



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Συμβολή στη μελέτη της αντικεραυνικής προστασίας  
πλοίου**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Ελένη Π. Νικολοπούλου**

Αθήνα, Οκτώβριος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Συμβολή στη μελέτη της αντικεραυνικής προστασίας  
πλοίου

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ελένη Π. Νικολοπούλου

Συμβουλευτική Επιτροπή: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Παντελής Ν. Μικρόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 24<sup>η</sup> Οκτωβρίου 2016.

Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παντελής Ν. Μικρόπουλος  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

Ιωάννης Μ. Προυσαλίδης  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ελευθερία Χ. Πυργιώτη  
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Παν. Πατρών

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

Γεώργιος Ι. Τσεκούρας  
Επίκουρος Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



.....  
**Ελένη Π. Νικολοπούλου**

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

Copyright © Ελένη Π. Νικολοπούλου, 2016.

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



*Τὸν ἀγῶνα τὸν καλὸν ἠγωνίσμαι, τὸν δρόμον τετέλεκα, τὴν πίστιν τετήρηκα·  
λοιπὸν ἀπόκειται μοι ὁ τῆς δικαιοσύνης στέφανος,  
ὃν ἀποδώσει μοι ὁ Κύριος ἐν ἐκείνῃ τῇ ἡμέρᾳ, ὁ δίκαιος κριτής,  
οὐ μόνον δὲ ἐμοί, ἀλλὰ καὶ πᾶσι τοῖς ἠγαπηκόσι τὴν ἐπιφάνειαν αὐτοῦ.*

Β' προς Τιμόθεον, κεφ. 4, στ. 5-8

**Στον πατέρα μου**





## Περίληψη

Με τον εκτεταμένο εξηλεκτρισμό και τη χρήση ζωτικής σημασίας ηλεκτρονικού εξοπλισμού στα συστήματα ενός πλοίου το φαινόμενο του κεραυνού αναδεικνύεται σε σοβαρό παράγοντα κινδύνου. Στην παρούσα διατριβή γίνεται αρχικά ανάλυση των φυσικών μηχανισμών αλληλεπίδρασης του κεραυνικού πλήγματος με τη δομή ενός πλοίου και καταγραφή της διεξαχθείσας έρευνας και των απαιτήσεων των σχετικών κανονισμών. Η σύγκριση μετρήσεων της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης από επιβολές κρουστικής τάσης σε υπό κλίμακα δοκίμιο πλοίου με τα αποτελέσματα εμπειρικών μοντέλων ανέδειξε την υπερεκτίμηση της παρεχόμενης ζώνης προστασίας στη σύνθετη δομή ενός πλοίου από τις θεωρητικές μεθόδους. Επιπλέον, η στατιστική φύση του κεραυνού και τα φαινόμενα γειτνίασης είναι παράγοντες που θα πρέπει να συνεκτιμώνται. Οι απαιτήσεις ενός πειράματος έγχυσης κρουστικού ρεύματος σε υπό κλίμακα μοντέλα πλοίου μελετήθηκαν με προκαταρκτικές μετρήσεις σε δοκίμια εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής με εφαρμογή της Θεωρίας της Ομοιότητας και της Διαστατικής Ανάλυσης. Ακολούθως, υπολογισμοί των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων σε πλοία έδειξαν ότι σε παράκτιες περιοχές με έντονη κεραυνική δραστηριότητα η συχνότητα κεραυνοπληξίας είναι 1 κάθε 2-3 χρόνια. Παράλληλα, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία για την εφαρμογή ανάλυσης θωράκισης στους ιστούς ενός πλοίου ενσωματώνοντας την πιθανότητα σύλληψης και τα φαινόμενα γειτνίασης για τον υπολογισμό του κατάλληλου ύψους και της θέσης αλεξικεραυνού. Ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις διαφόρων σημείων και κυματομορφών κεραυνικού πλήγματος στην τρισδιάστατη δομή πλοίου που εμπεριέχει βασικές οδεύσεις της καλωδίωσής του έδειξαν την ανάγκη εσωτερικής αντικεραυνικής προστασίας με χρήση διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων. Οι προκύπτουσες υπερτάσεις διαδίδονται σε μεγάλες αποστάσεις στο εσωτερικό της γάστρας και στην περίπτωση επακόλουθου πλήγματος μπορεί να φτάνουν τα 2kV για εσωτερικά καλώδια και τα 5kV για εξωτερικά καλώδια. Προτείνεται έτσι η περαιτέρω διερεύνηση των απαιτήσεων ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας έναντι υπερτάσεων των σχετικών προτύπων IEC 60945 και IEC 60533 με πιθανή αύξηση των επιπέδων ελέγχου.

