερθέντος μηχανισμού θα μπορούσε να εξηγήσει το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων σε εκείνα τα σύννεφα από τα οποία προέρχεται το 80% των κεραυνοπληξιών που συμβαίνουν στη γη. Το ασθενές όμως σημείο της παραδοχής του μηχανισμού αυτού εντοπίζεται στο ότι κατά το πείραμα με την πλάκα του χαλκού

εμφανίζονται μη αμνητέα ηλεκτρικά φορτία πάνω σε αυτήν μόνο όταν οι σταγόνες ύδατος περιλαμβάνουν ίχνη προσμίξεως όπως υδροξείδιο αμμωνίου (NH_4OH) [3].

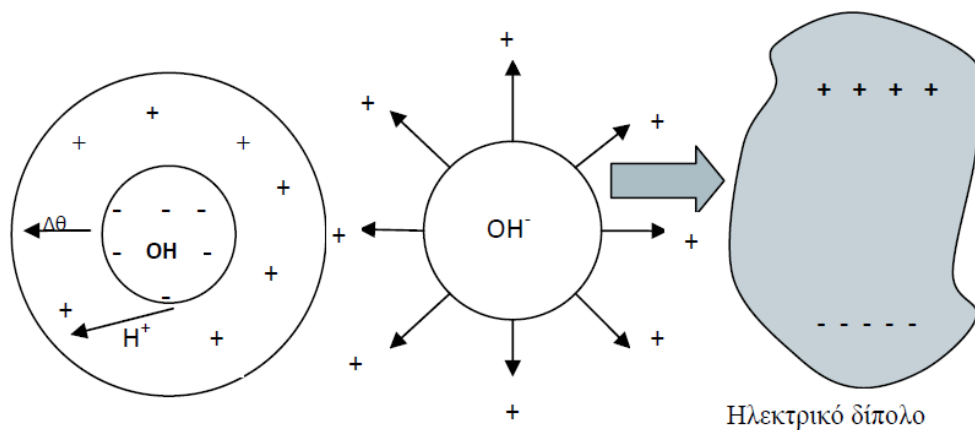


Σχήμα 1.10: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο ισχυράς ψύξεως [3]

1.5.3 Φαινόμενο διαρρήξεως

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

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



Σχήμα 1.11: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διαρρήξεως [3]

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

Α) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία τόσο θετικά, όσο και αρνητικά, σε ίσες ποσότητες που καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Με λίγα λόγια η φόρτιση ενός νέφους δεν είναι τίποτα άλλο παρά ένας διαχωρισμός φορτίων. Τα σύννεφα κατά κανόνα παρουσιάζουν στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο 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.

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

Γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων μέσα στο νέφος συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (μερικά πρώτα λεπτά της ώρας ως μισή ώρα περίπου) [3].

1.6. Τύποι και φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων

Οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- α) Μεταξύ σύννεφου-γης και αντίστροφα.

β) Εντός του ίδιου του συννέφου.

γ) Μεταξύ των συννέφων.

1.6.1 Κεραυνοί ανάμεσα σε σύννεφα και γη

Οι κεραυνοί της κατηγορίας αυτής παρατηρούνται όταν το ηλεκτρικό πεδίο πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον του νέφους, οπότε έχουμε εκκένωση κατερχόμενη, Σε περίπτωση που πάρει την κρίσιμη τιμή πλησίον της γης έχουμε ανερχόμενη εκκένωση. Σαν πολικότητα της εκκένωσης μεταξύ συννέφου και γης, λαμβάνεται η πολικότητα του φορτίου του κάτω μέρους του συννέφου που την προκάλεσε [3].

1.6.2 Κεραυνοί μέσα στα σύννεφα

Οι υπάρχουσες πληροφορίες για τους κεραυνούς του τύπου αυτού είναι λίγες και επιπλέον συχνά αντιφάσκουν μεταξύ τους. Γενικά στην περίπτωση αυτή, η εκκένωση λαμβάνει χώρα ανάμεσα στο ανώτερο θετικό και στο κατώτερο αρνητικό κέντρο του χωρικού φορτίου. Η διάρκεια της εκκένωσης είναι μεγάλη και το ρεύμα της έχει τιμές μερικές εκατοντάδες A έως 1 kA [3].

1.6.3 Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα

Κεραυνοί ανάμεσα στα σύννεφα εμφανίζονται σε ύψος μεγαλύτερο του 1 km και μικρότερο των 12 km. Βασικό χαρακτηριστικό των κεραυνών αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο μήκος κεραυνικού τόξου μέχρι και 40 km [3].

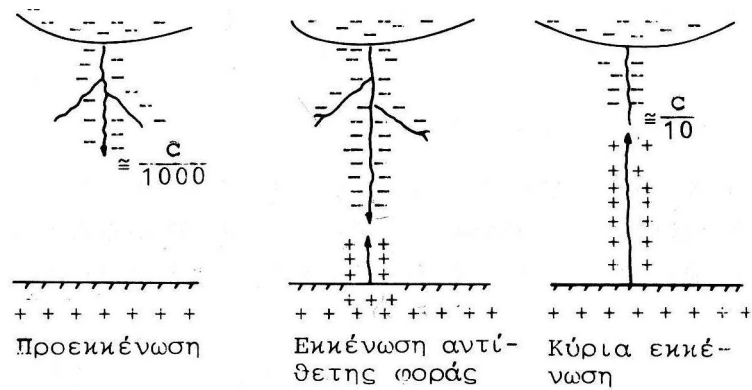
1.7 Φάσεις κεραυνικής εκκένωσης

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

A) Προεκκένωση

B) Εκκένωση αντίθετης φοράς

Γ) Κύρια Εκκένωση

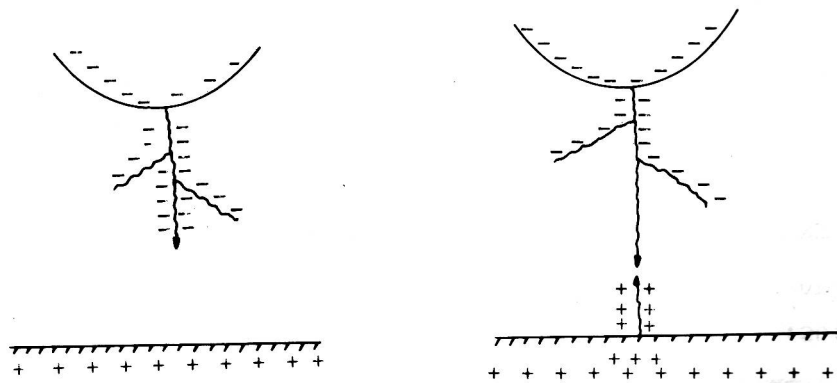


Σχήμα 1.12: Οι τρεις φάσεις της κεραυνικής εκκένωσης [3]

1.7.1 Προεκκένωση

Πριν μία κεραυνική εκκένωση 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 μεγίστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος, ο οχετός, (καλούμενος οχετός προεκκένωσης) θα κατευθυνθεί προς αυτό (όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7.2).



Σχήμα 1.13: Αρχικές φάσεις κεραυνικής εκκένωσης [3]

α: προεκκένωση

β: εκκένωση αντίθετης φοράς

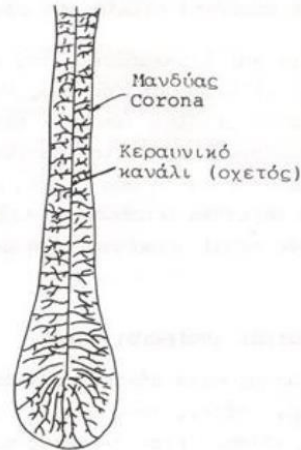
Η προεκκένωση ξεκινάει από μια περιοχή του σύννεφου όπου το ηλεκτρικό πεδίο θα αποκτήσει πολύ μεγάλες τιμές της τάξεως μερικών εκατοντάδων V/m. Δημιουργείται έτσι ένας αγώγιμος δρόμος (οχετός), ο οποίος τροφοδοτείται συνέχεια με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από το σύννεφο. Ενδέχεται να υπάρξουν διακλαδώσεις του αγώγιμου οχετού που όμως δεν καταλήγουν προς τη γη, λόγω του ότι δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων. Η μέση ταχύτητα προωθήσεως του οχετού προεκκένωσης είναι περίπου 0.3 m/μs [3].

1.7.2 Εκκένωση αντιθέτου φοράς

Η διαμήκη πτώση τάσεως κατά μήκος του οχετού προεκκένωσης διαφέρει στις διάφορες θέσεις του, η μέση τιμή της όμως είναι μικρότερη από 0,1 kV/cm. Έτσι ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται περίπου σαν μία μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος.

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο 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 εκκένωσης), που εκτείνεται μερικά μέτρα γύρω από αυτόν. Το πάχος του μανδύα αυτού είναι μεγαλύτερο στο προς το έδαφος άκρο του οχετού και αυξάνεται όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει στο έδαφος. Καθώς ο οχετός κατέρχεται στη γη αυξάνει το ηλεκτρικό πεδίο της. Έτσι είναι δυνατό να δημιουργήσει ένα φαινόμενο τύπου Corona, το οποίο καταλήγει σε μία ανερχόμενη εκκένωση, η οποία τείνει να συναντήσει τον

κατερχόμενο οχετό. Έτσι έχουμε πλήρη γεφύρωση του διακένου αέρα και άρα κεραυνικό πλήγμα. Στο σχήμα (1.12) φαίνεται η μορφή που έχει ο οχετός και ο μανδύας Corona.



Σχήμα 1.12: Κεραυνικό κανάλι

Η απόσταση που θα πρέπει να φτάσει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού για να ξεκινήσει από τη γη η εκκένωση αντίθετης φοράς χαρακτηρίζεται σαν απόσταση εναύσεως. Για να υπολογιστεί η ελάχιστη δυνατή απόσταση μπορούμε να ξεκινήσουμε από την υπόθεση ότι σε απόσταση d από το έδαφος βρίσκεται ένας αγωγίμος οχετός μήκους L τον οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε σαν συγκεντρωμένο γραμμικό φορτίο. Τότε για το ηλεκτρικό πεδίο E στην επιφάνεια της γης ισχύει ο τύπος:

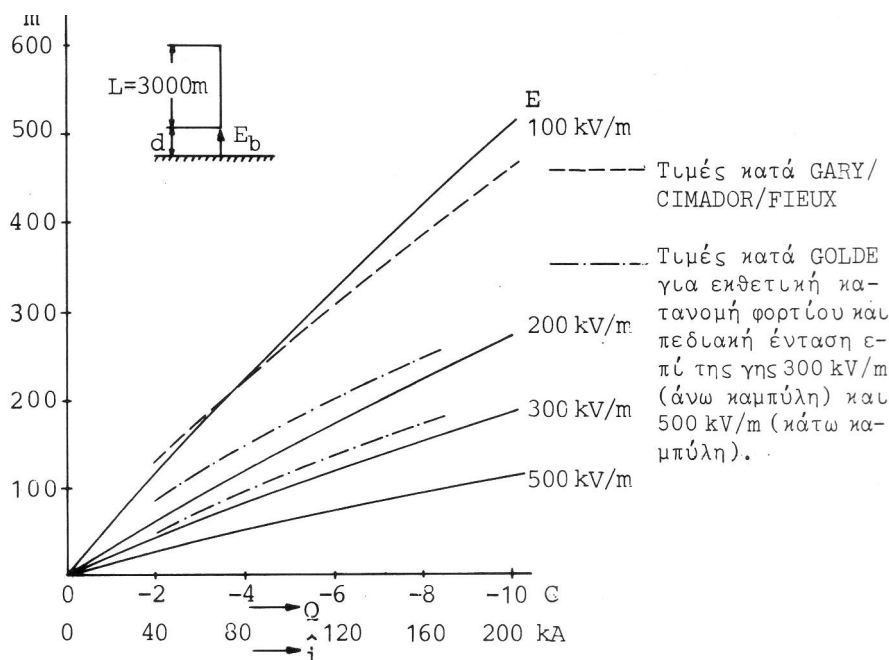
$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon L} \left[\frac{1}{d+L} - \frac{1}{d} \right] \quad (1.29)$$

και λύνοντας ως προς d έχουμε:

$$d = \frac{L}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{2Q}{\pi\epsilon EL^2}} - 1 \right] \quad (1.30)$$

Σύμφωνα με αυτή τη σχέση έχουν χαραχθεί οι καμπύλες $d=f(Q)$, που φαίνονται στο σχήμα (1.13) και οι οποίες έχουν σαν παράμετρο την τιμή του πεδίου E στην επιφάνεια της γης. Παρατηρώντας τις καμπύλες φαίνεται ότι, αυξανόμενου του φορτίου του οχετού της προεκκένωσης, η απόσταση εναύσεως αυξάνει λιγότερο από αναλογικά. Τα σύννεφα καταιγίδων περικλείοντα μικρές ποσότητες φορτίων μπορούν να δημιουργήσουν αγωγίμους οχετούς με ασθενή γραμμική πυκνότητα φορτίου αλλά και να προκαλέσουν μόνο ασθενή, όσον αφορά τη μέγιστη τιμή του ρεύματος του κεραυνού, πλήγματα. Έτσι γίνεται εμφανές ότι υπάρχει κάποια αναλογία στην ποσότητα του φορτίου που μεταφέρει ο οχετός και στη μέγιστη τιμή του κεραυνικού ρεύματος. Ο συντελεστής

αναλογίας έχει τιμή 20 kA/C. Γι'αυτό το λόγο και ο οριζόντιος άξονας του σχήματος και βαθμονομημένος και σε μονάδες ρεύματος. Από αυτό φαίνεται ότι οι κεραυνοί που είναι ασθενείς κατά μέγιστη τιμή του ρεύματος πρέπει να πλησιάσουν πολύ περισσότερο στη θέση πλήγματος προκειμένου να εναύσουν μία εκκένωση αντιθέτου φοράς, συγκριτικά με κεραυνούς που είναι ισχυροί κατά τη μέγιστη τιμή του ρεύματος [3].



Σχήμα 1.13: Απόσταση εναύσεως συναρτήσει του μεταφερόμενου φορτίου [3]

1.7.3 Κύρια εκκένωση

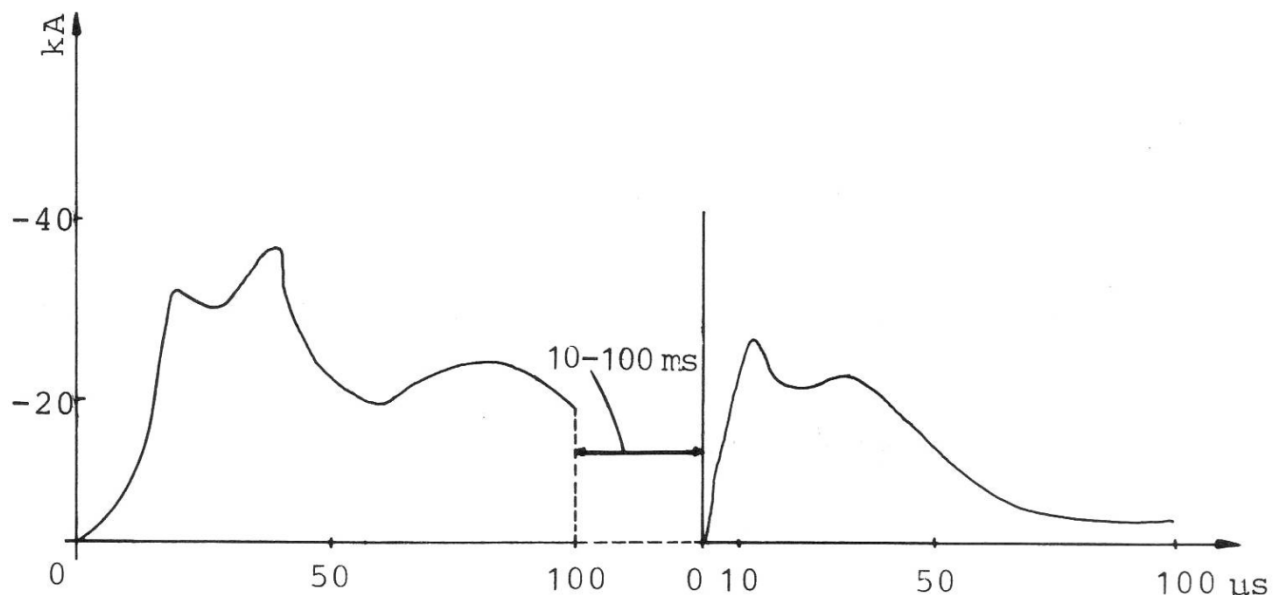
Στην τελευταία αυτή φάση, η οποία εξελίσσεται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα, έχουμε γεφύρωση της αποστάσεως μεταξύ νέφους και γης. Ο αγώγιμος οχετός προεκκένωσης που προϋπήρχε παίρνει τη μορφή ενός πλήρους οχετού εκκένωσης. Τα ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στον αγωγό είναι της τάξης των 10 έως 100 kA με κλίσεις μετώπου της τάξης των 20 έως 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. Η διάμετρος ενός οχετού εκκενώσεως είναι της τάξης των μερικών εκατοστών [3].

1.8. Πολικότητα

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

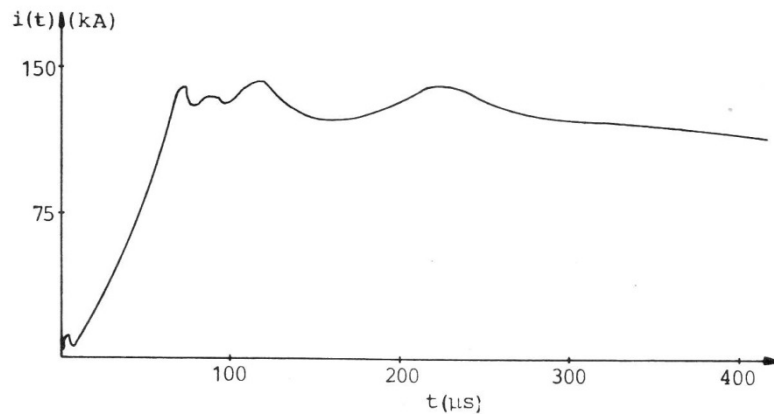
- i) Οι μέγιστες εντάσεις των κεραυνικών ρευμάτων φθάνουν πολλές δεκάδες kA.
- ii) Η μέση τιμή είναι μικρότερη της τάξεως των 2 kA.
- iii) Το εύρος της πρώτης εκκένωσης είναι μεγαλύτερο από τις τυχόν επόμενες εκκενώσεις.

α) Αρνητικοί κεραυνοί: Η μορφή του κύματος των ρευμάτων των “αρνητικών κεραυνών” παρουσιάζει ένα αρχικό τμήμα διάρκειας λίγων μs , με μικρή κλίση, ακολουθούμενο από άλλο τμήμα πολύ μεγαλύτερης κλίσης (περί τα 40 kA, μs) ως την τιμή κορυφής και τέλος από ένα άλλο τμήμα μεγάλης διάρκειας με ακανόνιστη μορφή.



Σχήμα 1.14: Τυπικό παλμογράφημα ρεύματος αρνητικού κεραυνού [3]

β) Θετικοί κεραυνοί: Οι θετικοί κεραυνοί αποτελούνται από ένα μόνο πλήγμα. Ο παλμός είναι σχετικά μεγάλης διάρκειας, (ο χρόνος ημίσεος εύρους είναι της τάξης των 500 μs) και έχει μέτωπο μικρής κλίσης (γύρω στα 2,5 kA/μs) [3].



Σχήμα 1.15: Τυπικό παλμογράφημα ρεύματος αρνητικού κεραυνού [3]

1.9. Παράμετροι κεραυνού

Ο κεραυνός σαν ηλεκτρικό φαινόμενο χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους:

i) Μέγιστη τιμή ρεύματος:

Συνέπεια της μέγιστης τιμής είναι η υπερπήδηση μονωτήρων και η καταστροφή των μονωτικών υλικών λόγω αυξημένου δυναμικού του σημείου πλήγματος

ii) Μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος $(di/dt)_{max}$:

Μέγιστη κλίση μετώπου του κεραυνικού ρεύματος καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε βρόχους κυκλωμάτων και τάσεις που αναπτύσσονται σε λογικά κυκλώματα ή κυκλώματα που περιλαμβάνουν ευαίσθητα ηλεκτρονικά στοιχεία οι οποίες μπορεί να έχουν καταστροφικές συνέπειες πχ σε συστήματα πλοήγησης ή τηλεπικοινωνίας αεροσκαφών

iii) Μεταφερόμενο φορτίο $\int_0^{\infty} i(t)dt$:

Το μεταφερόμενο φορτίο προκαλεί τοπική τήξη και διάτρηση μεταλλικών επιφανειών μικρού πάχους.

iii) Ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$:

Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων).

Μερικές τιμές των παραμέτρων του κεραυνού φαίνονται στον ακόλουθο (πίνακας 1.1). Η στήλη με το (+) δηλώνει τους θετικούς κεραυνούς, η στήλη με το (-) δηλώνει τους αρνητικούς κεραυνούς και η στήλη με το (-/+) δηλώνει τους αρνητικούς μαζί με τους θετικούς κεραυνούς [3].

A/ A	Παράμετρος	+		-		-/+	Μέγιστες μετρούμενες τιμές
		5%	50%	5%	50%		
1	\hat{i} (kA)	80	30	250	35	113	515 (PL)
2	$(\frac{di}{dt})_{max}$ (kA/μs)	120	40	32	2,4	102	230 (USA, 1965)
3	$\int_0^{\infty} i(t)dt$ (A· s)	0,55	0,055	15	0,65	3,5	19(CH)
4	$\int_0^{\infty} i^2(t)dt$ (A· s)	40	7,5	350	80	102	4000

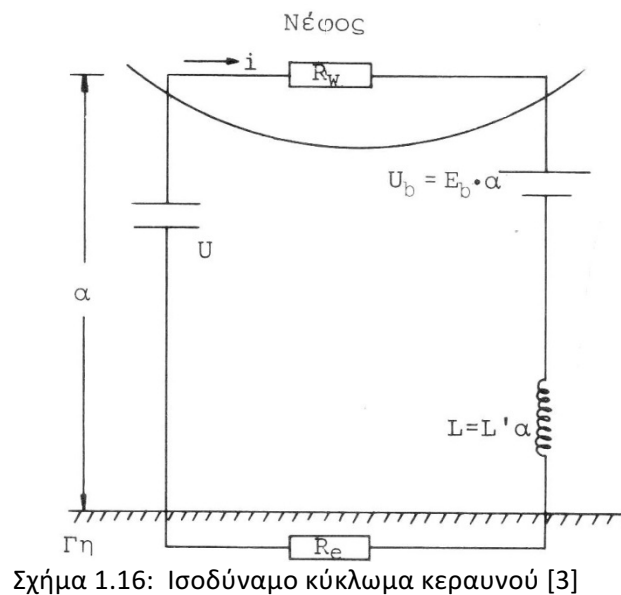
Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές κεραυνικών παραμέτρων [3]

1.10. Ισοδύναμο κύκλωμα κεραυνού

Έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες να δοθεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα που να περιγράφει το φαινόμενο του κεραυνού. Ένα ισοδύναμο κύκλωμα με το οποίο μπορούν να εκτιμηθούν οι τιμές παραμέτρων του κεραυνού, εάν είναι γνωστά

- η διαφορά δυναμικού μεταξύ νέφους και γης U
- η χωρητικότητα ανάμεσα στο σύννεφο και στη γη C
- η απόσταση μεταξύ συννέφου και γης α
- και η συνολική ωμική αντίσταση R

είναι το παρακάτω:



Σχήμα 1.16: Ισοδύναμο κύκλωμα κεραυνού [3]

Με το όρο συνολική ωμική αντίσταση εννοούμε το άθροισμα της ωμικής αντίστασης που συναντά το κεραυνικό ρεύμα κατά την διαδρομή εντός του νέφους και της αντίστασης γειώσεως δηλαδή $R=R_e+R_w$.

Όσον αφορά τα μεγέθη του κυκλώματος έχουμε [3]:

- $L' = 1 \mu\text{H/m}$
- $E=1 \text{ kV/m}$
- $R_e=8,92 \sqrt{\frac{\rho}{i}} (\Omega)$
- $\rho=100-1000(\Omega\text{m})$
- $i=10-100 (\text{kA})$
- $R_e=10-100 (\Omega)$
- $R=R_e+R_w=1000-2000(\Omega)$

Κεφάλαιο 2^ο : Αλληλεπίδραση κεραυνού-πλοίου και συνέπειες από κεραυνικό πλήγμα

2.1. Διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία

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

1. Σύνδεση κεραυνού με αλεξικέραυνο.
2. Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο.
3. Διάχυση φορτίου στο νερό.
4. Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και ανάμεσα τα εξαρτήματα του πλοίου.

2.1.1. Σύνδεση κεραυνού με αλεξικέραυνο

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία αποδεδειγμένη επιστημονική μέθοδος για να αποτραπεί ένα κεραυνικό χτύπημα, το βασικό πρόβλημα παρουσιάζεται στην εφαρμογή μέτρων προστασίας, αφού χτυπηθεί ένα πλοίο. Το σημείο όπου το κεραυνικό κανάλι πραγματοποιεί τη σύνδεση του με το πλοίο καθορίζεται από τη γεωμετρία των αγωγών που βρίσκονται στην κορυφή του πλοίου καθώς και τη θέση του καθοδικού οχετού προεκκένωσης. Για παράδειγμα, εάν οχετός προεκκένωσης βρίσκεται στο πίσω μέρος του πλοίου είναι πολύ πιθανό να χτυπηθούν οι αγωγοί που βρίσκονται στην πρύμνη. Γενικά όσο πιο ψηλός είναι ένας αγωγός τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα ο οχετός εκκένωσης αντιθέτου φοράς που ξεκινά από αυτόν τον αγωγό να ενωθεί με τον οχετό προεκκένωσης. Η τάση του ψηλού αγωγού να έλκει το κεραυνικό χτύπημα οδήγησε στην ιδέα του “κώνου προστασίας” (βλέπε Ενότητα 3.1.2). Η μέθοδος του κώνου προστασίας σε ένα πλοίο είναι προβληματική καθώς αγωγοί και πλήρωμα πλοίου που βρίσκονται μέσα στην περιοχή προστασίας είναι δυνατό να προκαλέσουν ανοδικούς οχετούς. Ως εκ τούτου, η μεγάλη ανησυχία σχετικά με τη σύνδεση κεραυνού-πλοίου είναι η εξασφάλιση ότι ο κεραυνός θα καταλήξει σε αλεξικέραυνα ή σε άλλους τερματικούς αγωγούς και όχι στο πλήρωμα ή σε ευαίσθητο ηλεκτρικό εξοπλισμό του πλοίου.

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 στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Έπιπλέον, το φορτίο που συσσωρεύεται στους αγωγούς μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικά τόξα. Μέσα από αυτά τα αγωγήμα κανάλια το φορτίο οδεύει προς χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Οι απλές

βασικές αρχές κυκλωμάτων δηλαδή ότι το ρεύμα ακολουθεί τη διαδρομή με τη μικρότερη αντίσταση έχουν περιορισμένη χρήση κατά τη διάρκεια αυτών των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς των χαρακτηριστικών του κεραυνού. 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 καταρτιού πλοίων. Για αυτό το λόγο κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη αγωγών προστασίας με φορά προς το νερό. Οι αγωγοί αυτοί συνδέουν τα αλεξικέραυνα με τα ηλεκτρόδια γείωσης ώστε να οδηγηθεί το κεραυνικό ρεύμα προς το νερό. Με αυτό τον τρόπο εμποδίζουν τις παράπλευρες εκκενώσεις, προστατεύουν τα αισθητήρια συστήματα και περιορίζουν στο ελάχιστο την ηλεκτρομαγνητική σύζευξη μεταξύ των ηλεκτρονικών συστημάτων.

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 αρκετά υψηλή ώστε να τρυπήσει το κουφάρι ενός πλοίου που είναι κατασκευασμένο από fiberglass, αν δεν δοθεί στο κεραυνικό ρεύμα μια εναλλακτική διέξοδος. Κάθε τέτοια διείσδυση του κεραυνικού ρεύματος αφήνει μια απανθρακωμένη τρύπα αλλά και πολύ περισσότερες εσωτερικές βλάβες. Σκοπός των ηλεκτροδίων γείωσης είναι να δημιουργήσουν γέφυρα προς το νερό, ώστε να περιορισθούν οι βλάβες στο κουφάρι του πλοίου. Στο βυθισμένο κομμάτι του κύτους τοποθετείται μια πλάκα γείωσης. Η πλάκα αυτή είναι ανεπαρκής ώστε να αποτρέψει παράπλευρες εκκενώσεις. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο να υπάρχουν πολλαπλοί διασυνδεδεμένοι αγωγοί. Αυτό όμως προκαλεί τα παρακάτω νέα προβλήματα:

- Επιταχύνεται η διαδικασία γαλβανικής διάβρωσης.
- Γίνεται ηλεκτρολυτική διάβρωση στις μαρίνες με τη διαρροή ρευμάτων γείωσης.
- Η τοποθέτηση πολλαπλών διασυνδέσεων στο κουφάρι του πλοίου αυξάνει την πιθανότητα εισροής νερού στο πλοίο.
- Η επιπλέον πλάκα γείωσης θα πρέπει να έχει εκτεθειμένες άκρες, οι οποίες θα προκαλέσουν ανεπιθύμητες τριβές στο νερό.

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, οι αιχμηρές γωνίες είναι ιδιαίτερα επιθυμητές στην εξωτερική πλευρά των πλακών γείωσης. Όταν αναπτύσσονται σπινθήρες η αντίσταση γείωσης μειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η τάση ολόκληρου του συστήματος προστασίας.

Το κύριο πρόβλημα όσον 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.

2.1.4 Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και προς τα εξαρτήματα του πλοίου

Ενώ οι αιχμηρές γωνίες έχουν ευεργετικά αποτελέσματα στα ηλεκτρόδια γείωσης, δεν συμβαίνει το ίδιο με τα αγωγίμα εξαρτήματα που βρίσκονται πάνω στο πλοίο. Τα εξαρτήματα αυτά δεν είναι σχεδιασμένα για να λειτουργούν ως ηλεκτρόδια γείωσης. Κάθε σπινθήρας που σχηματίζεται από αυτά δρα ως παράπλευρη εκκένωση και μπορεί να τραυματίσει το πλήρωμα, να ανοίξει τρύπα στο κουφάρι του πλοίου ή να καταστρέψει τα ηλεκτρονικά συστήματα. Τέτοιες ανεξέλεγκτες παράπλευρες εκκενώσεις πρέπει να αποφεύγονται. Το πρόβλημα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι ότι το σχήμα ή και η θέση κάποιων εξαρτημάτων στο πλοίο δεν μπορεί να αλλάξει.

2.2 Επιπτώσεις πρόσπτωσης κεραυνού σε πλοία

2.2.1 Βλάβες στα ηλεκτρικά συστήματα

Το ηλεκτρικό σύστημα ενός πλοίου είναι παρόμοιο με αυτό με ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά ο σχεδιασμός του το καθιστά ευαίσθητο σε μεταβατικά φαινόμενα και παροδικές διακυμάνσεις της τάσης λόγω της περιορισμένης σύνθετης αντίστασης του πλοίου. Εξαιτίας αυτού ένα κεραυνικό πλήγμα μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στα ηλεκτρικά συστήματα του πλοίου. Τέτοιου είδους συστήματα είναι δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, ράδιο VHF, ράδιο μετεωρολογικής ενημέρωσης, συστήματα μέτρησης ταχύτητας, συστήματα μέτρησης ταχύτητας αέρα αλλά και γεννήτριες 12V.

Κατά τη διάρκεια άμεσου κεραυνικού πλήγματος οι υπερτάσεις προκαλούν σοβαρές καταπονήσεις στις προστατευτικές διατάξεις των συστημάτων. Το κεραυνικό ρεύμα που προκαλούν οι υπερτάσεις αυτές είναι ικανό να καταστρέψει τον ηλεκτρικό εξοπλισμό αλλά και να προκαλέσει θερμική καταπόνηση στην καλωδίωση του συστήματος.

Στην πράξη η έκταση των βλαβών είναι μεγάλη, και για αυτό το λόγο, εκτός των κεραυνικών ρευμάτων, θεωρούμε συνυπεύθυνη την επαγόμενη υπέρταση. Μία

επαγόμενη υπέρταση στο σύστημα DC τροφοδοσίας του σκάφους μπορεί να προκληθεί μέσω μαγνητικής ζεύξης από κάποιον κοντινό καθοδικό αγωγό που διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) που επάγεται γύρω από ένα βρόχο καλωδίων για S επιφάνεια που εσωκλείεται από το βρόχο είναι [9]:

$$E = \frac{\mu_0}{2\pi} \iint_S \frac{dl/dt}{\rho} d\rho dz V \quad (2.1)$$

Η μεταβλητή ρ διαφέρει ανάλογα με το είδος και το σημείο του πλοίου. Για παράδειγμα, σε ένα ιστιοφόρο πλάτους 4m το ρ έχει μέγιστη τιμή περίπου $\rho_{\max}=2m$. Αυτό συμβαίνει καθώς είναι αδύνατο να δρομολογηθούν καλώδια σε μεγαλύτερη απόσταση από το κατάρτι. Η επαγόμενη τάση στην περικλειώμενη επιφάνεια αγγίζει τα $10kV/m^2$.

2.2.2 Βλάβες στο σκελετό

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος ενός κεραυνού 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 [10]. Σε κάθε μη μεταλλικό κουφάρι πλοίου υπάρχει μία πλάκα γείωσης και μέσω αυτής οδεύει το κεραυνικό ρεύμα προς το νερό. Τα ηλεκτρικά πεδία που αναπτύσσονται από τη ροή του ρεύματος από την πλάκα προς το νερό εξαρτώνται από την πυκνότητα ροής του ρεύματος και άρα από τη γεωμετρία του συστήματος. Τα ηλεκτρικά αυτά πεδία αυξάνουν τη διαφορά δυναμικού μεταξύ πλάκας γείωσης και νερού. Αν η τάση αυτή ξεπεράσει την τάση διάσπασης του διακένου, τότε μπορεί να υπάρξει δημιουργία πλευρικών εκκενώσεων. Οι εκκενώσεις αυτές, που γίνονται ανάμεσα στο νερό και την πλάκα γείωσης αλλά και των αγωγών που είναι συνδεδεμένοι στην πλάκα, μπορεί να τρυπήσουν το σκελετό του πλοίου.

Καθώς ρεύμα ρέει μέσω της πλάκας γείωσης, αυξάνεται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην πλάκα και ένα απομακρυσμένου σημείου με μηδενικό δυναμικό. Η αύξηση αυτή εξαρτάται από την αντίσταση της πλάκας και άρα από τη γεωμετρία της. Στόχος σήμερα, όπως ορίζεται στα περισσότερα πρότυπα, είναι η πλάκα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο ώστε η αντίσταση της να μην προκαλεί επικίνδυνη τάση.

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

$$R=1/2\sigma D \quad (2.2)$$

όπου σ είναι η αγωγιμότητα του γλυκού νερού με χωρίς διαλυμένα άλατα και

D η διάμετρος της πλάκας (34cm για τα πρότυπα ISO 10134 και ABYC [30,32]).

Γ' αυτές τις τιμές η αντίσταση είναι 1.45kΩ, 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. Το δυναμικό στο νερό μηδενίζεται σε απόσταση ίση με μερικές ακτίνες της πλάκας γείωσης, άρα σε περισσότερο από 1m. Μία ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της τάξης των 500kV/m είναι αρκετή για ηλεκτρική διάσπαση κεραυνικών παλμών. Καθώς τάσεις της τάξης των 44MV υπάρχουν σε αποστάσεις της τάξης του ενός μέτρου, η δημιουργία ηλεκτρικής διάσπασης είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Συνεπώς, μια πλευρική εκκένωση είναι πολύ πιθανόν να συμβεί μεταξύ της πλάκας γείωσης, καθώς και όποιου υπερθαλάσσιου ηλεκτρικού τμήματος είναι συνδεδεμένο με αυτήν, και του νερού.

Εκτός του μεγέθους, χαμηλότερη αντίσταση μπορούμε να πετύχουμε αλλάζοντας και το σχήμα της πλάκας. 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 [11] είναι

$$R = \frac{\ln\left(\frac{2L}{1.36d}\right)}{\pi L \sigma} \Omega \quad (2.3)$$

Πιο συγκεκριμένα, για L=10m και d=9.3mm (σύμφωνα με τα πρότυπα ABYC και ISO 10134) πετυχαίνουμε αντίσταση 234 Ω, ενώ το δυναμικό της πλάκας γείωσης είναι 7 MV για κεραυνικό ρεύμα 30kA. Είναι προφανές ότι, ενώ καταφέραμε να υποεξαπλασιάσουμε το δυναμικό, η τάση παραμένει σε επικίνδυνα υψηλά επίπεδα. Αντίθετα, σε συνθήκες θαλασσινού νερού έχουμε για το κυκλικό ηλεκτρόδιο αντίσταση 0.36 Ω με τάση 11kV ενώ για το ηλεκτρόδιο σε λωρίδα αντίσταση 0.06 Ω με τάση 1.8 kV. 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.

2.2.3 Θερμικές συνέπειες

Το κεραυνικό ρεύμα, αφού περάσει από το αλεξικέραυνο, οδηγείται στους καθοδικούς αγωγούς γείωσης και στη συνέχεια στο μεταλλικό σκελετό του πλοίου, το οποίο λειτουργεί ως τερματικό γείωσης. Οι καθοδικοί αγωγοί γείωσης υφίστανται θερμική καταπόνηση από τις απώλειες Joule. Έτσι, ανάλογα με τη μορφή και το είδος του αγωγού, υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης.

Ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας (ισχύς) που διαχέεται ως θερμότητα σε ένα αγωγό που οφείλεται σε ένα ηλεκτρικό ρεύμα είναι

$$P(t) = i^2 R \quad (2.4)$$

Θερμική ενέργεια που παράγεται επομένως εκφράζεται από την ωμική αντίσταση του μέσου από το οποίο εκφορτίζεται το ρεύμα πολλαπλασιασμένη με την ολική ισχύ αυτού.

$$W = R \int i^2 dt \quad (2.5)$$

Τα θερμικά αποτελέσματα ενός πλήγματος επομένως εξαρτώνται όχι μόνο από το εύρος του ρεύματος, αλλά και από τη διάρκεια ροής του. Αυτό συμβαίνει διότι η αύξηση της θερμοκρασίας σε έναν αγωγό, μέσα από τον οποίο εκφορτίζεται το ρεύμα του κεραυνού, είναι ανάλογη του $W/R = \int i^2 dt$. Όταν υπολογίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας ενός αγωγού θεωρούμε τη διάχυση της θερμότητας αμελητέα, καθώς η ροή του ρεύματος είναι μικρής διάρκειας. Έτσι η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα μέσο με αντίσταση R δίνεται από τον τύπο

$$\Delta\theta = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \frac{W}{R} \frac{\alpha \rho_0}{q^2 \gamma C_w} - 1 \right] \quad (2.6)$$

Όπου

$\Delta\theta$ η άνοδος της θερμοκρασίας του αγωγού (K)

W/R η ειδική ενέργεια της τρέχουσας άμεσης κατανάλωσης (K / Ω)

α ο συντελεστής θερμοκρασίας της αντίστασης (1 / K)

ρ_0 η ειδική ωμική αντίσταση του αγωγού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (Ωm)

q η επιφάνεια διατομής του αγωγού (m²)

γ η πυκνότητα του υλικού (kg/m³)

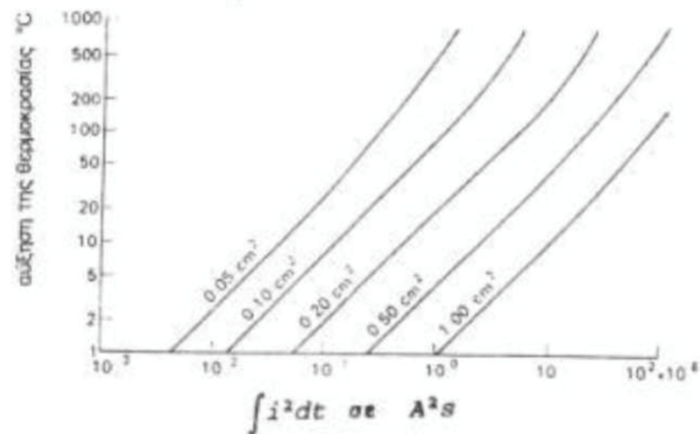
C_w η θερμοχωρητικότητα (J/kgK)

Οι τιμές των παραμέτρων για το αλουμίνιο, το σίδηρο και τον ανοξείδωτο χάλυβα δίνονται στον παρακάτω πίνακα

	Αλουμίνιο	Σίδηρος	Χαλκός	Ανοξείδωτος χάλυβας
$\rho_0(\Omega m)$	$29 \cdot 10^{-9}$	$120 \cdot 10^{-9}$	$17.8 \cdot 10^{-9}$	$0.7 \cdot 10^{-6}$
$\alpha(1/K)$	$4 \cdot 10^{-3}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$	$3.92 \cdot 10^{-3}$	$0.8 \cdot 10^{-3}$

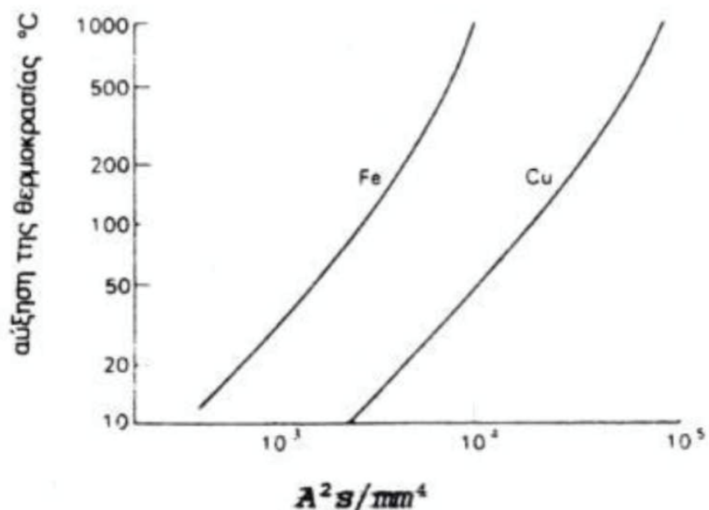
Πίνακας 2.1: τιμές των παραμέτρων ρ_0 και α για διαφορετικά υλικά [13]

Στο Σχήμα (2.1) φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας χάλκινων αγωγών με διαφορετικές διαμέτρους, συναρτήσει του W/R. Για αγωγούς από αλουμίνιο, η αύξηση της θερμοκρασίας είναι περίπου 1.5 φορά των τιμών που φαίνονται στο σχήμα



Σχήμα 2.1: Αύξηση της θερμοκρασίας σε χάλκινους αγωγούς σαν συνάρτηση του W/R [14]

Η αύξηση της θερμοκρασίας σε αγωγούς από χάλυβα και χαλκό δίνεται στο Σχήμα (2.2). Από το σχήμα και για W/R ίσο με $10^7 \text{ A}^2\text{s}$ και διατομή του αγωγού περίπου 50 mm^2 η αύξηση της θερμοκρασίας φτάνει τους $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία αυτή δεν είναι επικίνδυνη.



Σχήμα 2.2: Αύξηση της θερμοκρασίας σε χάλκινους και χαλύβδινους αγωγούς [14]

Υψηλός κίνδυνος έντονης αύξησης της θερμοκρασίας υπάρχει στην περίπτωση που δύο αγωγοί δεν είναι σωστά συνδεδεμένοι και άρα η σύνδεση τους παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλη αντίσταση. Όπως είναι αναμενόμενο, η ροή του κεραυνικού ρεύματος από μία τέτοια σύνδεση μπορεί να προκαλέσει στιγμιαία υπέρταση και σπινθήρα.

Κεφάλαιο 3^ο: Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας- Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων

3.1 Μέθοδοι εκτίμησης ζώνης προστασίας

3.1.1 Εισαγωγή

Για την προστασία κατασκευών από κεραυνικά πλήγματα, χρησιμοποιούνται κατ'εξοχήν εξωτερικές εγκαταστάσεις αντικεραυνικής προστασίας. Οι εγκαταστάσεις αυτές αποτελούνται από ένα συλλεκτήριο σύστημα, το οποίο προορίζεται να δέχεται τους κεραυνούς, ένα σύστημα αγωγών καθόδου και ένα σύστημα γείωσης. Το συλλεκτήριο σύστημα μπορεί να αποτελείται από μια ακίδα, ένα τεταμένο σύρμα ή ένα πλέγμα αγωγών και μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα του, και κατ'επέκταση την αποτελεσματικότητα της εγκατάστασης αντικεραυνικής προστασίας είναι η ζώνη προστασίας του.

Κατά καιρούς, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι εκτίμησης της ζώνης προστασίας ενός αντικεραυνικού συστήματος. Παρά τις όποιες διαφορές τους, αυτές οι μέθοδοι έχουν σκοπό να προσδιορίσουν δύο παραμέτρους: α) Την απόσταση πρόσκρουσης ή απόσταση διάσπασης (striking distance, συμβολίζεται παρακάτω με το γράμμα D ή S) και β) την ακτίνα σύλληψης (attractive radius, συμβολίζεται στο εξής με το γράμμα R). Η απόσταση πρόσκρουσης ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της κεφαλής του κατερχόμενου οχητού προεκκένωσης και του αντικειμένου που πλήττεται την στιγμή της σύλληψης. Αντίστοιχα, η ακτίνα σύλληψης ορίζεται ως η πλευρική απόσταση από το συλλεκτήριο σύστημα, στην οποία αν βρεθεί ο κατερχόμενος οχητός προεκκένωσης θα συλληφθεί από αυτό.

Οι κυριότερες μέθοδοι εκτίμησης της ζώνης προστασίας παρατίθενται παρακάτω.

3.1.2 Μέθοδος κώνου προστασίας (Cone of protection method, CPM)

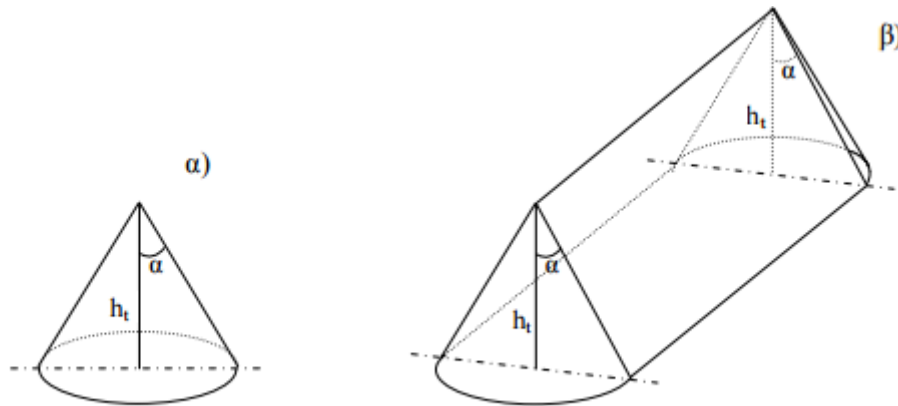
Η μέθοδος του κώνου προστασίας απαριθμεί πάνω από 200 χρόνια ζωής και η σύλληψή του προηγείται του ηλεκτρογεωμετρικού μοντέλου. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο προστατευόμενος όγκος που παρέχεται από ένα αλεξικέραυνο θεωρείται ότι έχει την μορφή ενός κυκλικού κώνου με κορυφή την απόληξη του αλεξικέραυνου. Το σκεπτικό, δηλαδή, της μεθόδου αυτής είναι ότι ο κεραυνός "προτιμά" να συνδεθεί με το υψηλότερο δυνατό σημείο (στην προκειμένη περίπτωση το αλεξικέραυνο) παρά με οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο που βρίσκεται εντός του κώνου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επεκταθεί εάν συνδέσουμε δύο γειωμένες ράβδους μέσω ενός μεταλλικού σύρματος. Έτσι, δημιουργούμε το συλλεκτήριο σύστημα με τη μέθοδο του κώνου προστασίας τεταμένου σύρματος, που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 [17].

Η μέθοδος CPM λαμβάνει υπ' όψιν το ύψος h του αλεξικέραυνου και την γωνία προστασίας α του κώνου. Για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης D και της ακτίνας σύλληψης R σε αυτό το μοντέλο ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$D = 2h \quad (3.1)$$

$$R = h \quad (3.2)$$

όπου το ύψος του αλεξικέραυτου h συμπεριλαμβάνει το ύψος της κατασκευής από το έδαφος.



Σχήμα 3.1: Ζώνη προστασίας συλλεκτηρίου συστήματος με την μέθοδο του κώνου προστασίας, α) κατακόρυφης ράβδου β) τεταμένου σύρματος [17]

Ως γωνία προστασίας α ορίζεται η γωνία ανάμεσα στην κατακόρυφη ράβδο και την επιφάνεια του κώνου. Οι τιμές της γωνίας προστασίας α βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα και εξαρτώνται από την απαιτούμενη στάθμη προστασίας και από το ύψος h_{total} πάνω από την επιφάνεια που χρήζει προστασίας.

Στάθμη Προστασίας	h (m)				Διάσταση πλέγματος (m)	
	20	30	45	60		
	R (m)	$\alpha^{(o)}$	$\alpha^{(o)}$	$\alpha^{(o)}$	$\alpha^{(o)}$	
I	20	25	*	*	*	5
II	30	35	25	*	*	10
III	45	45	35	25	*	10
IV	60	55	45	35	25	20

* Σ' αυτές τις περιπτώσεις εφαρμόζονται οι μέθοδοι της κυλιόμενης σφαίρας και πλέγματος αγωγών.

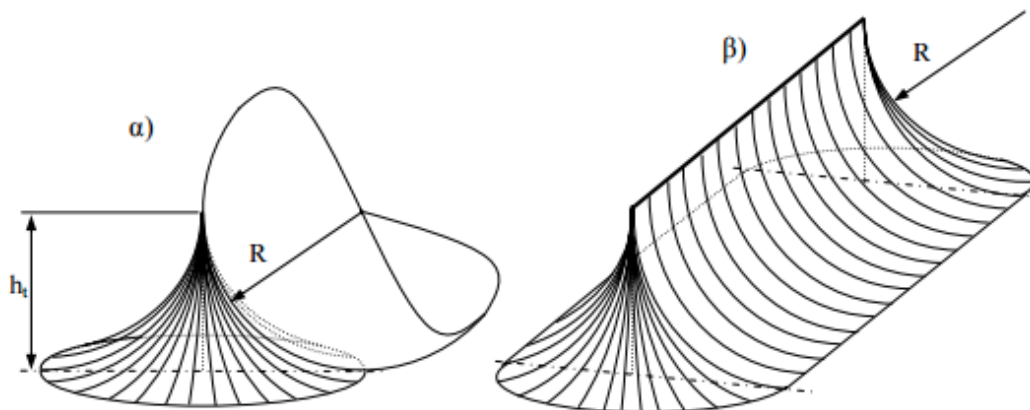
Πίνακας 3.1: Γωνία προστασίας $\alpha^{(o)}$, ακτίνα κυλιόμενης σφαίρας R (m) και διαστάσεις πλέγματος αγωγών ανάλογα με τη στάθμη προστασίας [18].

Μια πιο εμπειρική προσέγγιση της μεθόδου του κώνου προστασίας είναι η εξής: Για αναλογία προστασίας 1:1, δηλαδή όταν ο λόγος της ακτίνας σύλληψης R ως προς το ύψος του αλεξικεραύνου h ισούται με ένα, τότε χρησιμοποιείται κώνος προστασίας 45° ενώ για αναλογία προστασίας 2:1 χρησιμοποιείται κώνος 60° . Ωστόσο όσο μεγαλύτερη η γωνία του κώνου που χρησιμοποιείται, τόσο πιθανότερο το σύστημα προστασίας να αποτύχει. Είθισται, για πολύ ευαίσθητες κατασκευές, να χρησιμοποιούνται γωνίες κάτω των 45° [19].

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το μοντέλο αυτό δεν θεωρείται απόλυτα επιστημονικά αποδεδειγμένο, αφού είναι αποτέλεσμα απλοϊκών και ανεπαρκών φυσικών αρχών. Συνίσταται στον προσδιορισμό της ζώνης προστασίας σε κατασκευές απλής γεωμετρίας, αν και ακόμα και σε αυτές δεν είναι ασυνήθιστο ο κεραυνός να χτυπήσει μέσα στην ζώνη προστασίας. Ωστόσο, το μεγαλύτερό του μειονέκτημα είναι ότι δεν λαμβάνει υπ' όψιν κανένα στοιχείο του κεραυνού στον υπολογισμό της ζώνης προστασίας (π.χ. κεραυνικό ρεύμα).

3.1.3 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας (Rolling sphere method, RSM)

Στην μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας, η άκρη του κατερχόμενου οχητού θεωρείται ότι βρίσκεται στο κέντρο μιας σφαίρας ακτίνας R , η οποία εξαρτάται από την στάθμη προστασίας (Πίνακας 3.1) και είναι ίση με την απόσταση πρόσκρουσης D . Η φανταστική αυτή σφαίρα προκαθορισμένης ακτίνας κυλίεται πάνω από ένα ή περισσότερα τερματικά αέρα αλλά και κάθε άλλο γειωμένο μεταλλικό αντικείμενο σχετικό με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, ο σχεδιασμός του συλλεκτηρίου συστήματος της αντικεραυνικής προστασίας είναι κατάλληλος εάν κατά την κύλιση της σφαίρας αυτής κανένα σημείο της υπό προστασίας κατασκευής δεν έρχεται σε επαφή με την σφαίρα. Τα σημεία δηλαδή που δεν αγγίζει η σφαίρα είναι προστατευμένα ενώ τα σημεία που εφάπτονται σε αυτήν ή που διεισδύουν σε αυτήν χρήζουν προστασίας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην περίπτωση της κατακόρυφης ράβδου όσο και του τεταμένου σύρματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2: Ζώνη προστασίας συλλεκτηρίου συστήματος με τη μέθοδο κυλιόμενης σφαίρας όπου $R > h$ για α) κατακόρυφη ράβδο β) τεταμένο σύρμα [17]

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης D και της ακτίνας σύλληψης R που προκύπτουν από το μοντέλο αυτό είναι:

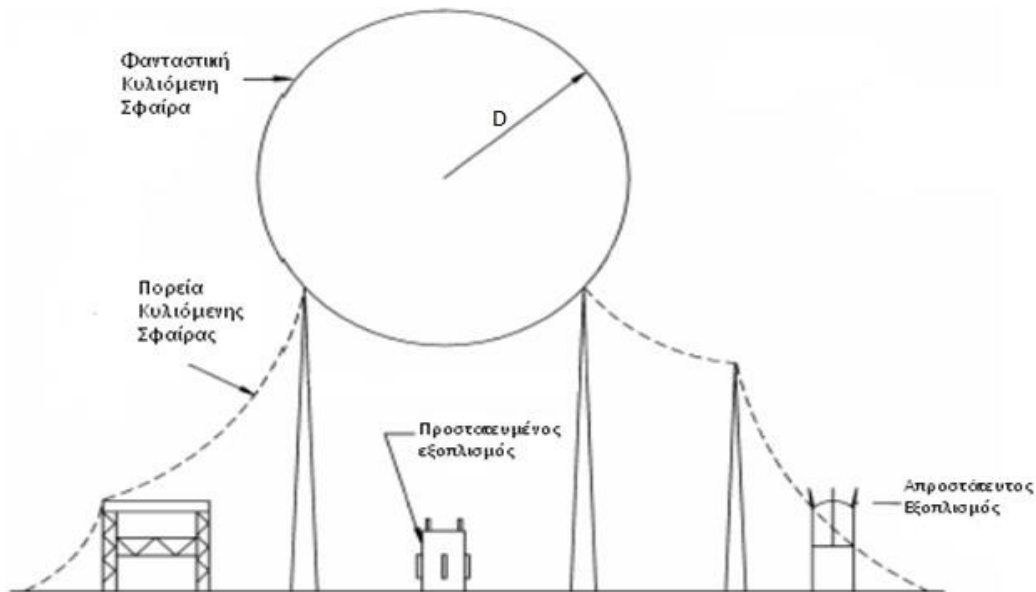
$$D = 10 \cdot I_p^{0,65} \quad (3.3)$$

όπου I_p το μέγιστο ρεύμα του οχητού προεκκένωσης 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.

Εκτός από τις δύο γεωμετρίες που περιγράφονται στο παραπάνω σχήμα, η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση συλλεκτηρίου συστήματος δύο κατακόρυφων ράβδων ύψους h , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας στην περίπτωση δύο ή περισσότερων συλλεκτηρίων συστημάτων [20]

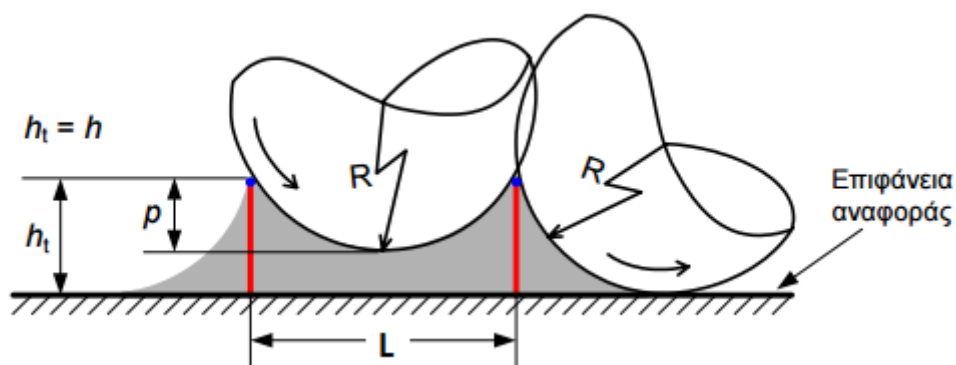
Στην περίπτωση αυτή, η απόσταση μεταξύ των δύο ράβδων L και η απόσταση διείσδυσης p της σφαίρας δίνονται από τις εξής σχέσεις:

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

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

όπου D : η απόσταση πρόσκρουσης σε m

h : το ύψος της κάθε ράβδου σε m



Σχήμα 3.4: Απόσταση L μεταξύ των δύο ράβδων και απόσταση διείσδυσης p με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας ανάμεσα σε δύο κατακόρυφες ράβδους [17]

Η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας αποτελεί αναμφισβήτητα την πιο διαδεδομένη μέθοδο σχεδίασης συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας. Βασίζεται στο ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στην Ουγγαρία το 1962 και η χρήση της εξαπλώθηκε λόγω της εφαρμογής της στην αντικεραυνική προστασία γραμμών

μεταφοράς (Lee 1978) [21]. Μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός ότι κατά τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης δεν λαμβάνεται υπ' όψιν το ύψος της κατασκευής αλλά μόνο το ρεύμα του κεραυνού.

3.1.4 Μέθοδος όγκου συλλογής (Collection Volume Method, CVM)

Η μέθοδος του όγκου συλλογής αναπτύχθηκε από τον A. J. Eriksson το 1979 ως εναλλακτική των ήδη υπαρχόντων μεθόδων τοποθέτησης συλλεκτηρίων συστημάτων. Μετρά ήδη πάνω από μία δεκαετία εφαρμογής και ένα μεγάλο ποσοστό των εγκαταστάσεων που έχουν σχεδιαστεί με βάση την μέθοδο αυτή βρίσκουν εφαρμογή στις πλέον επιρρεπείς σε κεραυνικά χτυπήματα περιοχές στον κόσμο. Οι σχέσεις που προτείνει το μοντέλο αυτό για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης D και της ακτίνας σύλληψης R είναι οι εξής:

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

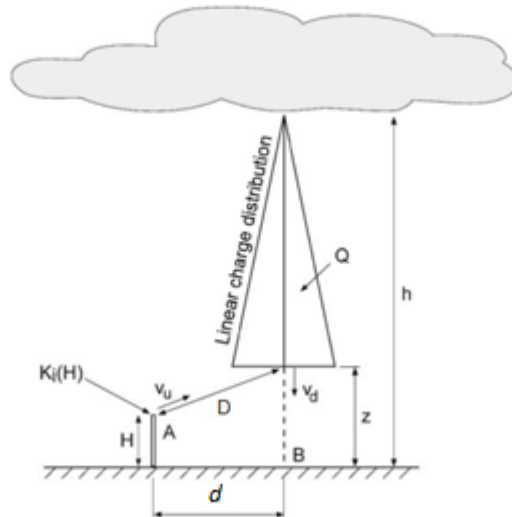
$$R = \sqrt{2 \cdot H \cdot D - H^2} \quad (3.8)$$

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

I_p το μέγιστο ρεύμα του οχετού προεκκένωσης σε kA.

Η έρευνα του Eriksson πραγματοποιήθηκε σε πραγματικές τρισδιάστατες κατασκευές και βασίστηκε στην θεωρητική έννοια του "όγκου συλλογής" η οποία είχε πρόσφατα προταθεί. Το μοντέλο του βασίστηκε στο γεγονός ότι η απόσταση πρόσκρουσης D εξαρτάται τόσο από το μέγιστο ρεύμα του κατερχόμενου οχετού (ή αλλιώς από το φορτίου του κατερχόμενου οχετού) όσο και από την τιμή του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από το συλλεκτήριο σύστημα. Έτσι, το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπ' όψιν εκτός από τις κατασκευαστικές παραμέτρους και την τιμή του ρεύματος του κεραυνού.

Για ληφθεί υπόψη λοιπόν στην μέθοδο αυτή η επίδραση του ρεύματος του κεραυνού ο Eriksson εισήγαγε έναν συντελεστή K_i ο οποίος είναι ο λόγος του επαυξημένου ηλεκτρικού πεδίου στην κορυφή της κατασκευής (E_T) προς το περιβάλλον πεδίο (E_0). Στη συνέχεια, εξέτασε την προσέγγιση ενός γραμμικά φορτισμένου καθοδικού οχετού και υπολόγισε το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται τόσο στην κορυφή της κατασκευής όσο και στο έδαφος κάτω ακριβώς από τον οχετό. Έτσι, όταν η ένταση του περιβάλλοντος ηλεκτρικού πεδίου είναι επαρκής, ή αλλιώς, όταν ο καθοδικός οχετός βρίσκεται επαρκώς κοντά στην κατασκευή, τότε ένας ανοδικός οχετός θα ξεκινήσει από αυτήν. Η απόσταση του καθοδικού οχετού σε αυτό το σημείο χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης



Σχήμα 3.5: Μοντέλο προσέγγισης κατερχόμενου οχετού σε κατασκευή που βρίσκεται σε αυθαίρετη απόσταση [22]

Για τον προσδιορισμό της απόστασης διάσπασης, ο Eriksson εφάρμοσε τις παρακάτω υποθέσεις και κριτήρια:

- Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E_T στην κορυφή της κατασκευής καθορίζεται από τον συντελεστή K_i της εκάστοτε κατασκευής.
- Ένας κατερχόμενος οχετός που πλησιάζει μία κατασκευή μπορεί να αναπαρασταθεί από μία κάθετη στήλη φορτίου που πηγάζει από ένα φορτισμένο σύννεφο που βρίσκεται σε απόσταση h από το έδαφος. Το φορτίο Q διανέμεται γραμμικά κατά μήκος της στήλης και η μέση ταχύτητα του οχετού είναι V_d .
- Το κεραυνικό ρεύμα σχετίζεται με το φορτίο με βάση την σχέση:

$$I_p = 10.6 \cdot Q^{0.7} \quad (3.9)$$

- Η επίδραση της γεωμετρίας και άρα των φορτίων χώρου στα άκρα της κατασκευής λαμβάνεται υπόψη με την εισαγωγή της έννοιας της "κρίσιμης ακτίνας". Με βάση τη θεωρία αυτήν, η έναρξη ενός κατερχόμενου οχετού γίνεται όταν δημιουργηθεί επαρκής 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.
- Η έναρξη ενός ανερχόμενου οχετού απαιτεί την επίτευξη πεδιακής έντασης 3.1 MV/m στην κρίσιμη ακτίνα. Η τιμή αυτή αφορά πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες και χρειάζεται αναγωγή λόγω διακυμάνσεων της πυκνότητας του αέρα, τη υγρασίας κλπ. [17]

Η εφαρμογή της έννοιας της κρίσιμης ακτίνας υποδηλώνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο E_m που απαιτείται για την έναρξη ανοδικού οχετού για την κορυφή της κατασκευής και το έδαφος είναι 3.1 MV/m κάτω από πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Ανάλογα με την θέση του κατερχόμενου οχετού, το ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την κρίσιμη ακτίνα, είτε στην κορυφή της κατασκευής, είτε στο έδαφος, μπορεί να υπερβεί την τιμή E_m και ως

αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ανερχόμενος οχετός. Ο συντελεστής αύξησης του ηλεκτρικού πεδίου της κατασκευής καθορίζει ποιό από αυτά θα γίνει πρώτο και για ποιά θέση του καθοδικού οχετού.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το πεδιακό κριτήριο έναρξης οχετού μπορεί να περιγραφεί από τις παρακάτω σχέσεις:

Σημείο Α (κατασκευή): Ολική ένταση πεδίου: $E_t = K_i \cdot E_A$ (3.10), με

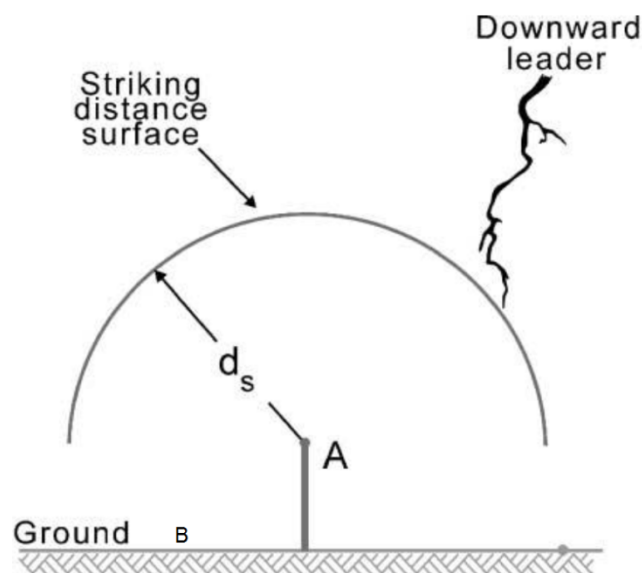
$$E_A = \frac{Q}{\pi \epsilon d^2 (h/d - z/d)^2} \left[\frac{(h/d - z/d)}{\{1 + (z/d)^2\}^{0.5}} + \sinh^{-1}\left(\frac{z}{d}\right) - \sinh^{-1}\left(\frac{h}{d}\right) \right]$$

Στους παραπάνω τύπους έχει υποτεθεί ότι το φορτίο ανά μονάδα μήκους αυξάνεται γραμμικά κατά μήκος του οχετού όσο πλησιάζουμε από το σύννεφο προς την άκρη του και ότι $z > H$ και $H \leq d$. Ένας ανερχόμενος οχετός θα ξεκινήσει εάν $E_t > E_m$.

Σημείο Β (έδαφος): Ένας ανερχόμενος οχετός θα ξεκινήσει εάν $E_B > E_m$, όπου:

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

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις, για δεδομένο φορτίου οχετού Q , μπορούμε να προσδιορίσουμε μια επιφάνεια απόστασης διάσπασης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικών υπολογισμών των E_t και E_B για διάφορες θέσεις και χαρακτηριστικά των καθοδικών οχετών.



Σχήμα 3.6: Η επιφάνεια απόστασης διάσπασης που προκύπτει μέσω επαναληπτικών υπολογισμών [22]

Η επίτευξη ηλεκτρικού πεδίου τιμής E_m για την δημιουργία του ανερχόμενου οχετού είναι αναγκαία αλλά όχι επαρκής συνθήκη για τη σύνδεσή του με τον κατερχόμενο οχετό. Σύμφωνα με τον Eriksson, ο κεραυνός θα τερματιστεί στην κατασκευή αντί για το έδαφος αφού παρέχει την δυνατότητα στον ανοδικό οχετό να διασχίσει την ενδιάμεση απόσταση πριν το ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος να φτάσει την κρίσιμη τιμή έναρξης του οχετού.

Έστω z_m η απόσταση μεταξύ της άκρης του κατερχόμενου οχετού και του εδάφους τη στιγμή που ικανοποιείται η συνθήκη $E_B=E_m$. Σύμφωνα με την πιο συντηρητική προσέγγιση του Eriksson, ο ανερχόμενος οχετός θα πρέπει να διανύσει απόσταση (d_s-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 ανάγεται σε:

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

Παρατηρούμε δηλαδή ότι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας για το μοντέλο είναι ο λόγος ταχυτήτων $K_v = u_d/u_u$. Αντικαθιστώντας τώρα την σχέση

$D = \sqrt{(z - H)^2 + x^2}$ από το σχήμα 3.5 στην σχέση (3.11) προκύπτει (για την οριακή περίπτωση):

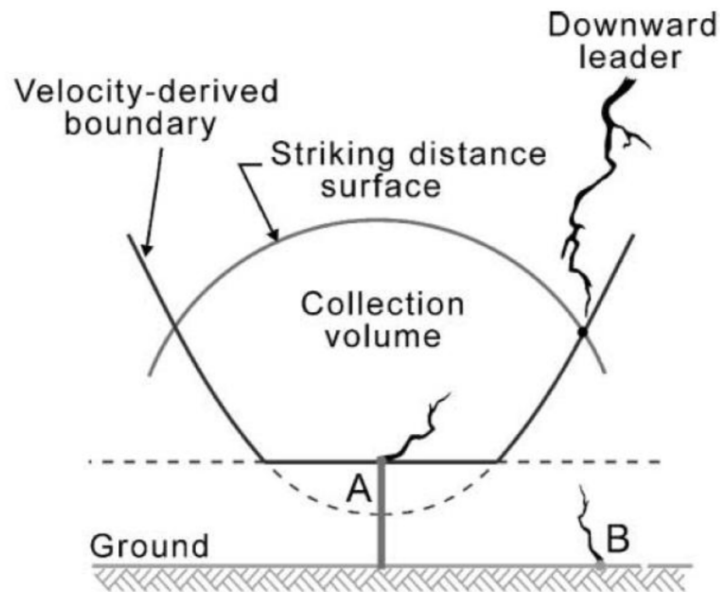
$$d = \sqrt{\left[\frac{z_m \cdot (K_v - 1) + z}{K_v} \right]^2 - (z - H)^2} \quad (3.12)$$

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

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

Με βάση τώρα την λιγότερο συντηρητική, αλλά αρκετά ακριβότερη προσέγγιση, ο ανερχόμενος οχετός χρειάζεται να διασχίσει την απόσταση $[D - (z - z_m)]$ λόγω της καθόδου του κατερχόμενου οχετού. Σε αυτήν την περίπτωση, εάν $z_m \ll D$, η σχέση (3.11) θα γίνει: $D = z \cdot \left(1 + \frac{1}{K_u}\right)$, ενώ για μεγάλες τιμές του K_v , η σχέση για την απόσταση τείνει στην (3.13).

Για μια κατασκευή ύψους H , τα σημεία (d, z) ικανοποιώντας τη σχέση (3.13), σχηματίζουν μια παραβολική επιφάνεια που βρίσκεται πάνω από την κατασκευή. Και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούμε επαναληπτικές μεθόδους για τον προσδιορισμό των σημείων. Η περιοχή που σχηματίζεται ονομάζεται "σύνορο εξαγόμενο από την ταχύτητα" και αναπαρίσταται στο παρακάτω σχήμα:

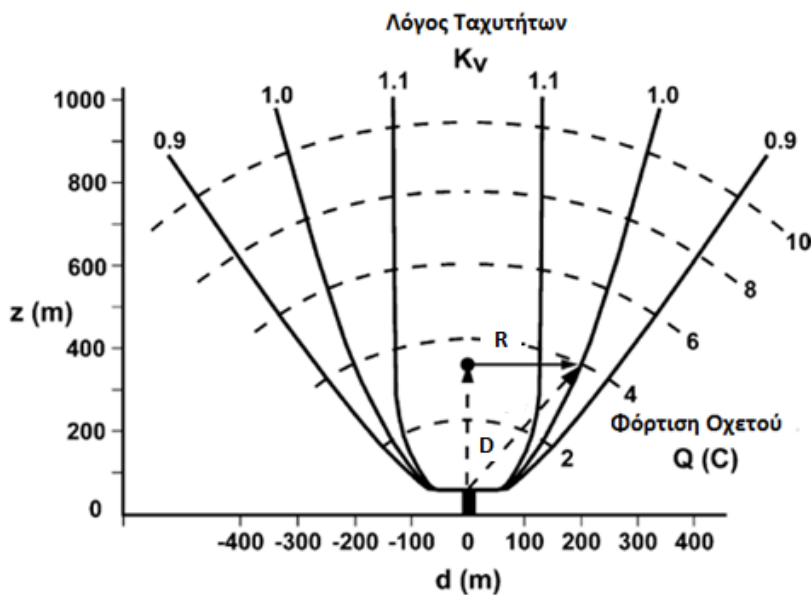


Σχήμα 3.7: Η επιφάνεια απόστασης διάσπασης και το σύνορο εξαγόμενο από την ταχύτητα, τα οποία σχηματίζουν τον όγκο συλλογής του εκάστοτε σημείου κατασκευής [22]

Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο όγκος συλλογής του εκάστοτε σημείου κατασκευής είναι ο όγκος που περικλείεται ανάμεσα στην επιφάνεια απόστασης διάσπασης και στο σύνορο εξαγόμενο από την ταχύτητα. Εάν ο κεραυνός καταλήξει σε αυτόν τον όγκο συλλογής τότε θα πλήξει το συλλεκτήριο σύστημα.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι το μέγεθος του όγκου συλλογής δεν είναι πάντοτε σταθερό και εξαρτάται από αρκετές εξωτερικές παραμέτρους, οι σημαντικότερες από τις οποίες είναι:

- Η φόρτιση του κατερχόμενου οχető ή το μέγιστο ρεύμα του κεραυνού καθώς και το ύψος της κατασκευής. Οι δύο αυτές παράμετροι σε συνδυασμό καθορίζουν την επιφάνεια απόστασης διάσπασης.
- Η αναλογία της ταχύτητας του κατερχόμενου οχető προς την ταχύτητα του ανερχόμενου οχető.
- Οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που απαιτείται για τη διάσπαση του αέρα εξαρτάται από την θερμοκρασία, την υγρασία και την πίεση του αέρα.



Σχήμα 3.8: Όγκος συλλογής κατασκευής ύψους 30m για διαφορετικές φορτίσεις κατερχόμενων οχετών και διαφορετικό λόγο ταχυτήτων [22]

3.1.5 Μέθοδος δυναμικού του οχετού προεκκένωσης (Leader Potential Concept Method, LPCM)

Η μέθοδος LPCM αναπτύχθηκε με σκοπό την αντικεραυνική προστασία πλοίων αλλά και γενικότερα κατασκευών που βρίσκονται στην θάλασσα και βασίζεται τόσο στο μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας όσο και στο μοντέλο γραμμικής φόρτισης (Linear Charge Model).

Η βασική αρχή πάνω στην οποία βασίζεται το μοντέλο αυτό είναι η υπόθεση ότι ο κατερχόμενος οχετός μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα αγώγιμο καλώδιο που εκτείνεται εντός του ηλεκτρικού πεδίου που περιβάλλει ένα φορτισμένο νέφος. Επίσης, θεωρείται ότι το συνολικό φορτίο του κεραυνού είναι μηδέν πριν αυτός αγγίξει το έδαφος, δηλαδή πριν γίνει η ζεύξη του ανερχόμενου και του κατερχόμενου οχετού προεκκένωσης. Το δυναμικό του κεραυνού που ήταν ίσο με V πριν αυτός αγγίξει το έδαφος, γίνεται μηδέν μετά την επαφή. Αυτή η μεταβολή του δυναμικού είναι ισοδύναμη με την προσθήκη ενός σταθερού φορτίου ανά μονάδα μήκους q κατά μήκος του κεραυνικού καναλιού κατά την διάρκεια του ανοδικού οχετού σύνδεσης. Το φορτίο ανά μονάδα μήκους σε ένα κεραυνικό κανάλι με χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους C υπολογίζεται ως:

$$q = -C \cdot V \quad (3.14)$$

Η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους C του κεραυνικού καναλιού είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του δυναμικού V του κεραυνού μέσω της σχέσης (3.14). Για να προσεγγίσουμε ένα κεραυνικό κανάλι, θεωρούμε έναν κατακόρυφο, λεπτό, μακρύ αγωγό που είναι κάθετος στο έδαφος και που έχει διάμετρο δ και μήκος Z . Η χωρητικότητα ενός τέτοιου αγωγού υπολογίζεται ως εξής:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln(Z/\delta)} \quad (3.15)$$

Η σχέση μεταξύ της διαμέτρου του κεραυνικού καναλιού και του φορτίου του βασίζεται στην υπόθεση ότι τα φορτία κατανέμονται σε έναν μανδύα τύπου Corona με ηλεκτρικό πεδίο 3 MV/m που ισούται με:

$$W = q/3 \cdot 10^6 \pi \epsilon \quad (3.16)$$

Το δυναμικό του κεραυνού προκύπτει ως εξής:

$$V = -(q/2\pi\epsilon) \cdot \ln(3 \cdot 10^6 \cdot Z\pi\epsilon/q) \quad (3.17)$$

Τελικά, η απόσταση πρόσκρουσης υπολογίζεται ως εξής:

$$D = V/750, \text{ σε m} \quad (3.18)$$

Το δυναμικό του κεραυνού υπολογίζεται από την σχέση (3.17) όπου q το φορτίο ανά μονάδα μήκους του κεραυνικού καναλιού σε milliCoulomb ανά μέτρο (mC/m) και Z το ύψος από τη βάση του νέφους μέχρι το έδαφος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι εξισώσεις προϋπήρχαν της μεθόδου LPCM, αφού είχαν διατυπωθεί από τους V. Mazur και L. H. Ruhnke στην μελέτη τους για το μοντέλο γραμμικής φόρτισης (Linear Charge Model). Ωστόσο, η μέθοδος LPCM εμπλούτισε τις εξισώσεις αυτές, θεωρώντας ότι κατά μέσο όρο, το ύψος Z υπολογίζεται σε 5000 m, και συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.17) και (3.18) ώστε τελικά η απόσταση πρόσκρουσης να είναι συνάρτηση τόσο του δυναμικού του κεραυνού όσο και του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος του κεραυνικού καναλιού. Η απόσταση πρόσκρουσης δηλαδή που προτείνει η μέθοδος LPCM είναι:

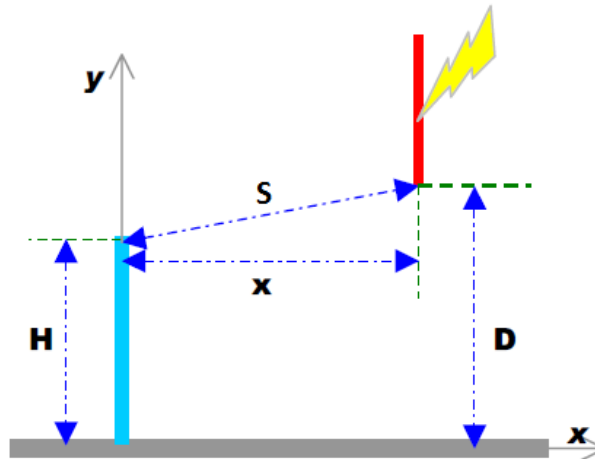
$$D = (q/41.7 \cdot 10^{-3}) \ln((q/41.7 \cdot 10^{-3})(1/2Z)), \text{ m} \quad (3.19)$$

3.1.6 Ελλειπτικό μοντέλο

Το ελλειπτικό μοντέλο παρουσιάστηκε το 2007 από τον S. Grybowski και την ομάδα του στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου της Πολιτείας του Μισισσιπιπύ. Το μοντέλο αυτό έγκειται στον προσδιορισμό της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης μίας ράβδου Franklin, σε ένα μοντέλο πλοίου. Η ανάγκη για τη δημιουργία του μοντέλου αυτού προέκυψε από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια εργαστηριακών δοκιμών σε υπό κλίμακα πλοίο, οι υπάρχουσες μέθοδοι δεν παρείχαν πλήρη προστασία στο πλοίο [23,24].

Σύμφωνα με το ελλειπτικό μοντέλο, η ζώνη προστασίας προσδιορίζεται από το ρεύμα του κεραυνού, το ύψος του αλεξικέραυνου (στην προκειμένη περίπτωση της ράβδου Franklin), και την πολικότητα του κεραυνού και η γενική ιδέα στην οποία βασίζεται είναι η εξής: Η απόσταση πρόσκρουσης από το έδαφος D , και η απόσταση πρόσκρουσης από την κορυφή του αλεξικέραυνου S , τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα κεραυνού, δεν έχουν το ίδιο μήκος όπως στο μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας. Η σχέση που συνδέει τα S και D είναι καθοριστική τόσο για τον προσδιορισμό της ζώνης προστασίας του αλεξικέραυνου όσο και για την πρόβλεψη του σημείου που θα πλήξει ο κεραυνός.

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά την μελέτη του ελλειπτικού μοντέλου είναι η εξής:



Σχήμα 3.9: Πειραματική διάταξη για την μελέτη της απόστασης πρόσκρουσης μιας ακίδας Franklin [23]

Για ορισμένο ύψος ράβδου H και απόσταση D μεταξύ του κάτω άκρου της φορτισμένης ράβδου και του εδάφους, μεταβλήθηκε η απόσταση X μεταξύ των δύο ράβδων μέχρι να εμφανιστούν σπινθήρες είτε προς τη ράβδο είτε προς το έδαφος. Στο πείραμα αυτό η φορτισμένη ράβδος αναπαριστά τον κατερχόμενο οχετό, η γειωμένη ράβδος την ακίδα Franklin και μία γειωμένη μεταλλική πλάκα το έδαφος. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε κρουστική τάση της μορφής $(1.2/50 \mu s)$, τόσο με θετική όσο και με αρνητική πολικότητα.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι υπάρχουν τρεις παράγοντες που καθορίζουν την απόσταση πρόσκρουσης: 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 προέκυψαν για την απόσταση πρόσκρουσης είναι οι εξής:

$$S = D \cdot (1 + 0.24 \cdot e^{-H/D}), \text{ για θετική πολικότητα} \quad (3.20)$$

$$S = D \cdot (0.8 \cdot e^{-(0.125H/D)} + 0.17), \text{ για αρνητική πολικότητα} \quad (3.21)$$

Στη εξίσωση (3.20) η απόσταση S είναι πάντοτε μεγαλύτερη από την απόσταση D και επίσης, η απόσταση S αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης D . Αντίστοιχα, στην εξίσωση (3.21) η απόσταση S είναι πάντοτε μικρότερη από την απόσταση D και επίσης, η απόσταση S αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης D με μικρότερο όμως ρυθμό.

Από τις εξισώσεις (3.20) και (3.21) μπορεί να εξαχθεί μία σχέση για την πλευρική απόσταση μεταξύ του κατερχόμενου οχετού και της γειωμένης ράβδου. Αυτή η απόσταση R ορίζει την ακτίνα σύλληψης στο ελλειπτικό μοντέλο και δίνεται από την εξίσωση:

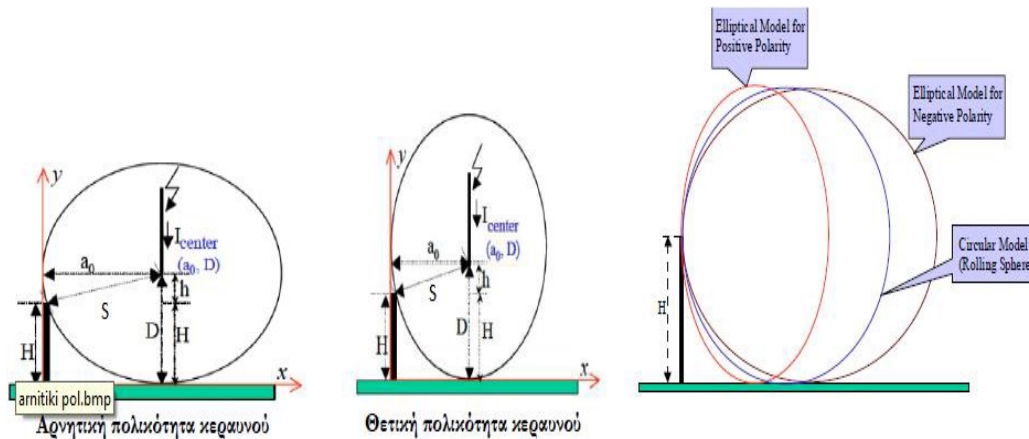
$$R = D \cdot \sqrt{\frac{S^2 - (D-H)^2}{D^2 - (D-H)^2}} \quad (3.22)$$

Παρόλα αυτά, κάποιες νεότερες έρευνες έδειξαν ότι η απόσταση πρόσκρουσης εξαρτάται και από το ύψος της γειωμένης ράβδου και από το ρεύμα του κεραυνού παρά το γεγονός ότι από τις εξισώσεις (3.20) και (3.21) απουσιάζει η παράμετρος του ρεύματος. Έτσι, προέκυψαν οι εξής καινούριες εξισώσεις οι οποίες περιλαμβάνουν και την εξάρτηση από το ρεύμα του κεραυνού:

$$S = 9.8959 \cdot I_s^{0.7251} + 1.7872 \cdot H^{-0.6092}, \text{ για θετική πολικότητα} \quad (3.23)$$

$$S = 6.0519 \cdot I_s^{0.6228} + 0.0027 \cdot H^{0.7029}, \text{ για αρνητική πολικότητα} \quad (3.24)$$

Από τη στιγμή που οι αποστάσεις πρόσκρουσης προς τη ράβδο Franklin είναι διαφορετικές για θετική και για αρνητική πολικότητα, θα παρουσιάζουν και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Με βάση αυτή τη θεώρηση, δημιουργήθηκε ένα ελλειπτικό μοντέλο για τον προσδιορισμό της ζώνης προστασίας που δημιουργεί μία ράβδος Franklin. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα μαζί με μία σύγκριση του με το μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας. Από τα παρακάτω σχήματα γίνεται κατανοητό γιατί ένας κεραυνός μπορεί να χτυπήσει αντικείμενα τα οποία βρίσκονται μέσα στην ζώνη προστασίας όταν αυτή έχει προσδιοριστεί με την μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας. Επίσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε από το σχήμα ότι σε σχέση με την κυλιόμενη σφαίρα, η ζώνη προστασίας του ελλειπτικού είναι μικρότερη για κεραυνό θετικής πολικότητας ενώ είναι μεγαλύτερη για κεραυνό αρνητικής πολικότητας.



Σχήμα 3.10: Ελλειπτικό μοντέλο για αρνητική και θετική πολικότητα κεραυνού και σύγκρισή του με το μοντέλο κυλιόμενης σφαίρας [23]

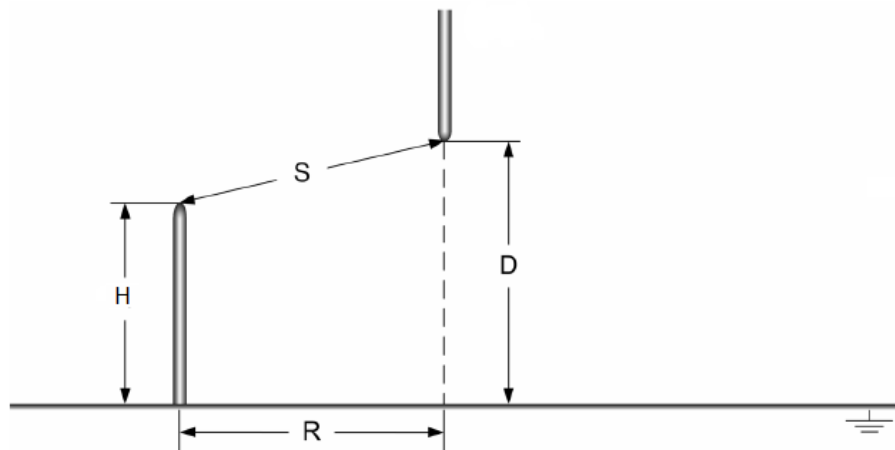
3.1.7 Στατιστικό μοντέλο

Το στατιστικό μοντέλο διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 2010 στην διδακτορική διατριβή του Θωμά Τσοβίλη. Το μοντέλο αυτό αντιμετωπίζει τον κεραυνό ως ένα σύνθετο φαινόμενο με έντονα πιθανοκρατική φύση. Δηλαδή, για την μελέτη της σύλληψης του κεραυνού, το στατιστικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τόσο το ρεύμα του, την πολικότητά του και το ύψος του αλεξικέραυνου, όσο και τα φαινόμενα γειτνίασης και την πιθανότητα σύλληψης του κεραυνού. Λόγω αυτής της θεώρησης και μέσω πειραμάτων, το μοντέλο αυτό εξάγει εξισώσεις για την ακτίνα σύλληψης και την απόσταση πρόσκρουσης οι οποίες περιγράφουν την πιθανοκρατική φύση του κεραυνού και οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

Το πειραματικό μέρος μέσω του οποίου προέκυψε το μοντέλο αυτό αποτελούνταν αρχικά από δοκιμές σε διάκενα φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής γειωμένης πλάκας οι οποίες σκοπό είχαν τον υπολογισμό της τάσης διάσπασης U_s που αντιστοιχεί σε 97.5%

πιθανότητα διάσπασης. Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τη μέθοδο των επιπέδων τάσης, η οποία θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω (βλ. Κεφάλαιο 4).

Αφού υπολογίστηκαν οι τάσεις U_s για διάφορα ύψη D της φορτισμένης ράβδου από το έδαφος, οι τάσεις αυτές επιβάλλονταν κατά τη διάρκεια πειραμάτων φορτισμένης ράβδου, μεταλλικής γειωμένης πλάκας και γειωμένης ράβδου. Για κάθε πλευρική απόσταση μεταξύ των δύο ράβδων, εφαρμόστηκαν 20 κρουστικές τάσεις. Αρχικά, το πείραμα ξεκινούσε από την πλευρική απόσταση στην οποία και οι 20 κρουστικές τάσεις κατέληγαν στην γειωμένη πλάκα, την απόσταση δηλαδή με πιθανότητα σύλληψης για την γειωμένη ράβδο 0%. Στη συνέχεια, η πλευρική απόσταση μειωνόταν μέχρι την απόσταση στην οποία όλες οι κρουστικές τάσεις κατέληγαν στην γειωμένη ράβδο, την απόσταση δηλαδή με πιθανότητα σύλληψης 100%. Με αυτόν τον τρόπο, προέκυψαν καμπύλες πιθανότητας σύλληψης οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε και για θετική και για αρνητική πολικότητα κρουστικής τάσης αλλά και για διαφορετικά ύψη D της φορτισμένης ράβδου από το έδαφος. Τέλος, για κάθε μία από τις κατανομές πιθανότητας σύλληψης που προέκυψαν υπολογίστηκε η μέση τιμή της πλευρικής απόστασης μεταξύ των δύο ράβδων για την οποία η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στην γειωμένη ράβδο είναι 50%. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.11: Πειραματική διάταξη διερεύνησης στατιστικού μοντέλου. H : ύψος γειωμένης ράβδου, D : ύψος φορτισμένης ράβδου από γη, S : απόσταση πρόσκρουσης, R : ακτίνα σύλληψης [25]

Από τη στιγμή που τόσο η απόσταση πρόσκρουσης όσο και η ακτίνα σύλληψης ακολουθούν κανονική κατανομή, οι κατανομές τους μπορούν να περιγραφούν από μία μέση τιμή S_c και R_c αντίστοιχα. Μέσω εφαρμογής της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων στις κανονικές κατανομές που προέκυψαν, υπολογίστηκαν οι εξισώσεις που περιγράφουν την μέση τιμή της ακτίνας σύλληψης R_c και της απόστασης πρόσκρουσης S_c για τις οποίες η πιθανότητα να καταλήξει η εκκένωση στη γειωμένη ράβδο είναι 50%. Οι εξισώσεις αυτές είναι οι εξής:

$$R_c = D \cdot [c_1 \cdot \ln(H/D) + c_2] \quad (3.25)$$

$$S_c = D \cdot [a \cdot \ln(H/D) + b] \quad (3.26)$$

Όπου οι συντελεστές c_1 , c_2 , a , b βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

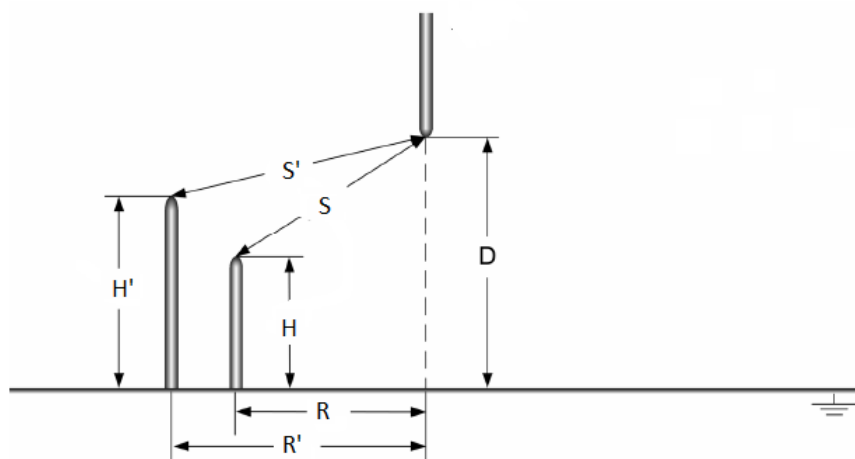
Απόσταση πρόσκρουσης			Ακτίνα σύλληψης		
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα		Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
a	-0.032	0.065	c_1	0.235	0.272
b	0.90	1.24	c_2	0.90	1.24

Πίνακας 3.2: Οι τιμές των συντελεστών c_1 , c_2 , a , b των εξισώσεων (3.25) και (3.26) [25]

Από το συγκεκριμένο πείραμα εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για δεδομένο ύψος H της γειωμένης ράβδου όταν μειώνεται η πλευρική απόσταση μεταξύ των ράβδων η πιθανότητα σύλληψης του κεραυνού αυξάνεται.
- Η αύξηση του ύψους της γειωμένης ράβδου συνεπάγεται μη γραμμική αύξηση της ακτίνας σύλληψης.
- Η αύξηση του ύψους της γειωμένης ράβδου συνεπάγεται λογαριθμική μείωση της απόστασης πρόσκρουσης φορτισμένης ράβδου-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 για αρνητικής πολικότητας εκκενώσεις σε σχέση με τις εκκενώσεις θετικής πολικότητας.
- Το ύψος D της φορτισμένης ράβδου από την γειωμένη πλάκα έχει μικρή επίδραση στην εξάρτηση της κανονικοποιημένης ακτίνας σύλληψης R/D από το λόγο H/D , ιδιαίτερα στις εκκενώσεις θετικής πολικότητας.

Στη συνέχεια, το παραπάνω πείραμα επαναλήφθηκε με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των φαινομένων γειννίας στη σύλληψη του κεραυνού. Έτσι, τροποποίησε την πειραματική διάταξη ως εξής:



Σχήμα 3.12: Πειραματική διάταξη για την διερεύνηση της επίδρασης των φαινομένων γειννίας στη σύλληψη του κεραυνού [25]

Στην νέα αυτή πειραματική διάταξη, τοποθετήθηκε μία κοντή ράβδος ανάμεσα στην ψηλή γειωμένη ράβδο και στην φορτισμένη ράβδο. Η κοντή ράβδος τοποθετήθηκε στην

κρίσιμη ακτίνα σύλληψης, η οποία υπολογίστηκε στο προηγούμενο στάδιο, ενώ η ψηλή ράβδος τοποθετήθηκε σε μια πλευρική απόσταση στην οποία όλες οι εκκενώσεις κατέληγαν είτε στην κοντή ράβδο είτε στην πλάκα. Για κάθε πλευρική απόσταση επιβάλλονταν 40 τάσεις διάσπασης U_s , όπως αυτές υπολογίστηκαν στο πρώτο σκέλος του πειράματος. Η πλευρική απόσταση μειωνόταν μέχρι την απόσταση εκείνη στην οποία όλες οι εκκενώσεις κατέληγαν στην ψηλή ράβδο (πιθανότητα σύλληψης 100%). Από αυτήν την πειραματική διαδικασία προέκυψαν καμπύλες πιθανότητας σύλληψης για την ψηλή ράβδο οι οποίες ακολουθούσαν κανονική κατανομή.

Πλέον, εάν η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην ψηλή ράβδο είναι p (πιθανότητα σύλληψης), η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στην πλάκα ή στην κοντή ράβδο είναι $0.5(1-p)$ αντίστοιχα (πιθανότητα αστοχίας). Έτσι, η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης στην περίπτωση δύο γειωμένων ράβδων είναι η ακτίνα που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης 33%. Με βάση αυτήν την θεώρηση, ο Τσοβίλης υπολόγισε την κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης S_{cn} και την κρίσιμη ακτίνα σύλληψης R_{cn} λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της γειννιάσης στην σύλληψη της εκκένωσης. Οι νέες σχέσεις προκύπτουν τροποποιώντας τις εξισώσεις (3.25), (3.26) κατά έναν συντελεστή λ :

$$R_{cn} = \lambda \cdot R_c \quad (3.27)$$

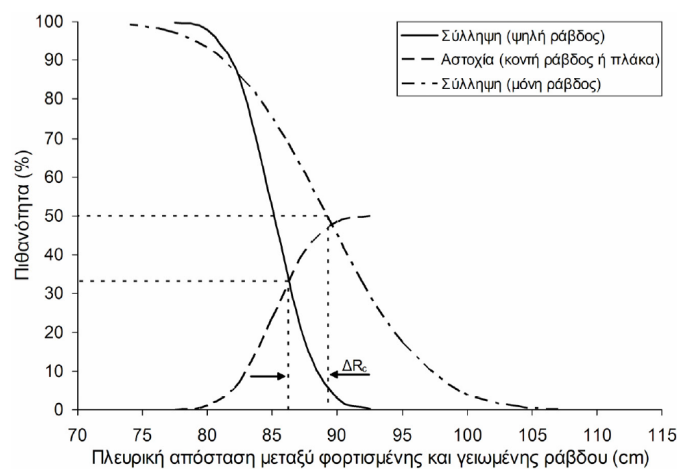
$$S_{cn} = \lambda \cdot S_c \quad (3.28)$$

Όπου ο συντελεστής λ παίρνει τις εξής τιμές:

	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
Απόσταση πρόσκρουσης	0.98	$1 - 0.03 \cdot (H'/D)$
Ακτίνα σύλληψης	$0.96 + 0.03 \cdot (H'/D)$	$1 - 0.03 \cdot (H'/D)$

Πίνακας 3.3: Οι τιμές του συντελεστή λ για τις εξισώσεις (3.27), (3.28) [25]

Στο παρακάτω σχήμα γίνεται φανερή η επίδραση της γειννιάσης στην σύλληψη της εκκένωσης μέσω της μετατόπισης της κανονικής κατανομής:



Σχήμα 3.13: Κατανομή της πιθανότητας σύλληψης ηλεκτρικής εκκένωσης από γειωμένη ράβδο ύψους 75 cm και μεταβολή αυτής υπό την παρουσία κοντύτερης γειννιάζουσας ράβδου που είναι τοποθετημένη στην κρίσιμη ακτίνα σύλληψης από την φορτισμένη ράβδο. Αρνητική πολικότητα επιβαλλόμενης τάσης, $D=75$ cm [25]

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από το πείραμα αυτό είναι:

- Η παρουσία γειτνιάζουσας κοντύτερης ράβδου επηρεάζει την κατανομή πιθανότητας σύλληψης της ψηλής ράβδου καθώς η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης μειώνεται κατά μια ποσότητα ΔR_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.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τις ανάγκες του πειράματός μας, επεξεργαστήκαμε τα αποτελέσματα του Τσοβίλη για την απόσταση πρόσκρουσης και την ακτίνας σύλληψης. Με αυτόν τον τρόπο, εξάγαμε σχέσεις για την μέση τιμή της ακτίνας σύλληψης R_c και την απόσταση πρόσκρουσης S_c για τις οποίες η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στην ψηλή γειωμένη ράβδο αντιστοιχεί σε 50% σε περίπτωση γειτνίασης, όπως συμβαίνει και στο μοντέλο του πλοίου μας, και όχι σε 33% όπως προβλέπει το στατιστικό μοντέλο. Αυτή η επεξεργασία ήταν αναγκαία, αφού στο πείραμά μας η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην προς μελέτη κατασκευή του πλοίου είναι p (πιθανότητα σύλληψης), ενώ η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει σε μια γειτνιάζουσα χαμηλότερη κατασκευή ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του πλοίου ή στην γειωμένη πλάκα είναι $1-p$ (πιθανότητα αστοχίας). Οι σχέσεις που μας προέκυψαν είναι οι παρακάτω:

$$R_c = D \cdot [a_1 \cdot \ln(H/D) + a_2] \quad (3.29)$$

$$S_c = D \cdot [b_1 \cdot \ln(H/D) + b_2] \quad (3.30)$$

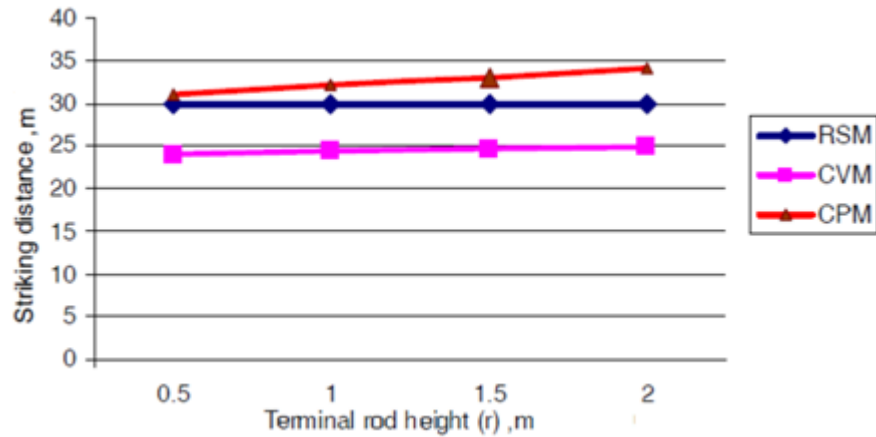
Όπου οι τιμές των συντελεστών a_1, a_2, b_1, b_2 βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

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

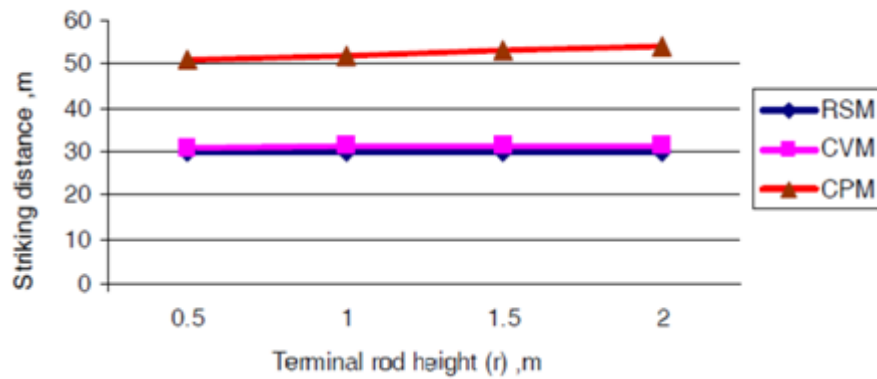
Πίνακας 3.4: οι τιμές των συντελεστών a_1, a_2, b_1, b_2 των εξισώσεων (3.29) και (3.30)

3.1.8 Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας σε πλοία

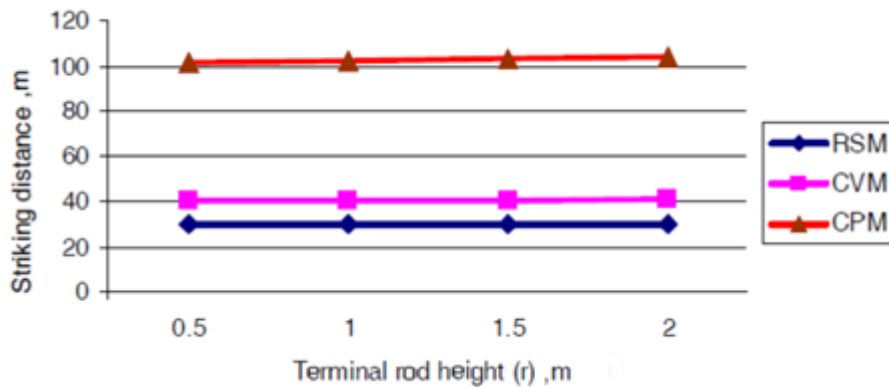
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται αποτελέσματα ερευνών οι οποίες αφορούν την σύγκριση διαφόρων μεθόδων αντικεραυνικής προστασίας στην περίπτωση πλοίων. Τα σχήματα 3.14, 3.15 και 3.16 μας δείχνουν την απόσταση πρόσκρουσης που προκύπτει εφαρμόζοντας τις μεθόδους CPM, RSM, CVM σε πλοία με ύψος καταρτιού 15, 25 και 50 m αντίστοιχα, για διάφορα ύψη του αλεξικέραυνου. Η τιμή του ρεύματος του κεραυνού σε όλες τις περιπτώσεις είναι $I_p = 5.4$ kA.



Σχήμα 3.14: Σχέση μεταξύ ύψους τερματικού αέρα (r) και απόστασης πρόσκρουσης (S) για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους με $H=15\text{m}$, $I_p = 5.4 \text{ kA}$ [28]



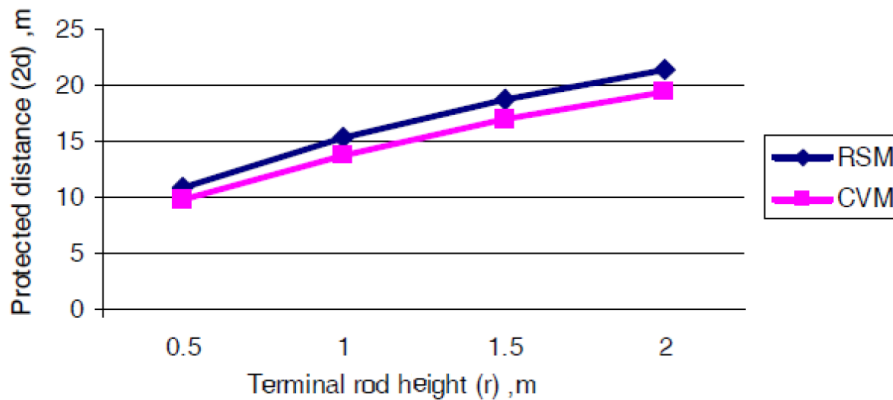
Σχήμα 3.15: Σχέση μεταξύ ύψους τερματικού αέρα (r) και απόστασης πρόσκρουσης (S) για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους με $H=25\text{m}$, $I_p = 5.4 \text{ kA}$ [28]



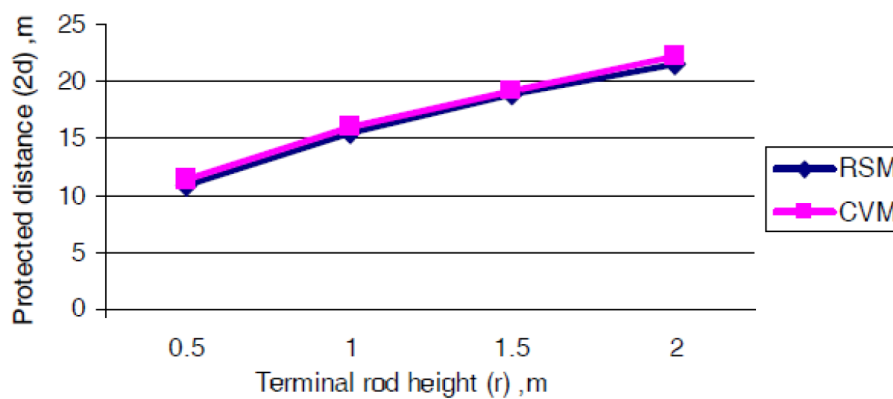
Σχήμα 3.16: Σχέση μεταξύ ύψους τερματικού αέρα (r) και απόστασης πρόσκρουσης (S) για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους με $H=50\text{m}$, $I_p = 5.4 \text{ kA}$ [28]

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ότι οι τιμές που προκύπτουν για την απόσταση πρόσκρουσης S με τη μέθοδο CPM είναι αναξιόπιστες, αφού το S αυξάνεται απότομα με την αύξηση του H. Επίσης, γίνεται φανερό ότι η μέθοδος RSM δίνει παραπλήσια αποτελέσματα με την μέθοδο CVM, τα οποία διαφέρουν αισθητά από τις τιμές που προέκυψαν από την CPM ειδικά για ψηλά πλοία.

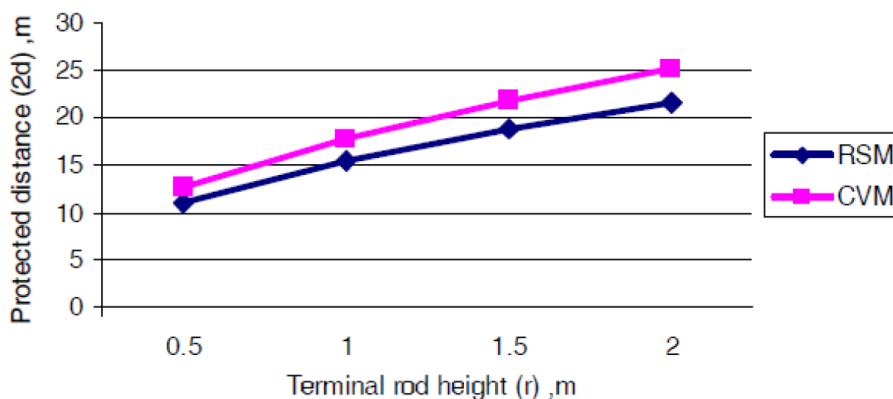
Στα σχήματα 3.17, 3.18 και 3.19 που ακολουθούν απεικονίζεται η συνολική οριζόντια απόσταση προστασίας για τις μεθόδους RSM και CVM έχοντας αποκλείσει πλέον τη μέθοδο CPM. Η απόσταση αυτή είναι το διπλάσιο της ακτίνας σύλληψης R της γειωμένης ράβδου. Τα ύψη των καταρτιών είναι και πάλι 15, 25 και 50 m αντίστοιχα, το ρεύμα του κεραυνού επίσης $I_p = 5.4$ kA, ενώ στον οριζόντιο άξονα έχουμε, όπως και πριν, διάφορα ύψη αλεξικέραυνου.



Σχήμα 3.17: Σχέση μεταξύ ύψους τερματικού αέρα (r) και απόστασης προστασίας (2d) με H=15m, $I_p = 5.4$ kA [28]

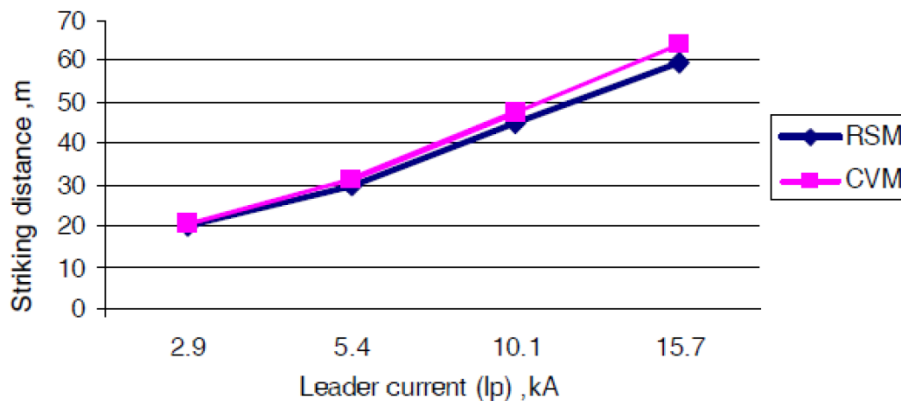


Σχήμα 3.18: Σχέση μεταξύ ύψους τερματικού αέρα (r) και απόστασης προστασίας (2d) με H=25m, $I_p = 5.4$ kA [28]



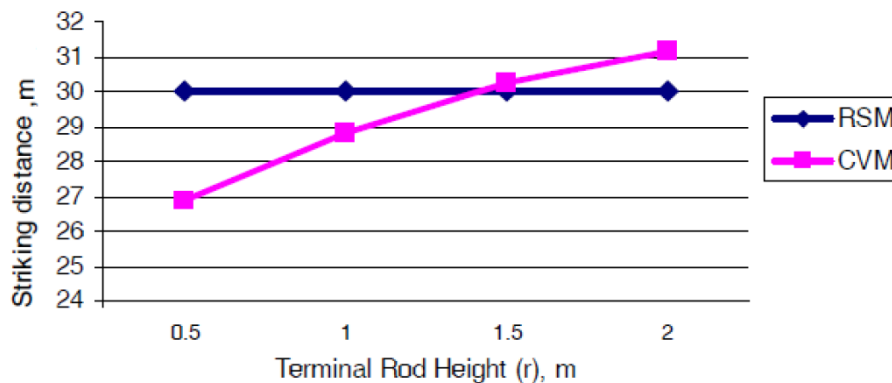
Σχήμα 3.19: Σχέση μεταξύ ύψους τερματικού αέρα (r) και απόστασης προστασίας (2d) με H=50m, $I_p = 5.4$ kA [28]

Το σχήμα 3.20 δείχνει την απόσταση πρόσκρουσης που προκύπτει από τις μεθόδους RSM και CVM για διαφορετικές τιμές του ρεύματος κεραυνού για μια ακίδα τύπου Franklin ύψους 0.5m σε κατάρτι πλοίου ύψους 30m.



Σχήμα 3.20: Σχέση μεταξύ ρεύματος κεραυνού και απόστασης πρόσκρουσης για $H = 30\text{m}$, $r = 0.5\text{m}$ [28]

Το σχήμα 3.21 αναπαριστά την απόσταση πρόσκρουσης που προέκυψε από τις μεθόδους RSM και CVM για διάφορα ύψη τερματικών αέρα σε πλοίο με ύψος καταρτιού 30m και για ρεύμα κεραυνού $I_p = 5.4\text{ kA}$.

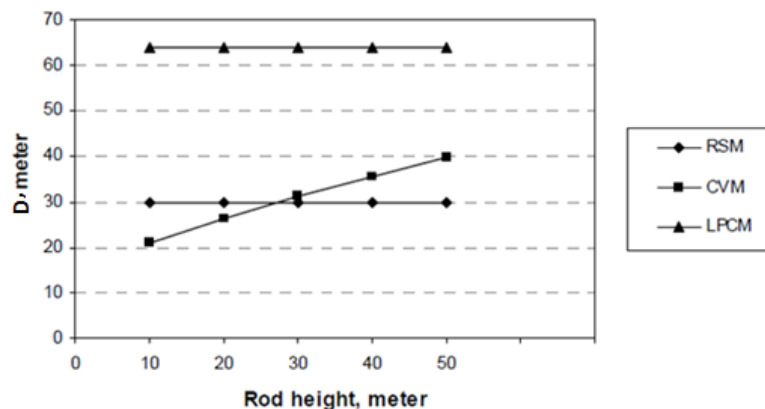


Σχήμα 3.21: Η απόσταση πρόσκρουσης για RSM και CVM για τερματικό αέρα ύψους $H = 30\text{m}$ και $I_p = 5.4\text{ kA}$ [28]

Από τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Για πλοίο ύψους 15m, για κάθε ύψος της ράβδου τα αποτελέσματα με βάση τη μέθοδο RSM είναι μεγαλύτερα από αυτά της μεθόδου CVM.
- Για πλοίο ύψους 25m τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων είναι ακριβώς τα ίδια.
- Για πλοίο ύψους μεγαλύτερο από 25m τα αποτελέσματα της μεθόδου CVM είναι, ως επί το πλείστον, μεγαλύτερα από αυτά της RSM.
- Η απόσταση πρόσκρουσης που προκύπτει από την RSM είναι σταθερή για το ίδιο επίπεδο προστασίας ανεξαρτήτως του ύψους του πλοίου ή της ακίδας. Ωστόσο, η χρήση της μεθόδου CVM δίνει αποτελέσματα για κάθε επίπεδο προστασίας τα οποία εξαρτώνται από το ύψος του πλοίου και το ύψος του αλεξικέραυνου.

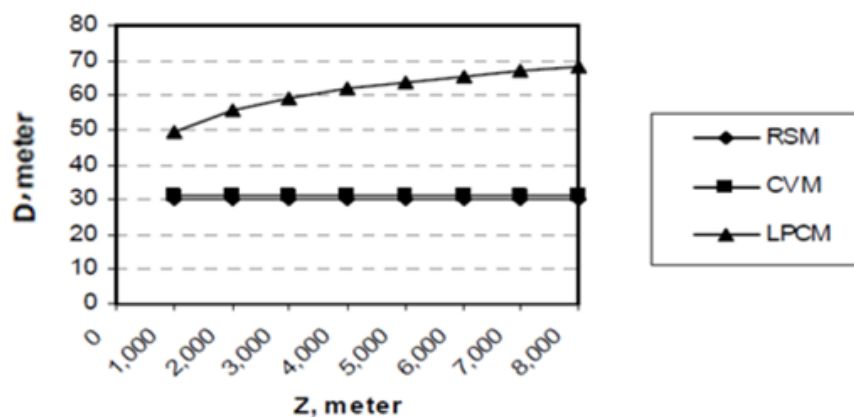
Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται η απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους RSM, CVM και LPCM συναρτήσεως του ύψους του αλεξικέραυνου, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το ύψος του καταρτιού του πλοίου. Το ρεύμα του κεραυνού είναι $I_p = 5.4 \text{ kA}$, το οποίο αντιστοιχεί σε επίπεδο προστασίας II, 97% αποτελεσματικότητα και τιμή του φορτίου ανά μονάδα μήκους 0.38 mC/m . Η απόσταση της βάσης του νέφους από το έδαφος είναι 5000m , ενώ το ύψος H επιλέχθηκε μεταξύ 10 και 50 μέτρων, αφού η πλειοψηφία των εμπορικών αλλά και των πολεμικών πλοίων έχουν ύψη που ανήκουν σε αυτό το εύρος τιμών.



Σχήμα 3.22: Απόσταση πρόσκρουσης για τις μεθόδους RCM, CVM και LPCM συναρτήσεως του ύψους αλεξικέραυνου H για $Z = 5000\text{m}$ και $I_p = 5.4 \text{ kA}$ [29]

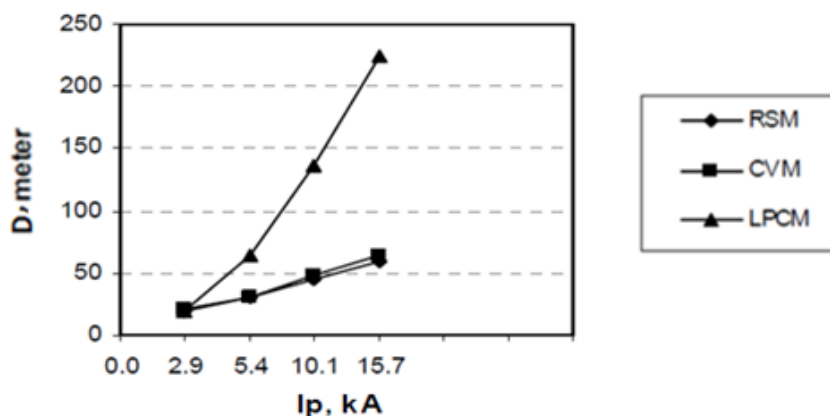
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι η μέθοδος LPCM δίνει απόσταση πρόσκρουσης περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Επίσης, παρατηρούμε ότι η απόσταση πρόσκρουσης της μεθόδου RSM είναι σταθερή, αφού σύμφωνα με την σχέση (3.3) εξαρτάται μόνο από το ρεύμα του κεραυνού, το οποίο είναι σταθερό. Σταθερή παραμένει και η απόσταση πρόσκρουσης που προκύπτει από την μέθοδο LPCM, αφού σύμφωνα με τις σχέσεις (3.17) και (3.18) εξαρτάται από το φορτίο q και το μήκος Z του κεραυνικού καναλιού, τα οποία επίσης είναι σταθερά.

Στο σχήμα 3.23 απεικονίζεται η απόσταση πρόσκρουσης των τριών μεθόδων που προαναφέραμε, αυτή τη φορά συναρτήσεως του μήκους Z του κεραυνικού καναλιού. Το ύψος του αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου του ύψους του καταρτιού είναι 30m ενώ το ρεύμα του κεραυνού και πάλι 5.4 kA . Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι η απόσταση πρόσκρουσης μεταβάλλεται με την αλλαγή του ύψους Z μόνο για τη μέθοδο LPCM, αφού μόνο αυτή λαμβάνει υπόψη την παράμετρο Z .



Σχήμα 3.23: Απόσταση πρόσκρουσης συναρτήσει του μήκους του κεραυνικού καναλιού για $H = 30\text{m}$ και $I_p = 5.4\text{ kA}$ [29]

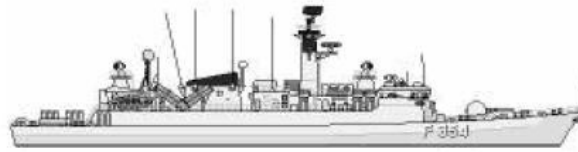
Στο σχήμα 3.24 βλέπουμε τη σχέση μεταξύ της απόστασης πρόσκρουσης και του ρεύματος κεραυνού για τις τρεις μεθόδους που μελετάμε για ύψος αλεξικέραυνου συμπεριλαμβανομένου του ύψους καταρτιού $H = 30\text{m}$ και $Z=5000\text{m}$. Οι τιμές του ρεύματος κεραυνού που επιλέχθηκαν αντιστοιχούν στα επίπεδα προστασίας I, II, III και IV με τιμές 2.9, 5.4, 10.1 και 15.7 kA αντίστοιχα.



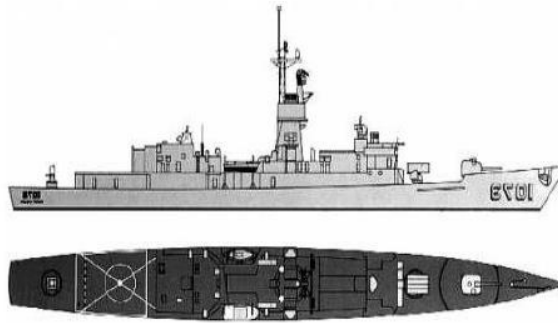
Σχήμα 3.24: Απόσταση πρόσκρουσης συναρτήσει του κεραυνικού ρεύματος για $H = 30\text{m}$ και $Z=5000\text{m}$ [29]

Από τα σχήματα 3.22, 3.23 και 3.24 παρατηρούμε ότι για όλα σχεδόν τα επίπεδα προστασίας η μέθοδος LPCM προβλέπει αισθητά αυξημένη απόσταση πρόσκρουσης σε σχέση με τις μεθόδους RCM και CVM. Η αύξηση αυτή συνεπάγεται την ανάγκη μειωμένου αριθμού αλεξικέραυνων για μια συγκεκριμένη περιοχή, γεγονός το οποίο έχει αντίκτυπο στο κόστος της αξιόπιστης αντικεραυνικής προστασίας ενός πλοίου.

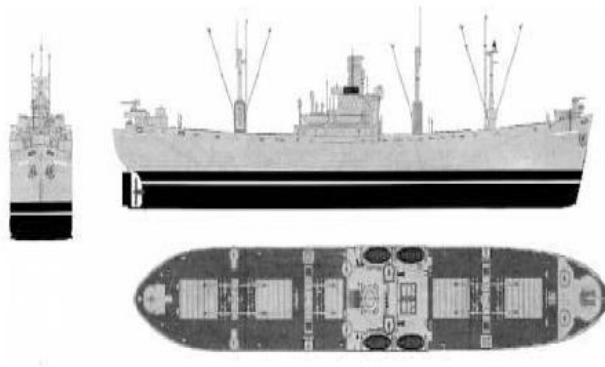
Παρακάτω παρατίθενται πέντε διαφορετικά είδη πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν η απόσταση πρόσκρουσης, η ακτίνα σύλληψης καθώς και ο αριθμός των αλεξικέραυνων, όπως αυτά προκύπτουν από τις μεθόδους RSM, CVM και LPCM.



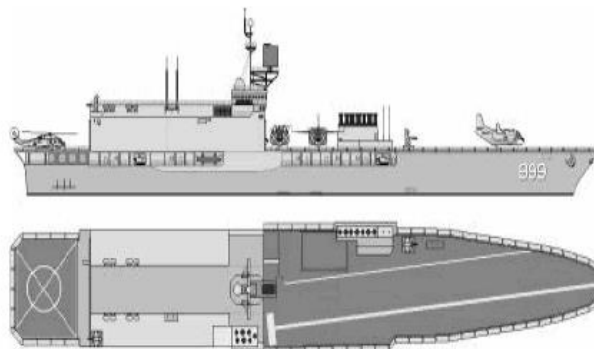
Σχήμα 3.25: Μεσαίο πολεμικό πλοίο [29]



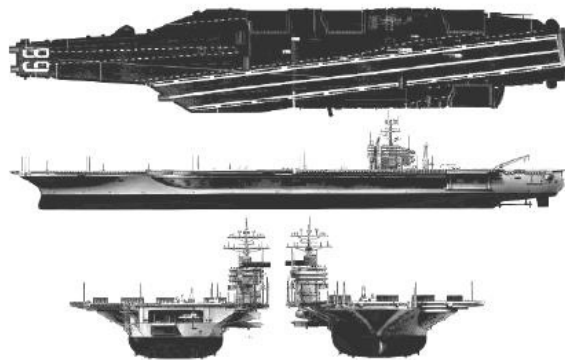
Σχήμα 3.26: Φρεγάτα [29]



Σχήμα 3.27: Εμπορικό πλοίο [29]

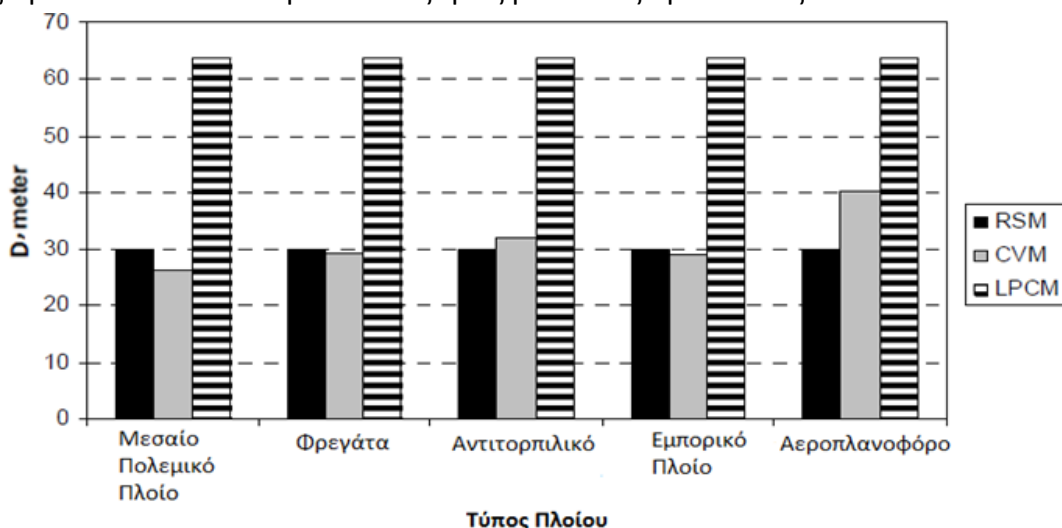


Σχήμα 3.28: Αντιτορπιλικό [29]



Σχήμα 3.29: Αεροπλανοφόρο [29]

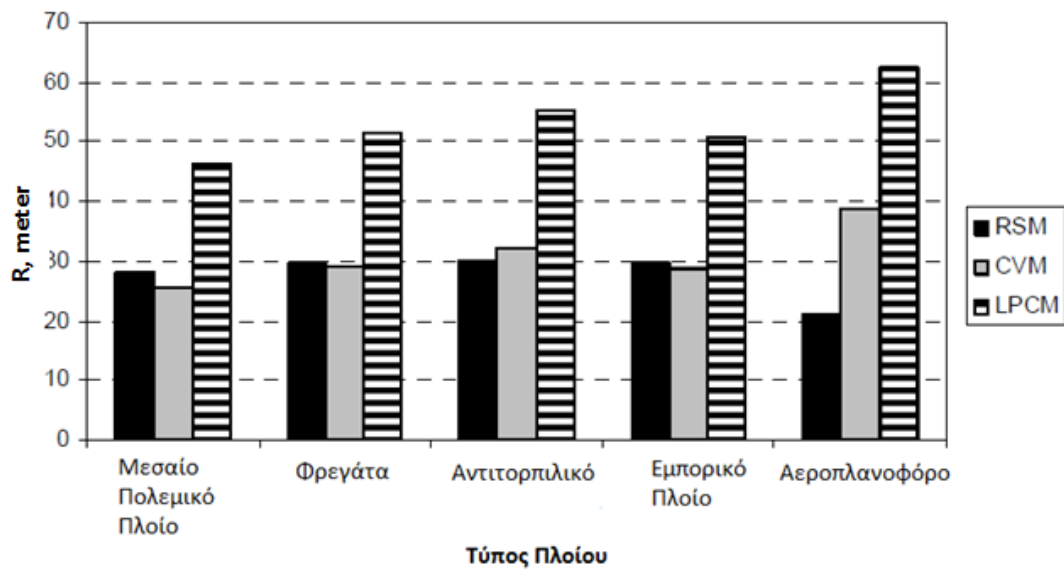
Στο παρακάτω σχήμα παρατίθεται η απόσταση πρόσκρουσης για κάθε είδος πλοίου όπως προκύπτει από κάθε μια από τις τρεις μεθόδους προστασίας:



Σχήμα 3.30: Απόσταση πρόσκρουσης για κάθε είδος πλοίου. $Z = 5000\text{m}$, $I_p = 5.4\text{ kA}$ [29]

Παρατηρούμε ότι στις μεθόδους RSM και CVM η απόσταση πρόσκρουσης είναι σχεδόν ίδια εκτός από την περίπτωση του αεροπλανοφόρου. Αυτό συμβαίνει επειδή η μέθοδος CVM λαμβάνει υπόψη και το ύψος του καταρτιού και το αεροπλανοφόρο έχει αισθητά μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με τους άλλους τέσσερις τύπους πλοίου. Επίσης η απόσταση πρόσκρουσης που προκύπτει από την μέθοδο LPCM είναι, για όλα τα πλοία που μελετήθηκαν, πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις δύο άλλες μεθόδους. Η διαφορά που προκύπτει κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30 μέτρων, η οποία είναι σημαντική αν αναλογιστούμε το μήκος των πλοίων. Τέλος, οι μέγιστες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των μεθόδων RSM και CVM για όλους σχεδόν τους τύπους πλοίων είναι περίπου $\pm 10\%$ ενώ τα αποτελέσματα της LPCM έχουν διαφορές που κυμαίνονται μεταξύ $\pm 60\%$ και $\pm 140\%$ τόσο με την RSM όσο και με την CVM.

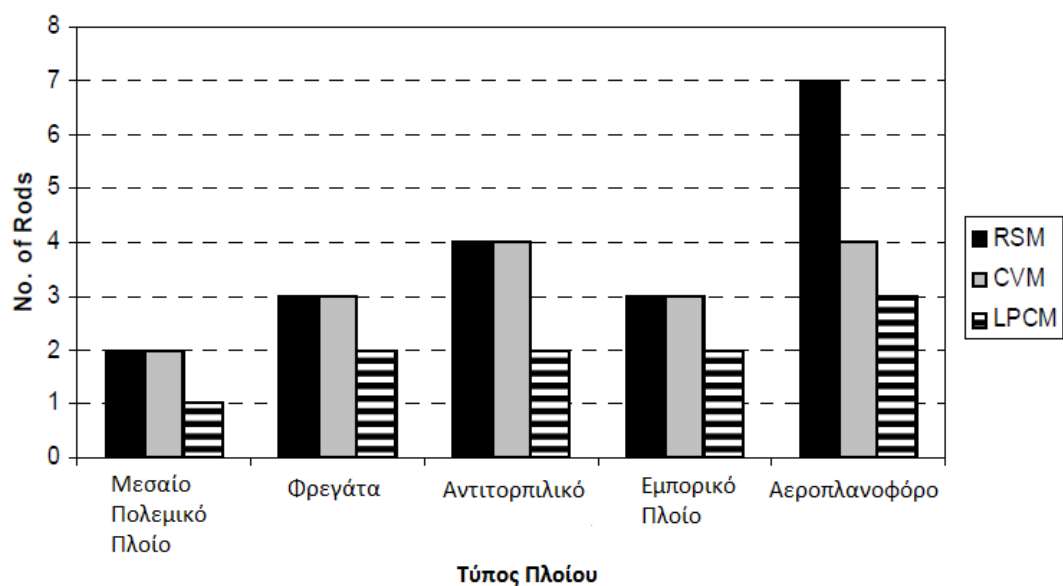
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα για την ακτίνα σύλληψης για κάθε είδος πλοίου όπως προκύπτει από καθεμιά από τις τρεις μεθόδους.



Σχήμα 3.31: Ακτίνα σύλληψης για κάθε είδος πλοίου. $Z = 5000\text{m}$, $I_p = 5.4\text{ kA}$ [29]

Και όσον αφορά την ακτίνα σύλληψης, οι τιμές τις που προκύπτουν από τις μεθόδους CVM και RSM είναι περίπου ίδιες, ενώ αυτές τις μεθόδου LPCM διαφέρουν σημαντικά. Οι μέγιστες διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων από CVM και RSM για όλους τους τύπους πλοίου εκτός από το αεροπλανοφόρο είναι $\pm 10\%$, ενώ τα αποτελέσματα από την LPCM έχουν διαφορές που κυμαίνονται μεταξύ $\pm 65\%$ και $\pm 200\%$ σε σύγκριση τόσο με RSM όσο και με CVM.

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ο αριθμός των αλεξικέραυνων που χρειάζονται για κάθε τύπο πλοίου σύμφωνα με κάθε μια από τις τρεις μεθόδους προστασίας:



Σχήμα 3.32: Αριθμός αλεξικέραυνων για κάθε είδος πλοίου. $Z = 5000\text{m}$, $I_p = 5.4\text{ kA}$ [29]

Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των αλεξικέραυνων είναι ο ίδιος για κάθε τύπο πλοίου εκτός από το αεροπλανοφόρο, εάν χρησιμοποιείται είτε η μέθοδος RSM είτε η CVM, ενώ μειώνεται στο μισό περίπου εάν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος LPCM. Συνεπώς, το κόστος της μεθόδου LPCM είναι αρκετά μειωμένο σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους.

3.2 Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων

3.2.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται διάφορα πρότυπα, οδηγίες και πλαίσια κανονισμών που αφορούν την αντικεραυνική προστασία σκαφών και πλοίων. Αρχικά, οι οδηγίες που θα αναλυθούν διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Τις νομοθετικές οδηγίες, οι οποίες είναι θεσπισμένες από την εκάστοτε Βουλή ή Κυβέρνηση και οι οποίες είναι υποχρεωτικές και προβλέπουν κυρώσεις για την μη εφαρμογή τους. Παρέχουν γενικές οδηγίες πάνω στο θέμα που πραγματεύονται και σπάνια το ρυθμίζουν αποτελεσματικά, καθιστώντας απαραίτητη την ύπαρξη των τεχνικών οδηγιών.
- Τις τεχνικές οδηγίες, οι οποίες είναι θεσπισμένες από εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς και περιλαμβάνουν κατασκευαστικά κριτήρια και κανόνες ως προς τη λειτουργικότητα και την ασφαλή χρήση των ηλεκτρικών συστημάτων. Είναι αρκετά λεπτομερείς και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν είναι υποχρεωτικές.

Οι οργανισμοί που ασχολούνται με θέματα ασφαλείας όσον αφορά σκάφη και εκδίδουν τεχνικές οδηγίες και έγγραφα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Τους εθνικούς οργανισμούς, κυριότεροι από τους οποίους είναι:
 - Οι εθνικοί νηογνώμονες, οι οποίοι αξιολογούν την συμμόρφωση των σκαφών με συγκεκριμένους κανονισμούς που αφορούν την ασφάλεια και την λειτουργικότητα τους. Οι νηογνώμονες δίνουν πιστοποιητικά για λογαριασμό της Σημείας που φέρει το σκάφος, πραγματοποιούν επιθεωρήσεις τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη διάρκεια ζωής του σκάφος αλλά δρουν και ως τεχνικοί σύμβουλοι.
 - Η ακτοφυλακή, η οποία ανήκει στα ένοπλα σώματα κάθε κράτους και έχει διευρυμένες αρμοδιότητες στα χωρικά και διεθνή ύδατα. Η ακτοφυλακή εκδίδει διευκρινιστικά έγγραφα που καλύπτουν τα κενά κατανόησης που μπορεί να προκύπτουν από ιεραρχικά ανώτερα έγγραφα.
 - Η Διεύθυνση Ηλεκτρικής Ασφάλειας, η οποία εκδίδει οδηγίες εντός του πλαισίου των παρόντων κανονισμών, με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικού επιπέδου ηλεκτρικής ασφάλειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Διεύθυνση Ηλεκτρικής Ασφάλειας Νορβηγίας.
 - Το ABYC (American Boat and Yacht Council), το οποίο είναι μια εθελοντική οργάνωση που εδράζει στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στόχος του είναι ο καθορισμός προτύπων και διαδικασιών για την κατασκευή σκαφών αναψυχής και σχετικού εξοπλισμού, ενώ η εφαρμογή των προτύπων του είναι εθελοντική.

- Τους διεθνείς οργανισμούς, μερικοί από τους οποίους είναι:
- Ο ISO (International Organization for Standardization), ο οποίος είναι οργανισμός τυποποίησης για όλους τους τομείς σε παγκόσμιο επίπεδο. Ασχολείται με την τυποποίηση στο τεχνικό και βιομηχανικό κομμάτι.
 - Η IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), η οποία αναπτύσσει πρότυπα εντός της κοινότητάς της, από επιτροπές οι οποίες λειτουργούν εθελοντικά. Η χρήση των προτύπων της IEEE είναι εντελώς προαιρετική και δεν υποκαθιστά ούτε αντικαθιστά την χρήση άλλων προτύπων. Τέλος, τα πρότυπα της IEEE υπόκεινται σε αλλαγές ανάλογα με την εξέλιξη της επιστήμης κάθε πέντε χρόνια.
 - Ο IEC (International Electrotechnical Commission) με έδρα τη Γενεύη, ο οποίος αποτελεί οργανισμό τυποποίησης με σκοπό την ενοποίηση όλων των εθνικών κανονισμών στον ηλεκτρονικό και ηλεκτρικό τομέα. Στον IEC συμμετέχει το σύνολο των βιομηχανικών κρατών μέσω τεχνικών επιτροπών, ενώ οι εκδόσεις του προορίζονται να γίνουν εναρμονισμένες σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται από τα πρότυπα του δεν είναι δεσμευτικές για τις εθνικές επιτροπές ωστόσο, υπάρχει δέσμευση για την εισαγωγή τους σε κάθε χώρα μέσω προσαρμογής των υφιστάμενων κανόνων ή μέσω αναφοράς σε αυτές.
 - Η CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization), η οποία αποτελείται από τις εθνικές επιτροπές τυποποίησης των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς και από άλλες χώρες όπως η Νορβηγία και η Ελβετία. Σκοπός της είναι η εναρμόνιση των νομοθεσιών των κρατών, ώστε να εξαλειφθούν πιθανά τεχνικά εμπόδια στο ελεύθερο εμπόριο μεταξύ τους. Η CENELEC εκδίδει δύο διαφορετικών κατηγοριών οδηγίες: α) Τα κείμενα εναρμόνισης (Harmonization Documents) των οποίων το τεχνικό περιεχόμενο θα πρέπει να εισαχθεί σε εθνικά πρότυπα σε προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και β) τα ευρωπαϊκά πρότυπα (European Norms) τα οποία είναι έγγραφα που μεταφράζονται στο σύνολο τους στην εθνική γλώσσα και αποτελούν εθνικό πρότυπο για όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Τα πρότυπα αυτά υιοθετούνται από την εκάστοτε χώρα μέσω των διαδικασιών που ορίζει η νομοθεσία της.
 - Ο IMO (International Maritime Organization), ο οποίος αποτελεί υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών που ειδικεύεται στον ναυτικό τομέα και που έχει σκοπό την διασφάλιση της ασφάλειας στη θάλασσα. Είναι χωρισμένος σε επιτροπές με κυριότερες την MSC (Maritime Safety Committee), που ασχολείται με την προστασία της ανθρώπινης ζωής στη θάλασσα, και την MEPC (Marine Environment Committee), που ασχολείται με την προστασία του περιβάλλοντος από δραστηριότητες που σχετίζονται με την ναυτιλία.

Στα επόμενα κεφάλαια θα παρατεθούν κάποια πρότυπα σχετικά με την αντικεραυνική προστασία διαφόρων τύπων σκαφών. Τα πρότυπα που θα ασχοληθούμε

προέρχονται τόσο από εθνικούς όσο και από διεθνείς οργανισμούς και παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

	Πρότυπα
Διεθνείς Οργανισμοί	ISO 10134 [30]
	IEC 60092-507 [31]
Εθνικοί Οργανισμοί	ABYC TE-4 [32]
	Bureau Veritas NR 566 [33]
	DEF STAN 02-516 [34]

Πίνακας 3.5: Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας που θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία.

3.2.2 ISO 10134: Μικρά σκάφη, Ηλεκτρικές συσκευές, Συστήματα Αντικεραυνικής Προστασίας

Το συγκεκριμένο διεθνές πρότυπο παρέχει οδηγίες για το σχεδιασμό, την κατασκευή και την εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας σε μικρά σκάφη με μήκος μέχρι 24 μέτρα.

Το πρότυπο αυτό λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι η πιθανότητα κεραυνικού πλήγματος διαφέρει ανάλογα με την γεωγραφική τοποθεσία και την εποχή του χρόνου αλλά και το γεγονός ότι αν υπάρξουν οι κατάλληλες προϋποθέσεις που επιτρέπουν την δημιουργία εκκένωσης, τότε αυτή είναι αναπόφευκτη. Το σκάφος μπορεί να πληγεί από κεραυνό είτε στην ανοιχτή θάλασσα είτε σε προβλήτα, ενώ, σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, η παρουσία συστήματος αντικεραυνικής προστασίας δεν μπορεί να εγγυηθεί πλήρη προστασία ως προς τις βλάβες εξοπλισμού ή τους επιβάτες.

Οι γενικές απαιτήσεις του προτύπου είναι οι εξής:

- Η προστασία τόσο των ανθρώπων όσο και του σκάφους από κεραυνό εξαρτάται από τον σχεδιασμό και την συντήρηση των εξαρτημάτων αλλά και από την συμπεριφορά του προσωπικού του σκάφους. Οι βασικές οδηγίες του προτύπου πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν στο σχεδιασμό και την εγκατάσταση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Ωστόσο, οι οδηγίες αυτές δεν δύναται να καλύψουν όλες τις επιμέρους περιπτώσεις.
- Το συνολικό κύκλωμα της αντικεραυνικής προστασίας, δηλαδή η διάταξη από την κορυφή του αλεξικέραυνου μέχρι την πλάκα γείωσης, πρέπει να έχει μηχανική ικανότητα και αγωγιμότητα τουλάχιστον ίση με αυτήν ενός αγωγού χαλκού 21mm². Επίσης, η διαδρομή του αγωγού προς τη γη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ευθεία. Επιπλέον συστάσεις μπορούν να βρεθούν στο άρθρο IEC 60092-352.

- Αν υπάρχουν μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα εντός ακτίνας 2m από οποιοδήποτε αγωγό γείωσης αντικεραυνικής προστασίας, υπάρχει ο κίνδυνος να αναπτυχθούν παράπλευρες εκκενώσεις ή σπίθες από τον αγωγό γείωσης προς το κοντινότερο σημείο του μεταλλικού αντικειμένου. Προς αποφυγή ζημιών από τις εκκενώσεις αυτές, πρέπει να τοποθετηθεί συνδετικός αγωγός αντικεραυνικής ζεύξης τουλάχιστον ισοδύναμος με αγωγό 13mm² χαλκού. Επιπλέον συστάσεις μπορούν να βρεθούν στο άρθρο IEC 60092-352.
- Σε περίπτωση που τα μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα που αναφέρθηκαν παραπάνω, και δεν αποτελούν μέρος της ηλεκτρικής εγκατάστασης του σκάφους, δεν δύναται να συνδεθούν με τον αγωγό γείωσης ή με τον αγωγό ζεύξης, μπορούν να γειωθούν απευθείας στην πλάκα γείωσης της αντικεραυνικής προστασίας.

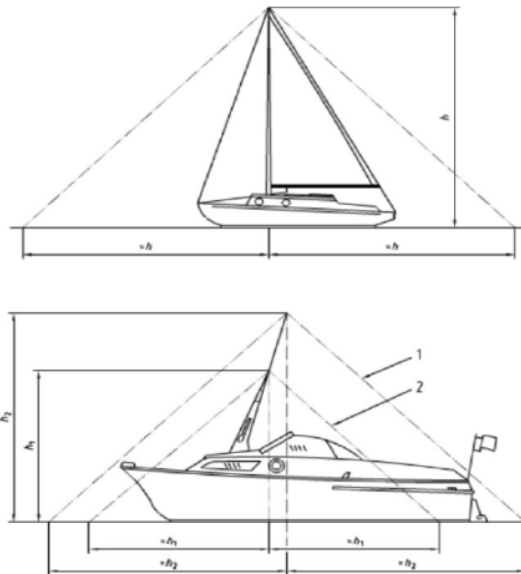
Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο αυτό δίνει οδηγίες επάνω σε επιμέρους τομείς. Οι οδηγίες αυτές δίνονται αναλυτικά παρακάτω:

Όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιείται στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, το πρότυπο προβλέπει ότι πρέπει να είναι ανθεκτικό στη διάβρωση. Αν δεν μπορεί να αποφευχθεί η χρήση διασταύρωσης ανόμοιων μετάλλων, τότε οι επιπτώσεις της διάβρωσης μπορούν να περιοριστούν είτε με την χρήση κατάλληλων επιμεταλλώσεων είτε με ειδικές συνδέσεις που είναι γαλβανικά συμβατές και με τα δύο μέταλλα. Επίσης, για τους αγωγούς καλωδίων, η οδηγία ορίζει ότι το μέγεθος του κάθε νήματος του γυμνού καλωδίου χαλκού πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.71mm² και ότι τα μονωμένα καλώδια χαλκού πρέπει να έχουν τουλάχιστον 19 νήματα. Τέλος, το πάχος κάθε μεταλλικής λωρίδας πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 1mm.

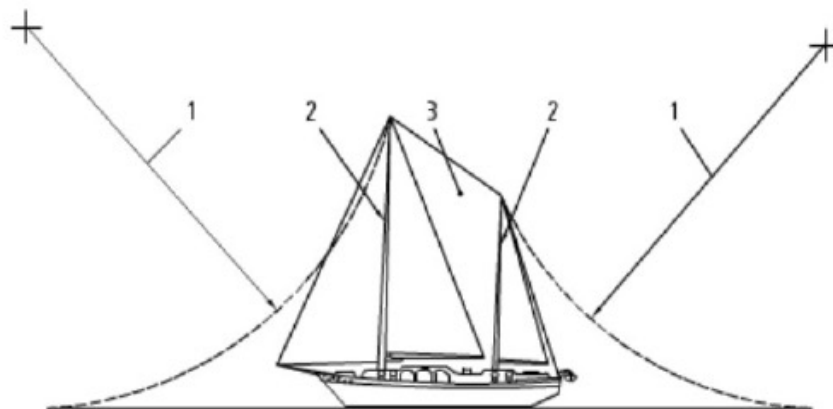
Στη συνέχεια, όσον αφορά την εγκατάσταση, προβλέπεται ότι οι αγωγοί αντικεραυνικής προστασίας που βρίσκονται κοντά στην καλωδίωση του σκάφους δεν πρέπει να δρομολογούνται παράλληλα με αυτήν, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι παράπλευρες εκκενώσεις και να ελαχιστοποιηθεί η επαγωγή υψηλής τάσης στην καλωδίωση του σκάφους. Επίσης, οι αγωγίμες συνδέσεις πρέπει να φτιάχνονται και να υποστηρίζονται έτσι ώστε να μην ζημιώνουν τους αγωγούς και να εξασφαλίζουν αγωγιμότητα ίση με αυτή του αγωγού.

Για το ύψος του καταρτιού προβλέπεται ότι αν αυτό δεν ξεπερνά τα 15m από το επίπεδο της θάλασσας, η ακτίνα βάσης είναι σχεδόν ίση με το ύψος h του καταρτιού (Σχήμα 3.33), ενώ για ύψη άνω των 15m, η ζώνη προστασίας εξαρτάται από την απόσταση πρόσκρουσης. Στην περίπτωση αυτή η ζώνη προστασίας καθορίζεται από ένα κυκλικό τόξο, η ακτίνα του οποίου είναι η απόσταση πρόσκρουσης. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.33, το τόξο περνά από την κορυφή του καταρτιού και καταλήγει στην θάλασσα. Εάν έχουμε περισσότερα του ενός κατάρτια, η ζώνη προστασίας καθορίζεται από τόξα σε όλα τα κατάρτια. Όταν το μήκος του σκάφους είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα προστασίας ενός καταρτιού, τότε πρέπει να ληφθούν πρόσθετα μέτρα αντικεραυνικής προστασίας

ώστε να δημιουργηθούν αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες προστασίας. Τέλος, η αύξηση του ύψους του καταρτιού πέραν της απόστασης πρόσκρουσης δεν αυξάνει και τη ζώνη προστασίας.



Σχήμα 3.33: Σκάφη με κατάρτι ύψους από το νερό μικρότερο των 15 μέτρων



Σχήμα 3.34: Σκάφος με κατάρτια ύψους από το νερό μεγαλύτερου των 15 μέτρων.

Αν τώρα το κατάρτι είναι κατασκευασμένο από μη αγώγιμο υλικό, ο σχετικός αγωγός γείωσης θα πρέπει:

- Να είναι όσο το δυνατόν ευθύς,
- Να είναι ασφαλώς προσδεμένος στο κατάρτι,
- Να εκτείνεται τουλάχιστον για 150 χιλιοστά πάνω από το κατάρτι,
- Να καταλήγει σε τερματικό αέρα και
- Να οδηγείται όσο πιο άμεσα γίνεται στη γείωση όπως περιγράφεται προηγουμένως

Επίσης, σύμφωνα με το πρότυπο, αν η κεραία τηλεπικοινωνιών καλύπτει τις παραπάνω γενικές απαιτήσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κατάρτι αντικεραυνικής προστασίας ενώ αν δεν υπάρχει μόνιμο κατάρτι το σκάφος μπορεί να προστατευτεί μέσω

ενός προσωρινού αντικεραυνικού καταρτιού που μπορεί να αναρτηθεί όταν παρουσιάζονται συνθήκες ικανές για την πρόπτωση κεραυνών.

Στη συνέχεια, όσον αφορά τη διασύνδεση διαφόρων μεταλλικών που βρίσκονται στο σκάφος, το πρότυπο επιβάλλει ότι οι μεταλλικές μάζες που βρίσκονται μόνιμα εγκατεστημένες στο σκάφος και η λειτουργία των οποίων δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη γείωση, πρέπει να συνδεθούν στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Σκοπός της διασύνδεσης αυτής είναι η αποτροπή βλάβης από πλευρικές εκκενώσεις. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα μπλοκ της μηχανής προτιμάται να συνδέονται απευθείας στην πλάκα γείωσης και όχι σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο του αγωγού αντικεραυνικής προστασίας αφού, με αυτόν τον τρόπο, ελαχιστοποιείται η ροή ρεύματος κεραυνικής αποφόρτισης μέσω των στοιχείων του κινητήρα.
- Κάθε μέταλλο που βρίσκεται εξ' ολοκλήρου στο εξωτερικό του σκάφους (για παράδειγμα οριζόντιες κουπαστές, κουπαστές σε καμπίνες, καμινάδες, ηλεκτρικά βαρούλκα, μεταλλικές μπουκαπόρτες κλπ) πρέπει να συνδέεται ηλεκτρικώς στο σύστημα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας του σκάφους.
- Κάθε μέταλλο που βρίσκεται εξ' ολοκλήρου στο εσωτερικό του σκάφους και το οποίο σε οποιοδήποτε σημείο του βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη των 2 μέτρων από αγωγό του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, πρέπει να συνδεθεί ηλεκτρικά με τον αγωγό αυτόν. Τέτοια αντικείμενα μπορεί να είναι μηχανές, δεξαμενές καυσίμων ή ράβδοι του μηχανισμού ελέγχου πλοήγησης. Τα μικρά μεταλλικά αντικείμενα όπως πυξίδες, ρολόγια κλπ δεν κρίνεται απαραίτητο να γειωθούν.
- Κάθε μέταλλο που προεξέχει από οροφή καμπίνας, κατάστρωμα ή πλευρικά του σκάφους πρέπει να συνδεθεί στον πλησιέστερο αγωγό αντικεραυνικής προστασίας στο σημείο που το μέταλλο εξέρχεται από το σκάφος και πρέπει να γειώνεται στο χαμηλότερο ή στο πιο ακραίο σημείο του εντός του σκάφους.
- Οι μεταλλικές βαλβίδες που επιτρέπουν την είσοδο και την έξοδο του νερού από και προς το σκάφος, αν είναι συνδεδεμένες στο σύστημα γείωσης αντικεραυνικής προστασίας, δεν πρέπει να συνδεθούν στο αγωγό γείωσης, αλλά πρέπει να συνδεθούν με αγωγούς ζεύξης στη λωρίδα ή την πλάκα γείωσης.

Ως κεραυνική γείωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία οποιαδήποτε μεταλλική επιφάνεια βυθισμένη στο νερό υπό οποιοσδήποτε συνθήκες που να έχει εμβαδό τουλάχιστον 0.1 m^2 . Πρέπει να αποτελείται είτε από μια εξωτερική πλάκα γείωσης που να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη βάση του καταρτιού αντικεραυνικής προστασίας, είτε από μία εξωτερική λωρίδα γείωσης από χαλκό, κράμα χαλκού ή αλουμίνιο που να έχει ελάχιστο πάχος 5mm και ελάχιστο πλάτος 19 mm. Οι ακμές της εξωτερικής πλάκας ή λωρίδας γείωσης πρέπει να είναι αιχμηρές και εκτεθειμένες και όχι στεγανοποιημένες και στρογγυλεμένες. Επίσης, αν χρησιμοποιηθεί λωρίδα γείωσης, αυτή θα πρέπει να εκτείνεται από ένα σημείο που βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη βάση του αντικεραυνικού καταρτιού προς την πρύμνη, όπου θα μπορεί να γίνει άμεση σύνδεση

με τη μηχανή του σκάφους. Οι μεταλλικές επιφάνειες του πηδαλίου, τα υποστηρίγματα, οι μόνιμες ή αφαιρούμενες καρίνες και η πλάκα γείωσης των ραδιοπομπών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εξωτερική πλάκα γείωσης αν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις που περιγράψαμε παραπάνω, ενώ ένας μεταλλικός σκελετός σκάφους αποτελεί από μόνος του επαρκή πλάκα γείωσης.

Τέλος, για τα σκάφη με μεταλλικό σκελετό, το πρότυπο ορίζει ότι αν υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του σκελετού και του αντικεραυνικού καταρτιού δεν χρειάζεται καμία παραπάνω αντικεραυνική προστασία. Για τα ιστιοφόρα με μη μεταλλικό σκελετό, μεταλλικές βάσεις, καλύμματα, μεταλλικά κατάρτια και ράγες πανιών πάνω σε μη μεταλλικά κατάρτια πρέπει να γειώνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις που αναλύθηκαν παραπάνω. Τα μηχανοκίνητα σκάφη με μη μεταλλικό σκελετό, μπορούν να είναι επαρκώς προστατευμένα από μια γειωμένη κεραία τηλεπικοινωνιών, έναν γειωμένο εκπομπό ή άλλο γειωμένο αντικεραυνικό κατάρτι, αν οι προδιαγραφές του έρχονται σε συμφωνία με τις απαιτήσεις του προτύπου.

3.2.3 IEC 60092-507

Στο κεφάλαιο 13.8 του προτύπου IEC 60092-507 περιγράφεται η αντικεραυνική προστασία σκαφών αναψυχής με μήκος μεταξύ 2 μέτρων και 50 μέτρων ή σκαφών με χωρητικότητα μικρότερη από 500 κόρους ολικής χωρητικότητας (grt). Οι προτάσεις του προτύπου αυτού είναι:

- Τα σκάφη με μη μεταλλικό σκελετό ή με μη μεταλλικά κατάρτια, αν πρόκειται για ιστιοφόρα, πρέπει να είναι εξοπλισμένα με αντικεραυνική προστασία.
- Οι αγωγοί καθόδου της αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από χαλκό και η διατομή τους να είναι τουλάχιστον 70mm^2 . Πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε μία επαφή από χαλκό με διάμετρο τουλάχιστον 12mm^2 που θα πρέπει να προεξέχει από την κορυφή του καταρτιού για τουλάχιστον 300 mm.
- Το κάτω άκρο του καλωδίου θα πρέπει να συνδέεται στη γείωση.
- Οι αγωγοί καθόδου του αλεξικέραυνου πρέπει να βρίσκονται έξω από το σκάφος και η διαδρομή τους θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθεία.
- Οι συνδέσεις που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν είναι μόνο οι βιδωτές, οι καρφωμένες ή οι συγκολλημένες.
- Εφόσον το κύτος είναι μεταλλικό, το κάτω άκρο των αγωγών καθόδου πρέπει να είναι γειωμένο σε αυτό.
- Εφόσον το κύτος είναι μη μεταλλικό, το κάτω άκρο των αγωγών καθόδου θα πρέπει να συνδέεται με ένα σημείο γείωσης από χαλκό ή άλλο αγώγιμο υλικό. Η επιφάνεια του πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.25m^2 και να βρίσκεται στο έξω μέρος του κύτους και κάτω από την ίσαλο γραμμή, έτσι ώστε να παραμένει βυθισμένο υπό όλες τις συνθήκες κλίσης του κύτους.

- Το σημείο γείωσης πρέπει να υπάρχει και να είναι διαχωρισμένο από την πλάκα γείωσης που χρησιμοποιείται για τη γείωση του συστήματος ισχύος ή του συστήματος σύνδεσης στη γείωση.

3.2.4 ABYC TE-4

Το τεχνικό έγγραφο αυτό εφαρμόζεται σε ιστιοφόρα και ταχύπλοα εφόσον υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Σύμφωνα με αυτό, η προστασία των ανθρώπων και του σκάφους από κεραυνό εξαρτάται από έναν συνδυασμό του σχεδιασμού και της συντήρησης του εξοπλισμού. Οι βασικοί του κανόνες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό και την εγκατάσταση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου εύρους του δομικού σχεδιασμού των πλοίων και της απρόβλεπτης φύσης του κεραυνού, δεν μπορούν να γίνουν προτάσεις που να καλύπτουν όλες τις περιπτώσεις.

Το πρότυπο παρέχει αρχικά κάποιες γενικές πληροφορίες για τους αγωγούς, το τερματικό αέρα και τη διασύνδεση, οι οποίες είναι:

Αγωγοί:

- Οι κύριοι αγωγοί πρέπει να έχουν αντίσταση το πολύ ίση με την αντίσταση χάλκινου αγωγού διατομής 21.2mm^2 και ίδιου μήκους.
- Οι δευτερεύοντες αγωγοί πρέπει να έχουν αντίσταση το πολύ ίση με την αντίσταση χάλκινου αγωγού διατομής 13.3mm^2 και ίδιου μήκους.
- Για να εξασφαλιστεί το αγωγίμο μονοπάτι μεταξύ τερματικού αέρα και νερού για την επαρκή εκφόρτιση κεραυνικών ρευμάτων, το σύστημα πρέπει να αποτελείται από αγωγούς που είναι κάθετοι και ευθείοι.
- Οι αγωγοί πρέπει να είναι από επικασσιτερωμένο πολύκλωνο χαλκό Τύπου II για αγωγό μικρότερο από 21.2mm^2 και από πολύκλωνο χαλκό τύπου III για αγωγό μεγαλύτερο από 21.2mm^2 .
- Ο κύριος αγωγός δεν πρέπει να αποτελείται από χάλκινη κορδέλα.
- Αν ως δευτερεύοντες αγωγοί χρησιμοποιούνται κορδέλες ή λωρίδες, αυτές δεν πρέπει να έχουν μεγαλύτερη αντίσταση από το αντίστοιχο σύρμα και πρέπει να έχουν ελάχιστο πάχος 0.8mm .
- Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται χάλκινη θωράκιση.
- Αν χρησιμοποιηθούν τελικοί υποδοχείς και συνδέσεις από πλέγμα ανοξείδωτου χάλυβα αυξάνεται η πιθανότητα υψηλής αντίστασης. Το πλέγμα δεν παρέχει αξιόπιστη διαδρομή προς τη γη.
- Αλουμινένιο κατάρτι επιφάνειας τουλάχιστον 100mm^2 θεωρείται επαρκής αγωγός.

Τερματικό αέρα:

- Το τερματικό αέρα πρέπει να έχει διάμετρο τουλάχιστον 9.5mm όταν είναι χάλκινο ή 12.7mm όταν είναι αλουμινένιο και πρέπει να εκτείνεται για τουλάχιστον 152mm πάνω από την κορυφή του καταρτιού αντικεραυνικής προστασίας, με την πλευρά που είναι προς τα σύννεφα να είναι στρογγυλεμένη.

- Τα μέσα σταθεροποίησης του τερματικού αέρα πρέπει να έχουν αντίσταση το πολύ ίση με αυτήν του κύριου κεραυνικού αγωγού.
- Όταν στο σκάφος υπάρχουν μη γειωμένα ή μη αγώγιμα αντικείμενα που προεξέχουν από τα αντικεραυνικά κατάρτια, αυτά μπορούν να προστατευτούν από έναν αγωγό γείωσης που θα καταλήγει σε τερματικό αέρα πάνω από το εκάστοτε αντικείμενο.
- Οι κεραίες τύπου "μαστίγιο" δεν πρέπει να καθλώνονται κατά τη διάρκεια καταιγίδας αν έχουν σχεδιαστεί ως μέρος του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας.

Διασύνδεση:

- Όλα τα μεταλλικά περιβλήματα και οι βάσεις πρέπει να συνδέονται απευθείας στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με τουλάχιστον δευτερεύοντα αγωγό.
- Μεγάλα μεταλλικά αντικείμενα όπως δεξαμενές, μηχανές κλπ εντός ακτίνας 1.8m από κάθε κεραυνικό αγωγό, πρέπει να συνδεθούν στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με δευτερεύοντα αγωγό.
- Αν το πλαίσιο ηλεκτρικών συσκευών είναι εσωτερικά συνδεδεμένο στο DC αρνητικό και το αρνητικό καλώδιο είναι μικρότερο από 13.3mm^2 , τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως δευτερεύων κεραυνικός αγωγός.
- Αν το πλαίσιο ηλεκτρικών συσκευών δεν είναι εσωτερικά συνδεδεμένο στο DC αρνητικό και το αρνητικό καλώδιο είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 13.3mm^2 , τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί δευτερεύων κεραυνικός αγωγός.
- Επιπρόσθετα στα μεγάλα μεταλλικά σώματα του σκάφος μπορεί να περιλαμβάνονται πηδάκια πλοήγησης, οριζόντια κάγκελα, κουπαστές, καμινάδες, ηλεκτρικά βίντσια, κρεμαστάρια λέμβων, μεταλλικές καταπακτές, μεταλλικές καμάρες, πυργίσκοι, μηχανές, δεξαμενές νερού και καυσίμων και βάσεις τιμονιού.
- Μικρά μεταλλικά αντικείμενα όπως πυξίδες, ρολόγια, κουτιά πρώτων βοηθειών κλπ δεν είναι σκόπιμο να γειωθούν.
- Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να είναι ανθεκτικά στη διάβρωση. Πρέπει να αποφεύγεται η χρήση συνδυασμού μετάλλων που σχηματίζουν ζημιογόνα γαλβανικά ζεύγη.
- Στην περιπτώσεις που η αποφυγή χρήσης συνένωσης ανόμοιων μετάλλων δεν είναι πρακτική, το φαινόμενο της διάβρωσης μπορεί να μειωθεί με την χρήση ειδικής επιψευδαργύρωσης ή ειδικών φινιρίσματος από ανοξείδωτο ατσάλι που χρησιμοποιούνται μεταξύ αλουμινίου και κράματος χαλκού. Επίσης, στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο χαλκός, ο οποίος πρέπει να είναι του τύπου που χρησιμοποιείται για συνήθεις εμπορικές ηλεκτρικές χρήσεις, με αγωγιμότητα 98% όταν δεν είναι πυρωμένος.
- Όλες οι αγώγιμες συνδέσεις πρέπει να γίνονται και να υποστηρίζονται σύμφωνα με το άρθρο E-11 του κανονισμού ABYC και πρέπει να έχουν αντίσταση μικρότερη ή ίση με τους χρησιμοποιούμενους αγωγούς. Δεν πρέπει να χρησιμοποιείται κόλλα μετάλλων.
- Οι καμπύλες του κύριου αγωγού δεν πρέπει να σχηματίζουν γωνία μεγαλύτερη των 90° και πρέπει να έχουν ακτίνα τουλάχιστον 20.3cm.

Στη συνέχεια, για τη ζώνη προστασίας, το πρότυπο προβλέπει ότι ένας γειωμένος αγωγός ή αντικεραυνικό κατάρτι ύψους έως 30m έλκει το κεραυνικό πλήγμα το οποίο θα έπεφτε εντός κωνικού χώρου, δηλαδή η ζώνη προστασίας προκύπτει από τη μέθοδο του κώνου προστασίας. Η κορυφή του χώρου που προστατεύεται είναι του ανώτερο σημείο του αγωγού ή του καταρτιού και η βάση του είναι ένας κύκλος επάνω στην επιφάνεια του νερού με ακτίνα ίση με το ύψος του αγωγού ή του καταρτιού. Το τερματικό αέρα πρέπει να τοποθετηθεί έτσι ώστε η ζώνη προστασίας να καλύπτει όλο το σκάφος ενώ, όταν η χρήση ενός τερματικού δεν είναι αρκετή, πρέπει να προστεθούν περισσότερα μέσα αντικεραυνικής προστασίας που να δημιουργούν αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες προστασίας, οι οποίες τελικά εμπεριέχουν όλο το σκάφος. Όταν χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός τερματικά αέρα η ζώνη προστασίας μπορεί να προσδιοριστεί γραφικά με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας, ενώ το να αυξήσουμε το ύψος του καταρτιού πάνω από 30m δεν αυξάνει τον όγκο της περιοχής προστασίας.

Αν τώρα το κατάρτι αποτελείται από μη μεταλλικό υλικό, ο αγωγός γείωσης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθύς, 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. Αν χρησιμοποιείται εκπομπός ως αντικεραυνικό κατάρτι, πρέπει να έχει αγωγιμότητα το πολύ ίση με την αντίσταση του κύριου αγωγού. Αν χρησιμοποιείται κατάρτι από ανθρακονήματα, παρότι είναι μερικώς αγωγίμα, θεωρούμε ότι είναι μη αγωγίμα (μη μεταλλικά) για τους σκοπούς αυτού του εγγράφου και συμπεριφερόμαστε όπως περιγράψαμε παραπάνω.

Όσον αφορά το τερματικό κεραυνικής γείωσης ενός σκάφους, πρέπει να αποτελείται από μια μεταλλική επιφάνεια (χαλκός, κράμα χαλκού, ανοξείδωτο ατσάλι, αλουμίνιο ή μόλυβδος) πάχους 5mm, που είναι σε επαφή με το νερό και έχει εμβαδό τουλάχιστον 0.1mm². Πρέπει επίσης να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο ευθεία κάτω από το αντικεραυνικό κατάρτι έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι οριζόντιες διαρροές του κύριου αγωγού. Οι προπέλες, οι άξονες, τα πηδάλια και οι άλλες μεταλλικές επιφάνειες μπορούν να χρησιμοποιηθούν 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. Αντίστοιχα, τα πηδάλια, τα αντίβαρα της καρίνας, οι εξισορροπητές ή κάθε μεταλλική προσθήκη με μια τουλάχιστον εξωτερική όψη μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματική γείωση, εφόσον τηρούν τις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν. Αν το πηδάλιο χρησιμοποιείται ως γείωση, ο κεραυνικός αγωγός πρέπει να συνδέεται απευθείας στον άξονα του πηδαλίου.

Επιπρόσθετα, το πρότυπο δίνει και τις παρακάτω οδηγίες σχετικά με το τερματικό κεραυνικής γείωσης:

- Τα σκάφη που χρησιμοποιούν γειωτική πλάκα ή λωρίδα τοποθετημένη μπροστά, θα πρέπει να γειώσουν τα όποια μεταλλικά αντικείμενα βρίσκονται πίσω στον αρνητικό ακροδέκτη της μηχανής σε ένα μεταλλικό πηδάλιο ή σε άλλο εξωτερικό αντικείμενο στην πρύμνη του σκάφους. Αυτές οι γειώσεις θα πρέπει να διασυνδεθούν με την πλάκα

ή λωρίδα γείωσης στην πλώρη. Σκοπός της συνδεσμολογίας αυτής είναι η αποφυγή οριζόντιας διαδρομής των αγωγών γείωσης.

- Η πλάκα ή λωρίδα πρέπει να είναι τοποθετημένη έτσι ώστε να είναι βυθισμένη υπό οποιοσδήποτε συνθήκες, ενώ όλες οι συνδέσεις στη λωρίδα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθείες και σύντομες.
- Η άκρη της λωρίδας γείωσης που βρίσκεται στην πρύμνη πρέπει να συνδέεται απευθείας στο αρνητικό τερματικό της μηχανής. Έτσι, παρέχεται μονοπάτι για οποιοδήποτε διαφυγόν ρεύμα DC που μπορεί να προκύψει ανάμεσα στις βίδες που διαπερνούν τον σκελετό και τη λωρίδα γείωσης.
- Οι αιχμές της εξωτερικής πλάκας ή λωρίδας γείωσης πρέπει να είναι αιχμηρές, εκτεθειμένες και όχι υδατοστεγώς σφραγισμένες ή στρογγυλεμένες στην περιοχή συγκόλλησης.
- Κάθε καρφί που διαπερνά τον σκελετό του πλοίου και που συνδέει τον κεραυνικό αγωγό στο τερματικό γείωσης πρέπει να έχει αγωγιμότητα όχι μικρότερη από αυτήν του κύριου αγωγού.

Υπάρχει επίσης πρόβλεψη για τις βαλβίδες εισροής-εκροής νερού και τα διαμπερή αποσπώμενα μέρη του σκελετού του σκάφους, τα οποία αν συνδέονται με τη γείωση του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, πρέπει να συνδέονται στην πλάκα ή λωρίδα γείωσης με τουλάχιστον δευτερεύοντα αγωγό.

Για τα σκάφη με μεταλλικό σκελετό, αν εξασφαλίζεται η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του μεταλλικού σκελετού και του καταρτιού ή άλλης μεταλλικής υπερδομής κατάλληλου ύψους, τότε δεν χρειάζεται καμία παραπάνω πρόβλεψη αντικεραυνικής προστασίας. Τα σκάφη που δεν φέρουν μόνιμο κατάρτι πρέπει να προστατευτούν με προσωρινό μόνιμο αντικεραυνικό κατάρτι, το οποίο πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο γεωμετρικό κέντρο του σκάφους. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, μπορεί να τοποθετηθεί αλλού με την προϋπόθεση η ζώνη προστασίας να καλύπτει ολόκληρο το σκάφος. Πρέπει να είναι τοποθετημένο έτσι ώστε οι επιβαίνοντες του σκάφους να μπορούν να μην έρχονται σε άμεση επαφή με αυτό και θα πρέπει να είναι μεταλλικό ή να φέρει κύριο καθοδικό οδηγό. Τέλος, θα πρέπει να συνδέεται με βυθισμένη πλάκα γείωσης εμβαδού τουλάχιστον 0.1m^2 .

Το πρότυπο κλείνει δίνοντας τις εξής οδηγίες σχετικά με την συντήρηση:

- Οι προβλέψεις για την αντικεραυνική προστασία μπορεί να τύχουν ελλιπούς προσοχής μετά την εγκατάστασή τους. Η σύνθεση και η υλοποίηση της αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να είναι συμπαγής και τα χρησιμοποιούμενα υλικά πρέπει να είναι πολύ ανθεκτικά στη διάβρωση.
- Η γείωση μεταλλικών αντικειμένων με σκοπό την αντικεραυνική προστασία αυξάνει την πιθανότητα επιβλαβούς γαλβανικής διάβρωσης.
- Αν ένα σκάφος έχει πληγεί από κεραυνό, οι πυξίδες, τα ηλεκτρικά και τα ηλεκτρονικά μέρη πρέπει να ελεγχθούν για πιθανές βλάβες ή αλλαγές στις ρυθμίσεις τους.

- Αν ένα σκάφος έχει πληγεί από κεραυνό, το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να ελεγχθεί για φυσικές βλάβες και για την ακεραιότητα και συνέχεια γείωσης του συστήματος.
- Αν ένα σκάφος έχει πληγεί από κεραυνό πρέπει να ελεγχθεί ο σκελετός του, οι υποθαλάσσιες δομές του και τα διαμπερή αποσπώμενα μέρη του. Ο κεραυνός μπορεί να εξέλθει από μία ή περισσότερες θέσεις κάτω από την ίσαλο γραμμή και ο μη εντοπισμός των εκάστοτε ζημιών μπορεί να δημιουργήσει μεταγενέστερο πρόβλημα όπως η εισροή υδάτων ή ακόμα και η βύθιση του πλοίου.
- Όπου είναι δυνατόν, ο εξοπλισμός πρέπει να εσωκλείεται σε μεταλλικούς θαλάμους, οι οποίοι θα συνδέονται με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με αγωγό διατομής τουλάχιστον 8.39mm^2 . Επίσης, πρέπει να εγκαθίστανται συσκευές καταστολής υπερτάσεων σε όλους τους αγωγούς που εισέρχονται ή εξέρχονται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό.
- Η γείωση μεταλλικών κεραιών τύπου ράβδου, παρέχει κάποια προστασία για σκάφη χωρίς κατάρτια ή δοκούς, με την προϋπόθεση ότι οι αγωγοί στο σύστημα γείωσης της κεραίας έχουν αγωγιμότητα αντίστοιχη με τον κύριο αγωγό, ότι η κορυφή της κεραίας δεν βρίσκεται 30m πάνω από το νερό, ότι μια φανταστική γραμμή υπό γωνία 45° προς την κάθετη της κεραίας δεν τέμνει καμία επιφάνεια του σκάφους (κώνος προστασίας) και ότι το πηνίο φόρτισης της κεραίας είναι εξοπλισμένο με κατάλληλο εξοπλισμό για να παρακάμπτει το κεραυνικό ρεύμα.

3.2.5 Bureau Veritas NR 566

Ο οργανισμός Bureau Veritas αποτελεί Γαλλικό νηογνώμονα ο οποίος ιδρύθηκε το 1828 και δραστηριοποιείται σε διάφορους τομείς σχετικούς με την πιστοποίηση. Ένας από αυτούς είναι η ναυτιλία και πιο συγκεκριμένα, οι οδηγίες για την αντικεραυνική προστασία πλοίων είναι οι εξής:

- Τα σκάφη με μη μεταλλικό σκελετό πρέπει να φέρουν αγωγό αντικεραυνικής προστασίας, το κατώτερο μέρος του οποίου πρέπει να συνδέεται σε πλάκα γείωσης χαλκού ή άλλου αγωγίμου υλικού συμβατό με το θαλασσινό νερό. Η πλάκα πρέπει να έχει επιφάνεια τουλάχιστον 0.25m^2 και να είναι ασφαλώς προσδεμένη στο εξωτερικό μέρος του σκελετού του σκάφους σε θέση που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο γραμμή έτσι ώστε να είναι βυθισμένη κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες πλεύσης.
- Τα σκάφη με μεταλλικό σκελετό αλλά με μη μεταλλικά κατάρτια πρέπει να φέρουν αγωγό αντικεραυνικής προστασίας. Το κατώτερο μέρος του αγωγού πρέπει να συνδέεται στο μεταλλικό σκελετό του πλοίου.
- Σε σκάφη με μεταλλικό σκελετό, αν υπάρχει ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του σκελετού του πλοίου και των καταρτιών αντικεραυνικής προστασίας ή άλλων μεταλλικών υπερδομών επαρκούς ύψους, δεν χρειάζεται περαιτέρω αντικεραυνική προστασία.
- Οι αγωγοί αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από χαλκό, είτε σε λωρίδα είτε πολύκλωνο, και πρέπει να έχουν διατομή τουλάχιστον 70mm^2 . Πρέπει επίσης να είναι προσδεμένοι σε χάλκινο καρφί διαμέτρου τουλάχιστον 12mm^2

το οποίο προεξέχει για τουλάχιστον 3m πάνω από την κορυφή του καταρτιού. Το κάτω άκρο των αγωγών πρέπει να γειωθεί.

- Οι αγωγοί αντικεραυνικής προστασίας πρέπει να εγκατασταθούν εξωτερικά του σκάφους και η διαδρομή τους πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθεία. Πρέπει επίσης να αποφεύγονται οι απότομες αλλαγές πορείας των αγωγών.
- Οι ενώσεις που επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται είναι οι βιδωμένες, οι θηλυκωμένες ή οι συγκολλημένες.

3.2.6 DEF STAN 02-51

Το πρότυπο αυτό εκδίδεται από το Υπουργείο Άμυνας του Ηνωμένου Βασιλείου και παρέχει αναλυτικές οδηγίες σχετικά με την αντικεραυνική προστασία διαφόρων κατηγοριών πολεμικών σκαφών. Το γεγονός ότι το πρότυπο αυτό δημιουργείται από στρατιωτικές υπηρεσίες το καθιστά ως ένα από τα αυστηρότερα και πλέον συγκεκριμένα επάνω στον τομέα αυτό.

Με σκοπό την προστασία έναντι των άμεσων επιπτώσεων κεραυνικών πληγμάτων προβλέπεται ότι:

- Πρέπει να υπάρχει μονοπάτι χαμηλής αντίστασης μεταξύ των προτιμώμενων σημείων πρόσπτωσης του κεραυνού και της γείωσης στο οποίο τα κεραυνικά ρεύματα άγονται ασφαλώς.
- Το μονοπάτι αυτό πρέπει να έχει υψηλή μηχανική αντοχή, επαρκή ικανότητα ροής ρεύματος και να αποτελείται από: α) Ένα τερματικό αέρα ικανό να λαμβάνει ένα απευθείας κεραυνικό πλήγμα χωρίς να υπόκειται σημαντική βλάβη, β) έναν αγωγό καθόδου που να συνδέει το τερματικό αέρα με το τερματικό γείωσης και γ) ένα τερματικό γείωσης που να άγει ασφαλώς υψηλά ρεύματα στη θάλασσα.
- Τα τερματικά αέρα παρέχουν έναν βαθμό προστασίας έναντι άμεσων πληγμάτων στα αντικείμενα που βρίσκονται εντός της ζώνης προστασίας τους.
- Όλα τα μέρη του σκάφους που βρίσκονται πάνω από το επίπεδο του καταστρώματος εκτός από ειδικά προστατευμένες εγκαταστάσεις πρέπει να βρίσκονται εντός της ζώνης προστασίας.
- Τα μεταλλικά μέρη που μπορεί να δεχθούν κεραυνικό πλήγμα, ακόμα και αν βρίσκονται εντός της ζώνης προστασίας, πρέπει να συνδέονται μέσω ζεύξης στο πλησιέστερο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με κεραυνική γείωση.

Αντίστοιχα, για την προστασία έναντι δευτερευόντων αποτελεσμάτων ενός κεραυνικού πλήγματος, το πρότυπο δίνει τις εξής οδηγίες:

- Η μόνωση μεταξύ των μερών να είναι επαρκής για να αντέχει τάσεις που μπορεί να εμφανιστούν μεταξύ τους
- Τα αγωγίμα κυκλώματα όπως καλώδια και σωλήνες δεν πρέπει να σχηματίζουν επαγωγικούς βρόχους ούτως ώστε να μειώνονται οι επαγώμενες τάσεις.
- Τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα πρέπει να "σκληραίνουν" με τη χρήση ηλεκτρικών πλαισίων και προστατευτικών διατάξεων όπως διακένων σπινθηρισμού.

- Πρέπει να υπάρχει επαρκής ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ όλων των παρακείμενων μεταλλικών δομών και μερών.

Ακόμα και αν το κεραυνικό πλήγμα συνδεθεί ικανοποιητικά και μεταφερθεί με ασφάλεια στη θάλασσα, εξακολουθούν να υπάρχουν κίνδυνοι λόγω των δευτερευόντων αποτελεσμάτων που προκαλούνται από τη ροή του ρεύματος μέσα στο σκάφος και στο νερό κοντά στην πλάκα γείωσης. Αυτοί οι κίνδυνοι μπορεί να αποβούν μοιραίοι εάν οι τάσεις παράξουν σπινθήρες στον αέρα που βρίσκεται εντός των δεξαμενών καυσίμων. Επίσης, οι δευτερεύουσες τάσεις μπορεί να είναι πτώσεις αντίστασης ή επαγόμενες 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 κάθε αγωγού προκαλώντας κανονική τάση.

Όσον αφορά την σχεδίαση μεταλλικών σκαφών οι οδηγίες του προτύπου είναι:

- Τα υψηλά σημεία του σκάφους πρέπει να είναι ικανά να φέρουν τα τερματικά αέρα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, εκτός αν βρίσκονται ήδη εντός της ζώνης προστασίας ενός άλλου τερματικού αέρα.
- Το τερματικό αέρα πρέπει να αποτελείται από μία αγώγιμη ράβδο διαμέτρου τουλάχιστον 12mm που θα προεξέχει τουλάχιστον 300mm από το σημείο στο οποίο είναι εγκατεστημένο. Πρέπει να είναι κατασκευασμένο από χαλκό, κράμα χαλκού ή ανοξείδωτο ατσάλι, εκτός αν το κατάρτι είναι αλουμινένιο οπότε σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο είδος αλουμινίου.
- Μεταλλικά κατάρτι και διάφορα δομικά στοιχεία μπορούν να αποτελέσουν τον καθοδικό αγωγό.
- Τα μεταλλικά πλέγματα λειτουργούν επίσης ως καθοδικοί αγωγοί και άρα πρέπει και αυτά να είναι συνδεδεμένα στον κύριο καθοδικό αγωγό.
- Ο σκελετός του σκάφους λειτουργεί ως τερματικό γείωσης οπότε δεν χρειάζεται τερματικό γείωσης.
- Τα ψηλά καλώδια που βρίσκονται παράλληλα στον καθοδικό αγωγό πρέπει να εσωκλείονται στο κατάρτι όπου αυτό είναι δυνατόν ώστε να αποφεύγονται επαγόμενες τάσεις. Τα κατάρτια συνθετικής κατασκευής πρέπει να διατηρούν μόνιμες μεταλλικές συνδέσεις χαμηλής αντίστασης μεταξύ όλων των μερών.

Αντίστοιχα, οι οδηγίες σχεδίασης μη μεταλλικών σκαφών είναι:

- Τα υψηλά σημεία του σκάφους πρέπει να είναι ικανά να φέρουν τα τερματικά αέρα του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, εκτός αν βρίσκονται ήδη εντός της ζώνης προστασίας ενός άλλου τερματικού αέρα.
- Το τερματικό αέρα πρέπει να αποτελείται από μία αγώγιμη ράβδο διαμέτρου τουλάχιστον 12mm που θα προεξέχει τουλάχιστον 300mm από το σημείο στο οποίο είναι εγκατεστημένο. Πρέπει να είναι κατασκευασμένο από χαλκό, κράμα χαλκού ή ανοξείδωτο ατσάλι, εκτός αν το κατάρτι είναι αλουμινένιο οπότε σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο είδος αλουμινίου.

- Η διαδρομή του καθοδικού αγωγού πρέπει να αποφεύγει επικίνδυνες περιοχές του πλοίου όπως δεξαμενές ή χώρους αποθήκευσης πυρομαχικών και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθεία, με ελάχιστη ακτίνα κάμψης ίση με δέκα φορές την αντίστοιχη διάμετρο του αγωγού. Ο αγωγός πρέπει να είναι ασφαλώς προσδεμένος επάνω στο σκάφος καθ' όλη τη διάρκεια της διαδρομής του, να είναι κατασκευασμένος από χαλκό ή κράμα αλουμινίου και να έχει μέγεθος τουλάχιστον 75mm^2 .
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι ενώσεων κατά μήκος του καθοδικού αγωγού, αρκεί να πληρούν τα εξής κριτήρια:
 - Δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται συγκολλημένες συνδέσεις.
 - Τα καλώδια πρέπει να τερματίζονται σε κατάλληλα συγκολλημένες προεξοχές.
 - Το αγώγιμο μονοπάτι κάθε σύνδεσης δεν πρέπει να διασφαλίζεται από τις βίδες και τους σφικτήρες που συγκρατούν τις αγώγιμες περιοχές των μερών των μερών του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Το εμβαδό των αγώγιμων περιοχών στις συνδέσεις πρέπει να είναι τουλάχιστον 100mm^2 χαλκού ή αλουμινίου.
 - Οι συνδέσεις πρέπει να είναι ανθεκτικές στη διάβρωση, ενώ 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 .
 - Οι συνδέσεις πρέπει να είναι προσβάσιμες για επιθεώρηση και να είναι τοποθετημένες σε σημεία που δεν είναι επιρρεπή σε βλάβες.
- Τα σκάφη με μη μεταλλικό σκελετό πρέπει να διαθέτουν τερματικό γείωσης αντικεραυνικής προστασίας το οποίο αποτελείται από μια μονίμως βυθισμένη αγώγιμη πλάκα με έναν συνδετικό στύλο. Αυτή η πλάκα δύναται να χρησιμοποιηθεί ως η κύρια ηλεκτρική γείωση του σκάφους.
- Η πλάκα γείωσης μπορεί να αποτελείται από οποιοδήποτε υλικό συμβατό με το νερό το οποίο δεν αποτελεί κυψέλη ηλεκτροχημικής διάβρωσης με οποιοδήποτε άλλο μεταλλικό αντικείμενο όπως η προπέλα.
- Η πλάκα γείωσης δεν πρέπει να βιάζεται ή να καλύπτεται με κανέναν τρόπο.
- Η πλάκα γείωσης πρέπει να έχει σχήμα που να ταιριάζει με το σκάφος και να τοποθετείται σε σημείο που να διευκολύνει την κάθετη μετάβαση του καθοδικού αγωγού.
- Η πλάκα πρέπει να έχει πάχος τουλάχιστον 7mm έτσι ώστε να αποφεύγεται διηλεκτρική διάσπαση του νερού στην επιφάνειά της όταν αυτή φέρει κεραυνικά ρεύματα. Το εμβαδό της πρέπει να είναι τουλάχιστον 0.25m^2 .
- Στην ιδανική περίπτωση, η πλάκα πρέπει να είναι κυκλική και στρογγυλεμένη στις άκρες. Αν χρησιμοποιείται ορθογώνια πλάκα, πρέπει να έχει πλάτος τουλάχιστον 400mm και γωνίες με ελάχιστη ακτίνα 50mm .
- Ο συνδετικός στύλος της πλάκας γείωσης πρέπει να είναι του ίδιου υλικού με την πλάκα γείωσης και να έχει ελάχιστη διάμετρο 50mm .
- Πρέπει να παρέχεται δυνατότητα σύνδεσης της πλάκας αντικεραυνικής προστασίας με την ξηρά μέσω αγωγού εμβαδού 75mm^2 .

- Πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οποιαδήποτε τάση παράγεται δευτερευόντως μπορεί να συγκρατηθεί σε τιμές μικρότερες των 2kV και ότι ο εξοπλισμός μπορεί να αντέξει τους παλμούς τάσης στους οποίους ενδέχεται να υποβληθεί. Οι τάσεις αυτές μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με το σχεδιασμό κυκλωμάτων γείωσης με σωστή χωροθέτηση των αγώγιμων κυκλωμάτων, με πλαισιωμένα καλώδια και με τη χρήση μόνωσης και προστατευτικών διατάξεων για τον εξοπλισμό.
- Κανονικά, τα μεταλλικά περιβλήματα γειώνονται στο σκελετό του πλοίου αλλά στα μη μεταλλικά σκάφη πρέπει να χρησιμοποιηθεί σύστημα αγωγών με σκοπό τη ζεύξη του εξοπλισμού με την 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.
- Αν θωρακίσουμε ένα κύκλωμα από τη μαγνητική ροή, δεν θα μπορούν να επαχθούν σε αυτό τάσεις. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν θωρακισμένα δωμάτια ή κλωβοί για την προστασία μεγαλύτερου εξοπλισμού.

Τέλος, όσον αφορά τους αγώγιμους βρόχους, οι οδηγίες του προτύπου είναι οι εξής:

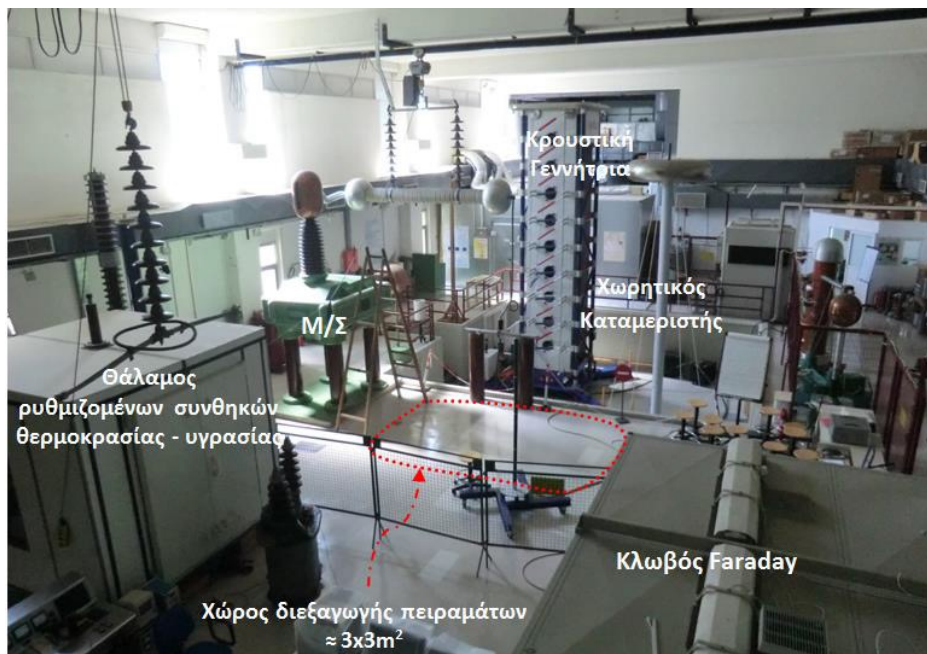
- Όταν, λόγω κεραυνικών ρευμάτων, μαγνητική ροή σχετίζεται με έναν βρόχο, τότε επάγονται τάσεις σε αυτόν. Εάν ο βρόχος δεν είναι εξ' ολοκλήρου μεταλλικός, οι τάσεις συγκεντρώνονται στη μη μεταλλική περιοχή και μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση. Τα μεταλλικά μέρη του βρόχου μπορεί να είναι καλώδια, σωλήνες ή αλλά μεταλλικά αντικείμενα της δομής.
- Τα αγώγιμα κυκλώματα πρέπει να έχουν την κατάλληλη χωροθέτηση έτσι ώστε να μειωθεί η επαγόμενη δευτερεύουσα τάση και να βοηθηθεί η πρόβλεψη επαρκών επιπέδων μόνωσης.
- Η σύνδεση της ροής συμβαίνει στον βρόχο που σχηματίζεται μεταξύ του καθοδικού αγωγού και οποιουδήποτε ηλεκτρικού κυκλώματος που βρίσκεται κοντά στο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας. Η τάση εξαρτάται από το εμβαδό του βρόχου και η ισχύς διάσπασης από τα διάκενα αέρα. Για να αποφευχθούν σπινθήρες πρέπει, εάν μέρη του κυκλώματος πλησιάζουν τον αγωγό, η απόσταση να είναι όσο πιο μικρή γίνεται ώστε να ελαχιστοποιηθεί το εμβαδό του βρόχου καθώς και η τάση διάσπασης μεταξύ κοντινών αντικειμένων.
- Η σύνδεση της ροής μειώνεται με τη μείωση του εμβαδού του βρόχου ή με την τοποθέτηση του κυκλώματος σε μια περιοχή χαμηλής πυκνότητας μαγνητικής ροής. Το εμβαδό που πρέπει να μειωθεί είναι αυτό της επιφάνειας που βρίσκεται στο επίπεδο που είναι ορθογώνιο στη ροή.
- Τα ηλεκτρικά κυκλώματα που βρίσκονται στον αέρα (όπως αυτό του ραντάρ) και είναι επιρρεπή σε κεραυνικά πλήγματα, πρέπει να προστατεύονται μέσω μη γραμμικών συσκευών (σπινθηριστές ή συσκευές απομάκρυνσης απότομων υπερτάσεων). Σε διαφορετική περίπτωση, θα πρέπει να γειώνονται κατά τη διάρκεια περιόδων με έντονη κεραυνική δραστηριότητα.

- Ο καλός σχεδιασμός των κυκλωμάτων και οι μεταβατικές διατάξεις προστασίας μπορούν να παρέχουν προστασία για ευαίσθητα ηλεκτρονικά κυκλώματα.
- Σε σκάφη με μη μεταλλικό σκελετό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιφερειακές πλάκες γείωσης στις δεξαμενές καυσίμων με σκοπό τη μείωση της συσσώρευσης τάσης. Έτσι αποσοβείται ο κίνδυνος σχηματισμού εσωτερικών σπινθήρων λόγω διάσπασης.
- Όταν χρησιμοποιούνται περιφερειακές πλάκες γείωσης, πρέπει όλοι οι σωλήνες και όλες οι μεταλλικές δομές εντός την προστατευόμενης περιοχής να συζευχθούν με την πλησιέστερη περιφερειακή γείωση με σκοπό τη μείωση της πτώσης αντίστασης και των επαγόμενων τάσεων.
- Όλες οι αγώγιμες προεξοχές εντός της θάλασσας όπως προπέλες, πηδάλια κλπ πρέπει να αντιμετωπίζονται ως περιφερειακές γειώσεις και να συζευχθούν στην αντικεραυνική γείωση.

Κεφάλαιο 4^ο: Πειραματική προσέγγιση του φαινομένου σύλληψης του κεραυνού

4.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη μέσω της οποίας διενεργήθηκαν οι δοκιμές σε μοντέλο πλοίου υπό κλίμακα με σκοπό τη διερεύνηση του φαινομένου σύλληψης του κεραυνού αποτελεί μέρος του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και απεικονίζεται παρακάτω:



Σχήμα 4.1: Χώρος διεξαγωγής πειράματος και περιγραφή πειραματικής διάταξης

Τα επιμέρους στοιχεία που αποτελούν την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο εν λόγω πείραμα είναι η κρουστική γεννήτρια, η διάταξη που επιτρέπει την λειτουργία της καθώς και το μοντέλο του πλοίου επάνω στο οποίο έγιναν οι δοκιμές. Τα στοιχεία αυτά παρατίθενται παρακάτω:

4.1.1 Διάταξη γεννήτριας κρουστικών τάσεων Ε.Μ.Π.

Το σύστημα παραγωγής και μέτρησης κρουστικών τάσεων APITZ/CRATOS αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Σύστημα φόρτισης συνεχούς τάσης (APITZ/ ± 100 kV dc).
- Εννιαβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων 1.8 MV APITZ/CRATOS 1800-90.
- Χωρητικός καταμεριστής (APITZ/CR 1800kV-470pF)
- Σύστημα χειρισμού και καταγραφής (λογισμικά CRATOS και WIN TR-AS, σύστημα μέτρησης DR STRAUSS/ TR-AS 100-12).

Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος αυτού είναι η εξής: Περισσότεροι του ενός πυκνωτές (στην περίπτωση μας εννέα) φορτίζονται σε παράλληλη σύνδεση μέσω ωμικών αντιστάσεων και στη συνέχεια εκφορτίζονται συνδεδεμένοι εν σειρά μέσω διακένων, δίνοντας συνολική τάση ίση με το άθροισμα των τάσεων των επί μέρους πυκνωτών. Ακολουθεί η καταγραφή των κρουστικών τάσεων αφού πρώτα η τάση υποβιβαστεί μέσω του χωρητικού καταμεριστή, έτσι ώστε να μην καταστραφεί το μετρητικό σύστημα. Αναλυτικότερα, για την δομή και τον τρόπο λειτουργίας των παραπάνω στοιχείων ισχύουν τα εξής:

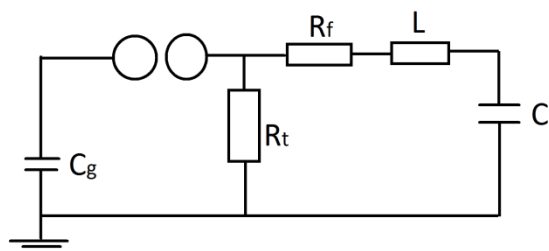
4.1.1.1 Σύστημα φόρτισης συνεχούς τάσης (APITZ/±100kV dc)

Το σύστημα αυτό παρεμβάλλεται μεταξύ του δικτύου και της κρουστικής γεννήτριας και σκοπός του είναι να μετατρέψει την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου (230V-50Hz) σε συνεχή τάση με υψηλή τιμή (της τάξης των δεκάδων kV). Αποτελείται από αντιστάσεις προστασίας και από έναν αυτομετασχηματιστή, ο οποίος επιτρέπει την ανόρθωση της τάσης αλλά και την ρύθμιση της τιμής της, έτσι ώστε να μπορούμε να φορτίσουμε την κρουστική γεννήτρια στο επίπεδο τάσης που επιθυμούμε. Τέλος, το σύστημα φόρτισης συνδέεται με την κρουστική γεννήτρια μέσω δύο αντιπαράλληλων διόδων, οι οποίες, ανάλογα με τη συνδεσμολογία τους, ρυθμίζουν την πολικότητα της παραγόμενης κρουστικής τάσης, αν δηλαδή θα είναι θετική ή αρνητική.

4.1.1.2 Εννιαβάθμια γεννήτρια κρουστικών τάσεων

Η κρουστική γεννήτρια APITZ/CRATOS που χρησιμοποιήσαμε αποτελείται από εννέα βαθμίδες κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από τα εξής:

- Δύο πυκνωτές κρούσης συνολικής χωρητικότητας $C_g = 0.5\mu\text{F}$
- Μια αντίσταση μετώπου $R_f = 50\text{k}\Omega$
- Μια αντίσταση ουράς $R_t = 130\text{k}\Omega$
- Δύο αντιστάσεις φόρτισης $R_{ch} = 30\text{k}\Omega$ η κάθε μία
- Μια παράσιτη αυτεπαγωγή L

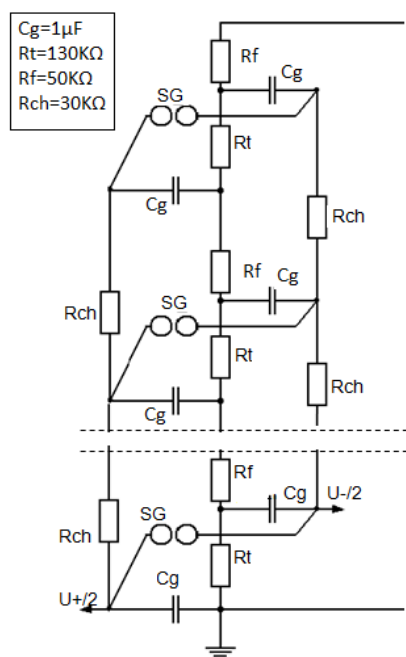


Σχήμα 4.2: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας βαθμίδας της κρουστικής γεννήτριας, όπου διακρίνονται τα επιμέρους στοιχεία της [35].

Κατά τη λειτουργία της κρουστικής γεννήτριας διακρίνουμε 2 φάσεις: την φάση φόρτισης και την φάση εκφόρτισης. Κατά την φάση φόρτισης οι πυκνωτές κρούσης C_g φορτίζονται με συνεχή τάση, ενώ μόλις γίνει διάσπαση του διακένου αρχίζει η φάση εκφόρτισης. Τότε ο πυκνωτής κρούσης αρχίζει να εκφορτίζεται, οπότε και εμφανίζεται η κρουστική τάση στους ακροδέκτες του χωρητικού καταμεριστή. Πιο αναλυτικά, όταν ο πυκνωτής κρούσης φορτιστεί στην επιθυμητή τάση, δημιουργείται ένας σπινθήρας στον σπινθηριστή, με τη βοήθεια της συσκευής έναυσης (trigatron), η οποία είναι ενσωματωμένη σε μια από τις δυο σφαίρες του σπινθηριστή. Έτσι, μέσω του σπινθήρα, ο πυκνωτής κρούσης συνδέεται στο υπόλοιπο κύκλωμα.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης όλες οι βαθμίδες είναι συνδεδεμένες παράλληλα. Όταν η τάση φόρτισης φτάνει στην προεπιλεγμένη τιμή και διασπαστεί το διάκενο σφαιρών της πρώτης βαθμίδας, η τάση εξόδου της βαθμίδας αυτής αυξάνει γρήγορα από το μηδέν μέχρι την τιμή της τάσης φόρτισης. Η αύξηση αυτή προκαλεί εσωτερική μεταβατική τάση, η οποία αυξάνει την τάση στο διάκενο της δεύτερης βαθμίδας και προκαλεί διάσπαση του διακένου της. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαδοχικά και μέσα σε μερικά ns όλες οι βαθμίδες διασπώνται και συνδέονται σε σειρά.

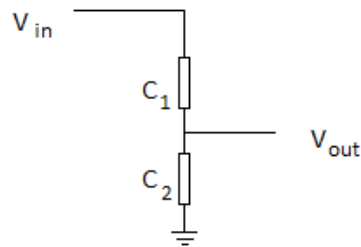
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η γεννήτρια αυτή αποτελεί παραλλαγή της πολυβάθμιας κρουστικής γεννήτριας τύπου Marx. Η διαφοροποίηση αφορά τον εν σειρά συνδυασμό δύο πυκνωτών ανά βαθμίδα. Ο ένας πυκνωτής φορτίζεται μέχρι το 50% της προεπιλεγμένης τιμής της τάσης φόρτισης, ενώ ο άλλος φορτίζεται (σε αντίθετη πολικότητα) έως το -50% της προεπιλεγμένης τιμής της τάσης φόρτισης. Τα πλεονεκτήματα του τροποποιημένου κυκλώματος σε σχέση με τη γεννήτρια τύπου Marx είναι η ανάπτυξη υψηλότερων εσωτερικών υπερτάσεων (που αυξάνουν το εύρος έναυσης) και η χαμηλότερη τιμή της παράσιτης αυτεπαγωγής.



Σχήμα 4.3: Κύκλωμα εννιαβάθμιας κρουστικής γεννήτριας APITZ/CRATOS [35]

4.1.1.3 Χωρητικός καταμεριστής (APITZ/CR 1800kV-470pF)

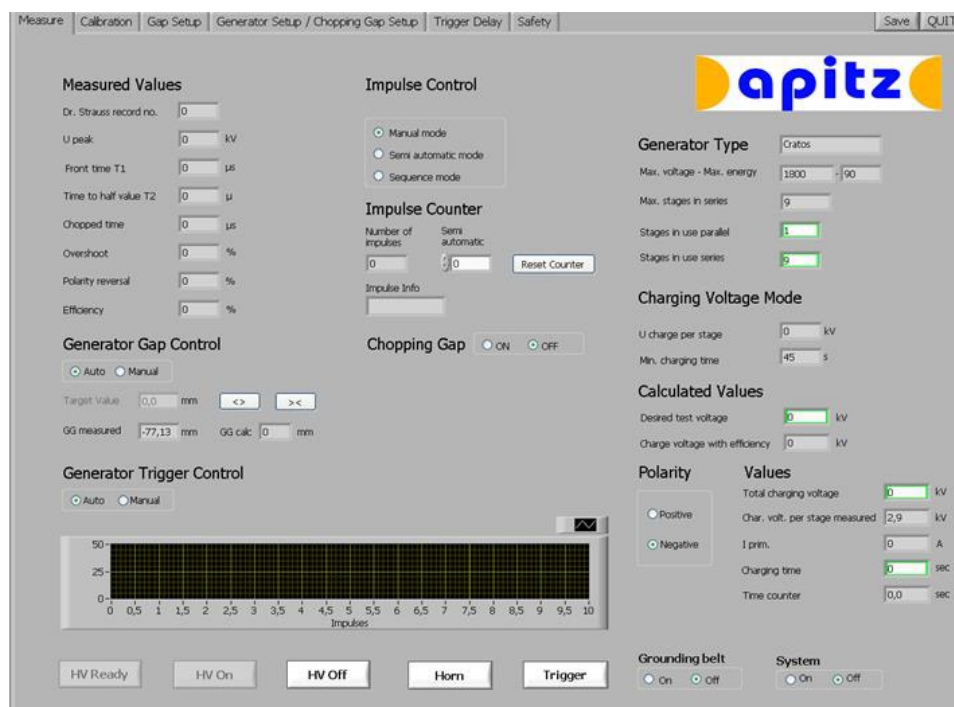
Ο χωρητικός καταμεριστής αποτελείται από τον εν σειρά συνδυασμό δύο πυκνωτών, έναν πυκνωτή υψηλής τάσης τιμής $C_1 = 450\text{pF}$ και έναν πυκνωτή χαμηλής τάσης τιμής $C_2 = 930\text{pF}$. Έτσι, ο λόγος καταμερισμού του είναι $K = (C_1 + C_2)/C_1 = 2068$. Ο καταμεριστής αυτός συνδέεται στην έξοδο της κρουστικής γεννήτριας με σκοπό τον υποβιβασμό της τάσης σε επίπεδα μετρήσιμα από το μετρητικό σύστημα.



Σχήμα 4.4:Χωρητικός καταμεριστής

4.1.1.4 Σύστημα χειρισμού γεννήτριας και καταγραφής κρουστικών τάσεων

Μέσα στον κλωβό Faraday (βλέπει σχήμα 4.1) υπάρχουν δύο υπολογιστές στους οποίους είναι εγκατεστημένα το σύστημα ελέγχου της κρουστικής γεννήτριας "CRATOS" και το μετρητικό σύστημα "WIN TR-AS" αντίστοιχα. Οι δύο αυτοί υπολογιστές είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους για λόγους ασφαλείας και αξιοπιστίας. Η κεντρική οθόνη του λογισμικού ελέγχου CRATOS παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 4.5: Κεντρική οθόνη του λογισμικού ελέγχου CRATOS[35]

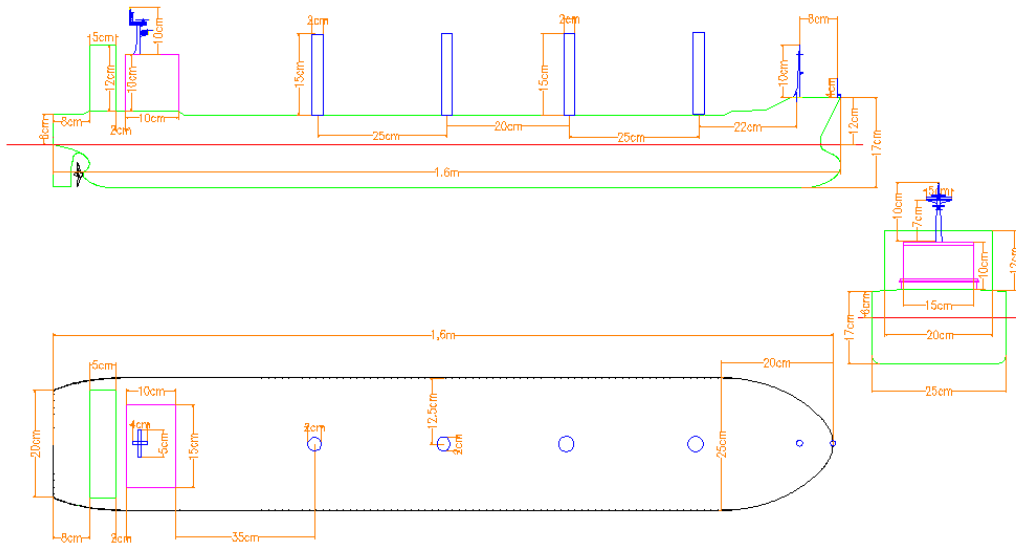
Η διαδικασία ελέγχου της γεννήτριας μέσω του CRATOS περιλαμβάνει τις εξής ενέργειες: Αρχικά, θέτουμε On τις ενδείξεις System και Grounding Belt έτσι ώστε να απομονώσουμε τη γεννήτρια από τη γείωση. Στη συνέχεια, καθορίζουμε την πολικότητα της παραγόμενης τάσης από το πεδίο Polarity και την επιθυμητή τιμή της από την επιλογή Desired test voltage που βρίσκεται στο πεδίο Calculated Values. Το λογισμικό, με βάση τον συντελεστή χρησιμοποίησης της γεννήτριας(αναγράφεται στο πεδίο efficiency), υπολογίζει την τιμή της τάσης που πρέπει να δοθεί ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή της τάσης. Η τάση αυτή αναγράφεται στο πεδίο charge voltage with efficiency. Στην συνέχεια μεταφέρουμε την τιμή αυτή στην επιλογή Total charging voltage του πεδίου Values. Στο πεδίο charging time γράφουμε τον χρόνο φόρτισης, ο οποίος είναι σταθερός και ίσος με 45sec. Αφού καθορίσουμε τα παραπάνω, επιλέγουμε την ένδειξη HV Ready και μετά από λίγα δευτερόλεπτα την ένδειξη HV On, έτσι ώστε να αρχίσει η διαδικασία της φόρτισης. Πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά την πρώτη δοκιμή το σύστημα πρέπει να παραμείνει στην ένδειξη HV Ready για τρία λεπτά πριν να αρχίσει η φόρτιση. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, μέσω των πεδίων Charging Voltage per stage measured και I primal, ελέγχουμε ώστε η τάση κάθε σταδίου και το ρεύμα φόρτισης να μην ξεπερνούν κάποια κρίσιμα όρια. Αν, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, παρατηρηθεί οποιαδήποτε απρόσμενη εξέλιξη, μπορούμε να διακόψουμε τη φόρτιση μέσω της ένδειξης HV Off, ενώ για λόγους προειδοποίησης το σύστημα διαθέτει την ένδειξη Horn.

Για την καταγραφή της παραγόμενης κρουστικής τάσης, χρησιμοποιούμε το λογισμικό καταγραφής WIN TR-AS. Σε αυτό, αρχικά δημιουργούμε ένα νέο αρχείο μέσω της επιλογής File→Project→Create New Project. Σε αυτό εισάγουμε, για λόγους πληρότητας, τις συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας και στη συνέχεια επιλέγουμε την πολικότητα της τάσης και την κλίμακα της μέσω του πεδίου CH1. Για να ξεκινήσουμε την καταγραφή πατάμε F8 ώστε το σύστημα να μπει στην κατάσταση recording, wait for trigger. Να σημειωθεί ότι για να εισέλθουμε για οποιοδήποτε λόγω στον χώρο διεξαγωγής του πειράματος, πρέπει να θέσουμε τις ενδείξεις Grounding Belt και System στην κατάσταση Off.

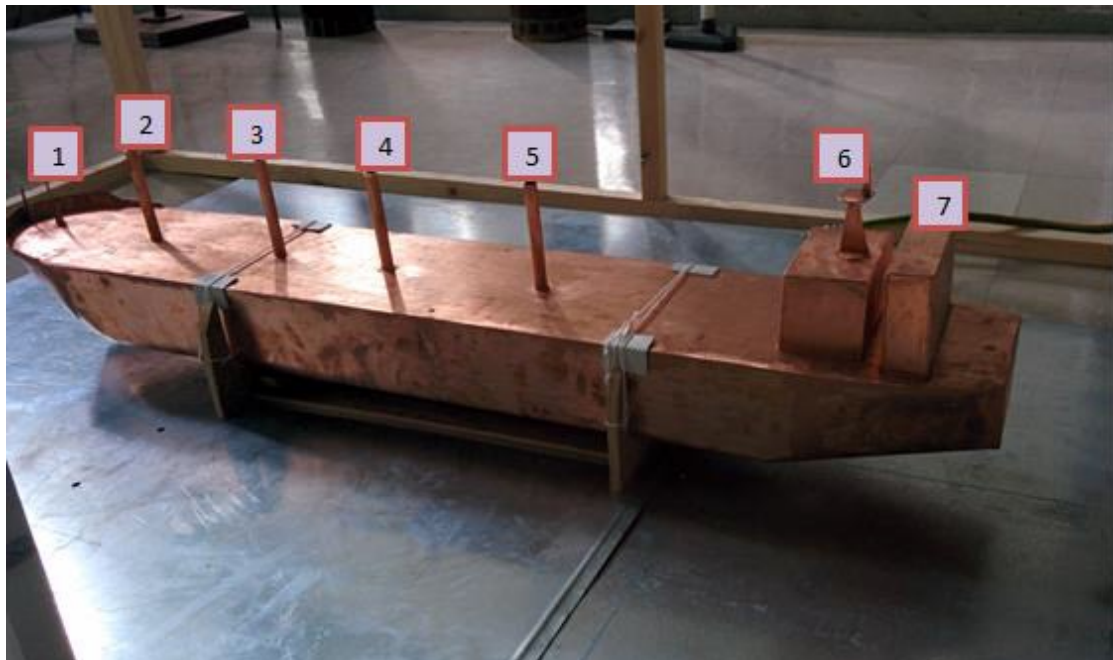
4.1.2 Μοντέλο πλοίου υπό κλίμακα

Το πλοίου που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή του πειράματος είναι μοντέλο πραγματικών διαστάσεων εμπορικού πλοίου σχεδιασμένο υπό κλίμακα 1:120. Είναι κατασκευασμένο από χαλκό και έχει μήκος 160cm και πλάτος 25cm. Οι κατασκευές του πλοίου που είναι πιο επιρρεπείς σε κεραυνικό πλήγμα είναι οι υψηλές κατασκευές όπως οι γερανοί φορτίου, οι καπνοδόχοι τα συστήματα επικοινωνιών και οι χώροι ναυσιπλοΐας και επικοινωνίας. Στο μοντέλο μας, οι τέσσερις κατασκευές στο μέσο του που μοιάζουν με ράβδους αναπαριστούν τους γεραμούς του πλοίου, οι κατασκευές στην πρύμνη αναπαριστούν τις καπνοδόχους και, μπροστά από αυτές, υπάρχει μια υπερκατασκευή στην κορυφή της οποίας βρίσκεται η κεραία του πλοίου.

Το μοντέλο του πλοίου βρίσκεται επάνω σε μία γειωμένη μεταλλική πλάκα πάχους 2mm περίπου. Η πλάκα αυτή αντιπροσωπεύει τη θάλασσα. Επίσης, επάνω από το πλοίο τοποθετήσαμε μία φορτισμένη ράβδο η οποία αναπαριστά την κεφαλή του κατερχόμενου οχετού. Η ράβδος έχει μήκος 50cm και διάμετρο 5mm.



Σχήμα 4.6: Σχέδιο μοντέλου πλοίου σχεδιασμένο μέσω AutoCad.



Σχήμα 4.7: Το μοντέλο πλοίου που χρησιμοποιήθηκε με αριθμημένες τις κατασκευές του.

4.2 Πείραμα ράβδου-μεταλλικής πλάκας

4.2.1 Πειραματική διαδικασία

Στο πρώτο στάδιο του πειράματος [36] μελετήθηκαν τα διάκενα ανάμεσα στη ράβδο και τη μεταλλική πλάκα. Στόχος του πειράματος ήταν η εύρεση της καμπύλης διάσπασης του διακένου για τις διάφορες αποστάσεις πρόσκρουσης (D). Η καμπύλη αυτή ακολουθεί κανονική κατανομή. Η φορτισμένη ράβδος τοποθετήθηκε διαδοχικά πάνω από τη γειωμένη πλάκα σε ύψος $D=0.50\text{m}$, $D=0.75\text{m}$ και $D=1\text{m}$. Για κάθε επίπεδο τάσης έγιναν 20 διασπάσεις του διακένου με το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις διασπάσεις να είναι δύο λεπτά. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο επιπέδων τάσεων (4.2.2) κατασκευάστηκαν οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης και ακολούθως η τάση διάσπασης του διακένου. Ως τάση διάσπασης του διακένου θεωρήθηκε η τάση U_s με πιθανότητα διάσπασης 97,5%. Οι τάσεις U_s , που υπολογίστηκαν σε αυτό το στάδιο, είναι οι τάσεις που επιβλήθηκαν στο πείραμα ράβδος-μοντέλο πλοίου.

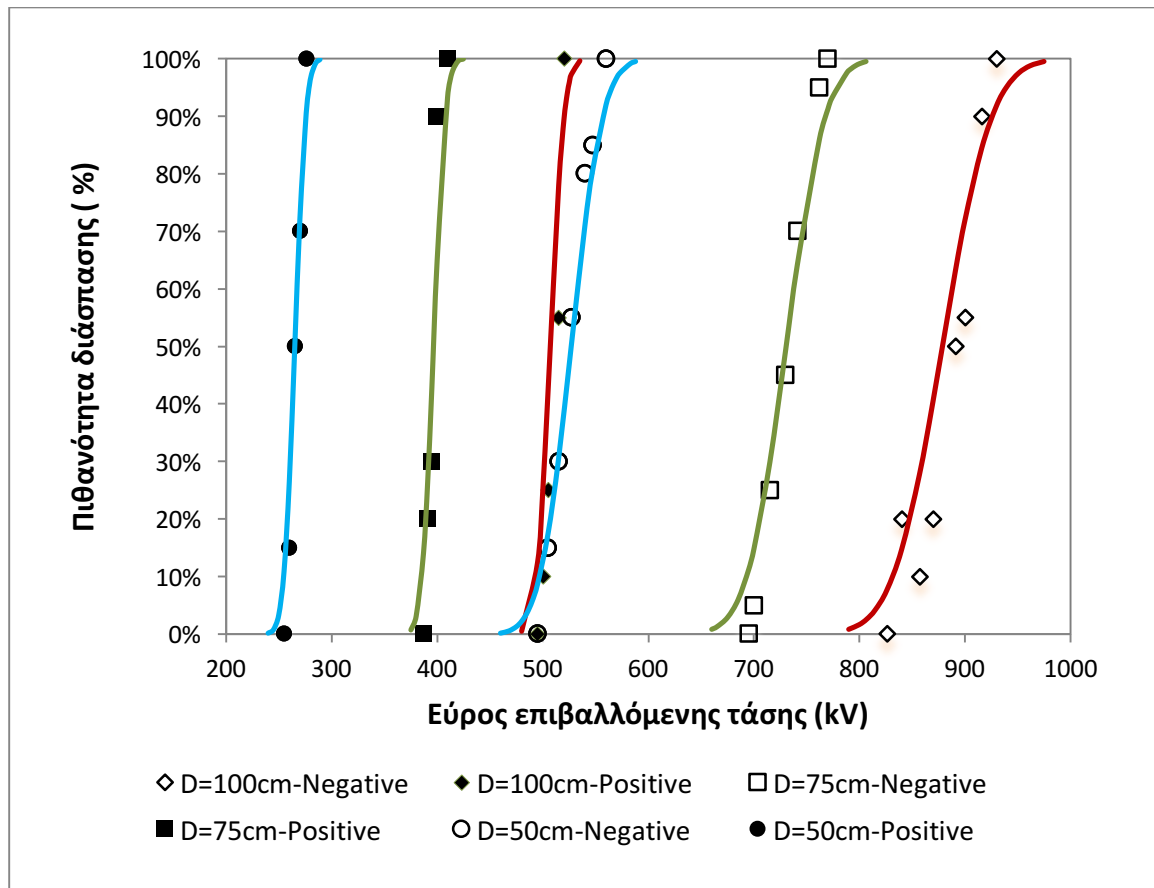
4.2.2 Μέθοδος επιπέδων τάσεων

Σύμφωνα με τη μέθοδο επιπέδων τάσεων, αν επιβάλουμε m_i φορές τάση σε ένα επίπεδο και επιτύχουμε d_i φορές διάσπαση τότε η πιθανότητα διασπάσεως στην τάση U_i ή $p(U_i)$ είναι ίση με τη συχνότητα διάσπασης $f_i = \frac{d_i}{m_i}$. Από τα αποτελέσματα της μεθόδου και μετά τη συσχέτιση τους μέσω του γραφήματος κανονικής κατανομής, προκύπτουν η 50% τάσης διάσπασης, U_{50} , και η συμβατική τυπική απόκλιση z .

Για να θεωρηθεί αξιόπιστη η μέθοδος αρκεί:

1. ο αριθμός των ανά επίπεδο επιβολών της τάσης να είναι αρκετά μεγάλος ($m \geq 10$),
2. το πρώτο επίπεδο τάσεως U_1 να έχει πιθανότητα διασπάσεως $p(U_1)=0$
3. η αύξηση της τάσεως ΔU ανά επίπεδο να κυμαίνεται περίπου στο 1% - 3%

Τα αποτελέσματα του πειράματος παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.8. Όπως είναι εμφανές, οι καμπύλες διάσπασης ακολουθούν κανονική κατανομή.



Σχήμα 4.8: Καμπύλες πιθανότητας διάσπασης διακένων ράβδου-πλάκας οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή [36]

Οι τάσεις διάσπασης που προκύπτουν από το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, κατόπιν αναγωγής στις πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες, εφαρμόζοντας τη διαδικασία της παραγράφου 4.3.

Απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας	Τάση διάσπασης U_0	
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
D=50cm	291.7 kV	594.9 kV
D=75cm	421.5 kV	817.6 kV
D=100cm	543.8 kV	985.3 kV

Πίνακας 4.1: Πρότυπες τάσεις διάσπασης U_0 (kV) για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα [36]

4.3 Αναγωγή τάσης διάσπασης

Η τάση διάσπασης στο διάκενο αέρα εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, πιο συγκεκριμένα την πίεση του αέρα, την υγρασία και τη θερμοκρασία. Για αυτό το λόγο εισάγονται κάποιοι διορθωτικοί παράγοντες ώστε να αναχθεί η τάση διάσπασης U_s του

πειράματος ράβδου-πλάκας με πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες σε μια τάση U_o με βάση τις πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες (t_o, b_o, h_o) . Θεωρούμε τις πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες σύμφωνα με το πρότυπο [37] ως εξής:

Θερμοκρασία: $t_o = 20^\circ\text{C}$

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

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

Θεωρούμε την πρότυπη τάση διάσπασης ως εξής:

$$U_o = \frac{U_s}{k_1 \cdot k_2} \quad (4.1)$$

Και άρα έχουμε:

$$U_s = U_o \cdot k_1 \cdot k_2 \quad (4.2)$$

Όπου:

k_1 : Ο συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα.

k_2 : Ο συντελεστής διόρθωσης υγρασίας.

Ο συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα αέρα δ και εκφράζεται μέσω της σχέσης (4.3)

$$k_1 = \delta^m \quad (4.3)$$

Όπου:

$$\delta = \frac{b}{b_o} \cdot \frac{273+t_o}{273+t} \quad (4.4)$$

ενώ ο εκθέτης m αναλύεται στη συνέχεια. Οι θερμοκρασίες t_o και t εκφράζονται σε βαθμούς Κελσίου και οι πυκνότητες αέρα b και b_o εκφράζονται σε millibars.

Ο συντελεστής διόρθωσης υγρασίας k_2 δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$k_2 = k^w \quad (4.5)$$

Όπου:

$$k = 1 + 0,010 \cdot \left(\frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad \text{για} \quad 1 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \leq \frac{h}{\delta} \leq 15 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (4.6)$$

Οι εκθέτες m και w που αναφέρονται παραπάνω υπολογίζονται μέσω της σχέσης (4.7) και του σχήματος 4.9.

$$g = \frac{U_B}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} \quad (4.7)$$

Όπου:

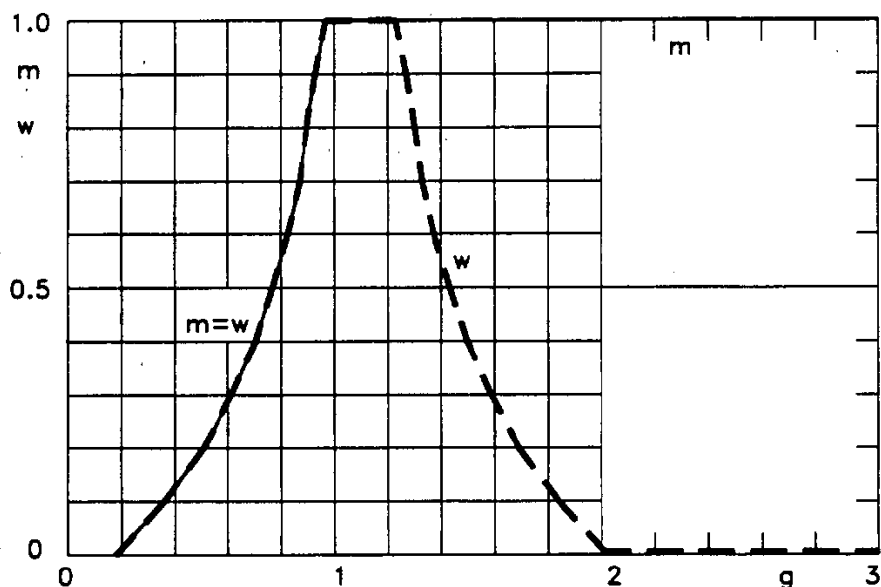
U_B : Η τάση διάσπασης που αντιστοιχεί σε πιθανότητα 50% στις πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ράβδου-πλάκας σε kV.

L: Μήκος διακένου σε m.

δ : Σχετική πυκνότητα αέρα.

k: Συντελεστής k η τιμή του οποίου υπολογίζεται από τη σχέση 4.6.

Οι εκθέτες m και w βρίσκονται προσεγγιστικά από το σχήμα 4.9 αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής g από τη σχέση (4.7).



Σχήμα 4.9: Τιμές των εκθετών m και w για το συντελεστή διόρθωσης πυκνότητας αέρα και για το συντελεστή διόρθωσης της υγρασίας αντίστοιχα, ως συνάρτηση της παραμέτρου g [37].

Οι πρότυπες τάσεις διάσπασης που αντιστοιχούν σε πιθανότητα 97.5% (πίνακας 4.1) πρέπει να αναχθούν στις ατμοσφαιρικές συνθήκες της εκάστοτε μέρας διεξαγωγής του πειράματος ώστε να προκύψουν οι διορθωμένες τάσεις διάσπασης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-1 [37]. Αυτές οι διορθωμένες τιμές των τάσεων εφαρμόστηκαν κατά την πειραματική διερεύνηση ράβδου-μοντέλου πλοίου.

4.4 Πείραμα ράβδου-πλοίου

Το μοντέλο πλοίου τοποθετήθηκε αρχικά στην γειωμένη μεταλλική πλάκα και καταπονήθηκε υπό κρουστικές τάσεις για τρεις διαφορετικές αποστάσεις της φορτισμένης ράβδου από την γειωμένη πλάκα, D=50cm, D=75 cm και D=100cm για αρνητική

πολικότητα.. Οι κρουστικές τάσεις που επιβλήθηκαν αντιστοιχούν σε 97,5% πιθανότητα διάσπασης, όπως υπολογίστηκαν στο πείραμα ράβδου-μεταλλικής πλάκας, οι οποίες έχουν αναχθεί σε διορθωμένες τάσεις με βάση τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Για τον προσδιορισμό της κατανομής της πιθανότητας σύλληψης στην εκάστοτε κατασκευή του πλοίου ακολουθήσαμε την εξής διαδικασία: Με σταθερή επιβαλλόμενη τάση διάσπασης U_s , η οποία αντιστοιχεί σε πιθανότητα διάσπασης 97.5%, και σταθερή απόσταση μεταξύ φορτισμένης ράβδου, η οποία αναπαριστά τον κατερχόμενο οχετό, και μεταλλικής πλάκας D , επιβλήθηκαν 20 κρουστικές τάσεις για κάθε πλευρική απόσταση φορτισμένης ράβδου-κατασκευής πλοίου. Ξεκινώντας από την πλευρική απόσταση στην οποία η πιθανότητα σύλληψης είναι 0% (δηλαδή καμία από τις 20 επιβολές τάσης δεν οδηγούσε σε σύλληψη του κεραυνού από την υπό μελέτη κατασκευή του πλοίου), μελετήσαμε διάφορες πλευρικές αποστάσεις μέχρι την απόσταση εκείνη στην οποία η πιθανότητα σύλληψης είναι 100% (δηλαδή όλες οι εκκενώσεις κατέληγαν στην υπό μελέτη κατασκευή). Η ίδια ακριβώς διαδικασία, με την ανάλογη επεξεργασία που παρουσιάζεται στη συνέχεια του κεφαλαίου, όσον αφορά υπερτάσεις θετικής πολικότητας, παρατίθεται στην εργασία [38].

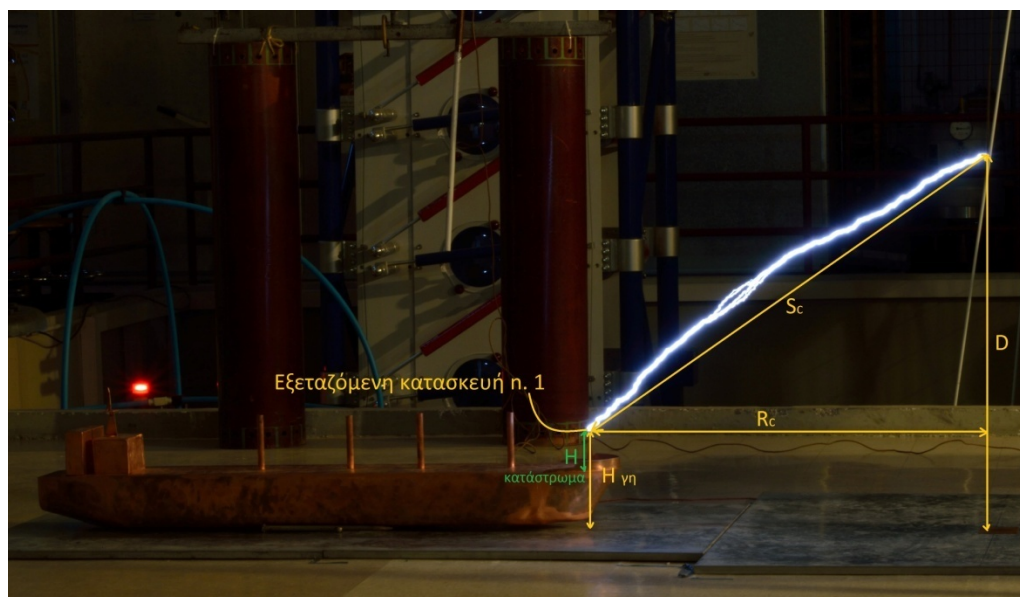
Αφού ολοκληρώθηκαν οι επιβολές των τάσεων, εξήχθησαν οι καμπύλες κατανομής πιθανότητας σύλληψης. Η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην υπό μελέτη κατασκευή είναι p ενώ η πιθανότητα να καταλήξει οπουδήποτε αλλού είναι $(1-p)$. Οι κατανομές πιθανότητας σύλληψης προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή και για κάθε κατανομή πιθανότητας σύλληψης υπολογίστηκε η μέση τιμή της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κατασκευής πλοίου στην οποία η πιθανότητα σύλληψης είναι 50% καθώς και η τυπική της απόκλιση. Τέλος, γνωρίζοντας την μέση ακτίνα σύλληψης R_c υπολογίσαμε την αντίστοιχη μέση απόσταση πρόσκρουσης S_c από το Πυθαγόρειο θεώρημα.

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας αυτής τα οποία περιλαμβάνουν, για κάθε μία από τις υπό μελέτη κατασκευές:

- Τους πίνακες των πειραματικών μετρήσεων για αρνητική πολικότητα και ύψη της φορτισμένης ράβδου από τη γειωμένη πλάκα $D=50\text{cm}$, $D=75\text{cm}$ και $D=100\text{cm}$.
- Τις κατανομές πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης.
- Τη σύγκριση των πειραματικών κατανομών με τις θεωρητικές κατανομές που προκύπτουν από το στατιστικό μοντέλο.
- Συγκριτικά γραφήματα των πειραματικών ακτίνων σύλληψης και αποστάσεων πρόσκρουσης σε σχέση με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από διάφορα θεωρητικά μοντέλα.

4.5 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 1 από γειωμένη πλάκα

Η περιοχή στην οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις αυτές φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Προφανώς, λόγω του τρόπου προσέγγισής του, το σημείο αυτό δεν υπόκειται σε φαινόμενα γεινίασης και άρα αναμένεται να συμπεριφερθεί ως περίπτωση μεμονωμένου γειωμένου αντικειμένου.



Σχήμα 4.10: Σχηματικό διάγραμμα της προσέγγισης της κατασκευής n.1 από την πλευρά της γειωμένης πλάκας. R_c : ακτίνα σύλληψης, S_c : απόσταση πρόσκρουσης, D : απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας και H : ύψος κατασκευής.

Ακολουθώντας την διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4 εξήχθησαν τα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα:

Κατασκευή 1: προσέγγιση από γειωμένη πλάκα								
D = 50 cm	P = 986 mbar			H = 7.69 g/cm ³ (42 %)			T = 21 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	49	45	40	35	33	31	28	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	15	35	45	70	95	100	-
D = 75 cm	P = 992 mbar			H = 7.76 g/cm ³ (40 %)			T = 22 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	76	70	66	62	58	55	53	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	10	20	65	85	95	100	-
D = 100 cm	P = 997 mbar			H = 5.433 g/cm ³ (28 %)			T = 22 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	122	110	100	95	90	80	70	67
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	25	40	60	60	80	95	100

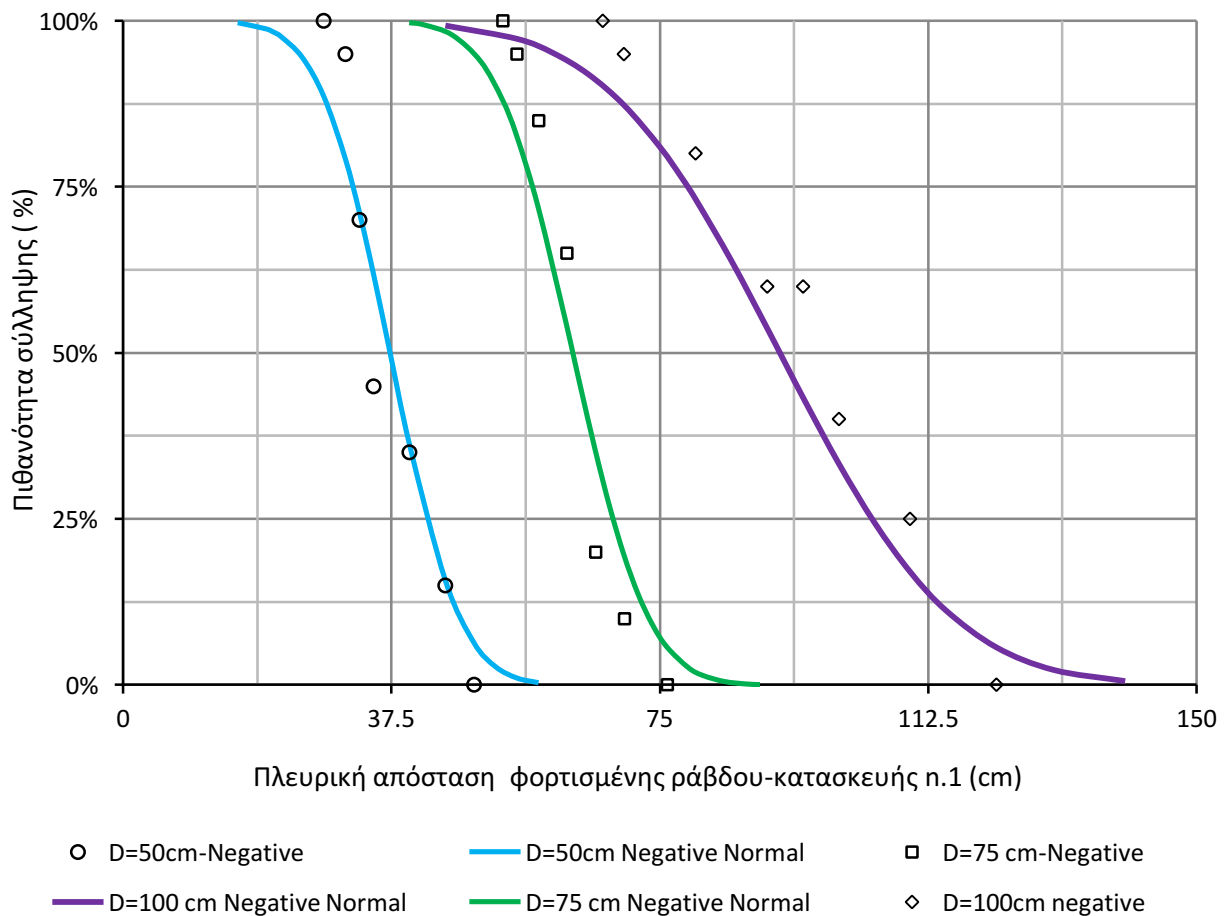
Πίνακας 4.2: Πειραματικά αποτελέσματα προσέγγισης της κατασκευής 1 από την γειωμένη πλάκα με τις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αρνητική πολικότητα.

Οι τάσεις διάσπασης που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το διάκενο βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

Αρνητική Πολικότητα	Απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D		
	50 cm	75 cm	100 cm
Διορθωμένη τάση διάσπασης U_s (kV)	581.1 kV	806.1 kV	960.5 kV

Πίνακας 4.3: Τάσεις διάσπασης κατασκευής 1 για αρνητική πολικότητα, διορθωμένες σύμφωνα με τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω, εξήχθησαν οι εξής κατανομές σύλληψης της εκκένωσης:

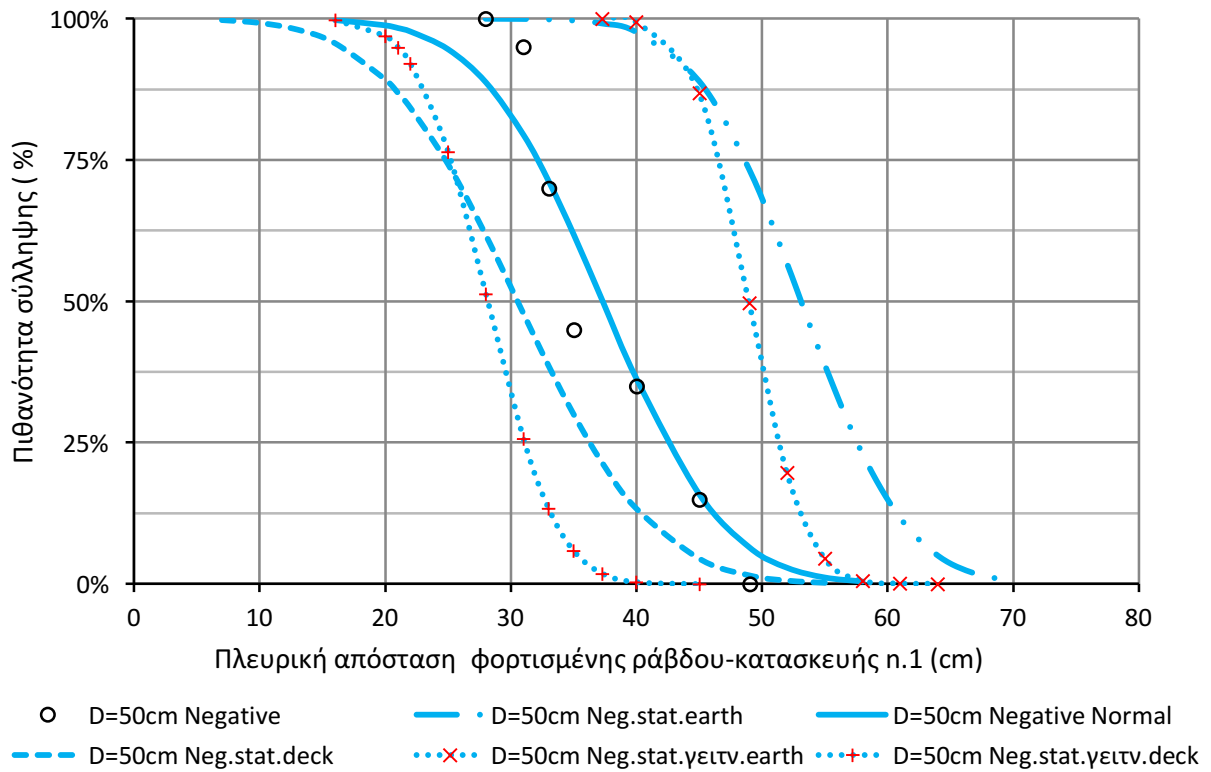


Σχήμα 4.11: Πειραματικές καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από την κατασκευή n.1 του πλοίου οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

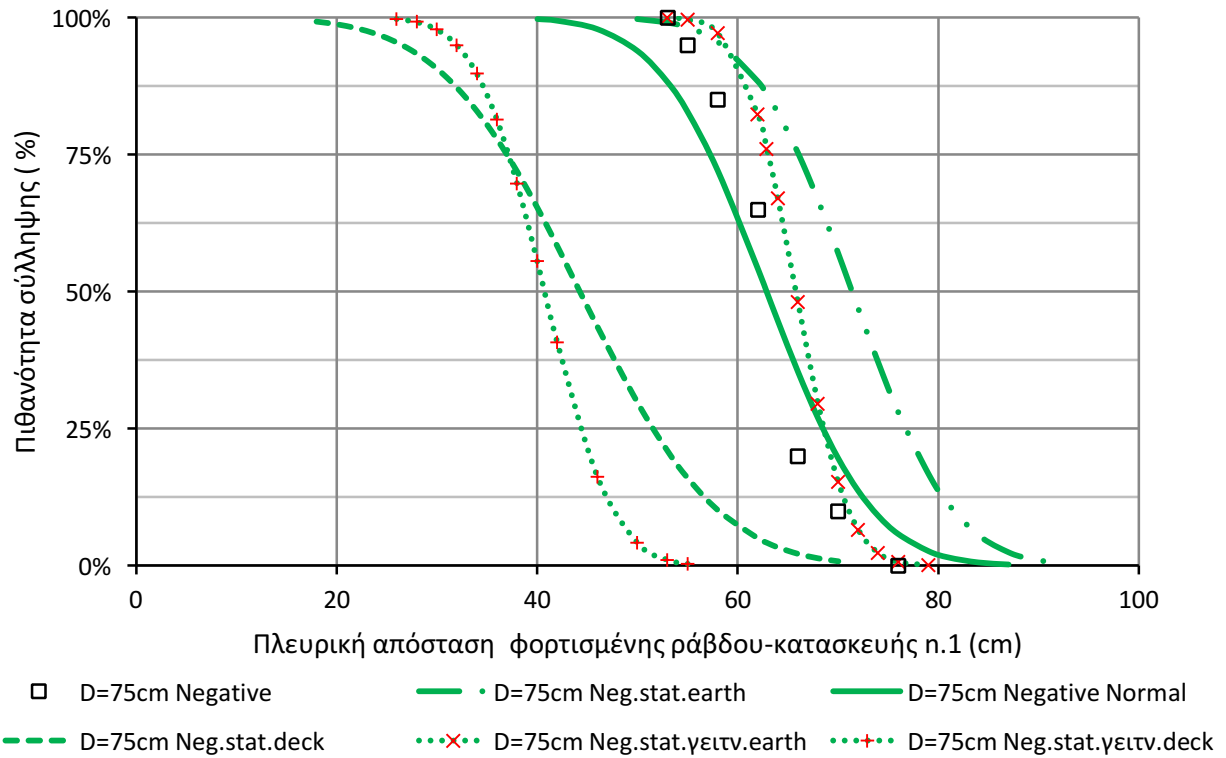
Στη συνέχεια παρατίθενται τρία διαγράμματα, ένα για κάθε απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, στα οποία αναπαριστώνται οι εξής κανονικές κατανομές:

- Η κατανομή που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα.

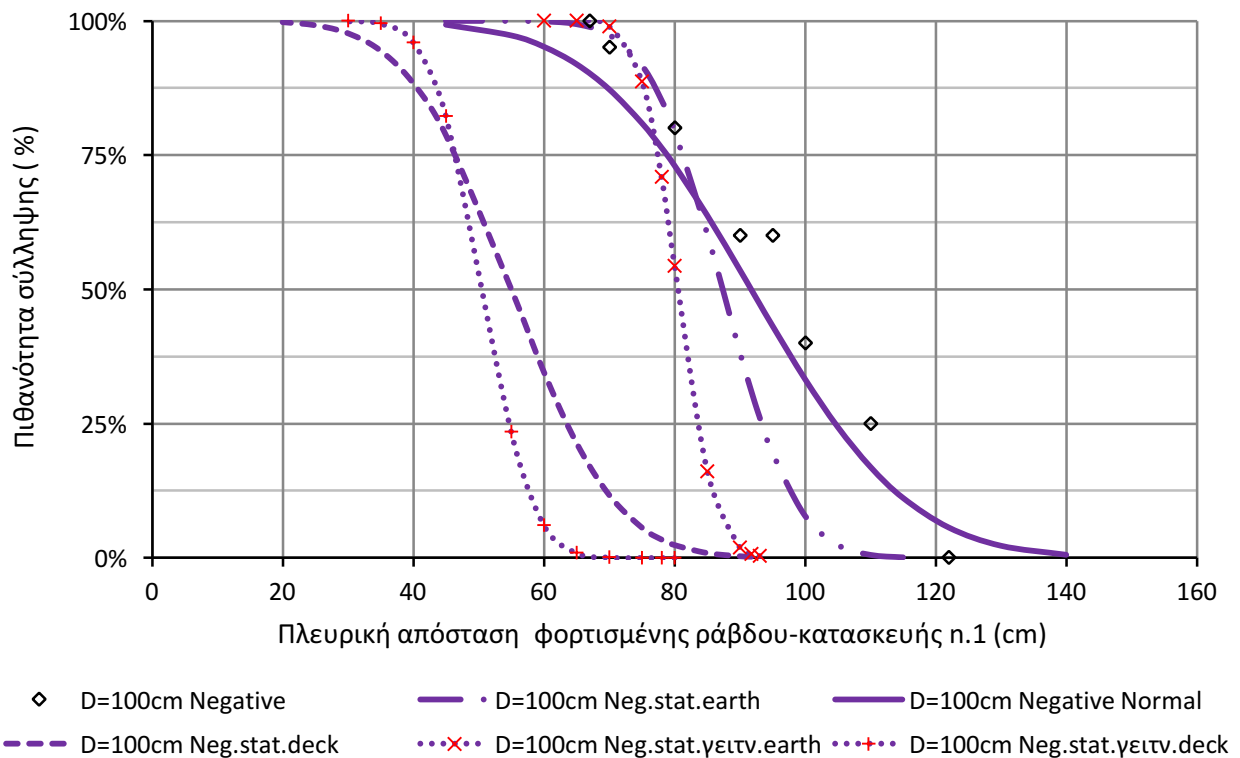
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου.



Σχήμα 4.12: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.1 του πλοίου για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=50cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



Σχήμα 4.13: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.1 του πλοίου για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=75cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



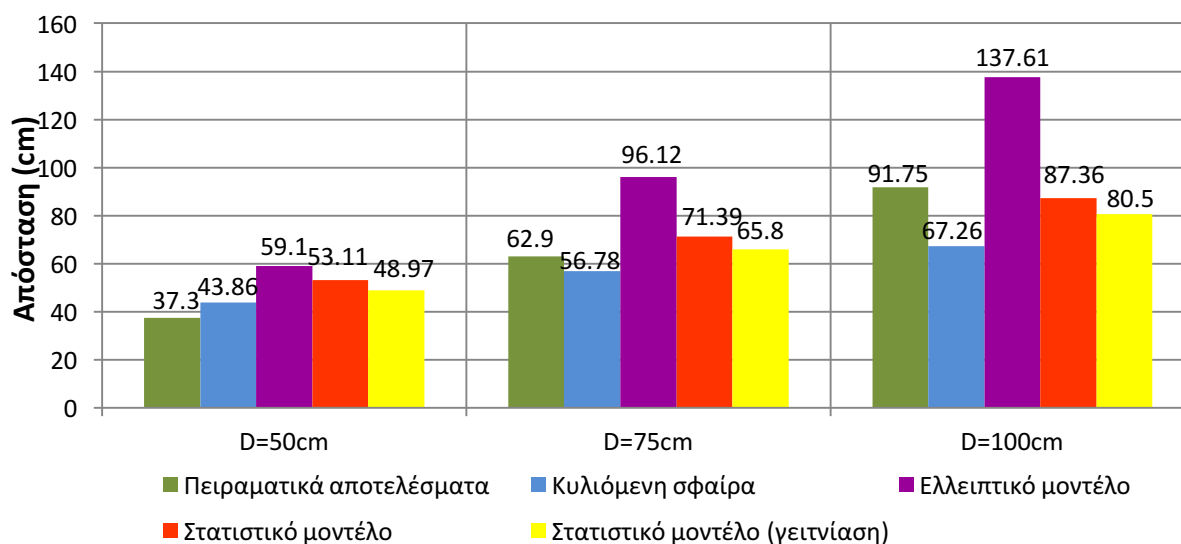
Σχήμα 4.14: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.1 του πλοίου για

απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας $D=100\text{cm}$ όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

Ένα πρώτο γενικό σχόλιο αναφορικά με τις κανονικές κατανομές είναι το γεγονός ότι στο μεγαλύτερο μέρος τους το εύρος τιμών που καλύπτουν οι πειραματικές κατανομές εμπεριέχεται-συμπίπτει με το αντίστοιχο εύρος τιμών των θεωρητικών κατανομών, ειδικά στην περίπτωση $D=50\text{cm}$, όπου υπάρχει πλήρης επικάλυψη. Παρατηρούμε ότι οι τιμές που προβλέπει η πειραματική μας κατανομή είναι αρκετά κοντά στις τιμές των κατανομών του στατιστικού μοντέλου. Επίσης παρατηρούμε ότι η μορφή των πειραματικών μας κατανομών προσεγγίζει περισσότερο την κατανομή του στατιστικού μοντέλου για μεμονωμένο σημείο. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι όσο το ύψος D αυξάνεται, οι πειραματικές κατανομές απομακρύνονται από το σημείο 1 και αυξάνεται η τυπική τους απόκλιση. Οι πειραματικές κανονικές κατανομές για $D=75\text{cm}$ και $D=100\text{cm}$ προσεγγίζουν περισσότερο τις θεωρητικές κανονικές κατανομές για μεμονωμένο σημείο στην οποία τα ύψη D και H έχουν μετρηθεί από το ύψος της γειωμένης πλάκας. Ωστόσο, για απόσταση $D=50\text{cm}$ παρατηρήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις δημιουργία κεραυνικού καναλιού μεταξύ της φορτισμένης ράβδου και της κουπαστής του πλοίου και γι αυτό το λόγο η πειραματική κατανομή, σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα διάκενα, είναι μετατοπισμένη περισσότερο προς την κατανομή του στατιστικού μοντέλου όπου τα ύψη D και H είναι υπολογισμένα ως προς το κατάστρωμα.

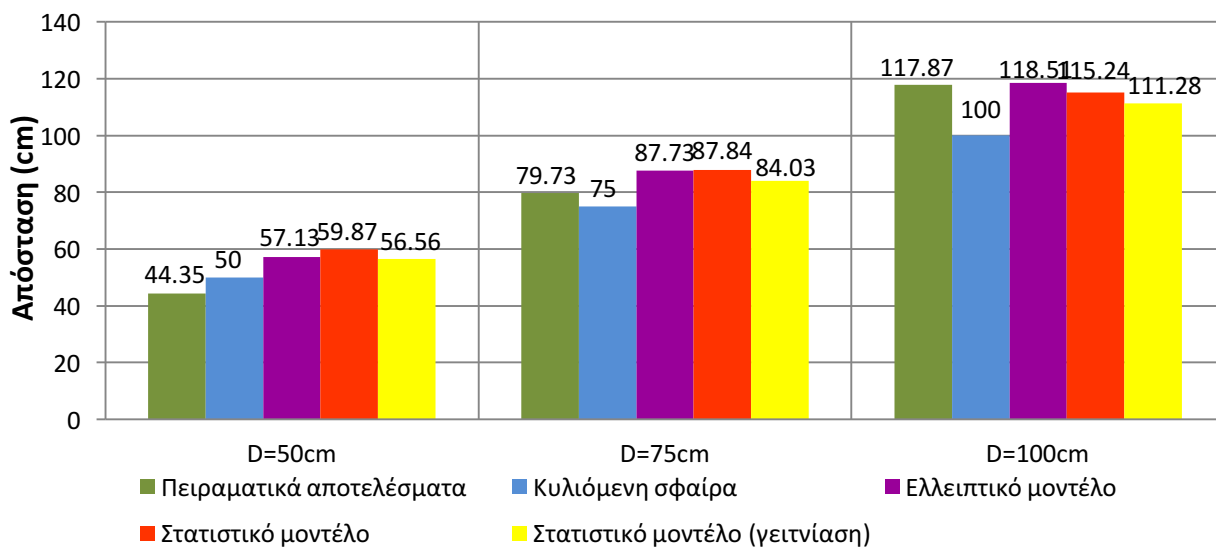
Τέλος, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για τις ακτίνες σύλληψης και τις αποστάσεις πρόσκρουσης.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



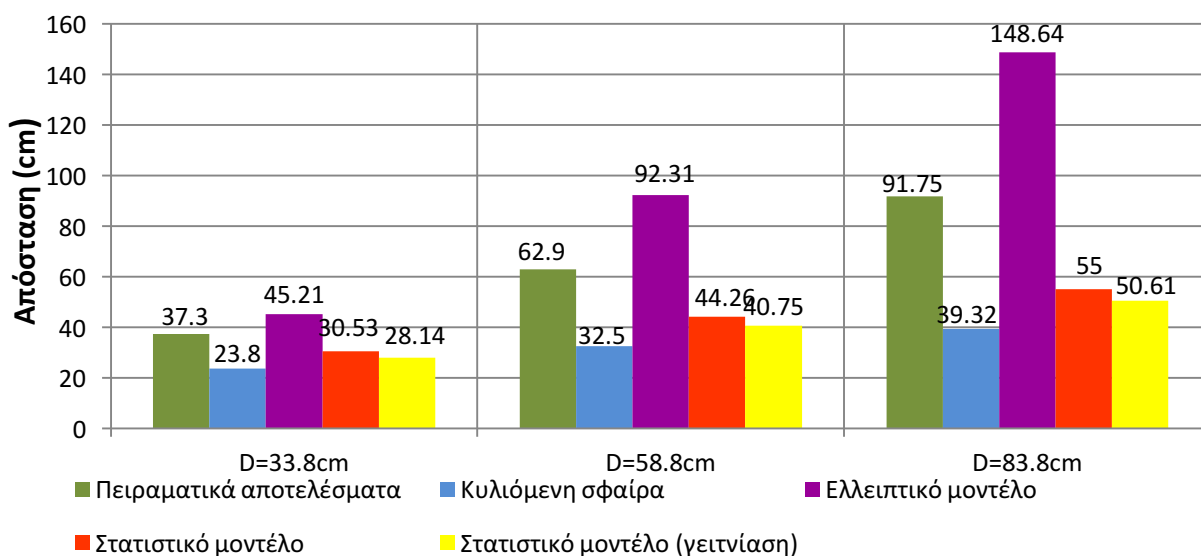
Σχήμα 4.15: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)



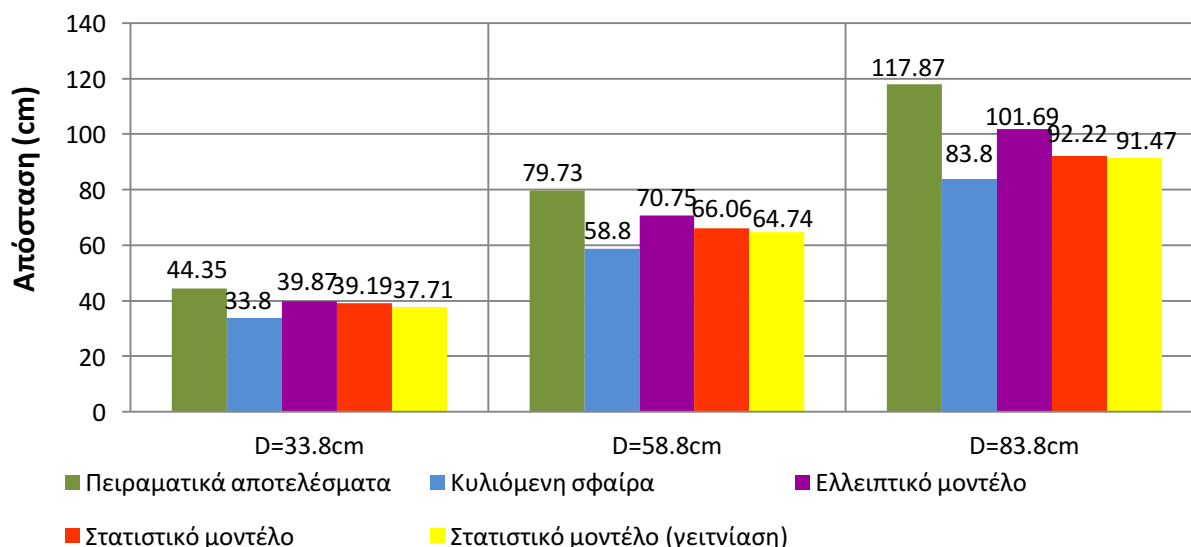
Σχήμα 4.16: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



Σχήμα 4.17: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)

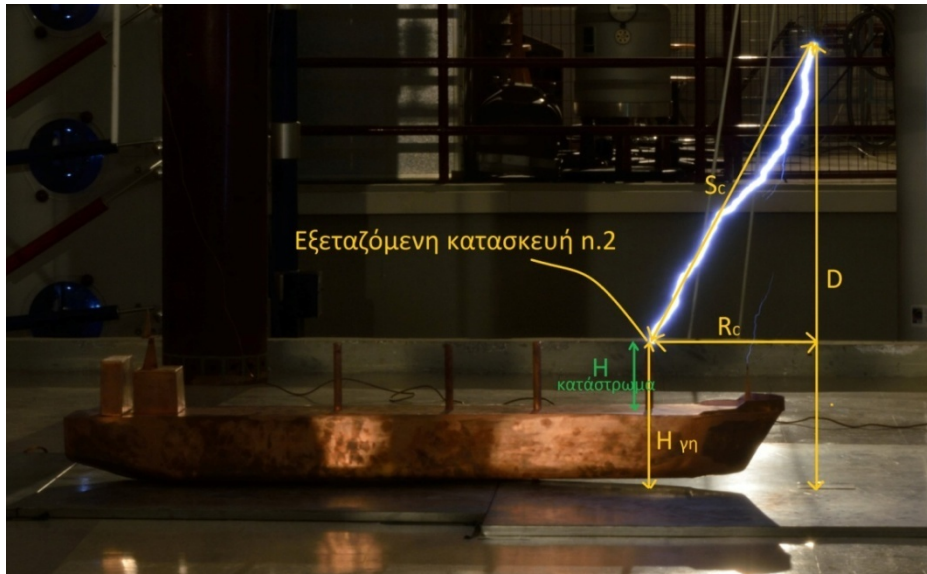


Σχήμα 4.18: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα προσεγγίζονται καλύτερα από τα θεωρητικά όταν θεωρήσουμε ως ύψος της κατασκευής και της φορτισμένης ράβδου την απόστασή τους από την γειωμένη πλάκα και όχι την απόστασή τους από το κατάστρωμα. Επίσης, επιβεβαιώνονται ορισμένες γνωστές ποιοτικές παρατηρήσεις αναφορικά με τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα. Συγκεκριμένα, τα στατιστικά μοντέλα είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικά τόσο για την ακτίνα σύλληψης όσο και για την απόσταση πρόσκρουσης, ενώ η κυλιόμενη σφαίρα και το ελλειπτικό μοντέλο δίνουν καλύτερα αποτελέσματα για την απόσταση πρόσκρουσης. Επίσης παρατηρούμε ότι η κυλιόμενη σφαίρα δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ακτίνα σύλληψης για μικρές αποστάσεις φορτισμένης ράβδου-πλάκας. Παράλληλα καταδεικνύεται το γεγονός ότι το ελλειπτικό μοντέλο υπερεκτιμά την ακτίνα σύλληψης όταν πρόκειται για εκκενώσεις αρνητικής πολικότητας.

4.6 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 2 από κατασκευή 1

Η περιοχή στην οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις αυτής της ενότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η περίπτωση αυτή αποτελεί προσέγγιση γειωμένης ράβδου, η οποία βρίσκεται υπό την επίδραση κοντύτερης γειωμένης ράβδου, δηλαδή βρίσκεται υπό γεινίαση.



Σχήμα 4.19: Σχηματικό διάγραμμα της προσέγγισης της κατασκευής n.2 από την πλευρά της κατασκευής n.1. R_c : ακτίνα σύλληψης, S_c : απόσταση πρόσκρουσης, D : απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας και H : ύψος κατασκευής.

Ακολουθώντας την διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4 εξήχθησαν τα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα:

Κατασκευή 2: προσέγγιση από κατασκευή 1									
D = 50 cm	P = 988 mbar			H = 8.84 g/m ³ (43 %)			T = 23 °C		
Πλευρική απόσταση (cm)	18	16	14	12	-	-	-	-	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	45	95	100	-	-	-	-	-
D = 75 cm	P = 997 mbar			H = 9.51 g/m ³ (49 %)			T = 22 °C		
Πλευρική απόσταση (cm)	25	22	20	17	-	-	-	-	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	25	65	100	-	-	-	-	-
D = 100 cm	P = 978 mbar			H = 10.89 g/m ³ (53 %)			T = 23 °C		
Πλευρική απόσταση (cm)	39	37	33	30	27	25	22	20	19
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	5	10	15	55	75	90	95	100

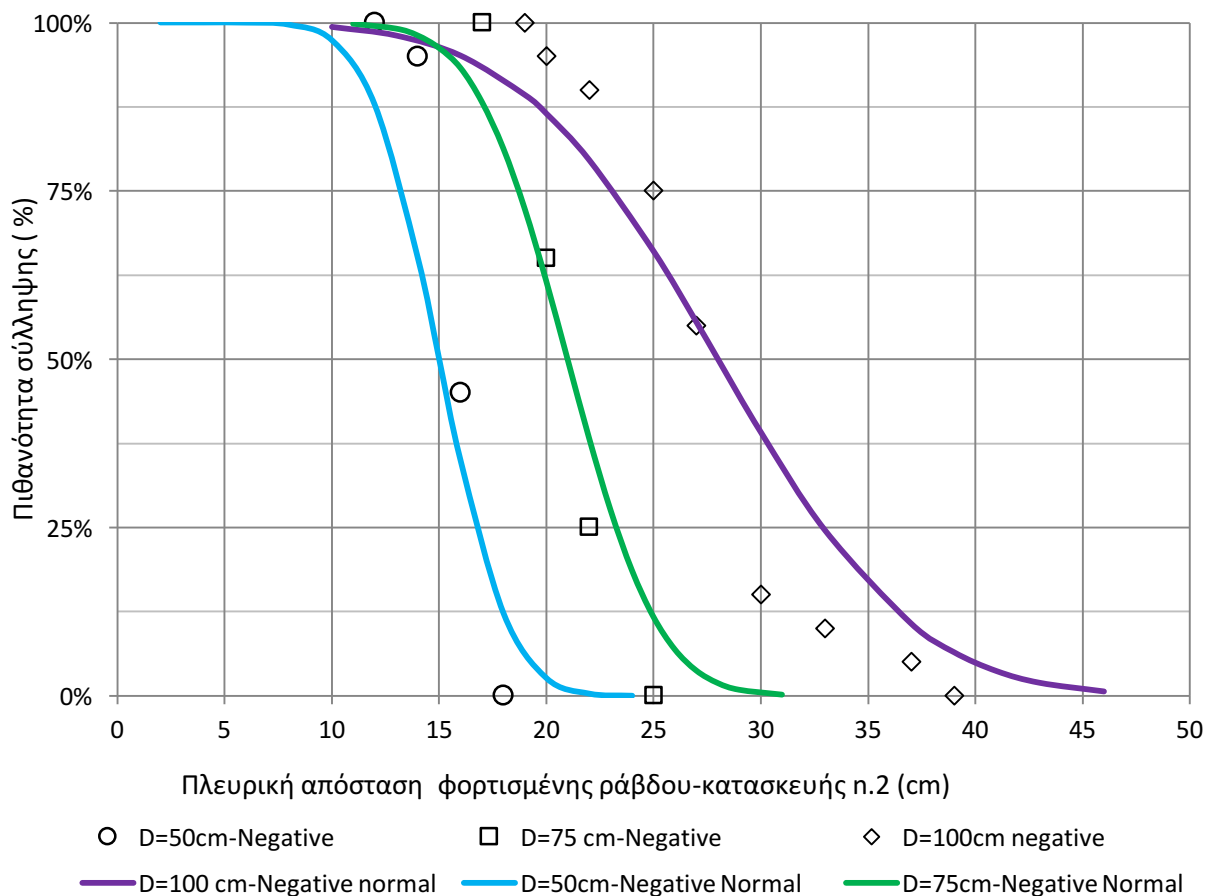
Πίνακας 4.5: Πειραματικά αποτελέσματα προσέγγισης της κατασκευής 2 από την κατασκευή 1 με τις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αρνητική πολικότητα.

Οι τάσεις διάσπασης που χρησιμοποιήθηκαν στις αρνητικής πολικότητας μετρήσεις είναι οι εξής:

Αρνητική Πολικότητα	Απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D		
	50 cm	75 cm	100 cm
Διορθωμένη τάση διάσπασης U_s (kV)	574.3 kV	799.2 kV	942.4 kV

Πίνακας 4.4: Τάσεις διάσπασης κατασκευής 2 για αρνητική πολικότητα, διορθωμένες σύμφωνα με τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξήχθησαν οι εξής κατανομές σύλληψης της εκκένωσης:

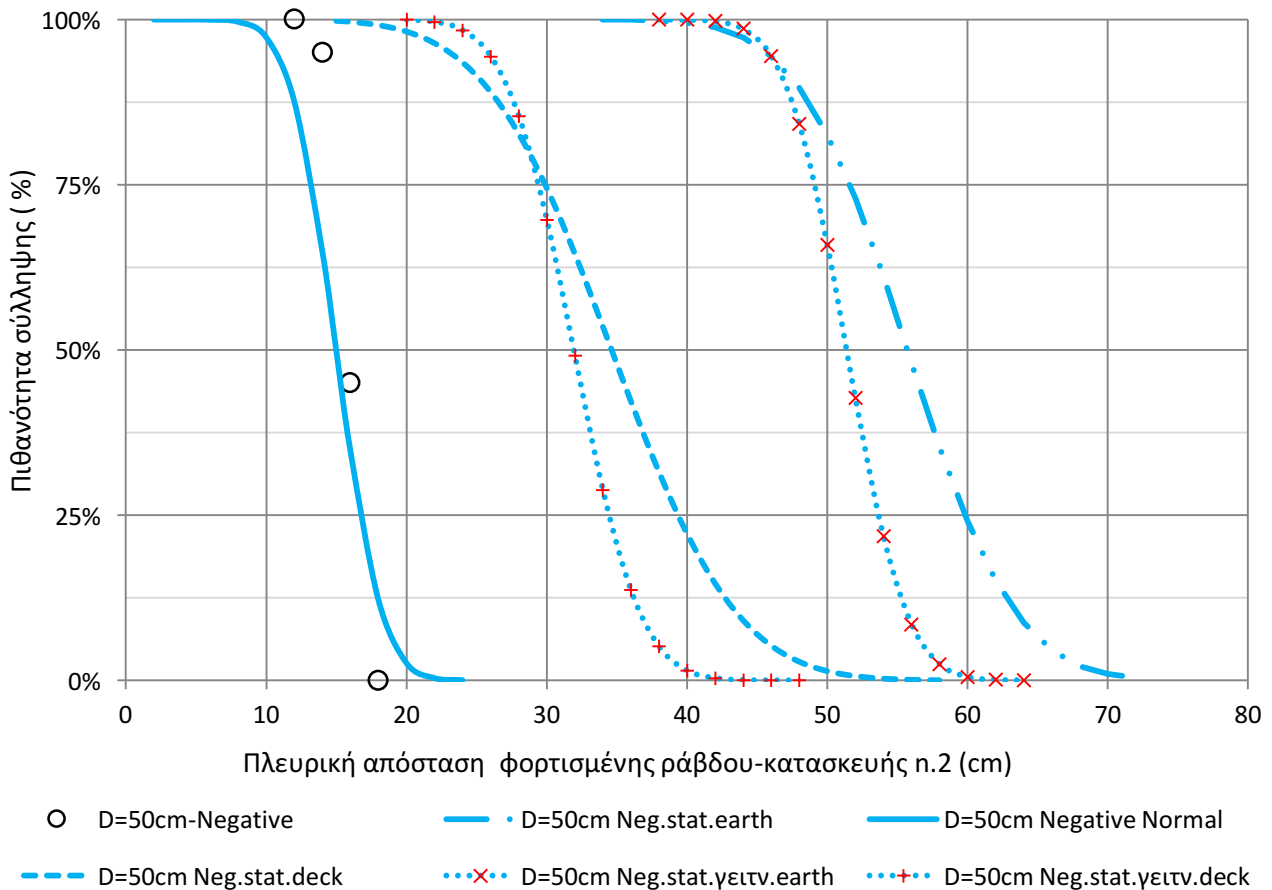


Σχήμα 4.20: Πειραματικές καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν προσεγγίζεται από την κατασκευή n.1, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

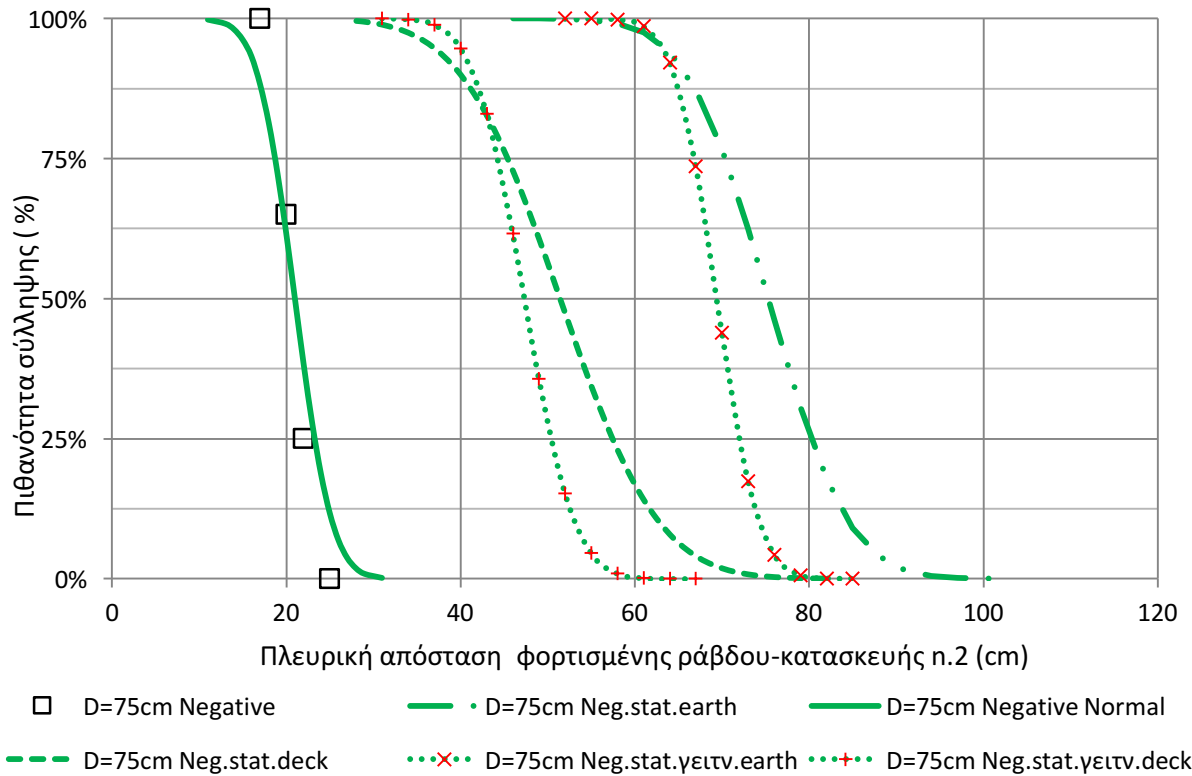
Στη συνέχεια παρατίθενται τρία διαγράμματα, ένα για κάθε απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, στα οποία αναπαριστώνται οι εξής κανονικές κατανομές:

- Η κατανομή που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα.

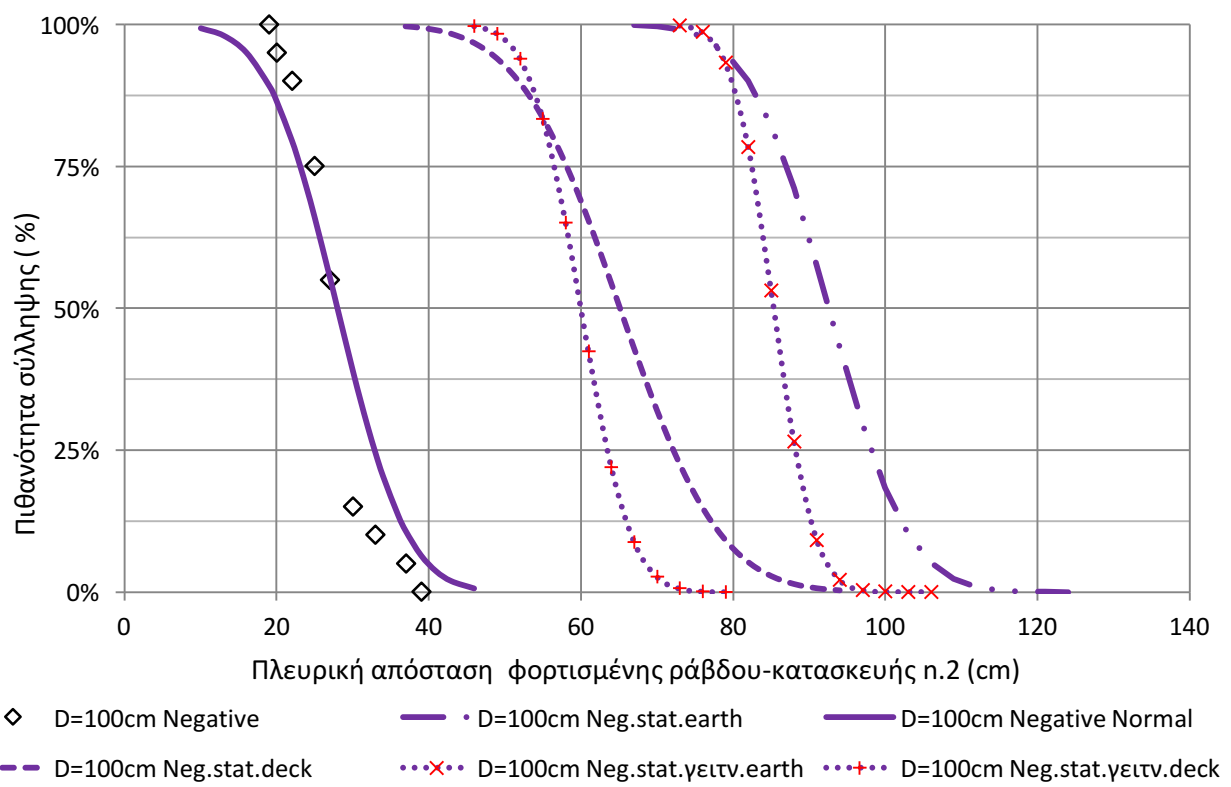
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου.



Σχήμα 4.21: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.1, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=50cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



Σχήμα 4.22: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.1, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=75cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

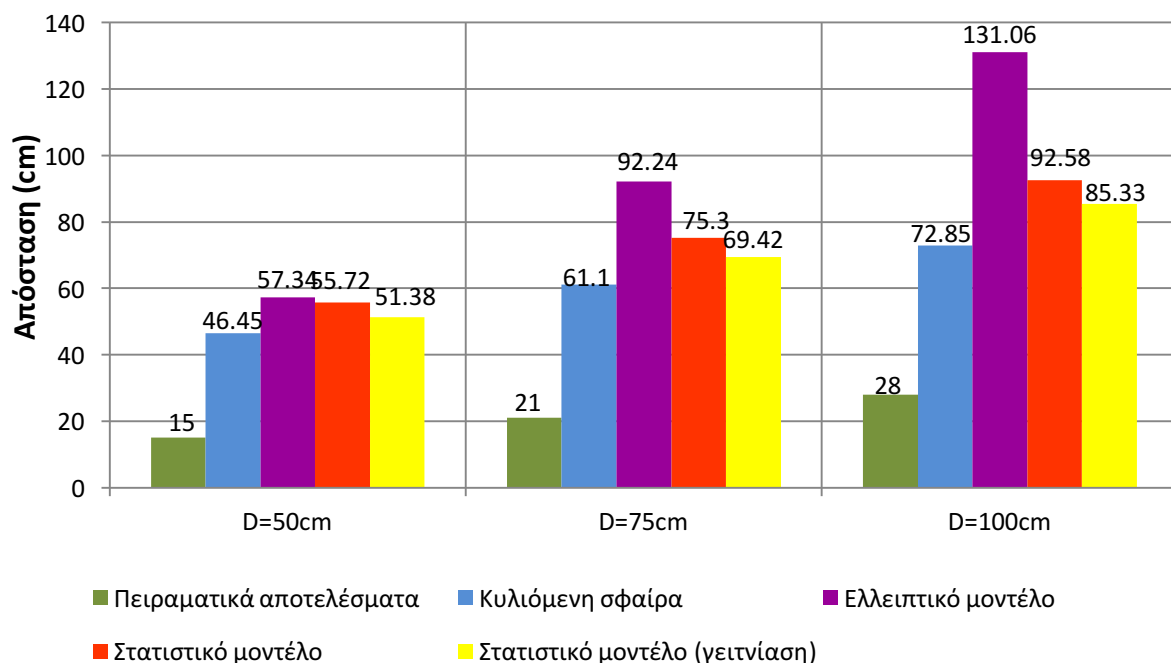


Σχήμα 4.23: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.1, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=75cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

Παρατηρούμε ότι οι πειραματικές κατανομές προβλέπουν τιμές για την πλευρική απόσταση φορτισμένης ράβδου-κατασκευής αισθητά μικρότερες από αυτές που προβλέπει το στατιστικό μοντέλο. Στην συνέχεια, παρατηρούμε ότι οι τιμές του στατιστικού μοντέλου που έχουν μικρότερη απόκλιση από τις πειραματικές είναι αυτές που προκύπτουν όταν θεωρήσουμε τα ύψη των δύο ράβδων με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου και όχι το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Τέλος, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι τιμές της τυπικής απόκλισης της πειραματικής κανονικής κατανομής προσεγγίζουν τις τιμές της τυπικής απόκλισης του θεωρητικού μοντέλου που λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα γειτνίασης.

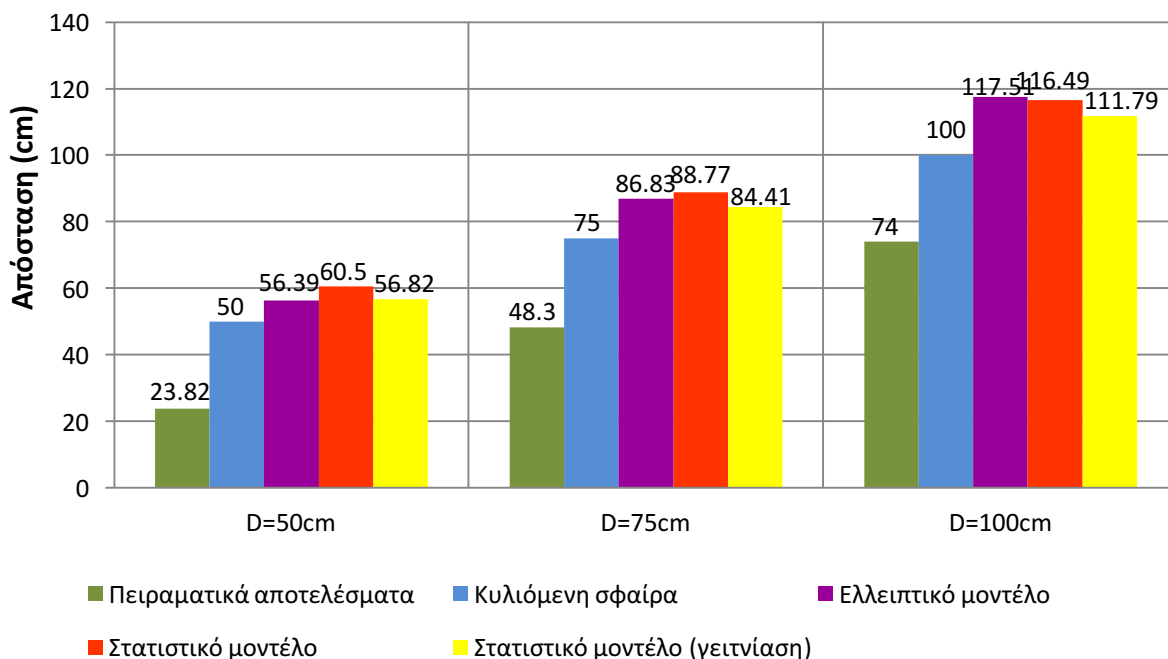
Στη συνέχεια, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για τις ακτίνες σύλληψης και τις αποστάσεις πρόσκρουσης.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



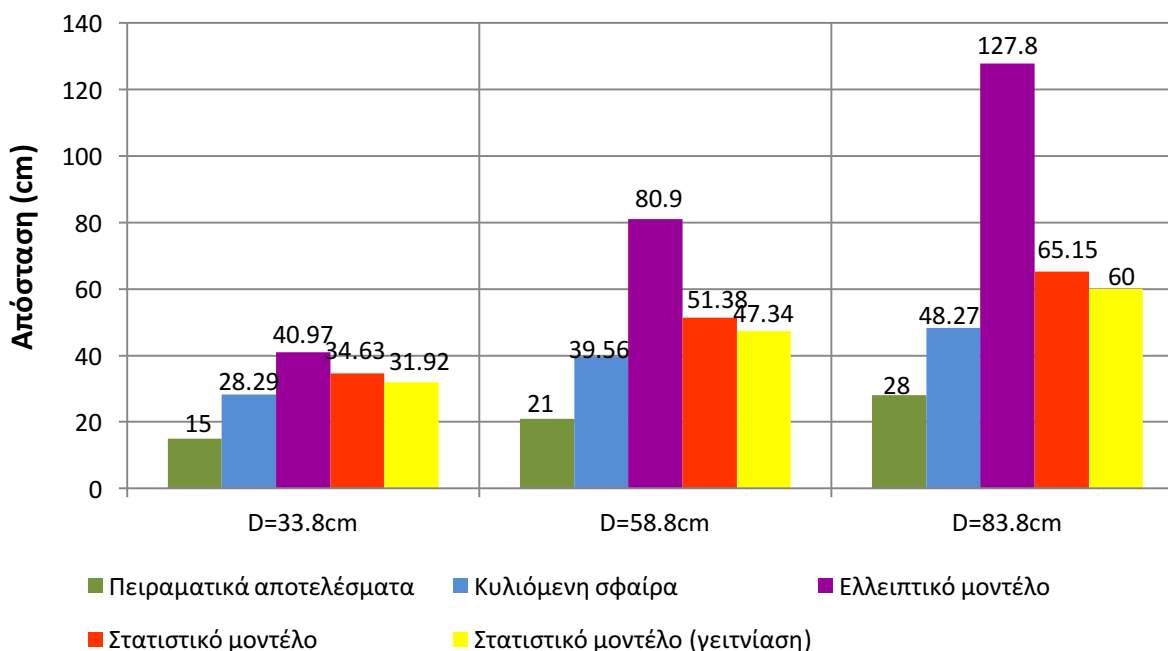
Σχήμα 4.24: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)



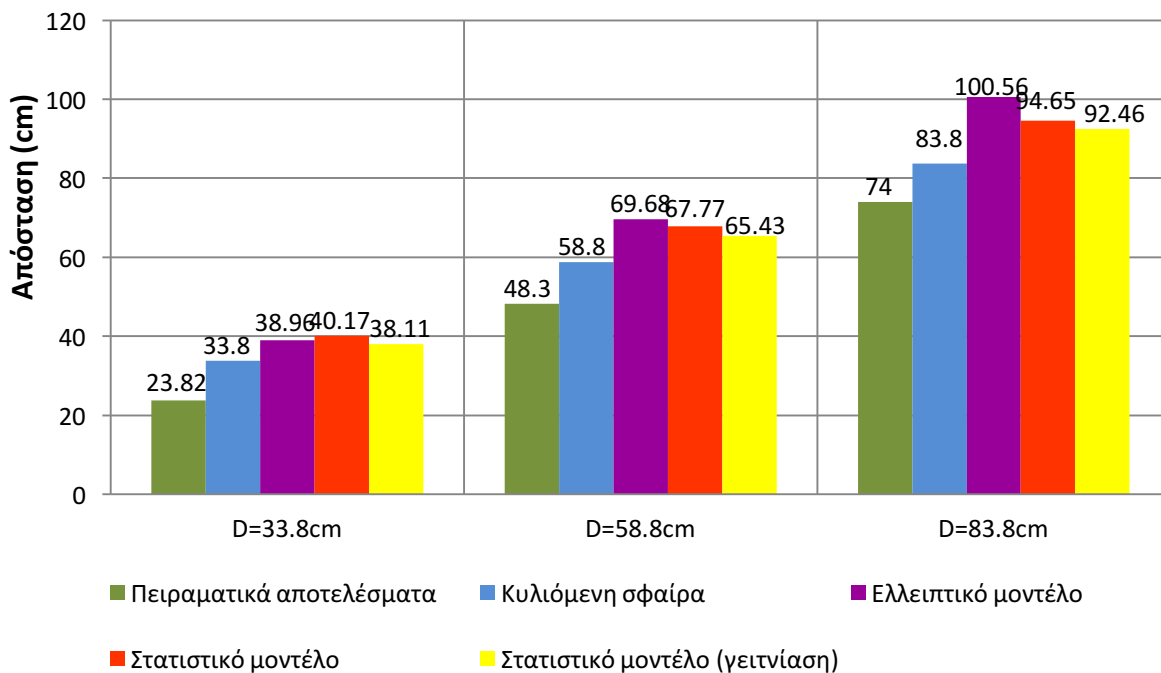
Σχήμα 4.25: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



Σχήμα 4.26: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(Sc)



Σχήμα 4.27: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πιο κοντά στα θεωρητικά όταν λαμβάνουμε το ύψος της φορτισμένης ράβδου και της κατασκευής του πλοίου από το επίπεδο του καταστρώματος και όχι από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Οι αποκλίσεις πειραματικών-θεωρητικών τιμών είναι αισθητές, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ακτίνας σύλληψης, ενώ για την απόσταση πρόσκρουσης παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση.

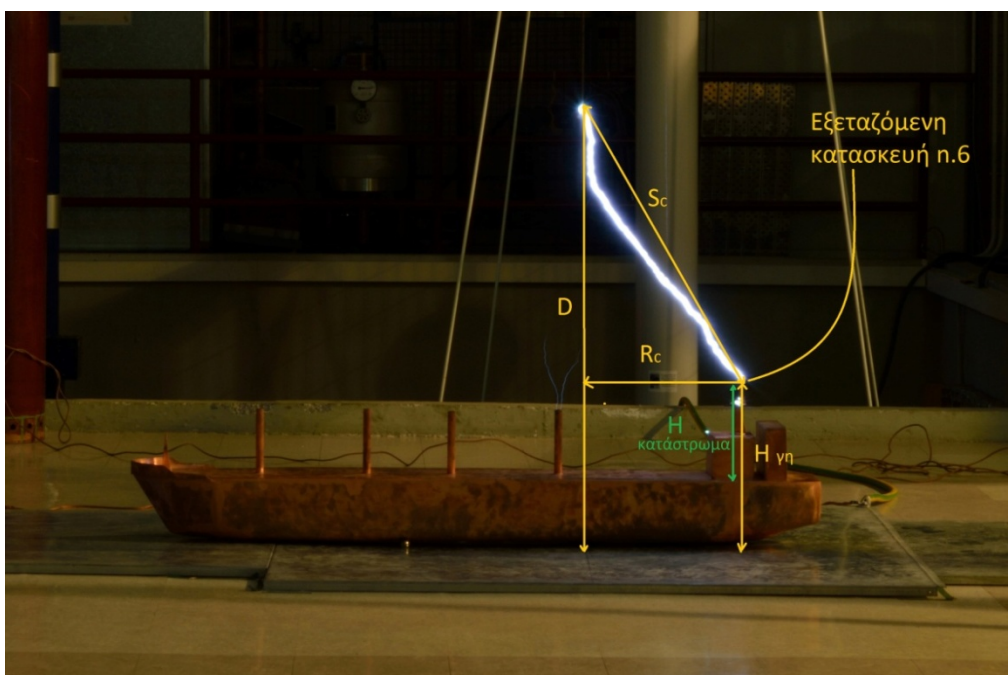
4.7 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 6 από κατασκευή 5

Η περιοχή στην οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις αυτής της ενότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η περίπτωση αυτή αποτελεί επίσης προσέγγιση γειωμένης ράβδου η οποία γεινιάζει με κοντύτερη γειωμένη ράβδου, όπως και στο κεφάλαιο 4.6.

Οι τάσεις διάσπασης που χρησιμοποιήθηκαν στις αρνητικής πολικότητας μετρήσεις είναι οι εξής:

Αρνητική Πολικότητα	Απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D		
	50 cm	75 cm	100 cm
Διορθωμένη τάση διάσπασης U_s (kV)	583.3 kV	804.9 kV	964 kV

Πίνακας 4.6: Τάσεις διάσπασης κατασκευής 6 για αρνητική πολικότητα, διορθωμένες σύμφωνα με τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες.



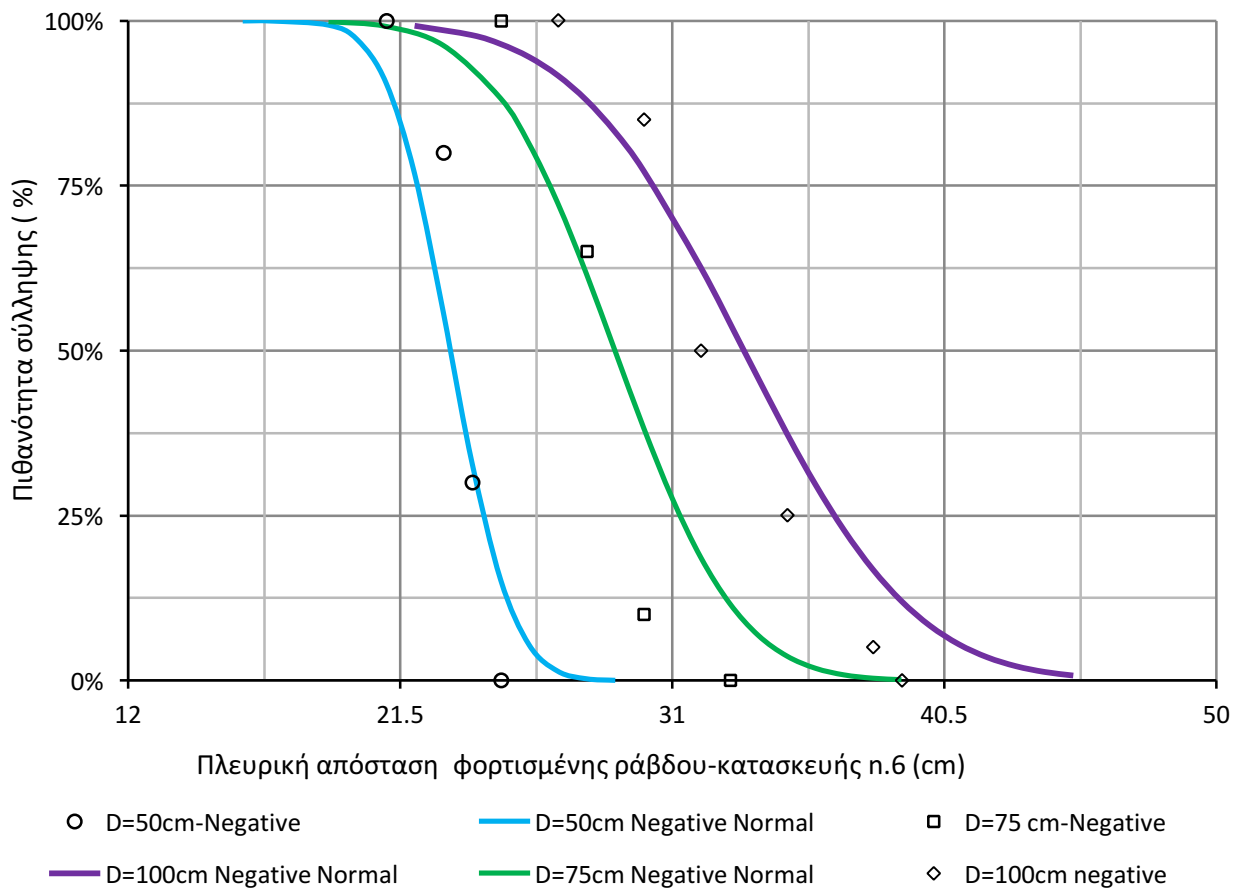
Σχήμα 4.28: Σχηματικό διάγραμμα της προσέγγισης της κατασκευής n.6 από την πλευρά της κατασκευής n.5. R_c : ακτίνα σύλληψης, S_c : απόσταση πρόσκρουσης, D : απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας και H : ύψος κατασκευής.

Ακολουθώντας την διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4 εξήχθησαν τα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα:

Κατασκευή 6: προσέγγιση από κατασκευή 5						
D = 50 cm	P = 1000 mbar		H = 9.12 g/m ³ (47 %)		T = 22 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	25	24	23	21	-	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	30	80	100	-	-
D = 75 cm	P = 1004 mbar		H = 6.40 g/m ³ (33 %)		T = 22 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	33	30	28	25	-	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	10	65	100	-	-
D = 100 cm	P = 997 mbar		H = 5.68 g/m ³ (55 %)		T = 21 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	39	38	35	32	30	27
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	5	25	50	85	100

Πίνακας 4.7: Πειραματικά αποτελέσματα προσέγγισης της κατασκευής 6 από την κατασκευή 5 με τις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αρνητική πολικότητα.

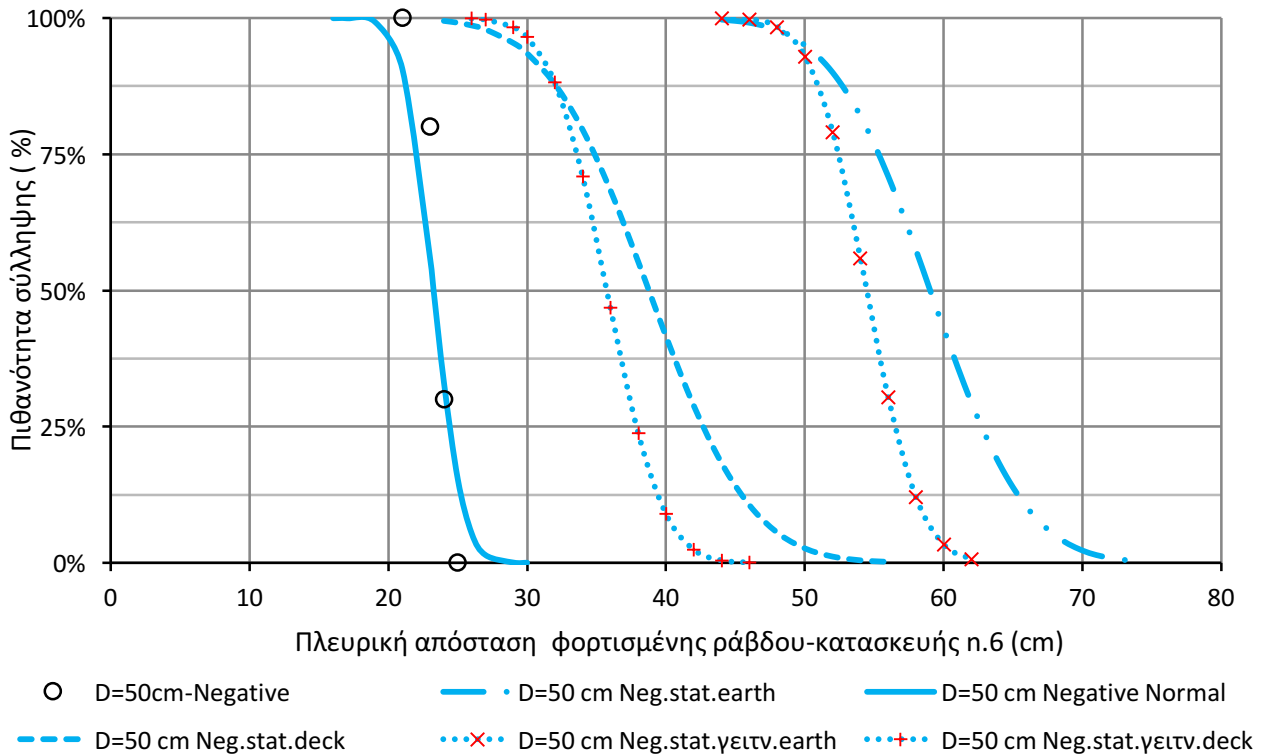
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξήχθησαν οι εξής κατανομές σύλληψης της εκκένωσης:



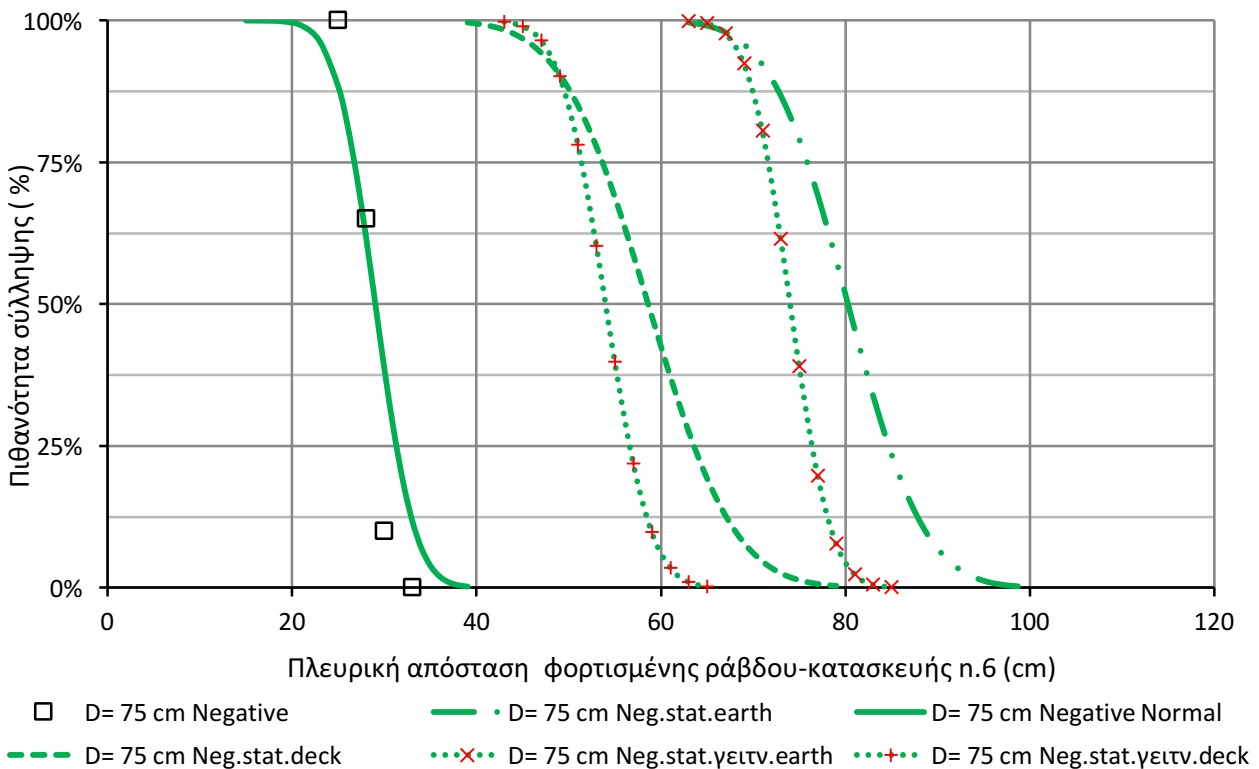
Σχήμα 4.29: Πειραματικές καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από την κατασκευή n.6 του πλοίου, όταν προσεγγίζεται από την κατασκευή n.5, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

Στη συνέχεια παρατίθενται τρία διαγράμματα, ένα για κάθε απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, στα οποία αναπαριστώνται οι εξής κανονικές κατανομές:

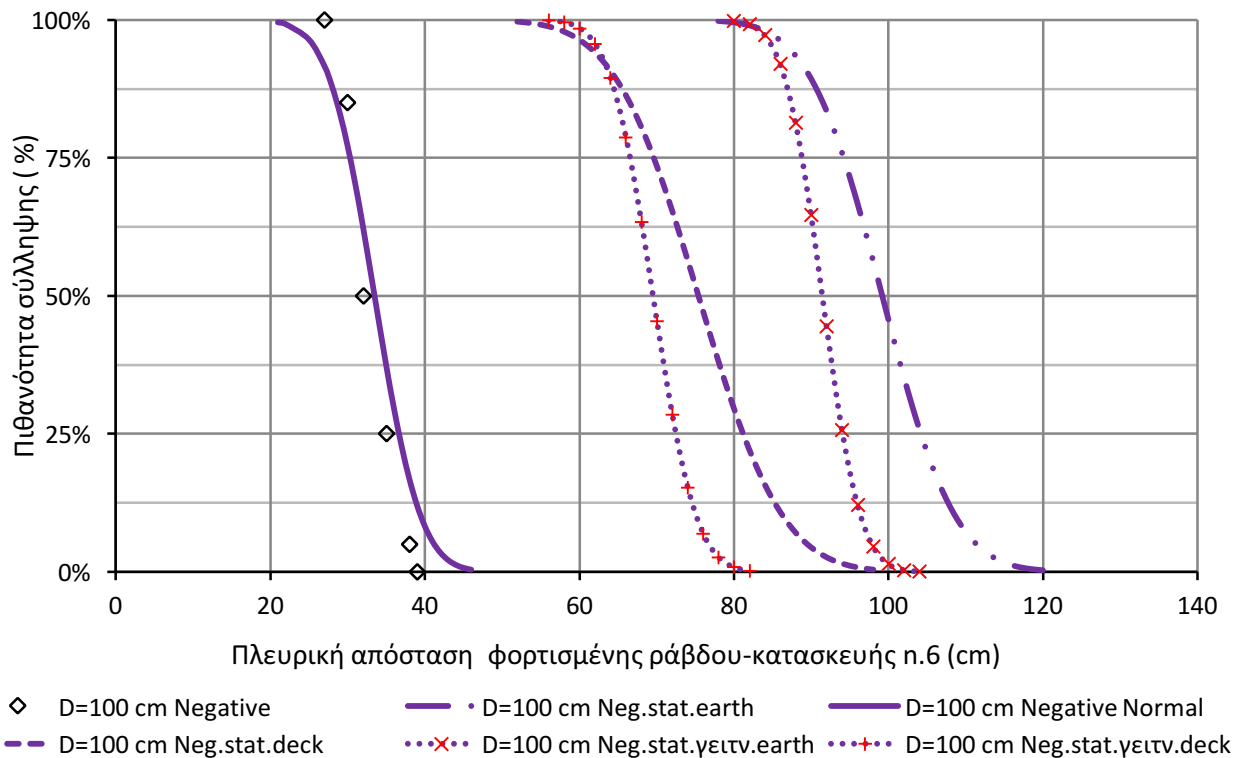
- Η κατανομή που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γειτνίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα.
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γειτνίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου.



Σχήμα 4.30: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.6 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.5, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=50cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



Σχήμα 4.31: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.6 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.5, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=75cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

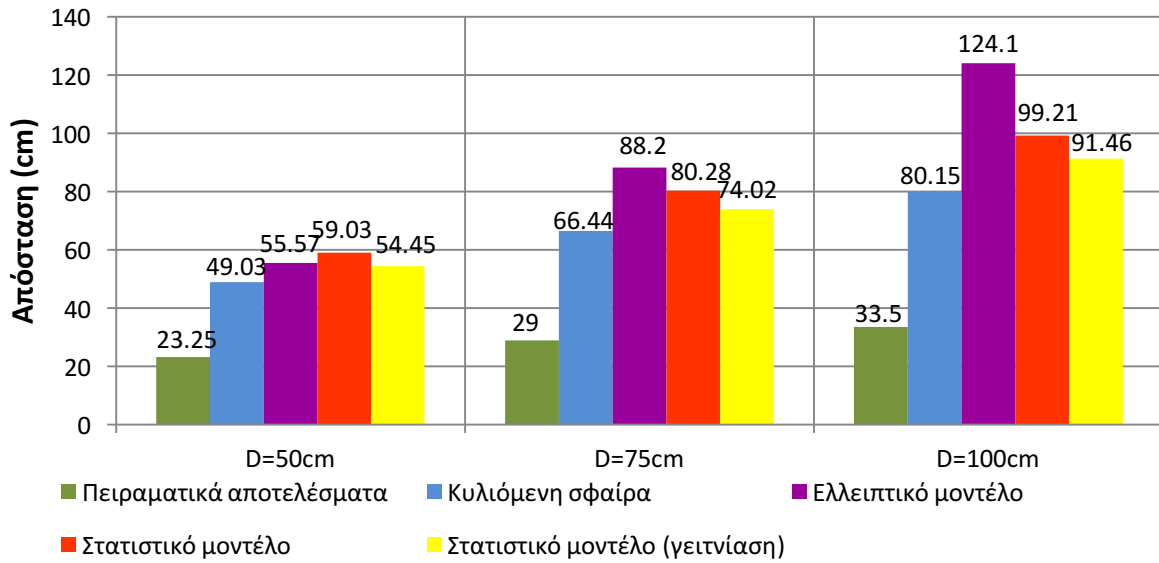


Σχήμα 4.32: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.6 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.5, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=100cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

Όπως και στο κεφάλαιο 4.6, όπου επίσης είχαμε προσέγγιση γειωμένης ράβδου η οποία υπόκειται σε φαινόμενα γεινίασης, παρατηρούμε ότι οι πειραματικές κατανομές προβλέπουν τιμές πλευρικής απόστασης αισθητά μειωμένες σε σχέση με το στατιστικό. Επίσης, η μείωση αυτή είναι μικρότερη αν θεωρήσουμε επίπεδο αναφοράς για τα ύψη των ράβδων το κατάστρωμα και όχι το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Η τυπική απόκλιση της πειραματικής κατανομής, ειδικά για τα διάκενα D=50cm και D=75cm είναι μικρότερη από την προβλεπόμενη σύμφωνα με τα στατιστικά μοντέλα. Οι πειραματικές κατανομές προσεγγίζουν την μορφή της κατανομής που προβλέπει το στατιστικό μοντέλο όταν υπάρχουν φαινόμενα γεινίασης.

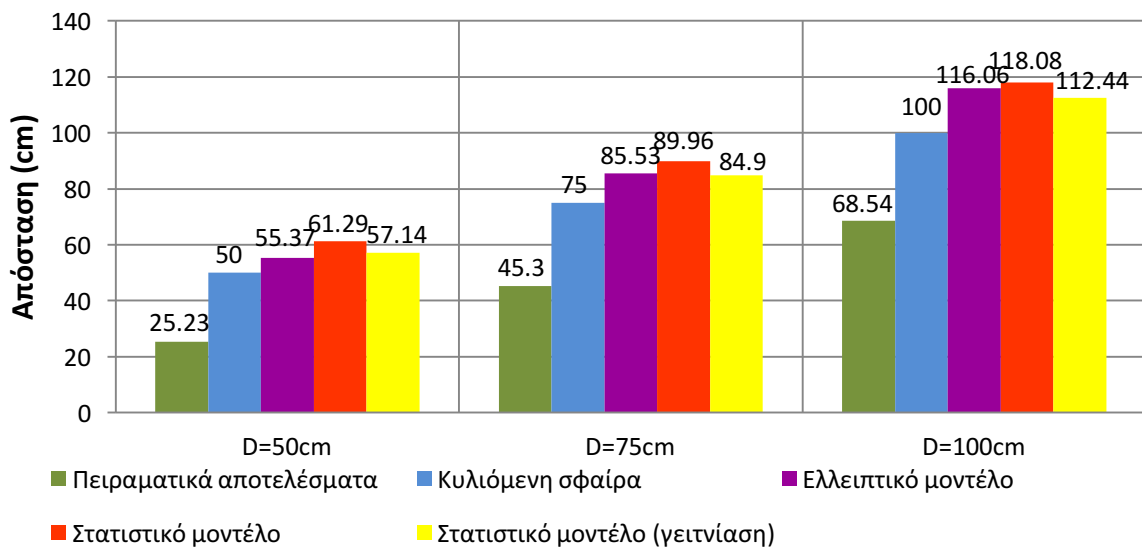
Στη συνέχεια, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για τις ακτίνες σύλληψης και τις αποστάσεις πρόσκρουσης.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



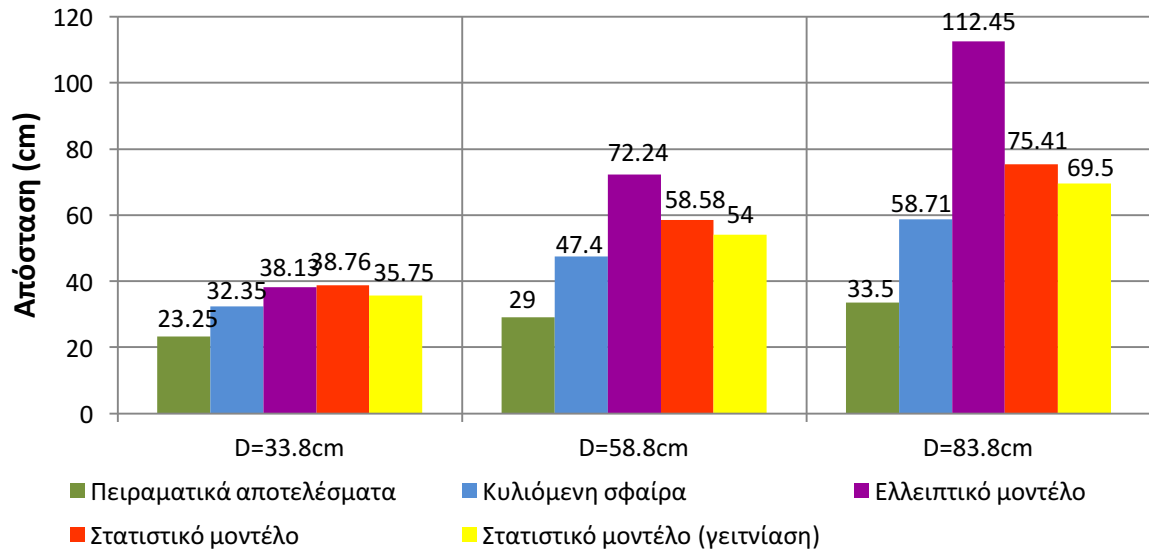
Σχήμα 4.33: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)



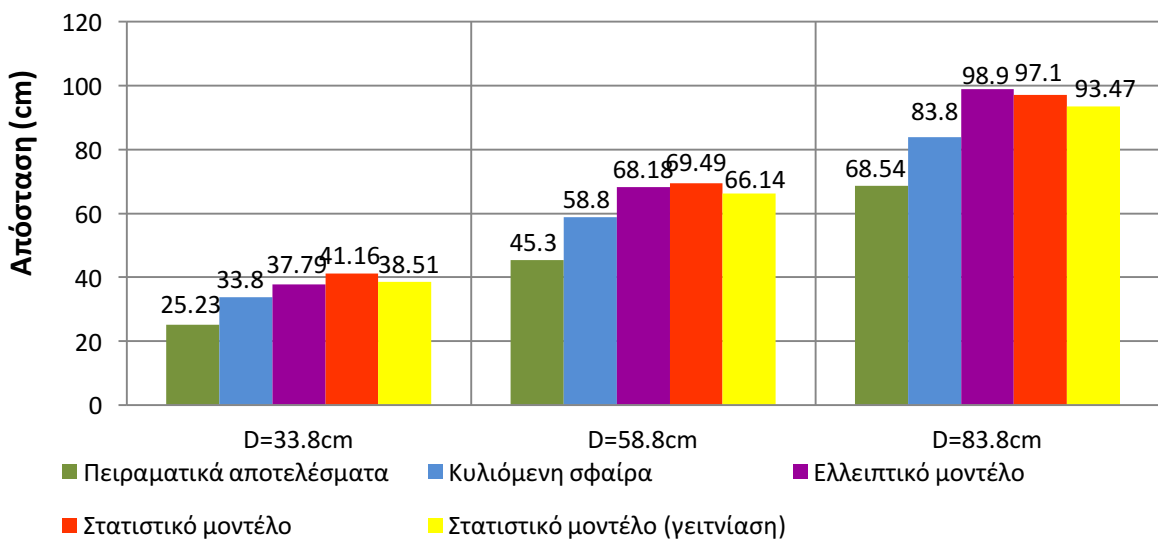
Σχήμα 4.34: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



Σχήμα 4.35: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)

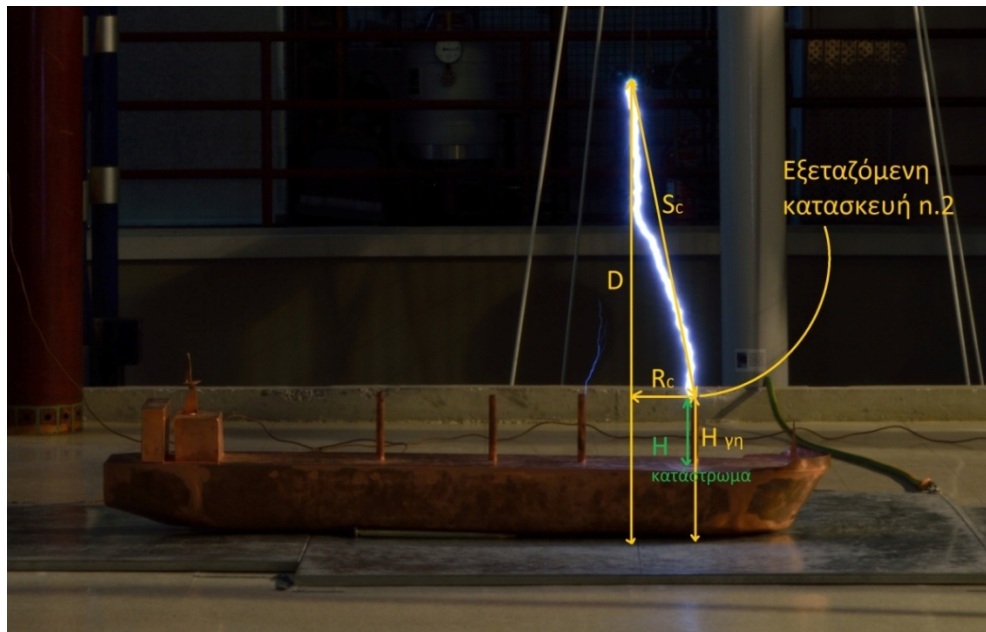


Σχήμα 4.36: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πιο κοντά στα θεωρητικά όταν λαμβάνουμε το ύψος της φορτισμένης ράβδου και της κατασκευής του πλοίου από το επίπεδο του καταστρώματος και όχι από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας.

4.8 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 2 από κατασκευή 3

Η περιοχή στην οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις αυτής της ενότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αυτή η περίπτωση αποτελεί επίσης μελέτη γειωμένης ράβδου που υπόκειται σε φαινόμενα γειννίασης. Ωστόσο, όπως γίνεται φανερό από το σχήμα, η προς μελέτη ράβδος και η γειννιάζουσα ράβδος είναι ισοϋψείς, σε αντίθεση με τις παραγράφους 4.6 και 4.7, όπου η γειννιάζουσα ράβδος ήταν χαμηλότερου ύψους από την ράβδο που μελετήσαμε.



Σχήμα 4.37: Σχηματικό διάγραμμα της προσέγγισης της κατασκευής n.2 από την πλευρά της κατασκευής n.5. R_c : ακτίνα σύλληψης, S_c : απόσταση πρόσκρουσης, D : απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας και H : ύψος κατασκευής.

Οι τάσεις διάσπασης που χρησιμοποιήθηκαν στις αρνητικής πολικότητας μετρήσεις είναι οι εξής:

Αρνητική Πολικότητα	Απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D		
	50 cm	75 cm	100 cm
Διορθωμένη τάση διάσπασης U_s (kV)	580.2	789 kV	942 kV

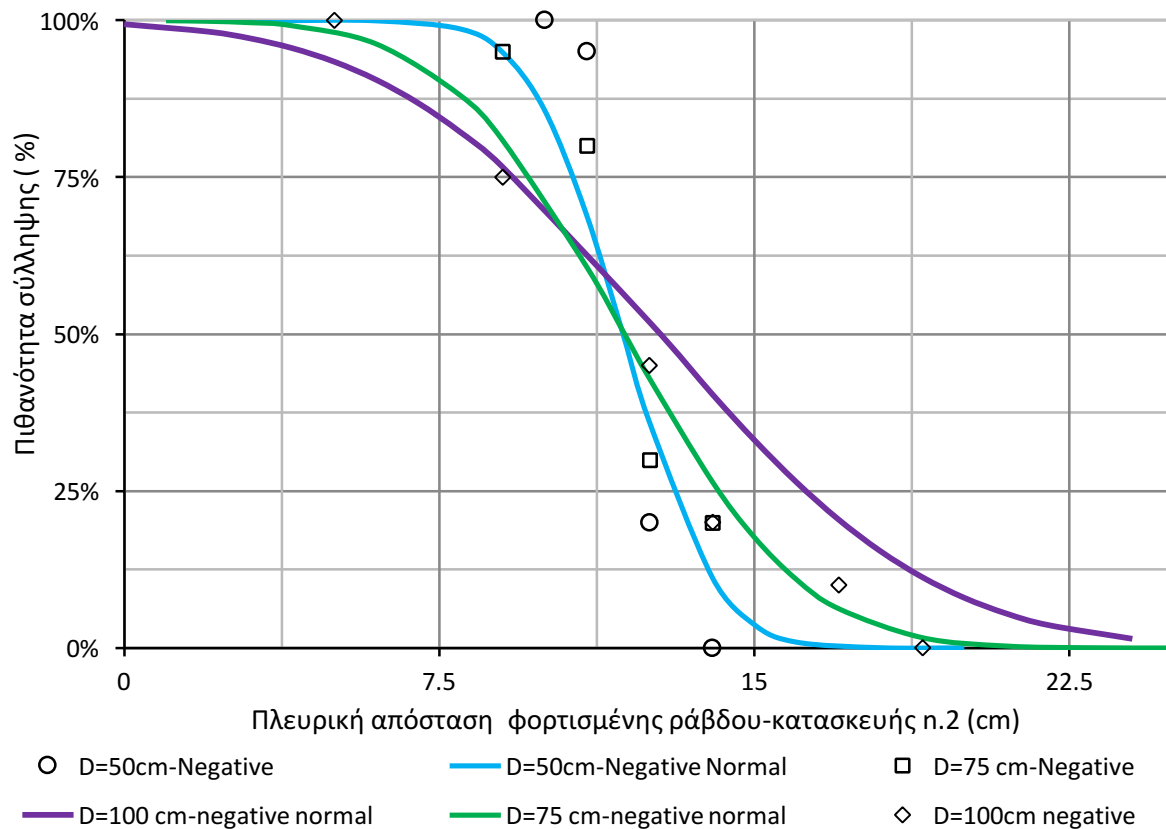
Πίνακας 4.8: Τάσεις διάσπασης κατασκευής 2, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή 3 για αρνητική πολικότητα, διορθωμένες σύμφωνα με τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Ακολουθώντας την διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4 εξήχθησαν τα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα:

Κατασκευή 2: προσέγγιση από κατασκευή 3						
D = 50 cm	P = 988 mbar		H = 7.428 g/m ³ (43 %)		T = 20 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	14	12.5	11	10	-	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	20	95	100	-	-
D = 75 cm	P = 984 mbar		H = 8.537 g/m ³ (44 %)		T = 22 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	17	14	12.5	11	9	8
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	20	30	80	95	100
D = 100 cm	P = 985 mbar		H = 8.731 g/m ³ (43 %)		T = 23 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	19	17	14	12.5	9	5
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	10	20	45	75	100

Πίνακας 4.9: Πειραματικά αποτελέσματα προσέγγισης της κατασκευής 2 από την κατασκευή 3 με τις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αρνητική πολικότητα.

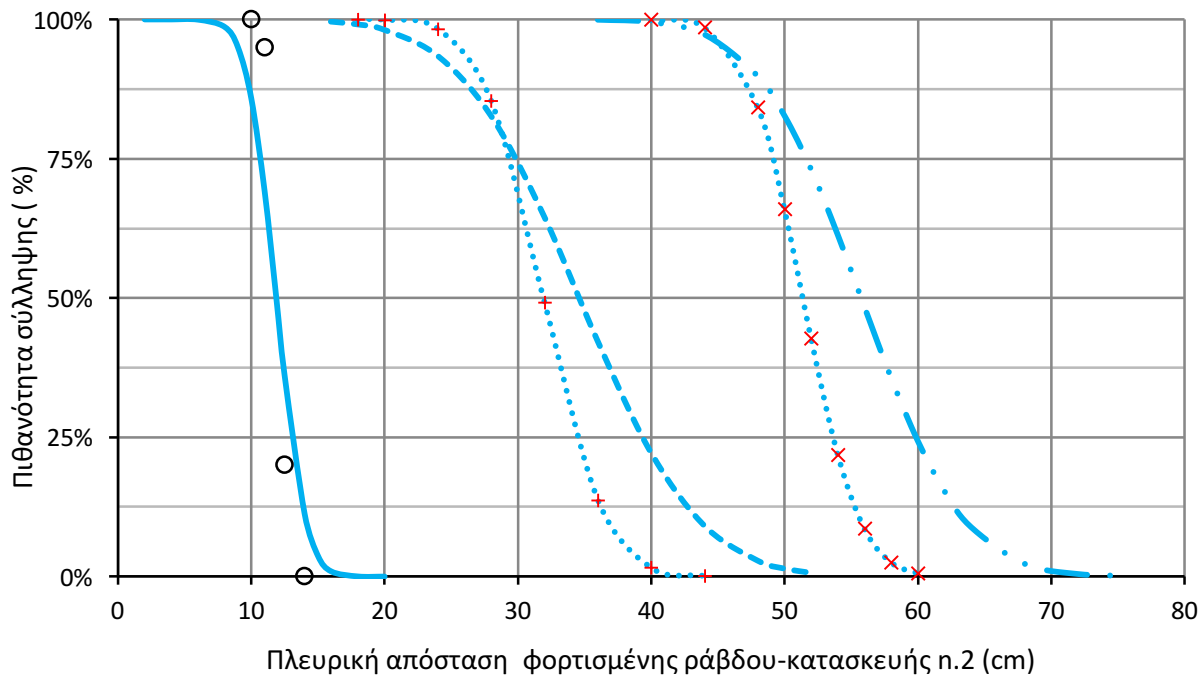
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξήχθησαν οι εξής κατανομές σύλληψης της εκκένωσης:



Σχήμα 4.38: Πειραματικές καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν προσεγγίζεται από την κατασκευή n.3, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

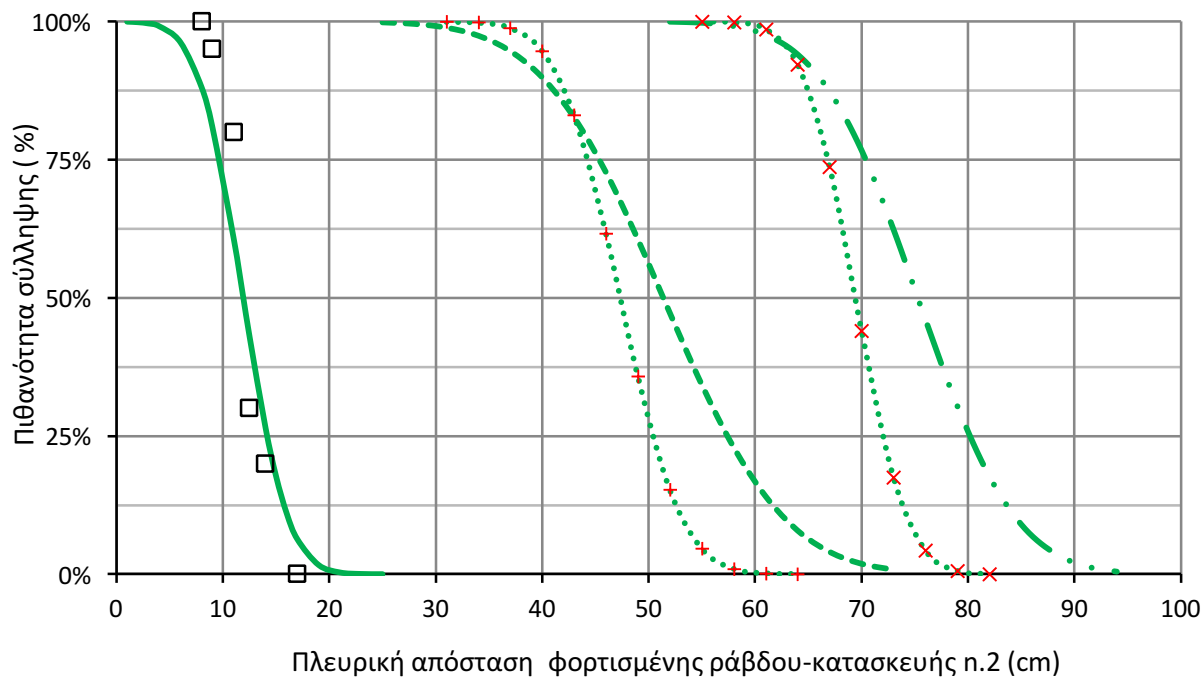
Στη συνέχεια παρατίθενται τρία διαγράμματα, ένα για κάθε απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, στα οποία αναπαριστώνται οι εξής κανονικές κατανομές:

- Η κατανομή που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα.
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου.



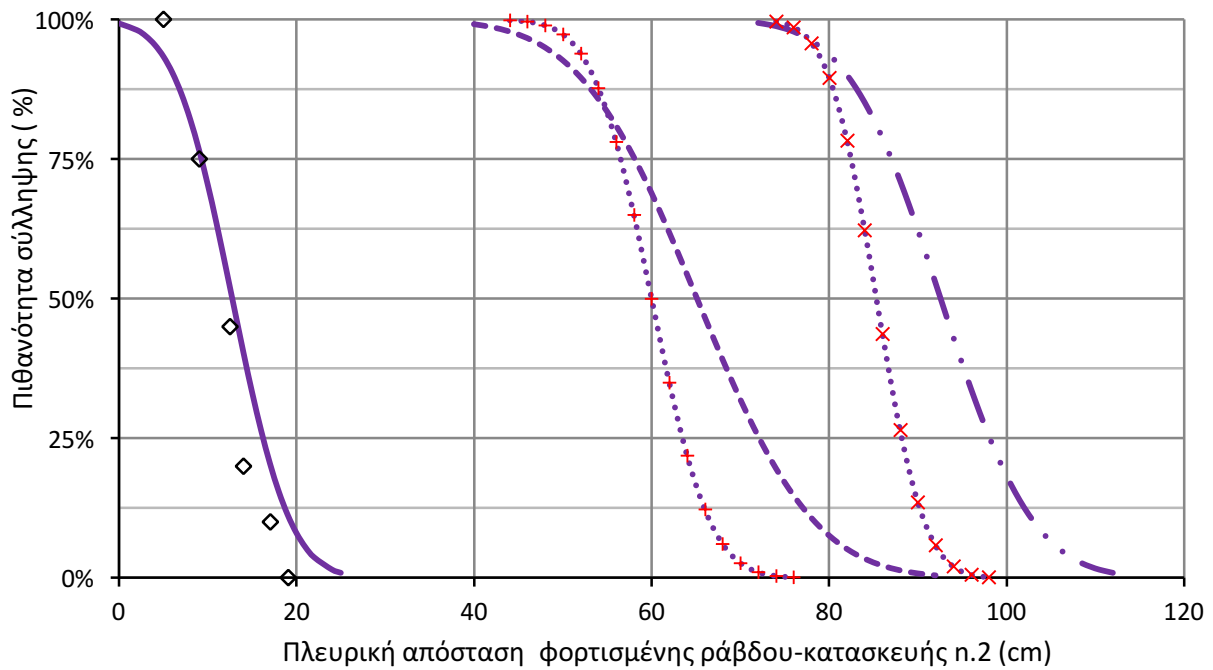
○ D=50 cm-Negative —•— D=50 cm Neg.stat.earth — D=50 cm Negative Normal
 - - - D=50 cm Neg.stat.deck •••×•• D=50 cm Neg.stat.γειtv.earth •••+•• D=50 cm Neg.stat.γειtv.deck

Σχήμα 4.39: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.3, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=50cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



□ D=75 cm Negative —•— D=75 cm Neg.stat.earth — D=75 cm Negative Normal
 - - - D=75 cm Neg.stat.deck •••×•• D=75 cm Neg.stat.γειtv.earth •••+•• D=75 cm Neg.stat.γειtv.deck

Σχήμα 4.40: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.3, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=75cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



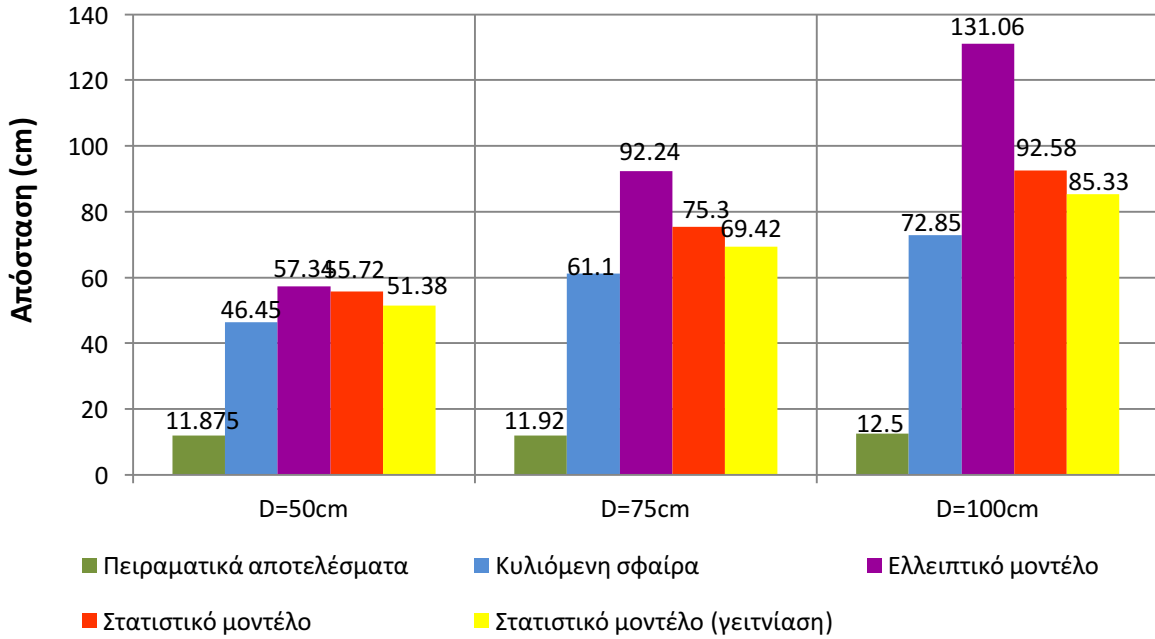
◇ D=100 cm Negative —•— D=100 cm Neg.stat.earth — D=100 cm Negative Normal
 - - - D=100 cm Neg.stat.deck •••×••• D=100 cm Neg.stat.γειtv.earth •••+••• D=100 cm Neg.stat.γειtv.deck

Σχήμα 4.41: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.2 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.3, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας $D=100\text{cm}$ όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

Παρατηρούμε ότι οι τιμές που προκύπτουν από τις πειραματικές κατανομές είναι αρκετά μικρότερες από τις τιμές που προβλέπουν οι καμπύλες του στατιστικού μοντέλου. Επίσης, είναι φανερό ότι για κάθε απόσταση D της φορτισμένης ράβδου από την πλάκα οι πειραματικές κατανομές εκτείνονται στο διάστημα από 0 cm έως 25 cm, με διαφορετική τυπική απόκλιση ανά ύψος D . Αυτό είναι λογικό, αφού η απόσταση των δύο ισοϋψών ράβδων είναι 25 cm και άρα οι τιμές της πλευρικής απόστασης περιορίζονται σε αυτό το διάστημα. Άρα, όσο το ύψος D αυξάνεται, αυξάνεται και η απόκλιση των πειραματικών κατανομών με τις θεωρητικές, αφού οι θεωρητικές προβλέπουν μεγαλύτερες πλευρικές αποστάσεις για μεγαλύτερα ύψη φορτισμένης ράβδου, ενώ αυξάνεται και η τυπική απόκλιση των πειραματικών κατανομών. Επιπλέον, από τις τρεις πειραματικές κατανομές προκύπτει ότι οι μετρήσεις είναι συγκεντρωμένες χωρίς ιδιαίτερα μεγάλη διασπορά σε ένα εύρος τιμών γύρω από το μέσο του χώρου μεταξύ των δύο ράβδων. Τέλος, και για τα τρία διαφορετικά διάκενα D , η θεωρητική κατανομή του στατιστικού μοντέλου που προσεγγίζει καλύτερα την πειραματική κανονική κατανομή είναι αυτή που λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα γεινίασης και που θεωρεί ως επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα.

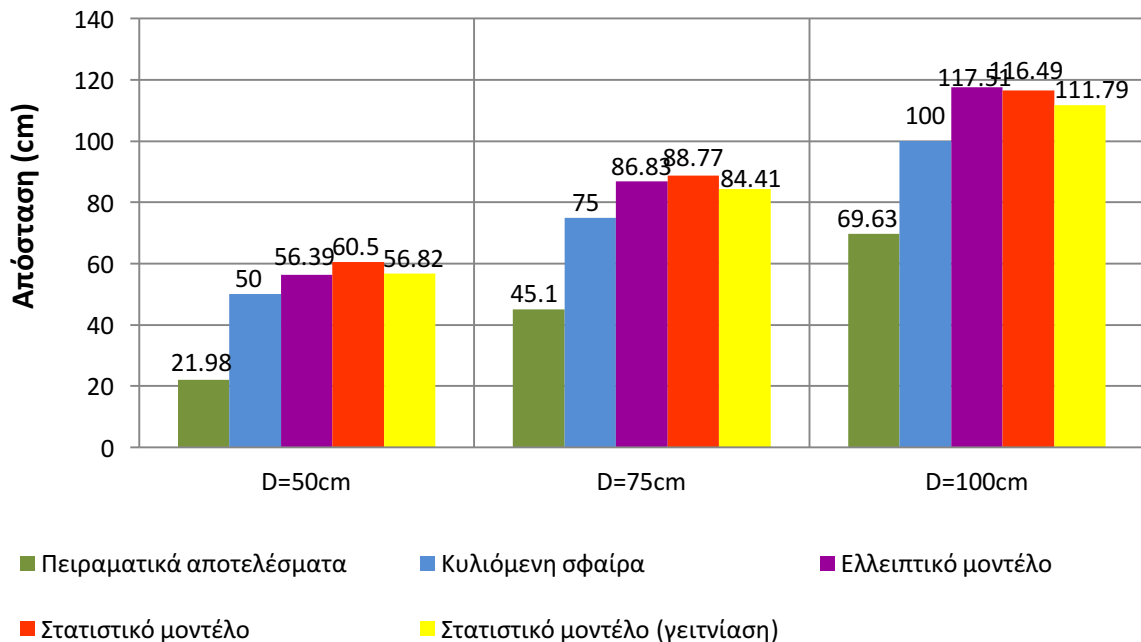
Στη συνέχεια, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για τις ακτίνες σύλληψης και τις αποστάσεις πρόσκρουσης.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



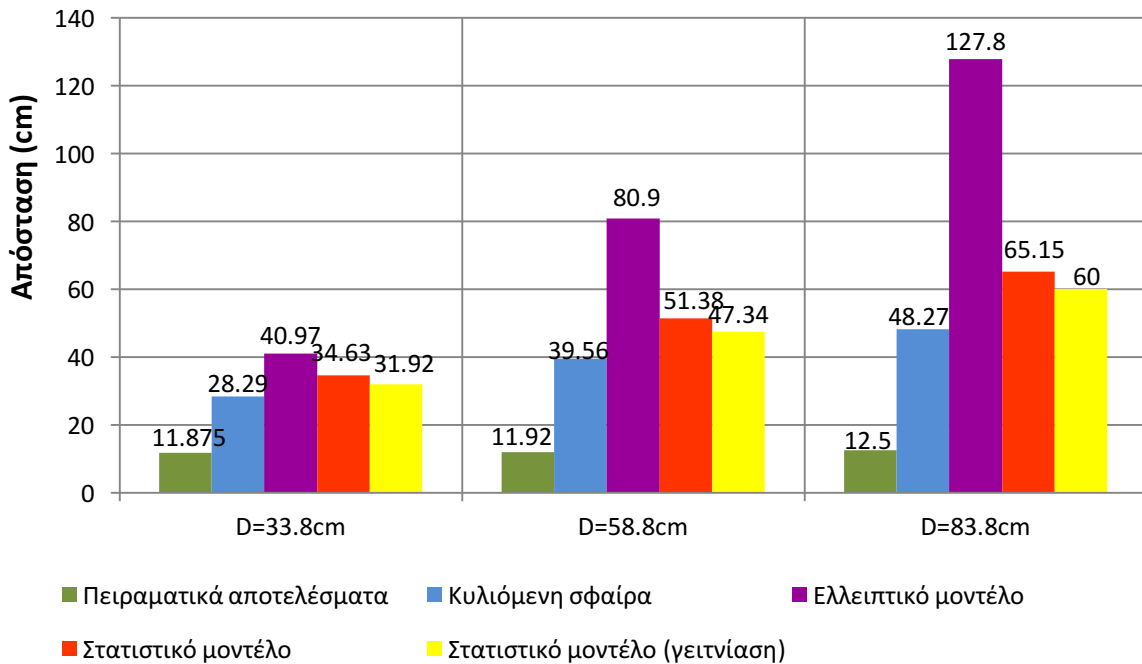
Σχήμα 4.42: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)



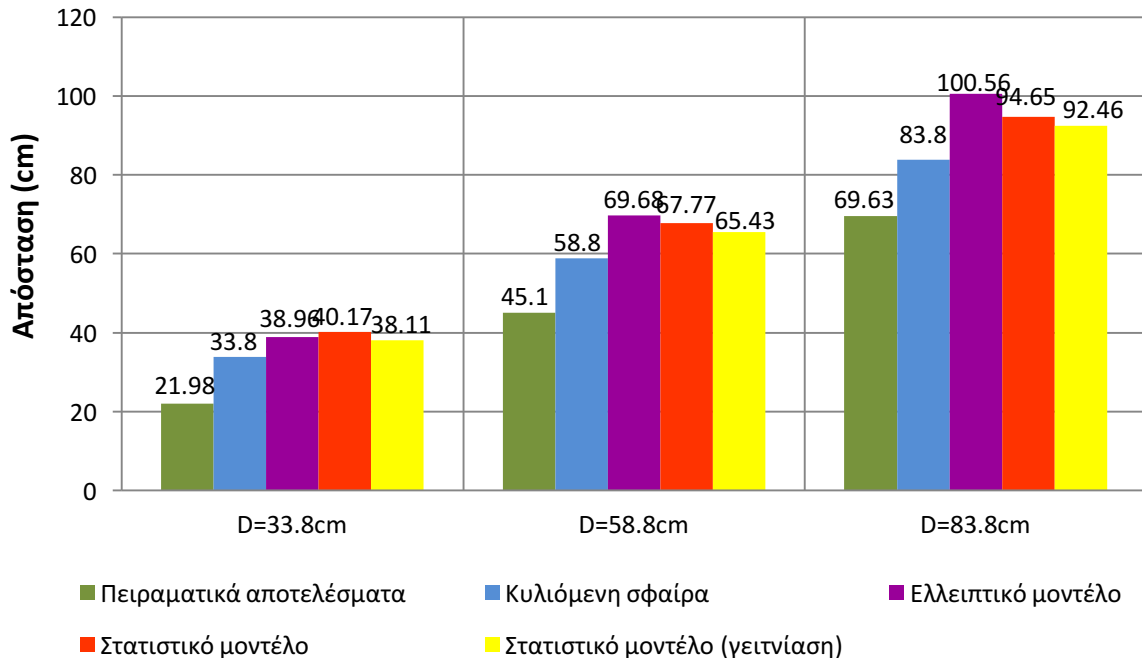
Σχήμα 4.43: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



Σχήμα 4.44: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)



Σχήμα 4.45: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της πειραματικής ακτίνας σύλληψης και απόστασης πρόσκρουσης είναι πολύ μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από το στατιστικό μοντέλο όταν αυτό θεωρεί ως επίπεδο αναφοράς την γειωμένη πλάκα. Όταν το μοντέλο

θεωρεί επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα, οι πειραματικές τιμές συγκλίνουν προσεγγίζουν περισσότερο τις πειραματικές, αν και στην περίπτωση της ακτίνας σύλληψης, η διαφορά παραμένει μεγάλη. Τέλος, ενώ θα περιμέναμε η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης να βρίσκεται στο μέσο της απόστασης των δύο ράβδων, είναι αξιοσημείωτο ότι είναι μετατοπισμένη προς τη ράβδο n.2.

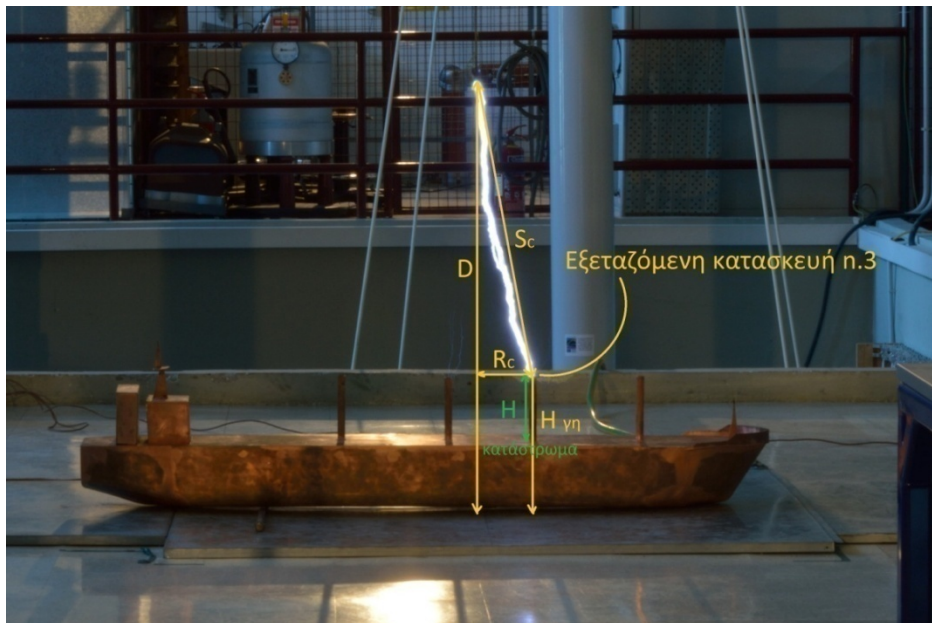
4.9 Πειραματικά αποτελέσματα- Προσέγγιση κατασκευής 3 από κατασκευή 4

Η περιοχή στην οποία διεξήχθησαν οι μετρήσεις αυτής της ενότητας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Όπως και στην ενότητα 4.8, η περίπτωση αυτή αποτελεί μελέτη γειωμένης ράβδου που γειτνιάζει με ισοϋψή γειωμένη ράβδο. Εδώ, το ύψος των δύο ράβδων είναι το ίδιο με την περίπτωση που παρουσιάζεται στην ενότητα 4.8 ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι αυτή τη φορά 20 cm.

Οι τάσεις διάσπασης που χρησιμοποιήθηκαν στις αρνητικής πολικότητας μετρήσεις είναι οι εξής:

Αρνητική Πολικότητα	Απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D		
	50 cm	75 cm	100 cm
Διορθωμένη τάση διάσπασης U_s (kV)	582.9	790.94	949.4

Πίνακας 4.10: Τάσεις διάσπασης κατασκευής 2, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή 3 για αρνητική πολικότητα, διορθωμένες σύμφωνα με τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες.



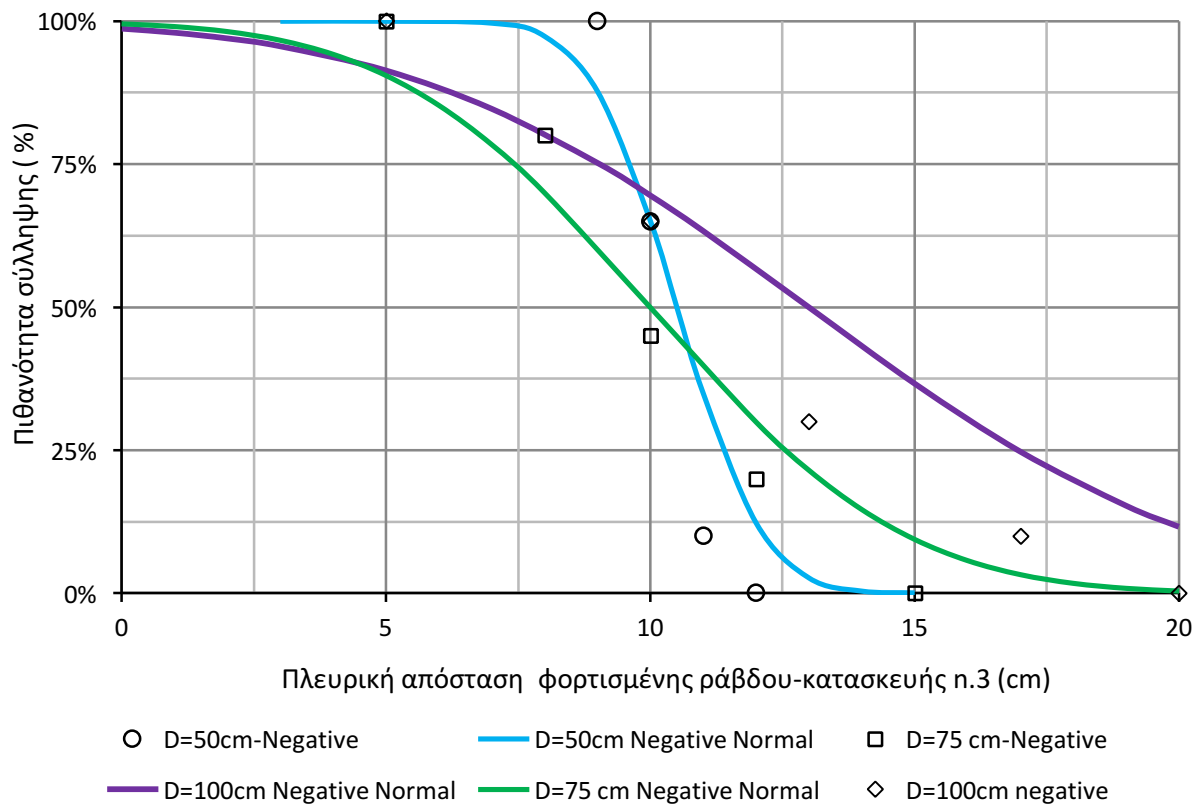
Σχήμα 4.46: Σχηματικό διάγραμμα της προσέγγισης της κατασκευής n.3 από την πλευρά της κατασκευής n.4. R_c : ακτίνα σύλληψης, S_c : απόσταση πρόσκρουσης, D : ύψος φορτισμένης ράβδου και H : ύψος κατασκευής.

Ακολουθώντας την διαδικασία μετρήσεων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4.4 εξήχθησαν τα παρακάτω πειραματικά αποτελέσματα:

Κατασκευή 3 προσέγγιση από κατασκευή 4						
D = 50 cm	P = 996 mbar		H = 7.874 g/m ³ (43 %)		T = 21 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	12	11	10	9	-	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	10	65	100	-	-
D = 75 cm	P = 990 mbar		H = 9.863 g/m ³ (48 %)		T = 23 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	15	12	10	8	5	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	20	30	80	100	-
D = 100 cm	P = 988 mbar		H = 11.963 g/m ³ (55 %)		T = 24 °C	
Πλευρική απόσταση (cm)	20	17	13	10	5	-
Πιθανότητα σύλληψης (%)	0	10	30	65	100	-

Πίνακας 4.11: Πειραματικά αποτελέσματα προσέγγισης της κατασκευής 3 από την κατασκευή 4 με τις αντίστοιχες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αρνητική πολικότητα.

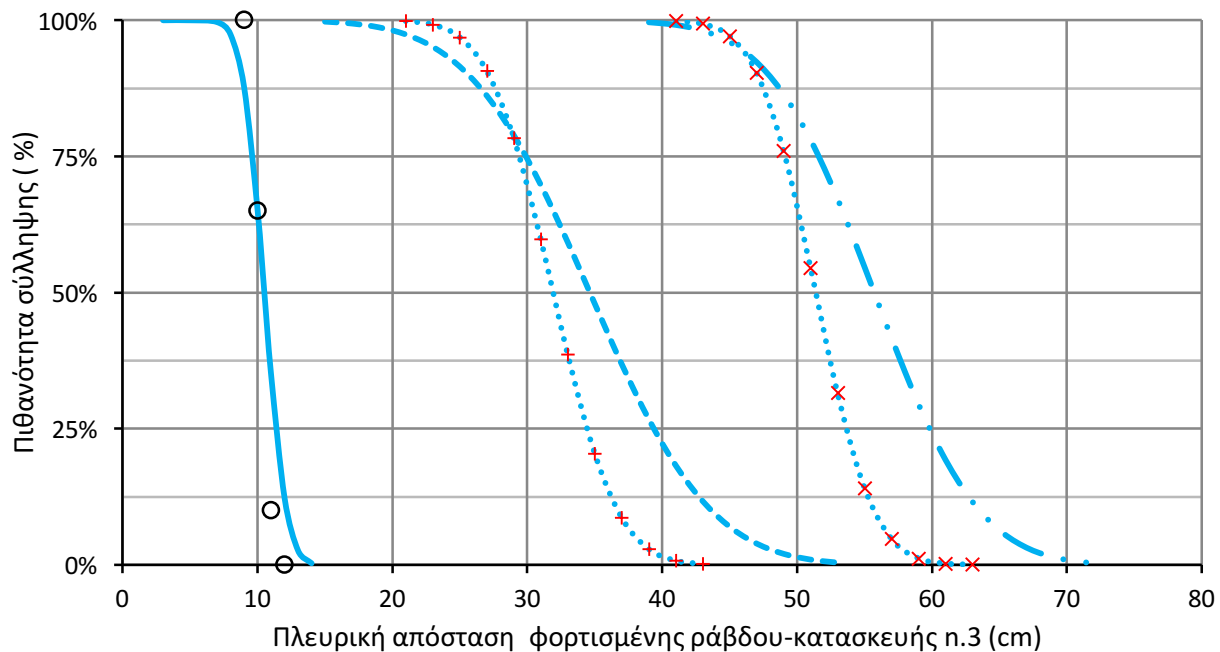
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, εξήχθησαν οι εξής κατανομές σύλληψης της εκκένωσης:



Σχήμα 4.47: Πειραματικές καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από την κατασκευή n.3 του πλοίου, όταν προσεγγίζεται από την κατασκευή n.4, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

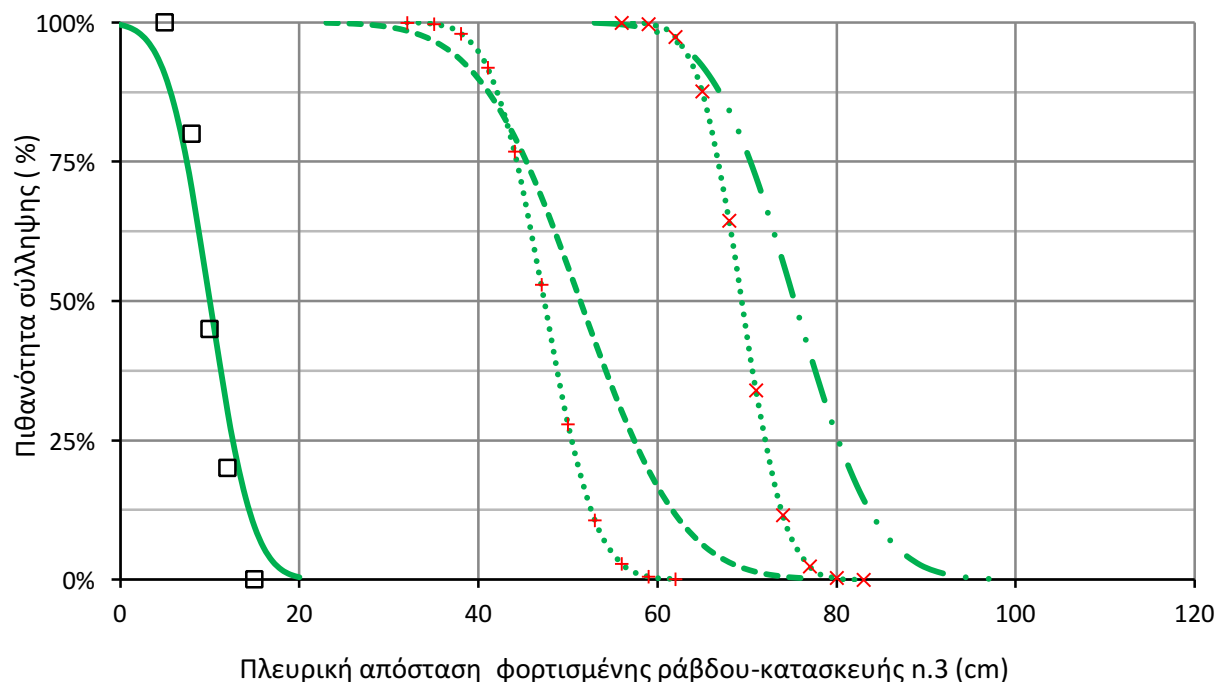
Στη συνέχεια παρατίθενται τρία διαγράμματα, ένα για κάθε απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, στα οποία αναπαριστώνται οι εξής κανονικές κατανομές:

- Η κατανομή που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα.
- Οι κατανομές που προβλέπονται από το στατιστικό μοντέλο (για μεμονωμένη ράβδο αλλά και για ράβδο υπό γεινίαση) όταν το ύψος τόσο της γειωμένης όσο και της φορτισμένης ράβδου έχουν μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου.



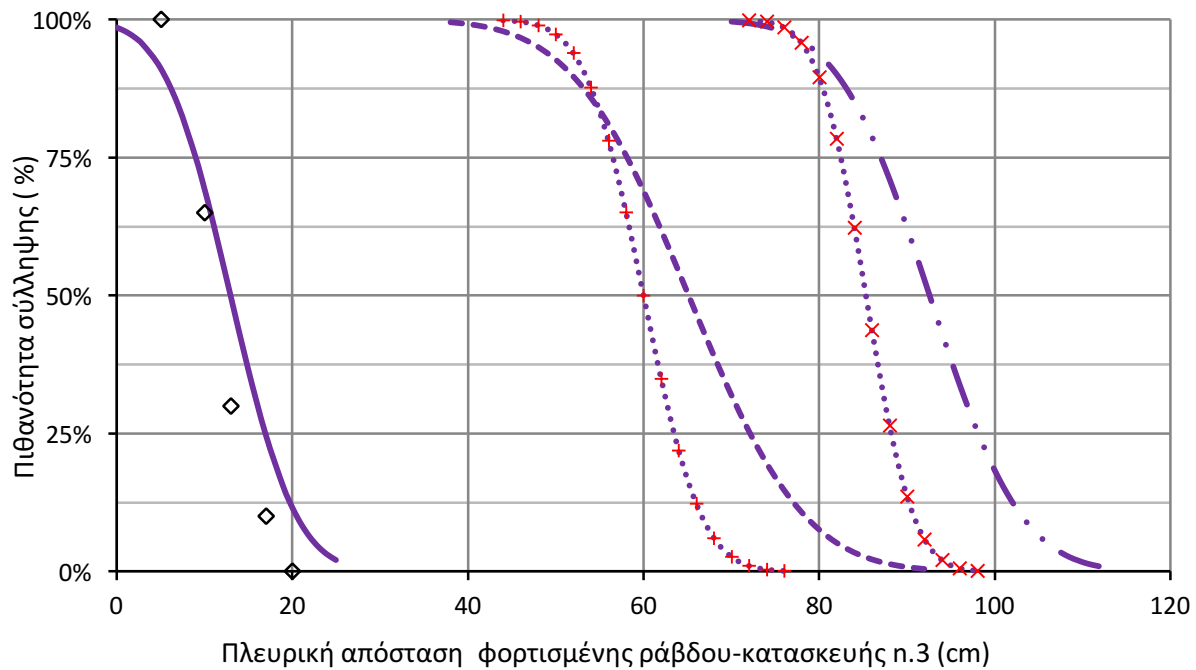
○ D=50 cm-Negative —•— D=50 cm Neg.stat.earth — D=50 cm Negative Normal
 - - - D=50 cm Neg.stat.deck •••×••• D=50 cm Neg.stat.γειτν.earth •••+••• D=50 cm Neg.stat.γειτν.deck

Σχήμα 4.48: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.3 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.4, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=50cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



□ D=75 cm Negative —•— D=75 cm Neg.stat.earth — D=75 cm Negative Normal
 - - - D=75 cm Neg.stat.deck •••×••• D=75 cm Neg.stat.γειτν.earth •••+••• D=75 cm Neg.stat.γειτν.deck

Σχήμα 4.49: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.3 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.4, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=75cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.



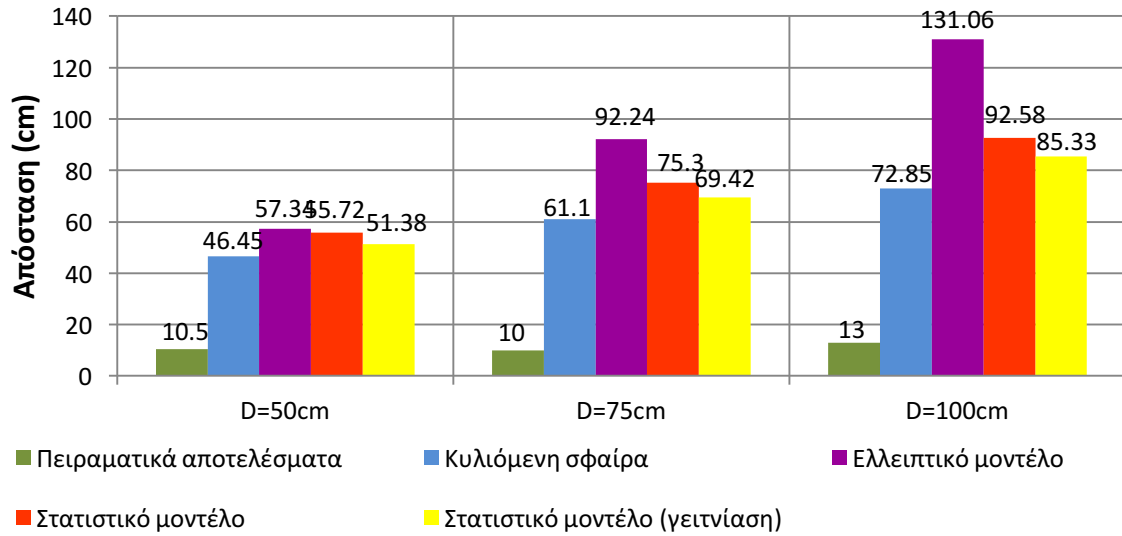
◇ D=100 cm Negative —•— D=100 cm Neg.stat.earth — D=100 cm Negative Normal
 - - - D=100 cm Neg.stat.deck •••x••• D=100 cm Neg.stat.γειtv.earth •••+••• D=100 cm Neg.stat.γειtv.deck

Σχήμα 4.50: Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης εκκένωσης από την κατασκευή n.3 του πλοίου, όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.4, για απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας D=100cm όπως αυτές προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα και το στατιστικό μοντέλο.

Αρχικά, παρατηρούμε από τα διαγράμματα ότι όσο μεγαλώνει το ύψος D της φορτισμένης ράβδου, αυξάνεται η τυπική απόκλιση των πειραματικών κατανομών. Επίσης, παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στην ενότητα 4.8, οι πειραματικές κατανομές εκτείνονται στο διάστημα από 0 cm έως 20 cm, το οποίο είναι η πλευρική απόσταση μεταξύ των δύο ισοϋψών ράβδων. Ωστόσο, με την αύξηση του ύψους D, παρατηρούμε ότι η κατανομή παίρνει τις ακραίες τιμές της (για 0% και 100% ευστοχία αντίστοιχα) εκτός του χώρου μεταξύ των δύο γειωμένων ράβδων. Επιπλέον, από τις τρεις πειραματικές κατανομές προκύπτει ότι οι μετρήσεις είναι συγκεντρωμένες με μεγαλύτερη διασπορά σε ένα εύρος τιμών που καλύπτει όλο το χώρο μεταξύ των ράβδων (20cm) σε σύγκριση με την περιοχή μεταξύ των ράβδων n.2 και n.3 που απέχουν L=25cm. Τέλος, παρατηρούμε ότι οι πειραματικές κατανομές έχουν μεγάλη απόκλιση σε σχέση με τις θεωρητικές του στατιστικού μοντέλου, ενώ η θεωρητική κατανομή που προσεγγίζει περισσότερο την πειραματική είναι και εδώ η κατανομή που λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα γειτνίασης και που θεωρεί ως επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα.

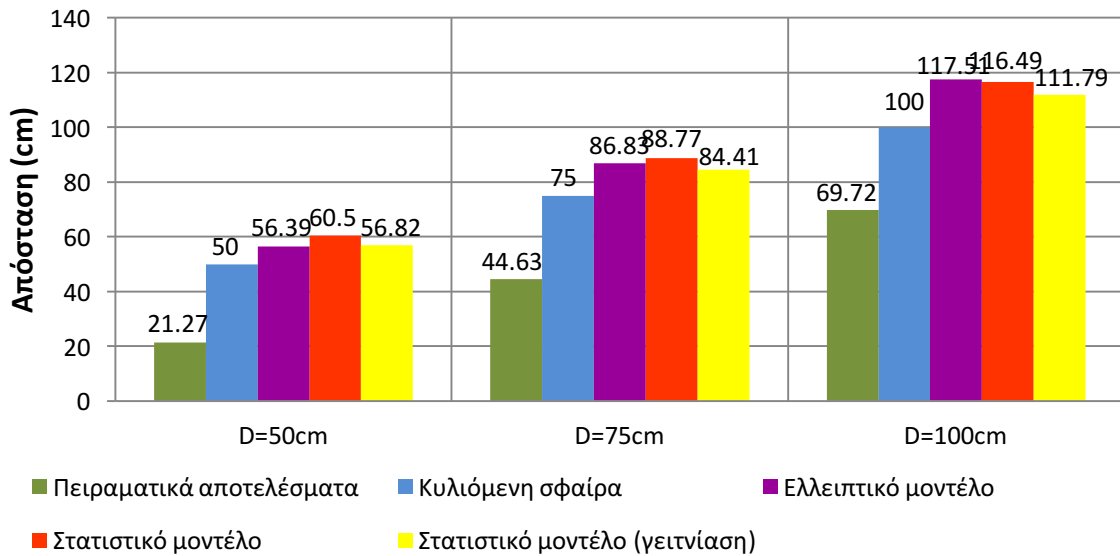
Στη συνέχεια, παρατίθενται συγκριτικά διαγράμματα για τις ακτίνες σύλληψης και τις αποστάσεις πρόσκρουσης.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(R_c)



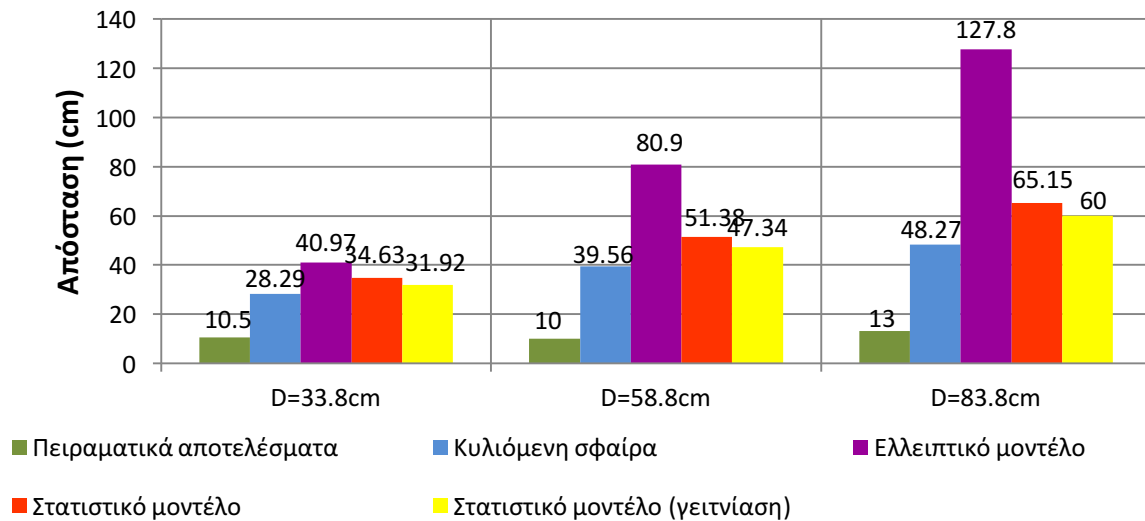
Σχήμα 4.51: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(S_c)



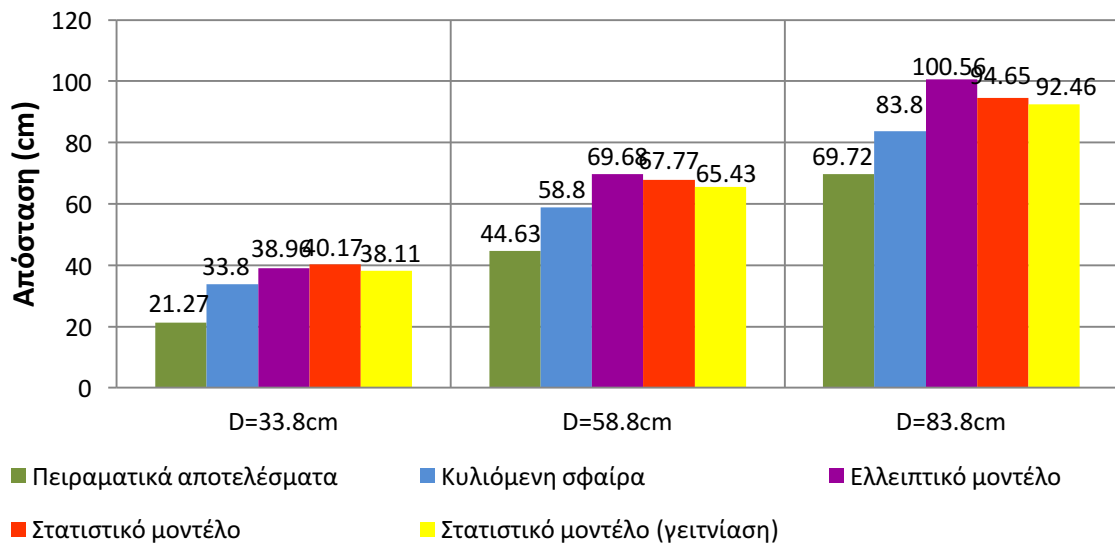
Σχήμα 4.52: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

Αρνητική πολικότητα, Ακτίνα σύλληψης(Rc)



Σχήμα 4.53: Συγκριτικό διάγραμμα των ακτίνων σύλληψης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Αρνητική πολικότητα, Απόσταση πρόσκρουσης(Sc)



Σχήμα 4.54: Συγκριτικό διάγραμμα των αποστάσεων πρόσκρουσης ανά απόσταση φορτισμένης ράβδου-πλάκας, όπου D μετρημένο από το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα

Παρατηρούμε ότι και σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στο κεφάλαιο 4.8, τα πειραματικά αποτελέσματα για την ακτίνα σύλληψης και την απόσταση πρόσκρουσης προσεγγίζονται περισσότερο από τα θεωρητικά όταν σε αυτά θεωρείται επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα και όχι η γειωμένη πλάκα. Ωστόσο, και σε αυτήν την περίπτωση, η απόκλιση της ακτίνας σύλληψης από τις θεωρητικές τιμές της είναι αρκετά μεγάλη. Τέλος, όπως και στην περιοχή μεταξύ των ράβδων n.2 και n.3, παρατηρούμε ότι η κρίσιμη ακτίνα

σύλληψης δεν εντοπίζεται στο μέσο της απόστασης των δύο ράβδων αλλά είναι μετατοπισμένη προς τη ράβδο n.4.

Κεφάλαιο 5^ο: Επεξεργασία Μετρήσεων-Συμπεράσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο ακολουθεί επεξεργασία των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4 καθώς και διάφορα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία αυτήν.

Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι, εκτός από την πολικότητα του κεραυνού, το ύψος του αλεξικέραυνου και τα φαινόμενα γειννίασης όπου αυτά εμφανίζονται, το πείραμα μας λαμβάνει υπόψη και την πιθανοκρατική φύση του φαινομένου του κεραυνού. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν με τις εξισώσεις του στατιστικού μοντέλου, αφού είναι το μόνο από τα μοντέλα που συνυπολογίζει και την πιθανότητα σύλληψης του κεραυνού.

Έναν ακόμα λόγο που μας οδήγησε στην μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων με την βοήθεια του στατιστικού μοντέλου αποτελεί το γεγονός ότι το στατιστικό μοντέλο προβλέπει ξεχωριστές εξισώσεις για την περίπτωση φαινομένων γειννίασης, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μοντέλα που μελετούν την αντικεραυνική προστασία μεμονωμένων σημείων.

Τέλος, στην παρακάτω μελέτη συμπεριλήφθηκαν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που αφορούν το σημείο 6 όταν αυτό προσεγγίζεται από το σημείο 7. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα [36]:

	H/D	R/D	S/D
Αποστάσεις H,D μετρημένες με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα	0.41	0.978	1.142184
	0.5466	0.9	1.007726
	0.82	0.648	0.672536
Αποστάσεις H,D μετρημένες με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα	0.2959	1.1671	1.3630
	0.4218	1.1480	1.2854
	0.7337	0.9586	0.9949

Πίνακας 5.1: Κανονικοποιημένοι λόγοι υψών, ακτίνων σύλληψης και αποστάσεων πρόσκρουσης για την κατασκευή n.6 όταν αυτή προσεγγίζεται από την κατασκευή n.7 [36]

5.2 Σύγκριση Στατιστικού μοντέλου - Πειραματικών αποτελεσμάτων

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 3.1.7, οι εξισώσεις που περιγράφουν την κρίσιμη ακτίνα σύλληψης και την κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης έχουν λογαριθμική μορφή και περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.25) και (3.26). Συνεπώς, αφού το πείραμά μας προσεγγίζεται καλύτερα από το στατιστικό μοντέλο, θεωρήσαμε ότι οι εξισώσεις που θα περιγράφουν τις κρίσιμες ακτίνες σύλληψης και αποστάσεις πρόσκρουσης που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα θα είναι της μορφής των εξισώσεων (3.25) και (3.26) του στατιστικού μοντέλου.

Στη συνέχεια, θεωρήσαμε τους κανονικοποιημένους λόγους H/D , R/D και S/D για κάθε απόσταση φορτισμένης ράβδου-γειωμένης πλάκας και, με βάση αυτούς του λόγους και τη δεδομένη μορφή των εξισώσεων προέκυψαν οι εξής συντελεστές α , β για την απόσταση πρόσκρουσης και c_1 , c_2 για την ακτίνα σύλληψης, μέσω του εργαλείου `fitool` του προγράμματος Matlab. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε τόσο για τις αποστάσεις μετρημένες από το επίπεδο της γειωμένης πλάκας όσο και από το επίπεδο του καταστρώματος. Οι τιμές που προέκυψαν παρατίθενται παρακάτω:

	Απόσταση πρόσκρουσης S_c - Αποστάσεις από πλάκα	
Σημείο-Προσέγγιση	α	β
Στατιστικό	0.065	1.24
1-0	-0.4217	0.6129
2-1	-0.3826	0.3033
2-3	-0.3721	0.2709
3-4	-0.3938	0.2464
6-5	-0.2598	0.4462
6-7	-0.6873	0.5527

Πίνακας 5.2: Συντελεστές α , β της εξίσωσης (3.26) όπως αυτοί προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα. Αποστάσεις με αναφορά το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

	Ακτίνα σύλληψης R_c - Αποστάσεις από πλάκα	
Σημείο-Προσέγγιση	c_1	c_2
Στατιστικό	0.272	1.24
1-0	-0.2462	0.5829
2-1	0.0302	0.3117
2-3	0.1644	0.3099
3-4	0.1203	0.2574
6-5	0.1879	0.5056
6-7	-0.4856	0.6578

Πίνακας 5.2: Συντελεστές c_1 , c_2 της εξίσωσης (3.25) όπως αυτοί προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα. Αποστάσεις με αναφορά το επίπεδο της γειωμένης πλάκας. Αρνητική πολικότητα.

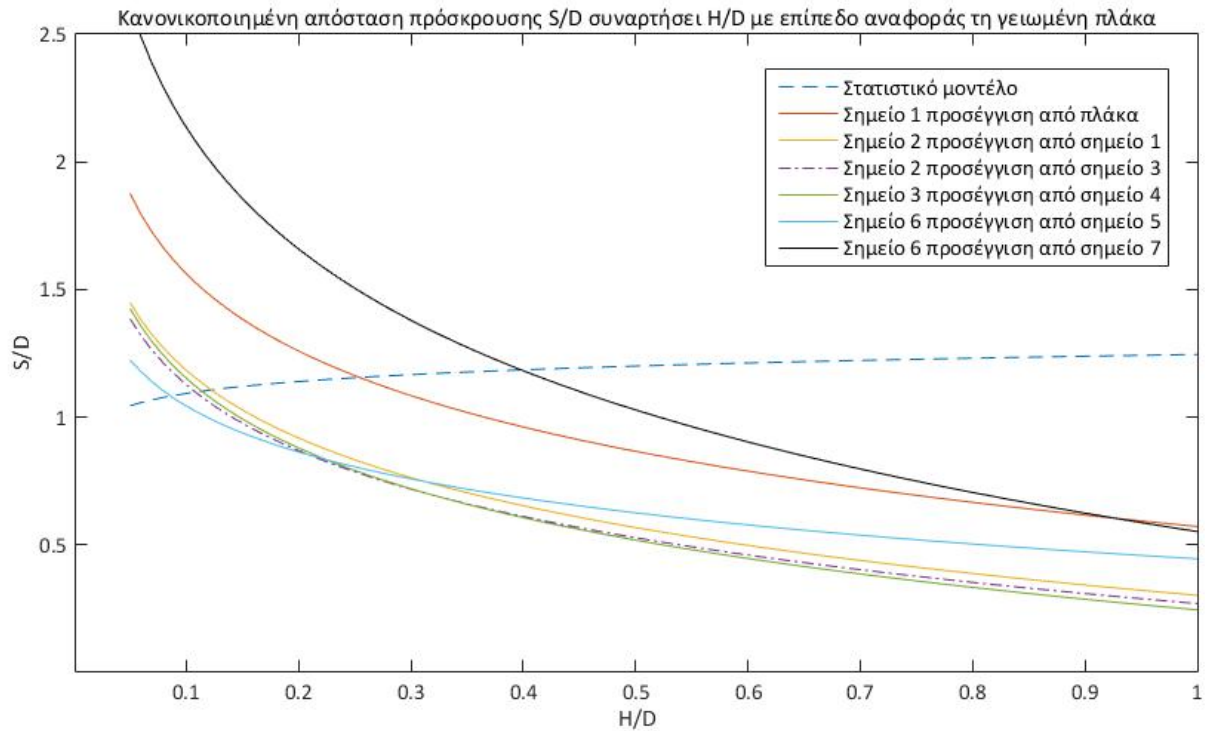
	Απόσταση πρόσκρουσης S_c - Αποστάσεις από κατάστρωμα	
Σημείο-Προσέγγιση	α	β
Στατιστικό	0.065	1.24
1-0	-0.1017	1.1830
2-1	-0.1978	0.5499
2-3	-0.1999	0.4937
3-4	-0.2242	0.4532
6-5	-0.0756	0.7156
6-7	-0.4159	0.8830

Πίνακας 5.3: Συντελεστές α , β της εξίσωσης (3.26) όπως αυτοί προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα. Αποστάσεις με αναφορά το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα.

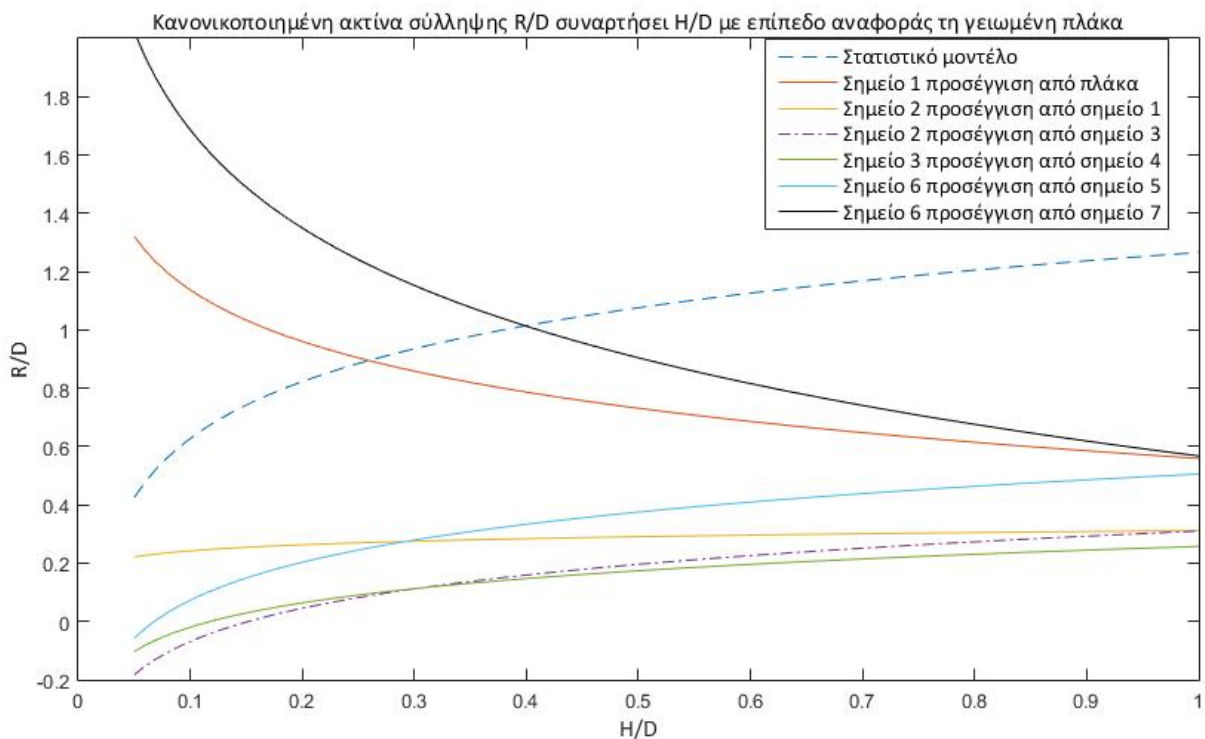
	Ακτίνα σύλληψης R_c - Αποστάσεις από κατάστρωμα	
Σημείο-Προσέγγιση	c_1	c_2
Στατιστικό	0.272	1.24
1-0	0.0141	1.1140
2-1	0.1239	0.5369
2-3	0.2267	0.5245
3-4	0.1785	0.4405
6-5	0.3203	0.7927
6-7	-0.2395	0.9004

Πίνακας 5.4: Συντελεστές c_1 , c_2 της εξίσωσης (3.25) όπως αυτοί προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα. Αποστάσεις με αναφορά το επίπεδο του καταστρώματος. Αρνητική πολικότητα.

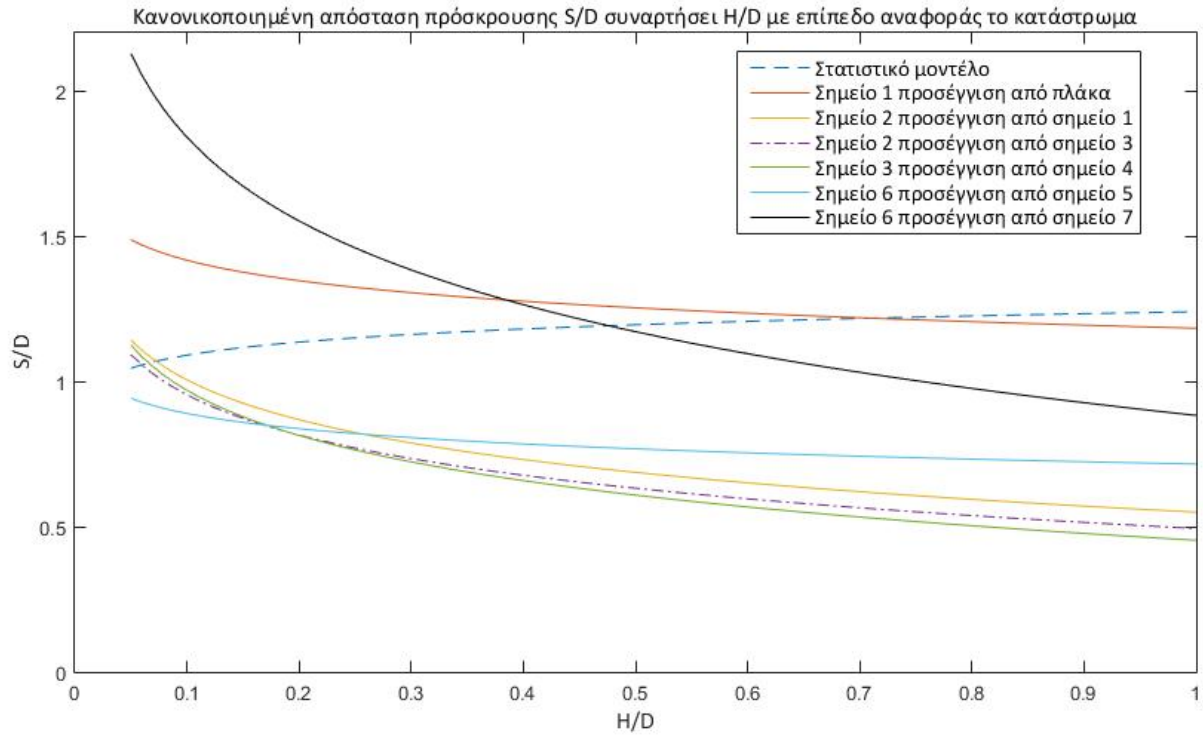
Με δεδομένους πλέον τους συντελεστές α , β , c_1 , c_2 των εξισώσεων (3.25), (3.26) όπως αυτοί προκύπτουν μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων, μπορούμε να απεικονίσουμε σε διάγραμμα τα κανονικοποιημένα μεγέθη S/D και R/D . Έτσι, στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες αποστάσεις πρόσκρουσης και ακτίνες σύλληψης που προκύπτουν από την πειραματική προσέγγιση της εκάστοτε κατασκευής, τόσο με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα όσο και με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα. Οι καμπύλες αυτές συγκρίνονται με την καμπύλη που προβλέπει το στατιστικό μοντέλο για μεμονωμένο σημείο αφ' ενός για λόγους ευκρίνειας των σχημάτων, αφετέρου γιατί το στατιστικό μοντέλο στην περίπτωση γειννίασης θεωρεί την κρίσιμη ακτίνα σύλληψης και απόσταση πρόσκρουσης για ποσοστό σύλληψης 33.3%, κάτι το οποίο έρχεται σε αναντιστοιχία με την θεώρησή μας για κρίσιμη ακτίνα σύλληψης και απόσταση πρόσκρουσης σε ποσοστό σύλληψης 50%.



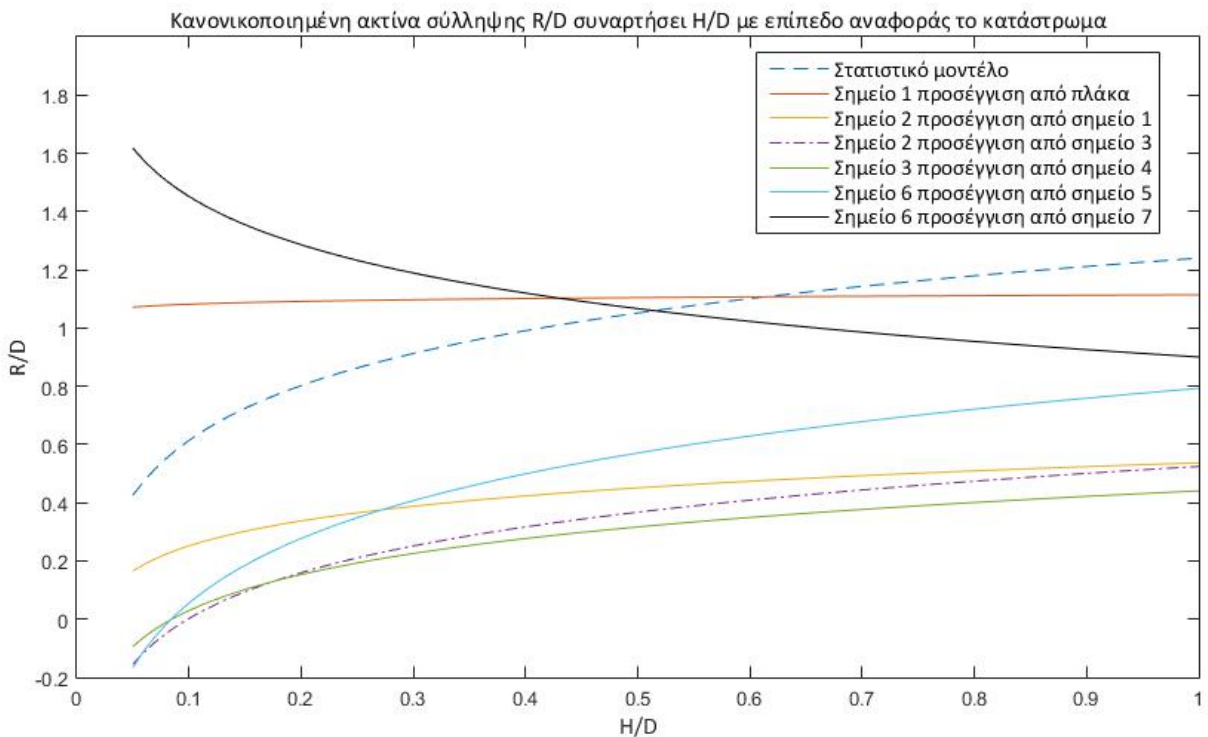
Σχήμα 5.1: Κανονικοποιημένη απόσταση πρόσκρουσης S/D συναρτήσει H/D , όπως αυτή προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο και τα εκάστοτε πειραματικά δεδομένα, με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα. Αρνητική πολικότητα.



Σχήμα 5.2: Κανονικοποιημένη ακτίνα σύλληψης R/D συναρτήσει H/D , όπως αυτή προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο και τα εκάστοτε πειραματικά δεδομένα, με επίπεδο αναφοράς τη γειωμένη πλάκα. Αρνητική πολικότητα.



Σχήμα 5.3: Κανονικοποιημένη απόσταση πρόσκρουσης S/D συναρτήσει H/D , όπως αυτή προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο και τα εκάστοτε πειραματικά δεδομένα, με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα. Αρνητική πολικότητα.

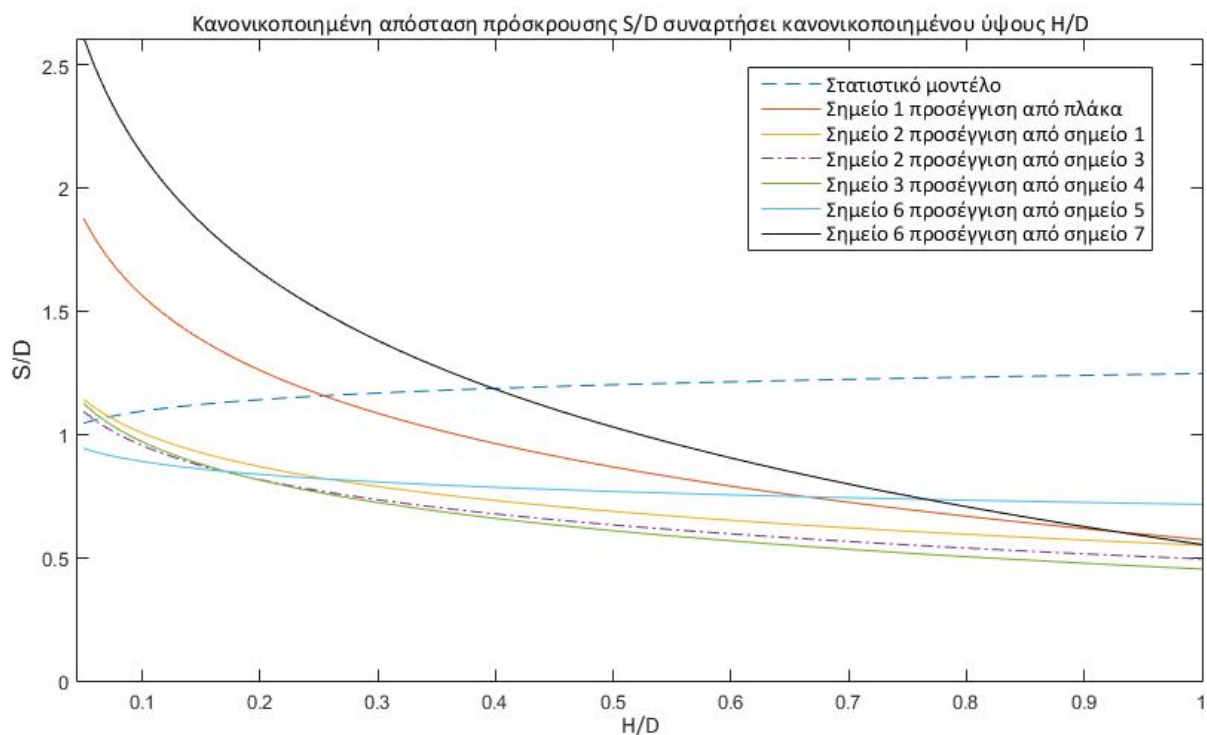


Σχήμα 5.4: Κανονικοποιημένη ακτίνα σύλληψης R/D συναρτήσει H/D , όπως αυτή προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο και τα εκάστοτε πειραματικά δεδομένα, με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα. Αρνητική πολικότητα.

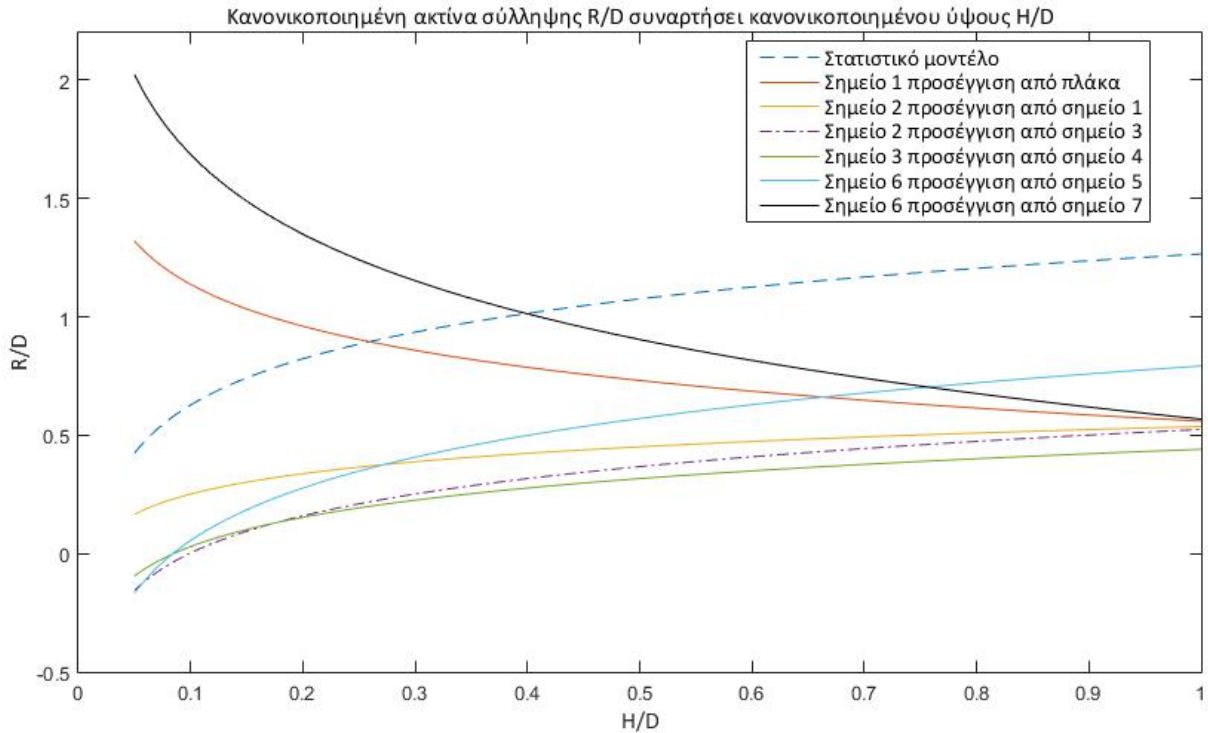
Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα, οι καμπύλες του εκάστοτε σημείου τόσο για την απόσταση πρόσκρουσης όσο και την ακτίνα σύλληψης παρουσιάζουν αισθητές διαφορές ανάλογα με το επίπεδο αναφοράς που θεωρούμε. Σύμφωνα λοιπόν με τις παραπάνω καμπύλες και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν στο κεφάλαιο 4, θεωρούμε τα εξής:

- Κατά την προσέγγιση της κατασκευής n.1 από την πλευρά της γειωμένης πλάκας αλλά και κατά την προσέγγιση της κατασκευής n.6 από την πλευρά της κατασκευής n.7 (τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται στον πίνακα 5.1), θεωρείται ως επίπεδο αναφοράς η γειωμένη πλάκα.
- Κατά την προσέγγιση την κατασκευής n.2 από την πλευρά τόσο της κατασκευής n.1 όσο και της κατασκευής n.3, καθώς και κατά την προσέγγιση των κατασκευών n.3 και n.6 από την πλευρά των κατασκευών n.4 και n.5 αντίστοιχα, θεωρείται ως επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα.

Με βάση τα παραπάνω, καταλήγουμε σε δύο καινούρια διαγράμματα για τις κανονικοποιημένες αποστάσεις πρόσκρουσης και ακτίνες σύλληψης, όπου πλέον η καμπύλη που αντιστοιχεί σε κάθε κατασκευή προκύπτει με βάση την παραπάνω θεώρηση όσον αφορά το επίπεδο αναφοράς.



Σχήμα 5.5: Κανονικοποιημένη απόσταση πρόσκρουσης S/D συναρτήσει H/D, όπως αυτή προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα, με βάση το εκάστοτε επίπεδο αναφοράς. Αρνητική πολικότητα.



Σχήμα 5.6: Σχήμα 5.5: Κανονικοποιημένη ακτίνα σύλληψης R/D συναρτήσει H/D, όπως αυτή προκύπτει από το στατιστικό μοντέλο και τα πειραματικά δεδομένα, με βάση το εκάστοτε επίπεδο αναφοράς. Αρνητική πολικότητα.

Αρχικά, θα πρέπει να εξηγήσουμε ότι παρά τις εμφανείς ομοιότητες του πειράματος μας με το αντίστοιχο πείραμα που διεξήχθη στα πλαίσια του στατιστικού μοντέλου, υπάρχουν και αρκετές διαφορές όσον αφορά την εκτέλεσή του. Κατά τη διάρκεια του πειράματος που οδήγησε στο στατιστικό μοντέλο, η γειτνιάζουσα ράβδος και η φορτισμένη ράβδος ήταν σταθερές ενώ η υπό μελέτη ράβδος μετακινούνταν. Έτσι, η φορτισμένη ράβδος δεν βρισκόταν σε κανένα στάδιο του πειράματος στον χώρο ανάμεσα στις δύο γειωμένες ράβδους. Αντίθετα, στην δική μας εκδοχή του πειράματος, η φορτισμένη ράβδος κινούνταν στον χώρο ανάμεσα στις δύο ράβδους, ενώ η γειτνιάζουσα ράβδος ήταν τοποθετημένη σε τυχαία απόσταση σε σχέση με την υπό μελέτη ράβδο και όχι στην κρίσιμη ακτίνα αυτής.

Με βάση τα δύο παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

Όσον αφορά την κανονικοποιημένη απόσταση πρόσκρουσης S/D παρατηρούμε ότι:

- Αρχικά, η κλίση των πειραματικών καμπυλών είναι διαφορετική από αυτήν του στατιστικού μοντέλου, αφού ενώ το μοντέλο προβλέπει αύξηση της κανονικοποιημένης απόστασης πρόσκρουσης S/D όσο αυξάνεται το κανονικοποιημένο ύψος H/D, στις πειραματικές καμπύλες συμβαίνει το αντίθετο.

- Η κλίση και ο σταθερός όρος α , β στην εξίσωση (3.26), όσον αφορά τις πειραματικές καμπύλες, μεταβάλλονται ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο ράβδων (γειτνιάζουσα και υπό μελέτη), με τα κυριότερα από αυτά να είναι η μεταξύ τους απόσταση και ο λόγος των υψών τους.
- Όταν ο λόγος H/D προσεγγίζει τη μονάδα, ο λόγος S/D τείνει στο 0.5.

Όσον αφορά την κανονικοποιημένη ακτίνα σύλληψης R/D παρατηρούμε ότι:

- Οι πειραματικές κατανομές έχουν την ίδια κλίση και γενικά παρόμοια συμπεριφορά με την κατανομή του στατιστικού μοντέλου.
- Οι πειραματικές κατανομές που αφορούν κατασκευές που υπόκεινται σε γειτνίαση έχουν μια κατακόρυφη μετατόπιση προς τα κάτω σε σχέση με την κατανομή του στατιστικού μοντέλου.
- Οι κατανομές που αφορούν τις κατασκευές n.1 και n.6 όταν αυτές προσεγγίζονται από την γειωμένη πλάκα και την κατασκευή n.7 αντίστοιχα παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες. Η συμπεριφορά αυτή δύναται να εξηγηθεί με βάση τη γεωμετρία των κατασκευών.
- Η κλίση και ο σταθερός όρος c_1 και c_2 στην εξίσωση (3.25), όσον αφορά τις πειραματικές καμπύλες, μεταβάλλονται ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο ράβδων (γειτνιάζουσα και υπό μελέτη), με τα κυριότερα από αυτά να είναι η μεταξύ τους απόσταση και ο λόγος των υψών τους.
- Όταν ο λόγος H/D προσεγγίζει τη μονάδα, ο λόγος R/D τείνει στο 0.5.

Όσον αφορά τώρα τις κατασκευές n.1 και n.6 όταν αυτές προσεγγίζονται από την γειωμένη πλάκα και την κατασκευή n.7 αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες κατασκευές, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ακτίνας σύλληψης. Αρχικά, η προσέγγιση της κατασκευής n.1 από την γειωμένη πλάκα θεωρήθηκε ως περίπτωση μεμονωμένου σημείου. Αυτή η θεώρηση επαληθεύτηκε μόνο για την απόσταση φορτισμένης ράβδου $D=100\text{cm}$. Ωστόσο, για $D=50\text{cm}$ και $D=75\text{cm}$ η κατασκευή n.1 αντιμετώπισε φαινόμενα γειτνίασης από την πλώρη του πλοίου, αφού οι εκκενώσεις κατέληγαν είτε στην γειωμένη πλάκα, είτε στην πλώρη είτε στην κατασκευή αυτήν. Για τον λόγο αυτό, για μεγάλες τιμές της απόστασης D , και άρα για μικρές τιμές του λόγου h/D , εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές του λόγου R/D από αυτές που θα προέκυπταν αν η γειτνίαση αυτήν ήταν ομοιόμορφη.

Αντίστοιχα, η κατασκευή n.6, όταν αυτή προσεγγίστηκε από την πλευρά της κατασκευής n.7, θεωρήθηκε ότι υπέστη φαινόμενα γειτνίασης από την κατασκευή n.7. Αυτή η θεώρηση ήρθε σε πλήρη αντιστοιχία με τα πειραματικά αποτελέσματα για αποστάσεις φορτισμένης ράβδου $D=100\text{cm}$. Ωστόσο, για $D=50\text{cm}$ και $D=75\text{cm}$, υπήρξαν εκκενώσεις που έπληξαν την πρύμνη του πλοίου και άρα δημιουργήθηκαν φαινόμενα γειτνίασης και ως προς την κατασκευή αυτή.

Συνεπώς, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι η γεινίαση με την εκάστοτε επιπλέον κατασκευή στις δύο αυτές περιπτώσεις απεικονίζεται στο τμήμα της καμπύλης όπου έχουμε μεγάλες τιμές του λόγου H/D , δηλαδή για μικρές τιμές της απόστασης D . Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και την διαφοροποίηση των καμπυλών αυτών σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Εν συνεχεία, με βάση την θεώρηση που έγινε παραπάνω σε σχέση με τα επίπεδα αναφοράς που ελήφθησαν για κάθε κατασκευή, παρατίθεται πίνακας που περιλαμβάνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους συντελεστές α , β , c_1 , c_2 για κάθε μία από τις πειραματικές κατανομές, όπου:

L : η απόσταση μεταξύ των δύο γειωμένων ράβδων,

h_ψ : το ύψος της ράβδου που μελετάμε,

h_κ : το ύψος της γεινιάζουσας ράβδου.

Σημείο-προσέγγιση	$\frac{h_\psi}{h_\kappa}$	L (cm)	α	β	c_1	c_2
6-7	1.38	10	-0.6873	0.5527	-0.4856	0.6578
1-0	1.455	9	-0.4217	0.6129	-0.2462	0.5829
6-5	1.33	43	-0.0756	0.7156	0.3203	0.7927
2-1	1.25	22	-0.1978	0.5499	0.1239	0.5369
2-3	1	25	-0.1999	0.4937	0.2267	0.5245
3-4	1	20	-0.2242	0.4532	0.1785	0.4405

Πίνακας 5.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων κατασκευών καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές των εξισώσεών τους.

Με βάση τώρα τον πίνακα αυτό, και εξαιρώντας τα δύο πρώτα σημεία για τους λόγους που περιγράψαμε παραπάνω μπορούμε να κάνουμε τις εξής, πιο συγκεκριμένες παρατηρήσεις:

- Η κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης και η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης για τα πειραματικά μας δεδομένα περιγράφονται από τις εξισώσεις:

$$R_c/D = c_1 \cdot \ln(H/D) + c_2 \quad (5.1)$$

$$S_c/D = a \cdot \ln(H/D) + \beta \quad (5.2)$$

- Οι σταθεροί όροι των δύο εξισώσεων β και c_2 εξαρτώνται τόσο από τον λόγο των υψών όσο και από την απόσταση μεταξύ των γειωμένων ράβδων. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι δύο αυτοί όροι μειώνονται όταν μειώνεται ο λόγος των υψών, καθώς και ότι μειώνονται όταν μειώνεται η απόσταση των δύο ράβδων, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι οι όροι β και c_2 είναι

συνάρτηση τόσο του λόγου h_{ψ}/h_{κ} όσο και της απόστασης L , με τις μεταβολές τους να είναι προς την ίδια κατεύθυνση με τις μεταβολές των δύο αυτών μεγεθών και με τον λόγο h_{ψ}/h_{κ} να έχει τη μεγαλύτερη βαρύτητα. Δηλαδή:

$$\beta = f \left(k_1 \cdot \frac{h_{\psi}}{h_{\kappa}}, m_1 \cdot L \right), \text{ όπου } k_1, m_1 > 0 \text{ και } k_1 > m_1 \quad (5.3)$$

$$c_2 = f \left(k_2 \cdot \frac{h_{\psi}}{h_{\kappa}}, m_2 \cdot L \right), \text{ όπου } k_2, m_2 > 0 \text{ και } k_2 > m_2 \quad (5.4)$$

- Η κλίση α της εξίσωσης (5.2) είναι αρνητική και εξαρτάται επίσης τόσο από τον λόγο των υψών όσο και από την απόσταση μεταξύ των γειωμένων ράβδων. Οι μεταβολές της είναι επίσης προς την ίδια κατεύθυνση με τις μεταβολές του λόγου h_{ψ}/h_{κ} και της απόστασης L , αλλά εδώ μεγαλύτερη βαρύτητα έχει η απόσταση L . Συνοπτικά, ισχύει:

$$\alpha = f \left(k_3 \cdot \frac{h_{\psi}}{h_{\kappa}}, m_3 \cdot L \right), \text{ όπου } k_3, m_3 > 0 \text{ και } k_3 < m_3 \quad (5.5)$$

- Η κλίση c_1 της εξίσωσης (5.1) είναι θετική και εξαρτάται επίσης από το λόγο των υψών και από την απόσταση μεταξύ των γειωμένων ράβδων. Οι μεταβολές της είναι προς την ίδια κατεύθυνση με τις μεταβολές του λόγου h_{ψ}/h_{κ} και της απόστασης L , με την απόσταση L να έχει μεγαλύτερη βαρύτητα. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται από τα πειράματα που αφορούν τις περιοχές 6-5, 2-1, 2-3, ωστόσο, δεν επαληθεύονται από τα πειράματα που διεξήχθησαν στην περιοχή 3-4, τα οποία παρουσιάζουν αναντιστοιχία. Συνοπτικά, μπορούμε να πούμε ότι:

$$c_1 = f \left(k_4 \cdot \frac{h_{\psi}}{h_{\kappa}}, m_4 \cdot L \right), \text{ όπου } k_4, m_4 > 0 \text{ και } k_4 < m_4 \quad (5.6)$$

5.3 Συμπεράσματα- Επόμενη μέρα

Συνοψίζοντας, μπορούμε να καταλήξουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Όταν η κατασκευή που μελετάται βρίσκεται σε περιοχή του πλοίου η οποία δεν γειτνιάζει με την θάλασσα, θα πρέπει κατά τη μελέτη της αντικεραυνικής της προστασίας να λαμβάνεται ως ύψος της κατασκευής με επίπεδο αναφοράς το κατάστρωμα του πλοίου.
- Αντίθετα, όταν η κατασκευή που μελετάται γειτνιάζει με την θάλασσα, θα πρέπει, κατά την μελέτη της αντικεραυνικής της προστασίας, το ύψος της να μετρηθεί με επίπεδο αναφοράς την ίσαλο γραμμή του πλοίου.
- Αν για κάποια κατασκευή ισχύουν και οι δύο παραπάνω περιπτώσεις, δηλαδή είναι τοποθετημένη έτσι ώστε η γειτνιάσή της με την θάλασσα να εξαρτάται από τον τρόπο προσέγγισής της, τότε το επίπεδο αναφοράς που λαμβάνεται εξαρτάται από τρόπο προσέγγισής της, με βάση τις δύο παραπάνω περιπτώσεις. Δύναται, δηλαδή, για την ίδια κατασκευή, να ληφθούν διαφορετικά επίπεδα αναφοράς ανάλογα με την θέση της επάνω στο πλοίο.

- Οι υπάρχουσες μέθοδοι αντικεραυνικής προστασίας υπερεκτιμούν τόσο την απόσταση πρόσκρουσης όσο και την ακτίνα σύλληψης, όταν η υπό μελέτη κατασκευή υπόκειται σε φαινόμενα γειννίασης. Αυτό είναι λογικό, αφού τα μοντέλα αυτά δεν συνυπολογίζουν την επίδραση της γειννίασης.
- Όσον αφορά την μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας, παρατηρούμε πολύ μεγάλες αποκλίσεις στην ακτίνα σύλληψης, αφού, σε ορισμένες περιπτώσεις, η πειραματική ακτίνα σύλληψης είναι ακόμα και 70% μικρότερη από αυτήν που προβλέπει η μέθοδος. Στην απόσταση πρόσκρουσης οι προβλέψεις της μεθόδου είναι πιο συνεπείς, αφού στην πλειοψηφία των περιπτώσεων παρατηρούμε αποκλίσεις της τάξης του 30%. Παρόλα αυτά, δεν μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η πειραματική απόσταση πρόσκρουσης προσεγγίζεται επαρκώς από το μοντέλο αυτό.
- Όσον αφορά το ελλειπτικό μοντέλο, οι προβλέψεις του τόσο για την ακτίνα σύλληψης όσο και για την απόσταση πρόσκρουσης παρουσιάζουν την μεγαλύτερη απόκλιση από όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στις προβλέψεις του για την ακτίνα σύλληψης το ελλειπτικό μοντέλο παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση και με τα υπόλοιπα μοντέλα.
- Στην περίπτωση του στατιστικού μοντέλου, παρατηρήθηκαν επίσης αποκλίσεις όσον αφορά την ακτίνα σύλληψης, οι οποίες ήταν ελάχιστα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες αποκλίσεις που είχε η κυλιόμενη σφαίρα σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και όσον αφορά την απόσταση πρόσκρουσης.
- Επιβεβαιώθηκε η συμπεριφορά της κανονικοποιημένης ακτίνας σύλληψης R/D όπως αυτή προβλέπεται από την εξίσωση (3.25). Ωστόσο, αποδείχτηκε ότι οι συντελεστές c_1 και c_2 της εξίσωσης αυτής, στην περίπτωση όπου εμφανίζονται φαινόμενα γειννίασης, δεν είναι σταθεροί, αλλά εξαρτώνται από τον λόγο του ύψους της κατασκευής προς το ύψος της γειννιάζουσας κατασκευής και από την μεταξύ τους απόσταση.
- Αντίστοιχα, η κανονικοποιημένη απόσταση πρόσκρουσης S/D περιγράφεται από την εξίσωση (3.26) του στατιστικού μοντέλου, στην οποία, επίσης στην περίπτωση που υπάρχουν φαινόμενα γειννίασης, οι συντελεστές α , β επίσης εξαρτώνται από τον λόγο των υψών των δύο κατασκευών και από την μεταξύ τους απόσταση. Επίσης, οι καμπύλες που προέκυψαν από τα πειραματικά δεδομένα έχουν αρνητική κλίση, σε αντίθεση με την καμπύλη του στατιστικού μοντέλου που έχει θετική κλίση.

Εν συνεχεία, για την επέκταση και περαιτέρω διερεύνηση των παραπάνω συμπερασμάτων προτείνονται οι εξής εισηγήσεις:

- Θα μπορούσαν να διενεργηθούν επιπλέον πειράματα για διαφορετικούς λόγους υψών $\frac{h_\psi}{h_\kappa}$ και αποστάσεις L μεταξύ των ράβδων έτσι ώστε να μπορέσει να ποσοτικοποιηθεί η εξάρτηση των συντελεστών α , β , c_1 , c_2 από τα μεγέθη αυτά.

- Θα μπορούσε το αντίστοιχο πείραμα να διενεργηθεί για μεγαλύτερες αποστάσεις D της φορτισμένης ράβδου από το έδαφος έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά των εξισώσεων (5.1) και (5.2) για τιμές του λόγου H/D που τείνουν στο μηδέν.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Δείγμα φωτογραφιών από τη διεξαγωγή του πειράματος

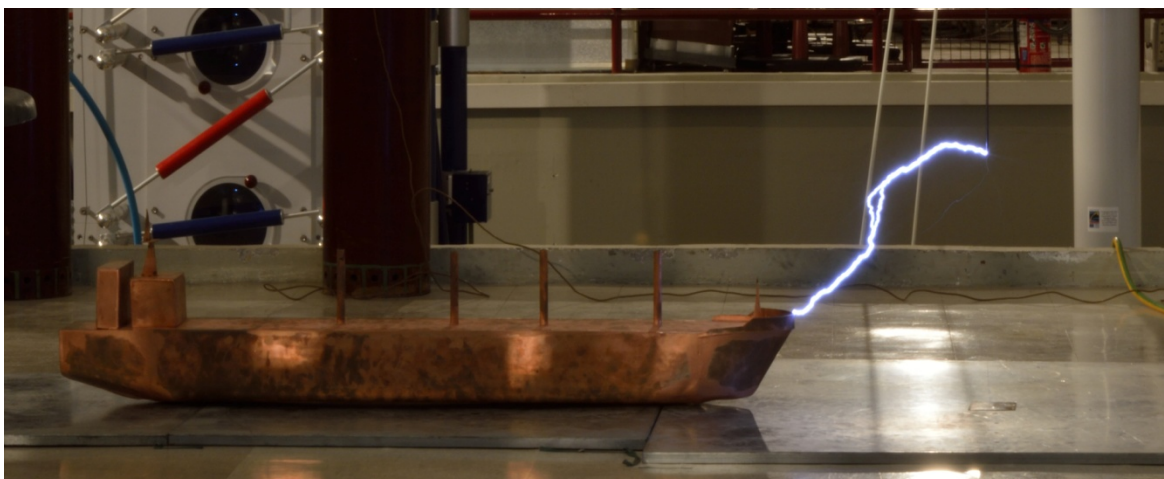
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κατασκευή 1- Προσέγγιση από γειωμένη πλάκα



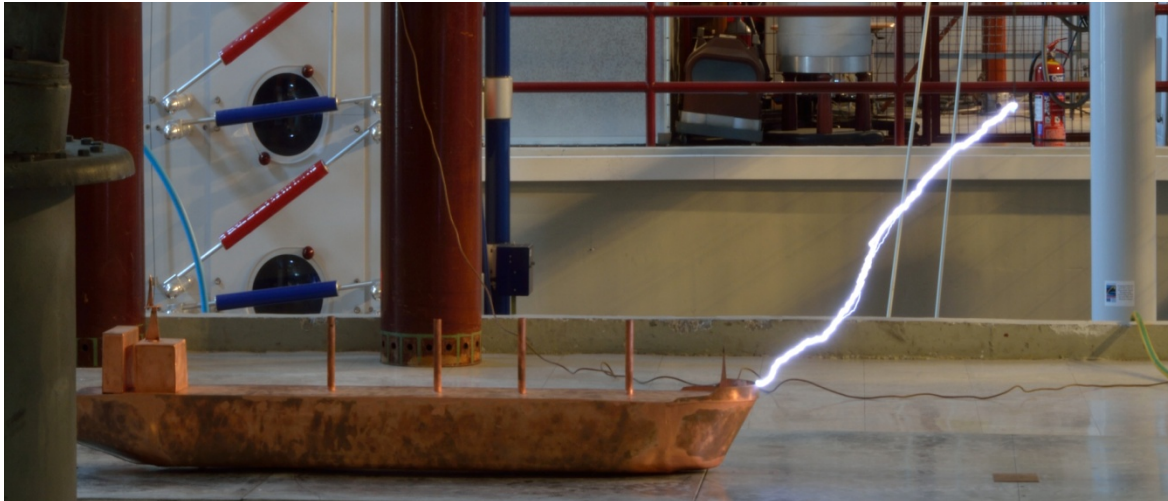
D=50cm Σύλληψη



D=50cm Αστοχία



D=50cm Αστοχία



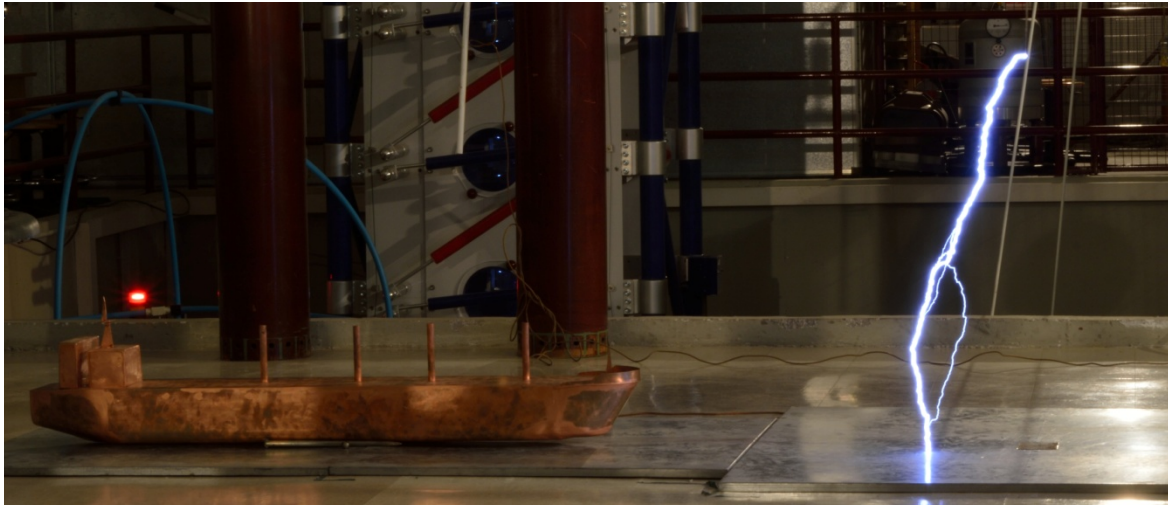
D=75cm Αστοχία



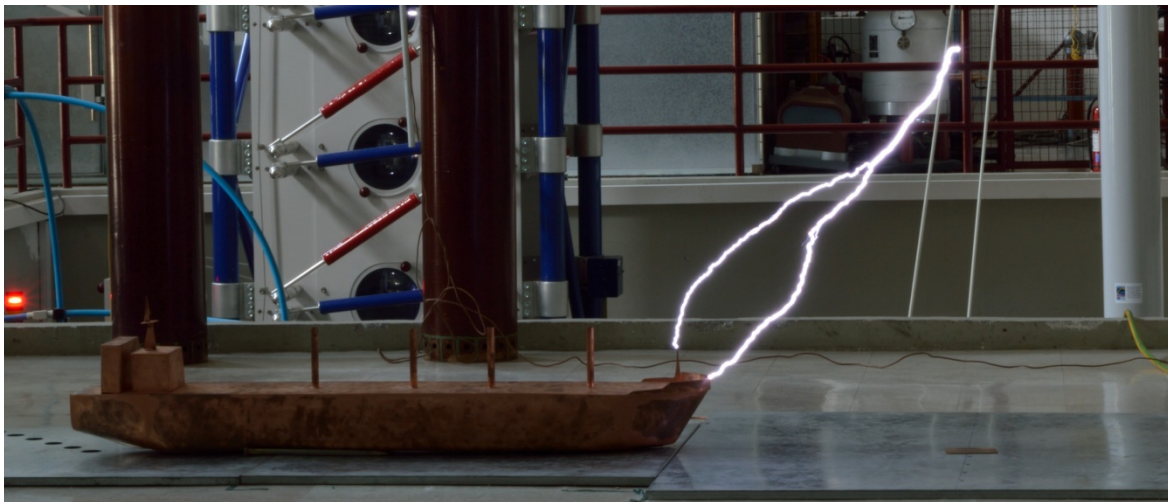
D=75cm Σύλληψη



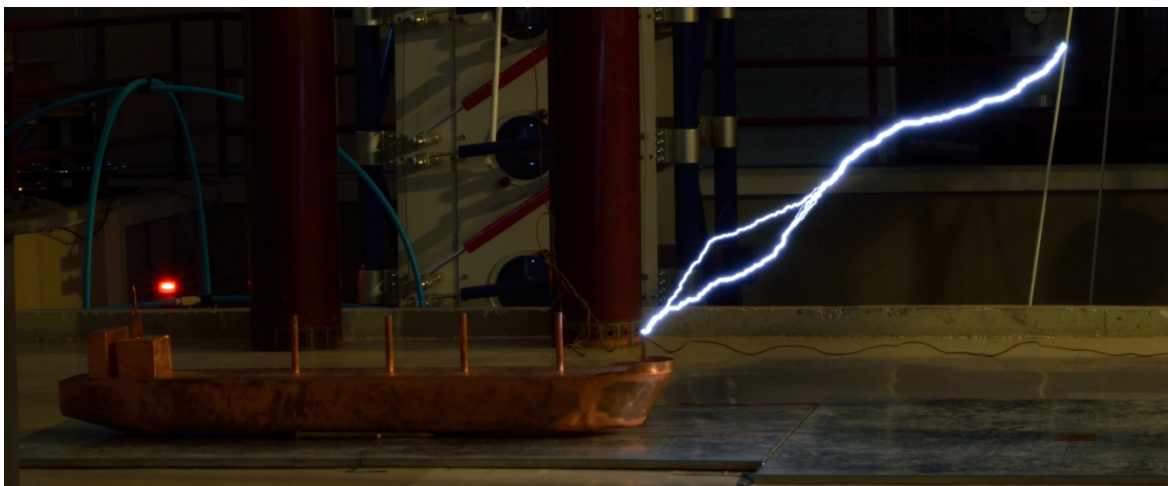
D=75cm Αστοχία



D=100cm Αστοχία

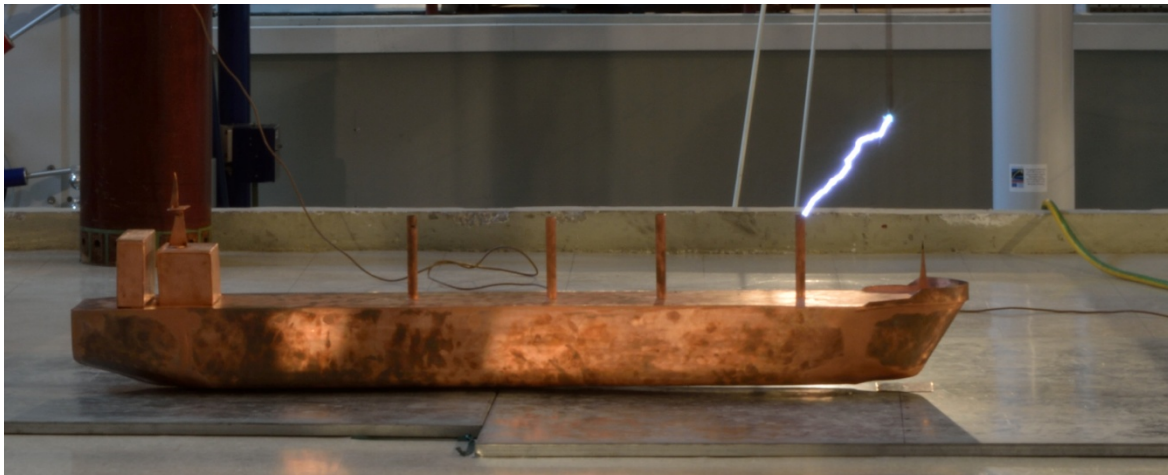


D=100cm Αστοχία

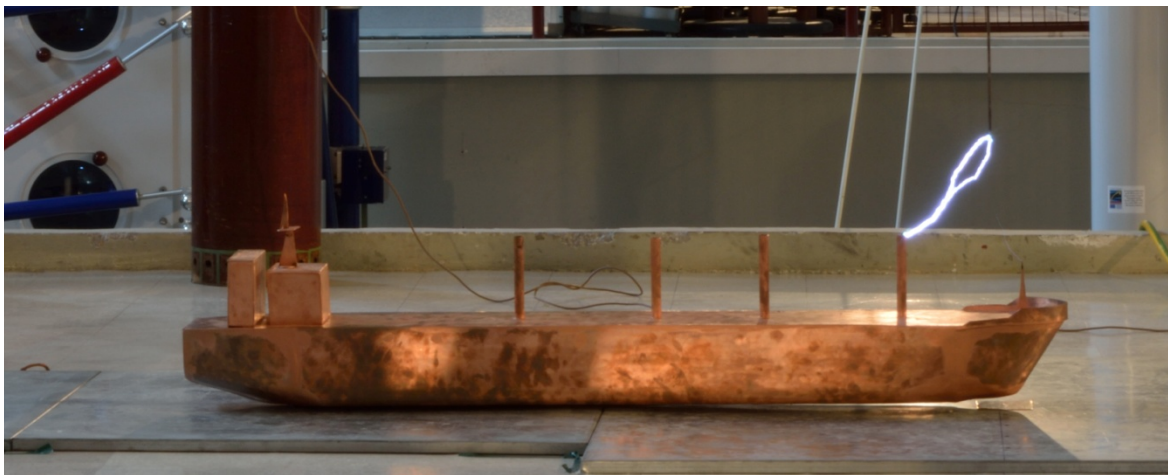


D=100cm Σύλληψη

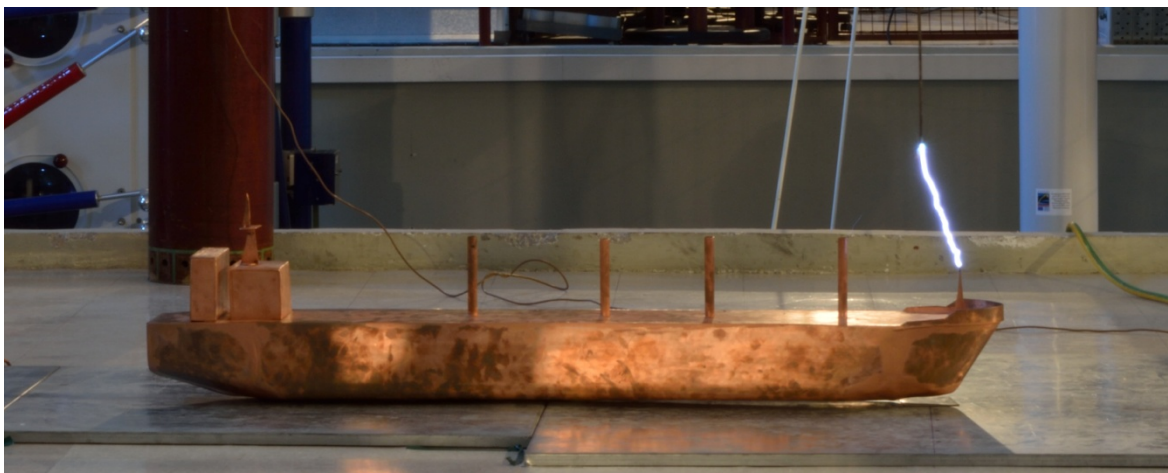
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κατασκευή 2- Προσέγγιση από κατασκευή 1



D=50cm Σύλληψη



D=50cm, Σύλληψη



D=50cm Αστοχία



D=75cm Αστοχία



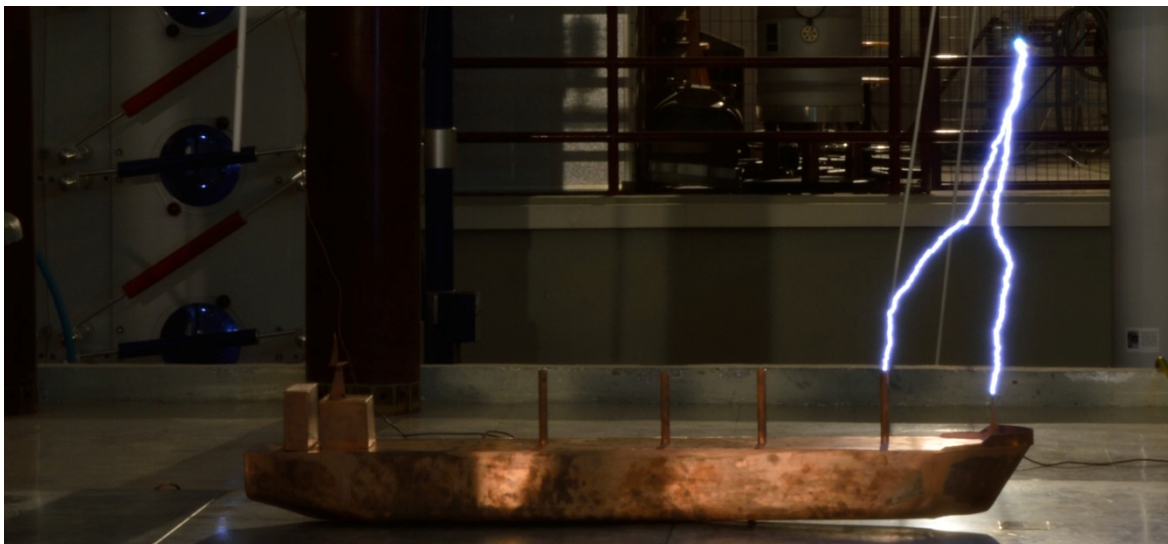
D=75cm Σύλληψη



D=75cm Αστοχία



D=100cm Σύλληψη



D=100cm Αστοχία

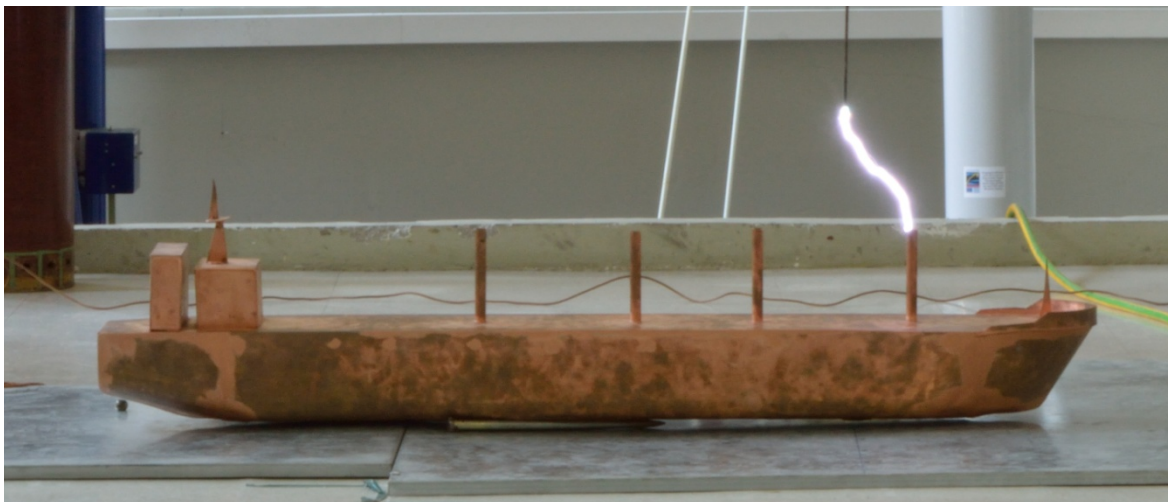


D=100cm Αστοχία

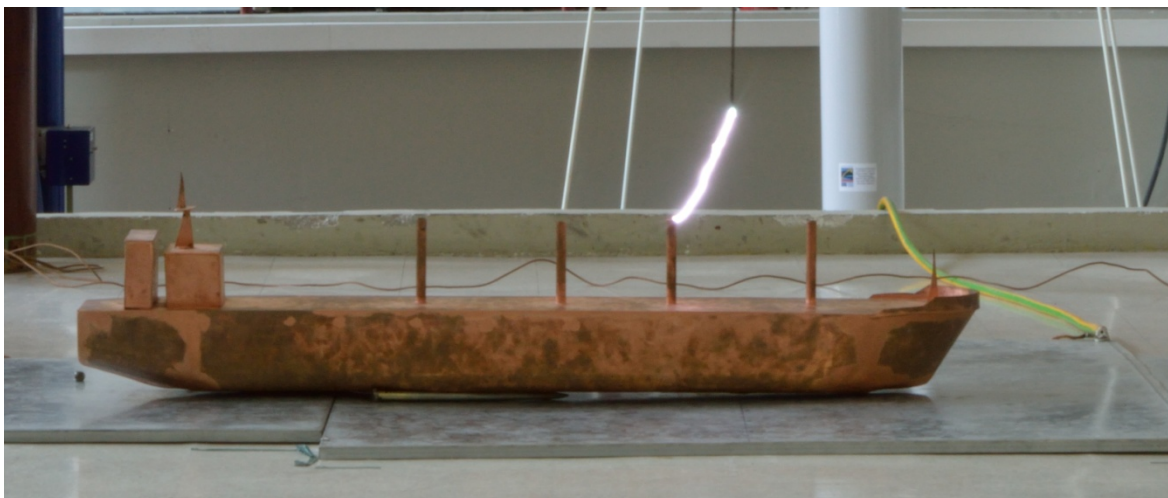
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Κατασκευή 2- Προσέγγιση από κατασκευή 3



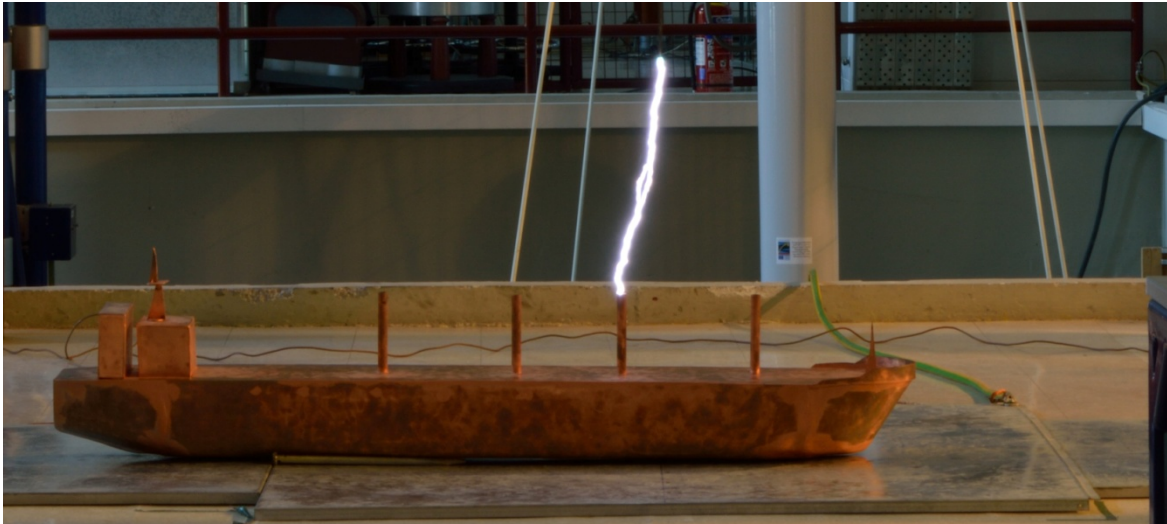
D=50cm Σύλληψη



D=50cm Σύλληψη



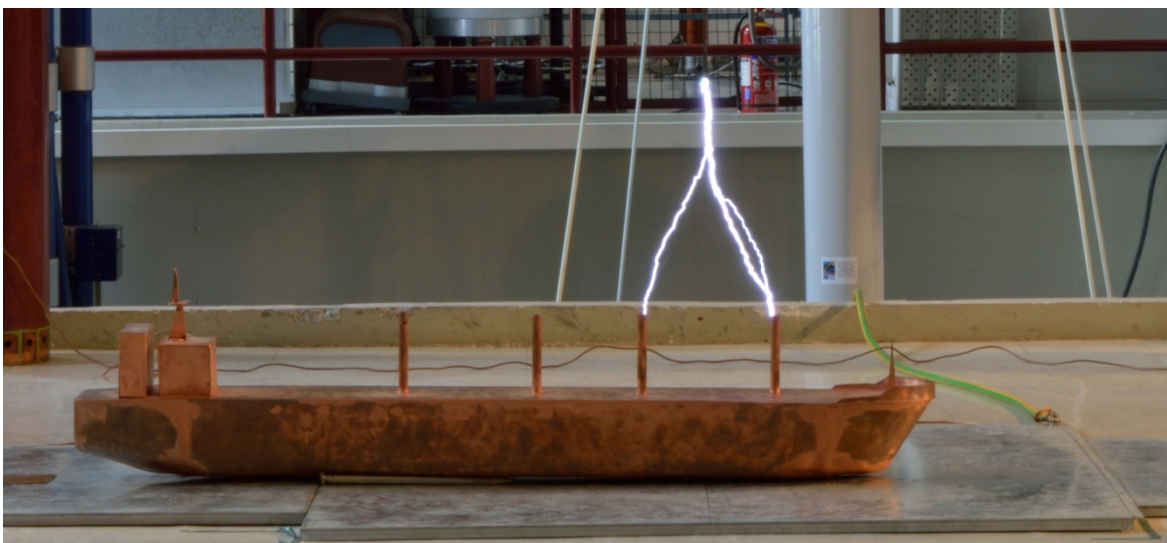
D=50cm Αστοχία



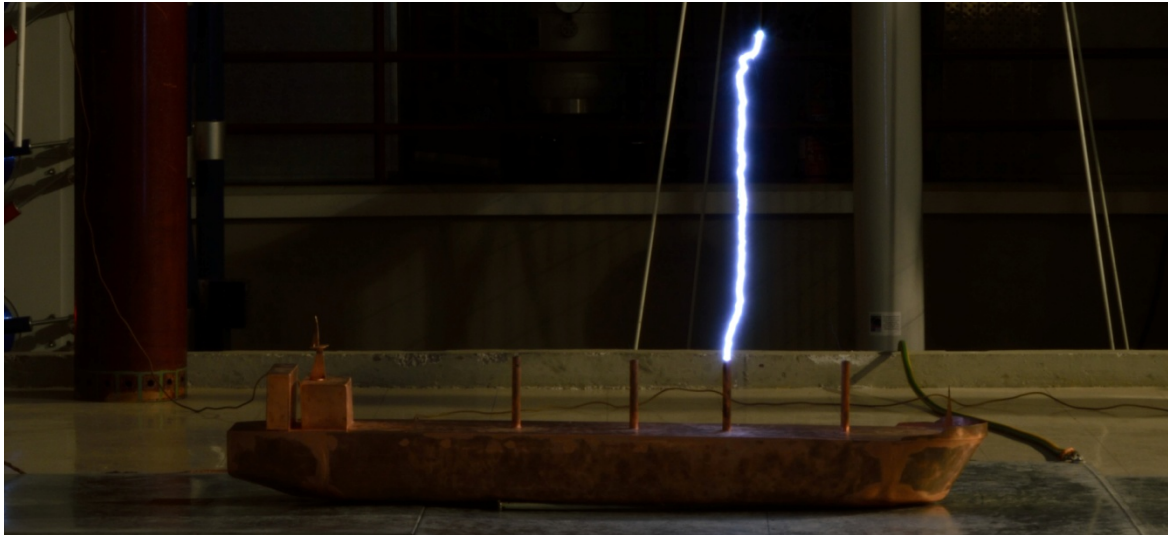
D=75cm Αστοχία



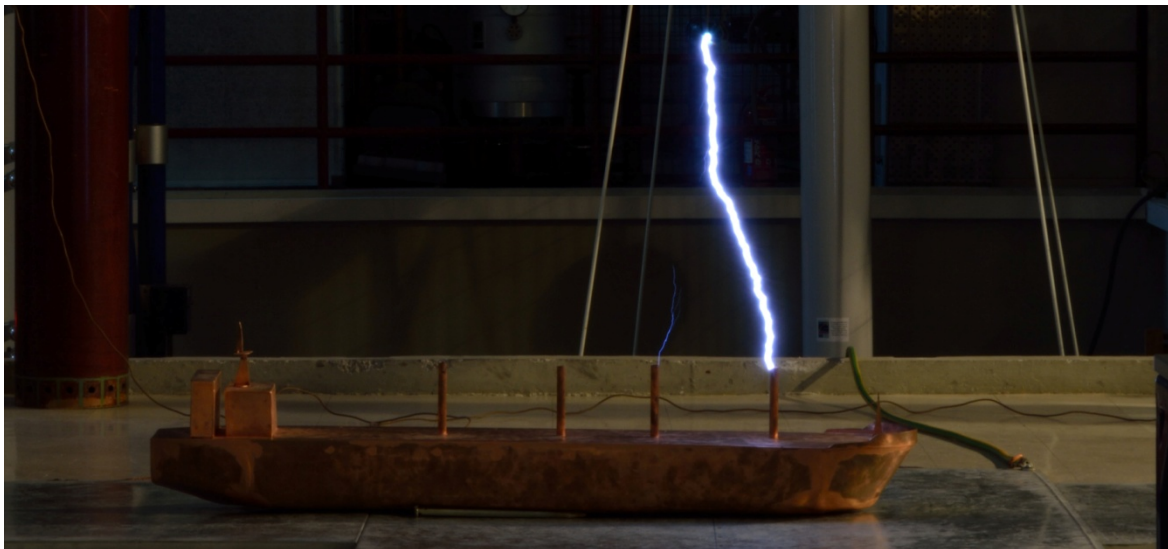
D=75cm Σύλληψη



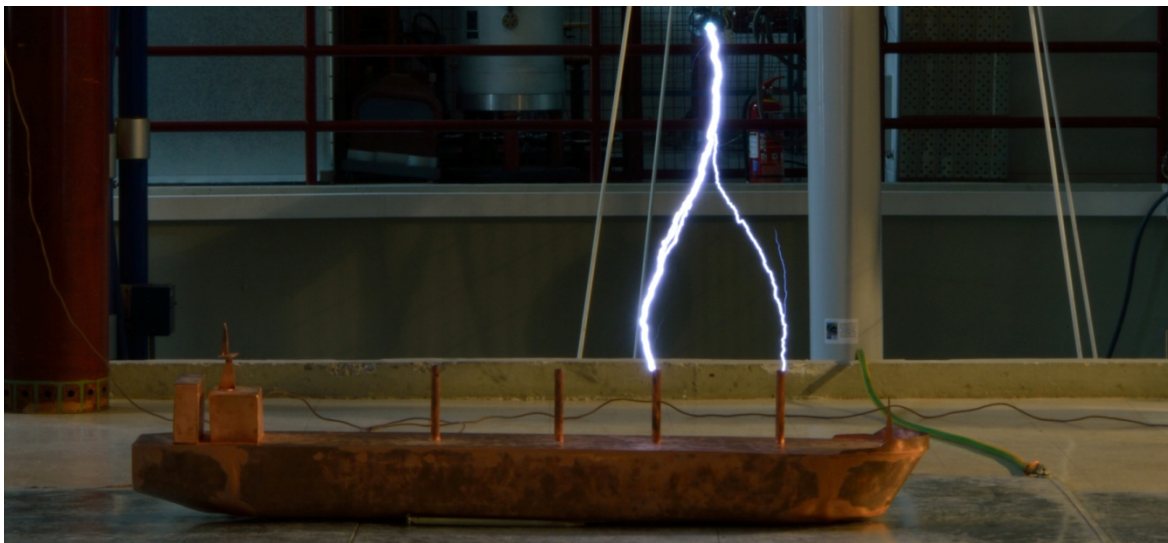
D=75cm Αστοχία



D=100cm Αστοχία

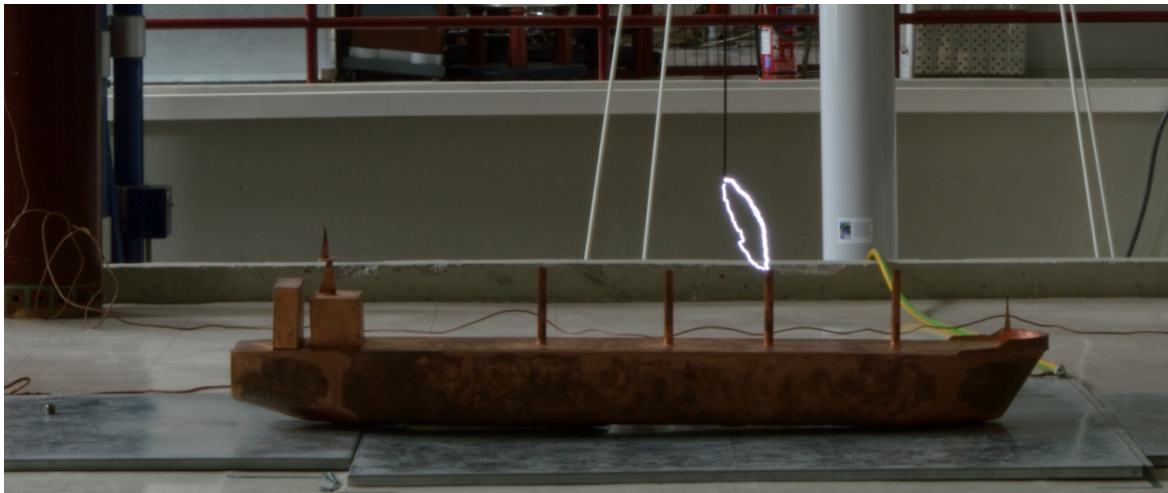


D=100cm Σύλληψη

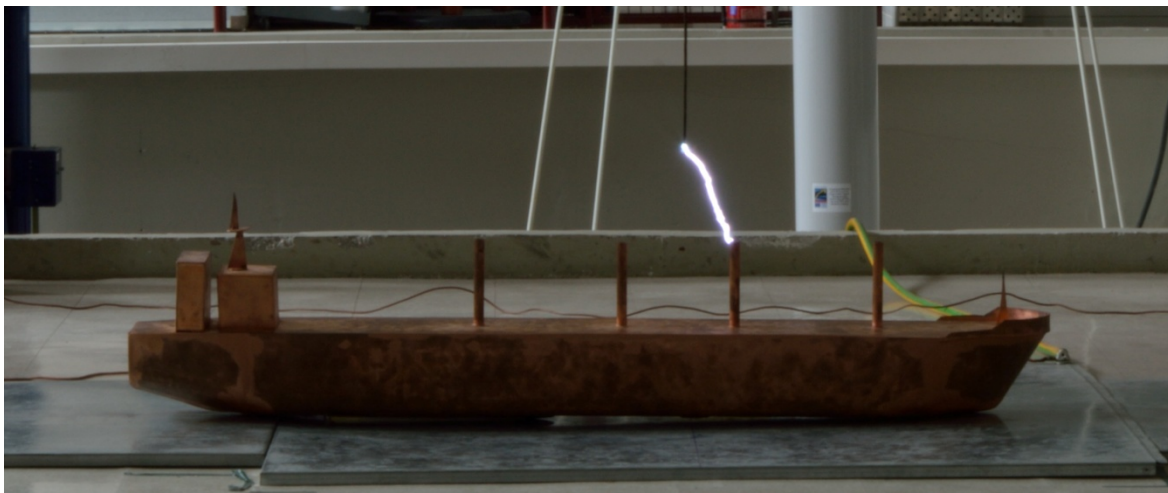


D=100cm Αστοχία

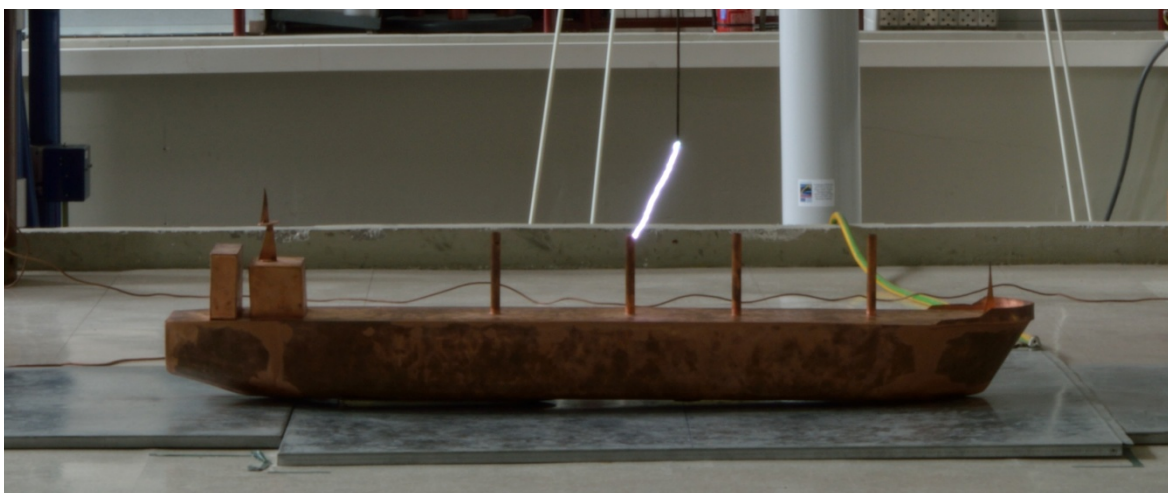
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Κατασκευή 3- Προσέγγιση από κατασκευή 4



D=50cm Σύλληψη



D=50cm Σύλληψη



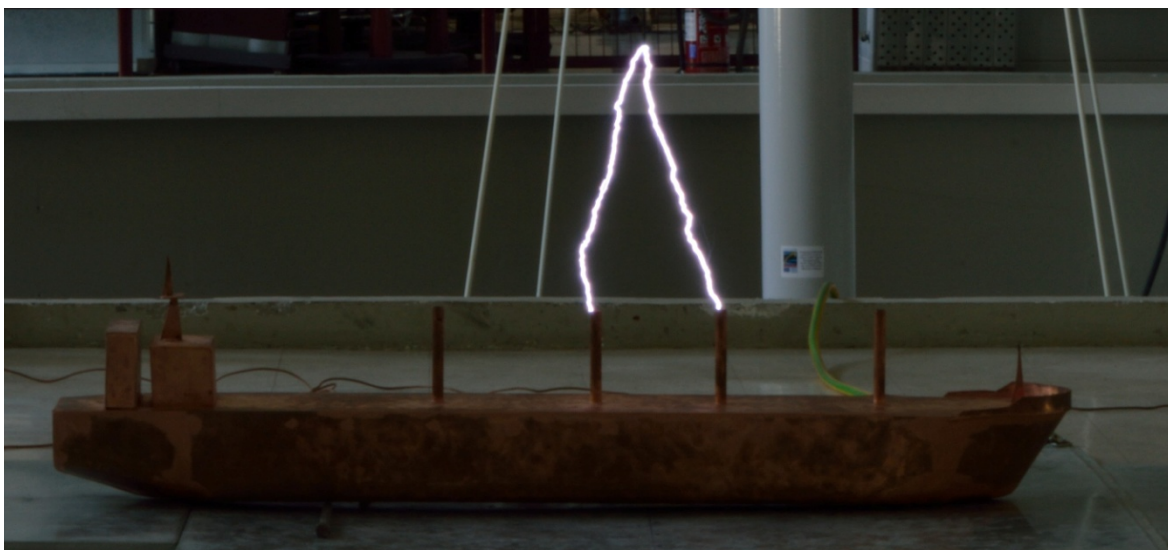
D=50cm Αστοχία



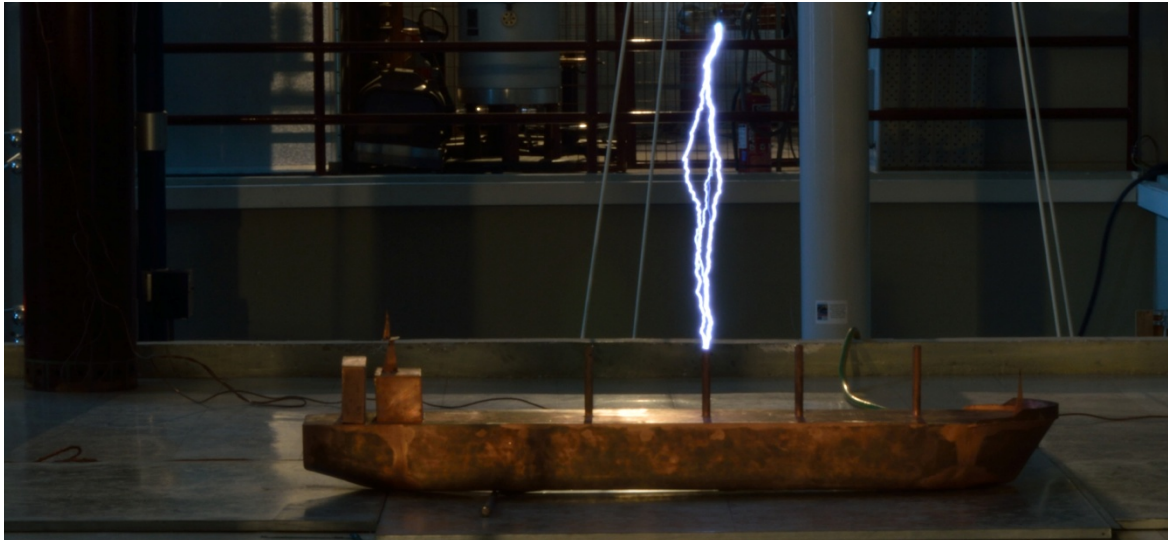
D=75cm Σύλληψη



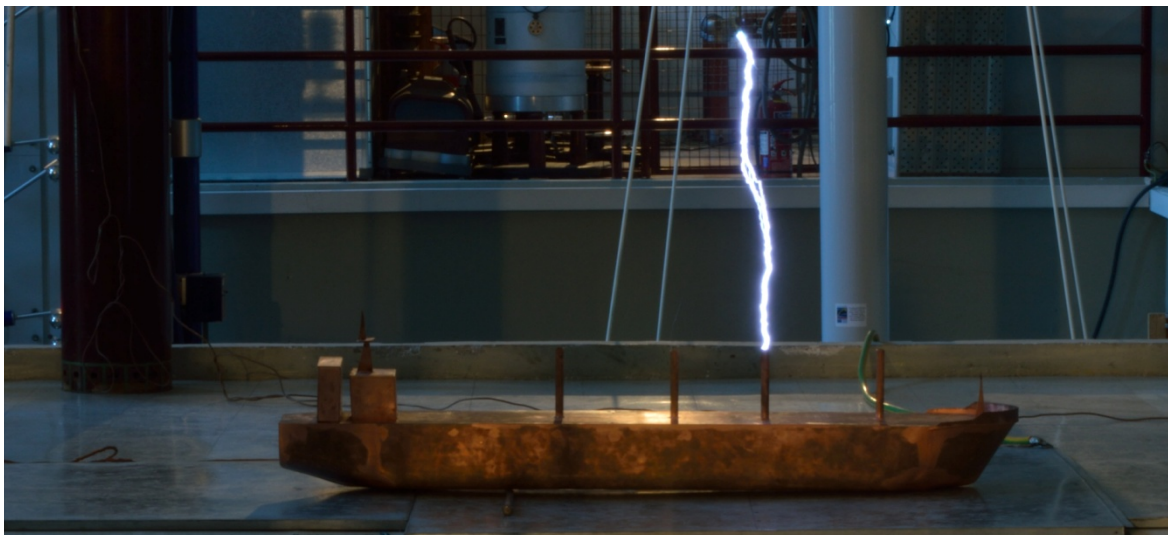
D=75cm Αστοχία



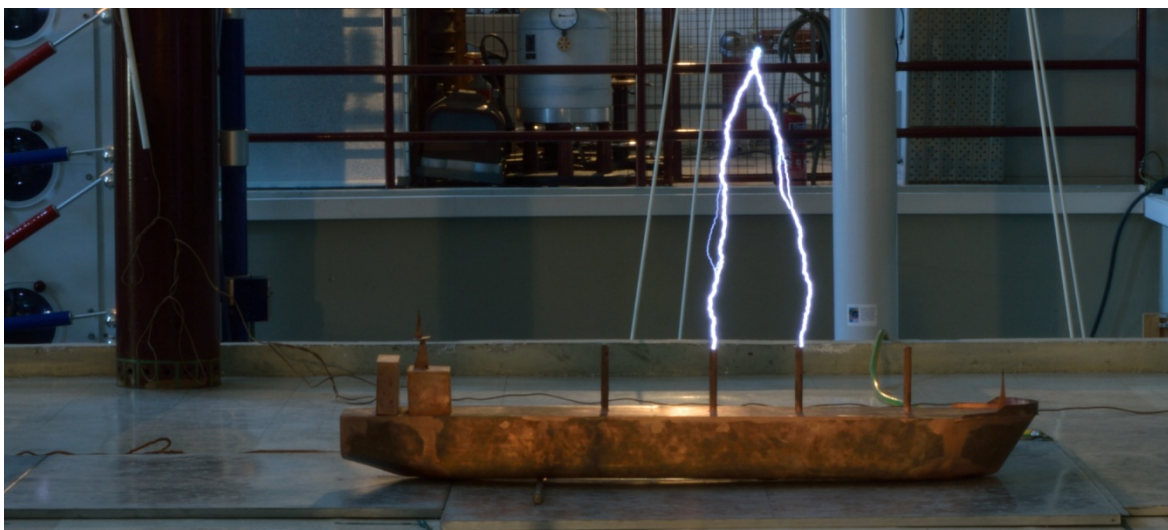
D=75cm Αστοχία



D=100cm Αστοχία

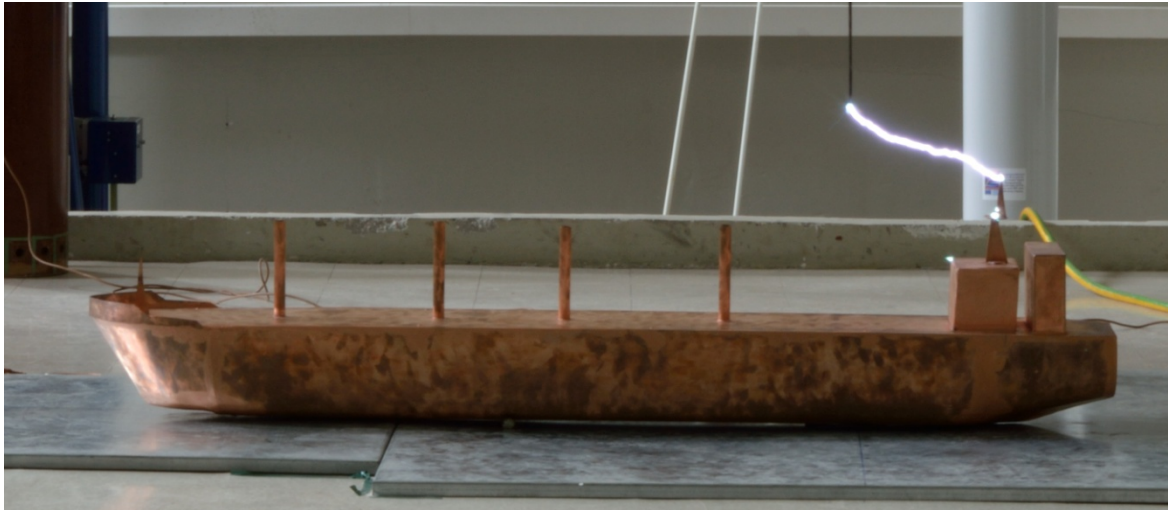


D=100cm Σύλληψη

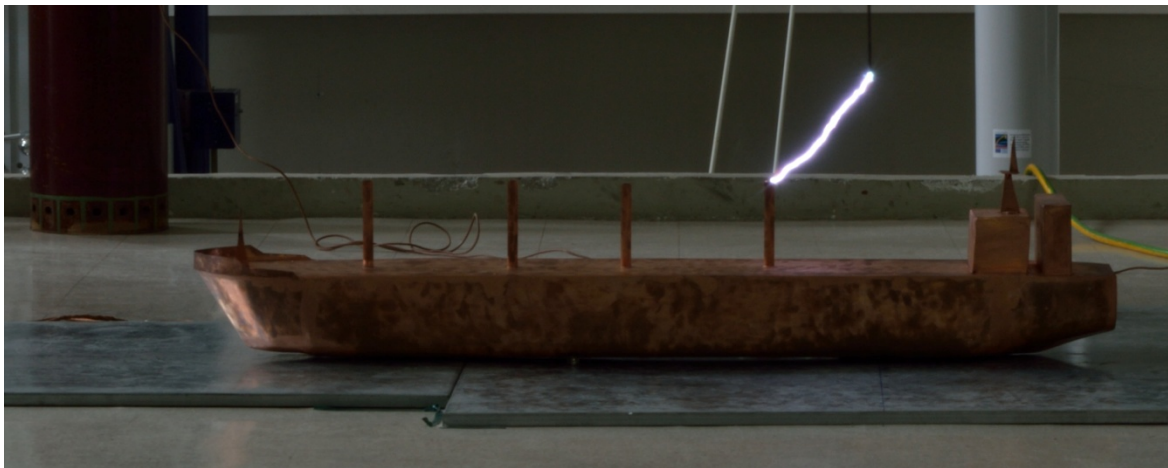


D=100cm Αστοχία

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Κατασκευή 6- Προσέγγιση από κατασκευή 5



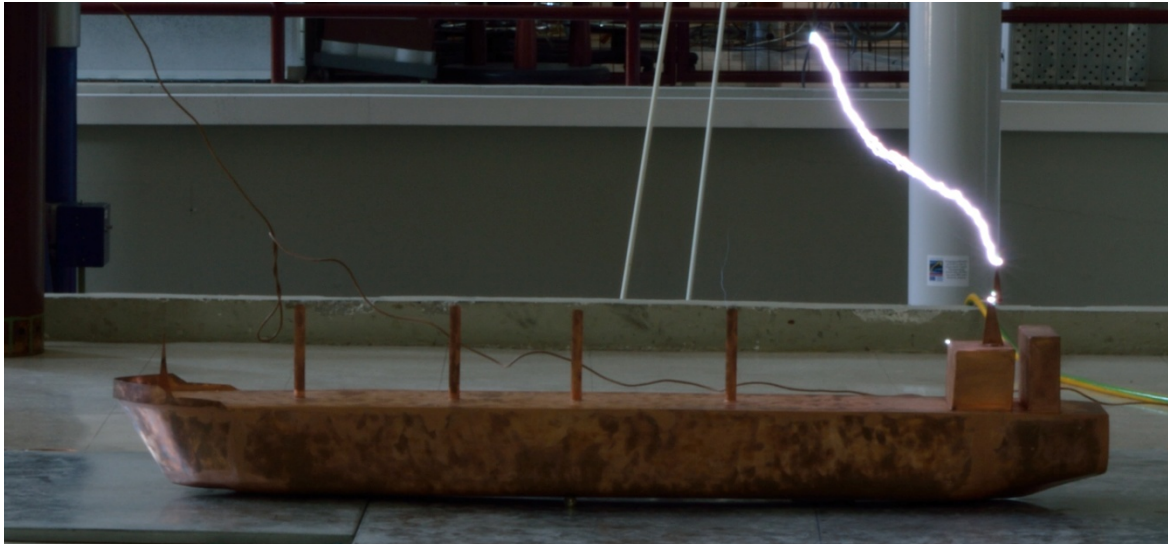
D=50cm Σύλληψη



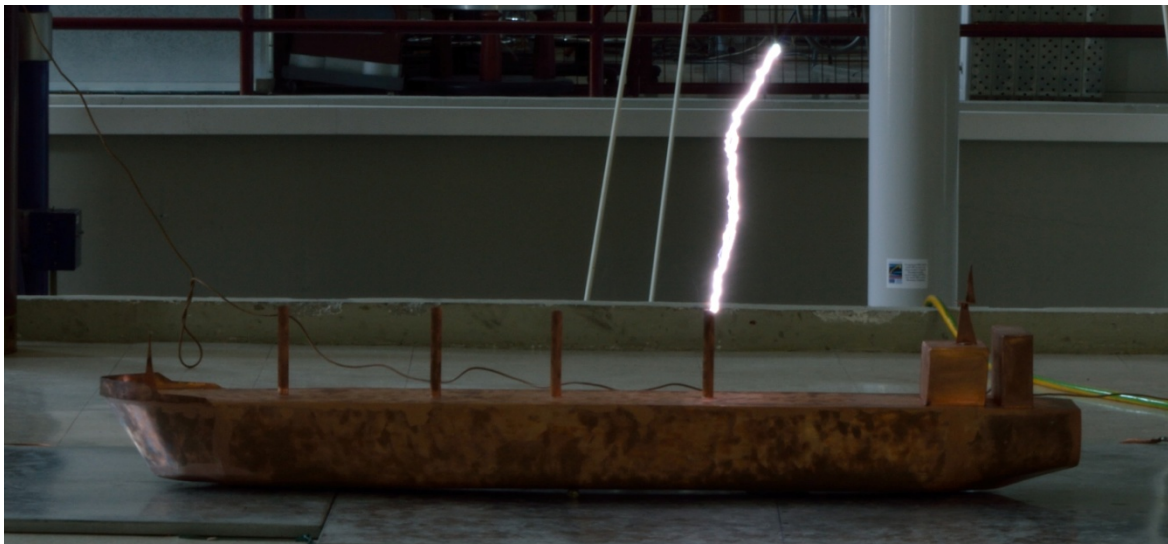
D=50cm Αστοχία



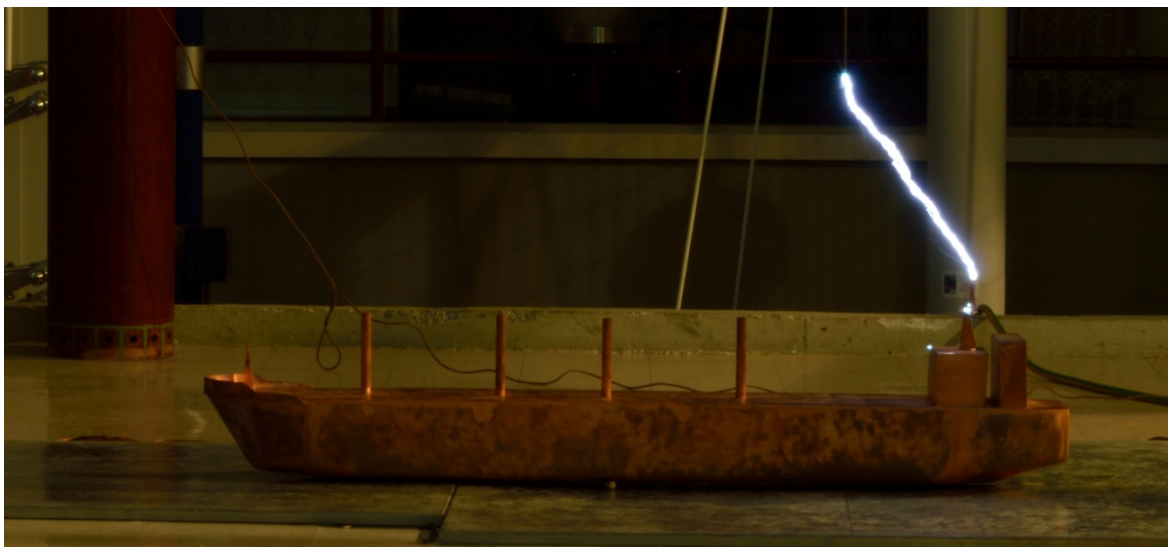
D=50cm Σύλληψη



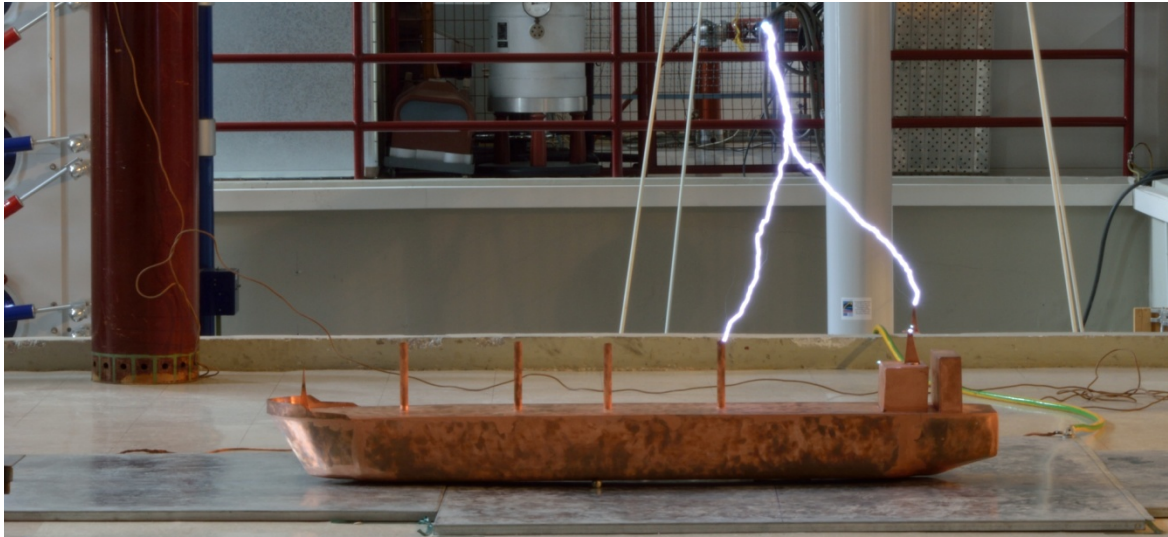
D=75cm Σύλληψη



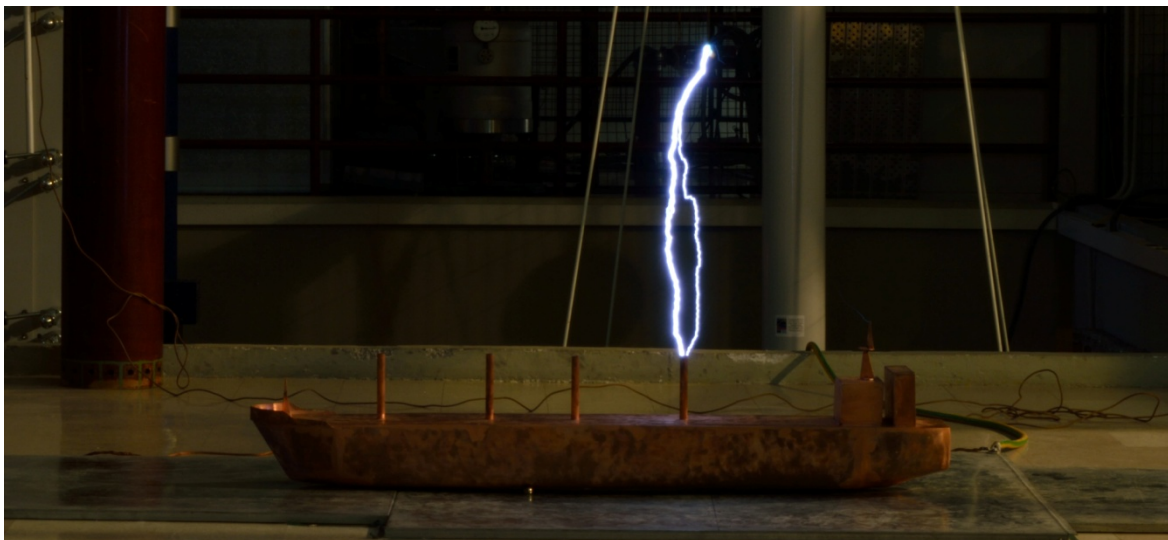
D=75cm Αστοχία



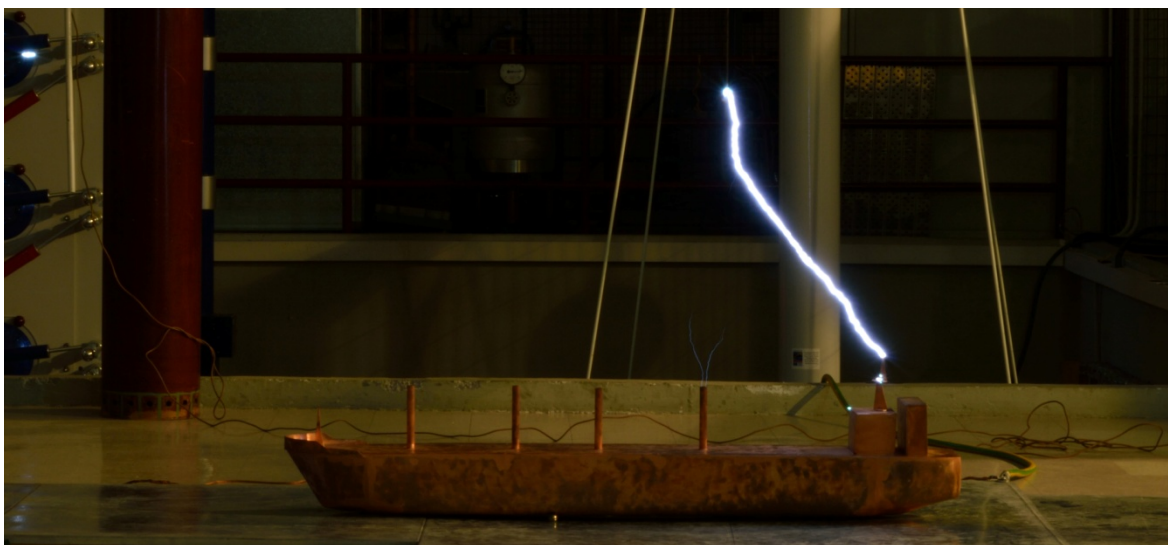
D=75cm Σύλληψη



D=100cm Αστοχία



D=100cm Αστοχία



D=100cm Σύλληψη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Πληροφορίες από <http://www.codecheck.com/cc/BenAndTheKite.html>
- [2] Εικόνες από <https://www.google.com>
- [3] Ι.Α. Σταθόπουλος, 'Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων', Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα, Οκτώβριος 1989
- [4] Martin A. Uman, 'The lightning discharge', International Geophysics Series, Volume 39
- [5] Πληροφορίες από <http://igelectric.com/ti-einai-o-keraynos/>
- [6] Λ. Σ. Οικονόμου, 'ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΚΕΡΑΥΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ', Αθήνα Μάιος 2006
- [7] Χ Χαλδούπης, 'Εισαγωγικά στοιχεία ατμοσφαιρικής φυσικής', Ηράκλειο 2000
- [8] Πληροφορίες από το <http://www.marinelightning.com>
- [9] Τσαλαμέγκας – Ρουμελιώτης, Σημειώσεις Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων, Τόμος Β, Αθήνα 2004
- [10] Y.T. Lin, M. A. Uman, R.B Standler, Lightning return stroke models, 1980
- [11] E.K. Saraoja, Lightning Earths, New York 1977
- [12] E. M. Thompson, 'A Critical Assessment of the U.S. Code for Lightning Protection of Boats', IEEE May 1991
- [13] 81/262/FDIS, IEC 62305-1 Ed. 1.0, Protection against lightning – Part 1: General principles, Italy 2005
- [14] Πυργιώτη Ε. Προστασία κατασκευών από κεραυνούς, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πανεπιστήμιο Πατρών 2012
- [15] P. N. Mikropoulos and T. E. Tsovilis, "Striking distance and interception probability," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1571-1580, Jul. 2008.
- [16] P. N. Mikropoulos and T. E. Tsovilis, "Interception probability and shielding against lightning," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 863-873, Apr. 2009.
- [17] Παντελής Μικρόπουλος, Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
- [18] International Standard IEC 61024-1 : 1990
- [19] V.A. Rakov and M.A. Uman, "Lightning physics and effects", University of Florida, 2003

- [20] P.Y. Okyere, Ph.D & George Eduful, "Evaluation of Rolling Sphere Method Using Leader Potential Concept: A Case Study", University of Science and Technology Kumasi-Ghana
- [21] F. D'Alessandro: A modern perspective on direct strike lightning protection.
- [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", Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07, IEEE 21-23 May 2007, Arlington USA, pages:215 - 220
- [24] Yang Song, "Study of the lightning protection zone of the Franklin rod", Msc Thesis, Mississippi State University, Mississippi, August 2004
- [25] Θωμάς Ε. Τσοβίλης, "Μοντέλο σύλληψης κεραυνού και εφαρμογές του σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας", Διδακτορική Διατριβή, Θεσσαλονίκη, 2010
- [26] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, "Statistical Method for the Evaluation of the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.20, pages: 202-211
- [27] S. Grzybowski, Y.Song, "Experimental Study of Rod Height and Impulse Polarity Impact on the Protection Zone", Proceedings of the 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP'2004), Avignon, France, 13-16 September, 2004, pages: 372-377
- [28] Maritime Structures and Ships Lightning Protection, Hossam-Eldin, Ehab A.M. Omran, Electrical Engineering Department Alexandria University, Egypt.
- [29] 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
- [30] International Standard ISO 10134:2003 (E)
- [31] International Standard IEC 60092-507 2008-01 Electrical installations in ships – Part 507: Small vessels
- [32] ABYC TE-4 07/06
- [33] Hull Arrangement, Stability and Systems for Ships less than 500 GT, July 2011
Rule Note NR 566 DT R00 E
- [34] Ministry of Defense, Defense Standard 02-516, July 2003

- [35] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων ΕΜΠ, “ Συμπληρωματικές Σημειώσεις Υψηλών Τάσεων”,
Αθήνα, Οκτώβριος 2012
- [36] Ανδρέας Αλεξάνδρου, 'Κεραυνοπληξία πλοίου: Πειραματική διερεύνηση, μέσω δοκιμών
σε μοντέλα υπό κλίμακα', Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π. 2014.
- [37] High Voltages Test Techniques, IEC 60060-1, 1989
- [38] Μ. Φ. Γεωργόπουλος, 'Συμβολή στην αντικεραυνική προστασία πλοίου υπό καταπόνηση
θετικής πολικότητας', Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π. 2015.