**Λέξεις-Κλειδιά:** κεραυνοπληξία πλοίου, αντικεραυνική προστασία, πειράματα κλίμακας, Θεωρία της Ομοιότητας, πιθανότητα σύλληψης, ανάλυση θωράκισης, φαινόμενα γειτνίασης, επαγόμενες υπερτάσεις, ηλεκτρομαγνητική ατρωσία



## Abstract

With the extended electrification of all onboard systems and the use of vital electronic equipment lightning arises as a serious danger for ships. In the present dissertation the physical procedures of the interaction between lightning and the hull of a ship are at first analyzed along with the relative performed research and the requirements of the regulations. Overestimation of the resulting protection zone on a complex ship geometry was concluded by comparing results from impulse voltage experiments on a scaled down ship model to the calculations of lightning protection zone models. Lightning interception probability and proximity effects were highlighted as dominant factors. The needs of an impulse current injection experiment on a scaled down ship model are investigated through measurements on grounding electrodes placed in an electrolytic tank with application of the Similarity Theory and Dimensional Analysis. According to lightning incidence calculations on various ship models, a lightning strike is expected on a ship approximately every two or three years on coastal areas with intense lightning activity. Meanwhile, a thorough procedure was developed for the execution of lightning shielding analysis on the masts of a ship incorporating the statistical nature of lightning. Apart from the external lightning protection system, the need for internal lightning protection with the installation of surge protective devices was outlined through electromagnetic simulations of various lightning strike scenarios on a 3d ship geometry with embedded basic routes of cable harness. The calculated induced overvoltages in the ship electric network might even reach during a subsequent lightning strike 2kV for indoor cables close to openings or 5kV for exposed outdoor cables and they are coupled to distances deep below the deck. Therefore, the further investigation of the immunity requirements for marine equipment according to IEC 60945 and IEC 60533 and their possible reassessment to higher surge immunity levels is proposed.

**Keywords:** Lightning strikes on ships, Lightning protection, Scaled-down experiments, Similarity Theory, interception probability, proximity effects, shielding analysis, lightning induced effects, Electromagnetic immunity.



# Πρόλογος

---

Η παρούσα διδακτορική διατριβή, εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλου και πραγματεύεται τη διερεύνηση της κεραυνοπληξίας πλοίων. Ειδικότερα, η εργασία αποτελείται από τα παρακάτω κεφάλαια:

**Κεφάλαιο 1:** Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μία θεωρητική εισαγωγή στους φυσικούς μηχανισμούς αλληλεπίδρασης του κεραυνού με τη θάλασσα και τη δομή ενός πλοίου. Οι βασικές διεργασίες που ακολουθούν την πρόσπτωση κεραυνού σε πλοία αναλύονται με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες ενός πλοίου και παρατίθενται συστήματα αντικεραυνικής προστασίας που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία, τόσο για πλοία μεταλλικού σκελετού όσο και για μη μεταλλικά πλοία. Επίσης, γίνεται αναφορά σε βασικούς διεθνείς και εθνικούς κανονισμούς για την αντικεραυνική προστασία σε πλοία, περιγράφονται συγκεντρωτικά οι απαιτήσεις ως προς τα δομικά στοιχεία του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας και εντοπίζονται κενά και ασυμφωνίες. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα πρότυπα IEC 60945 και IEC 60533 όπου ορίζονται οι δοκιμές, στις οποίες πρέπει να υποβάλλεται ηλεκτρικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε πλοία, με έμφαση στο ζήτημα της ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας.

**Κεφάλαιο 2:** Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αρχικά μία εισαγωγή στη Θεωρία της Ομοιότητας, τη Διαστατική Ανάλυση και τις επακόλουθες μεθόδους κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου, η οποία συμπληρώνεται από βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων σε υπό κλίμακα μοντέλα. Για τη διερεύνηση των απαιτήσεων σχεδίασης ενός πειράματος σε υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου έγινε εφαρμογή της Διαστατικής Ανάλυσης στον υπολογισμό της μεταβατικής αντίστασης ταινιών γείωσης και πραγματοποιήθηκαν προκαταρκτικές μετρήσεις εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής με έγχυση κρουστικού ρεύματος για διάφορα επίπεδα αγωγιμότητας νερού.

**Κεφάλαιο 3:** Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται πειράματα επιβολής κρουστικής τάσης σε υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου για τη διερεύνηση της σύλληψης του κεραυνού από τις υπάρχουσες κατασκευές του. Μετά την ανάλυση της πειραματικής διάταξης και της διαδικασίας των μετρήσεων, παρατίθενται οι πειραματικές καμπύλες πιθανότητας σύλληψης και συγκρίνονται οι τιμές της μέσης ακτίνας σύλληψης και της μέσης απόστασης πρόσκρουσης με τις αντίστοιχες προβλέψεις εμπειρικών μοντέλων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται προσομοιώσεις του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μέσης απόστασης πρόσκρουσης, εξάγονται συμπεράσματα ως προς την επίδραση των φαινομένων γειτνίασης και μελετάται περαιτέρω η εξάρτηση αυτών από γεωμετρικές παραμέτρους.

**Κεφάλαιο 4:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται υπολογισμοί των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων σε οκτώ μοντέλα πλοίων ως εκτίμηση στο σύνολο της επιφάνειάς τους, αλλά και κατανεμημένα σε επίπεδα ομοειδών δομών. Μελετάται η σχετική επίδραση του μοντέλου σύλληψης και της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος και εντοπίζονται περιοχές εκτεθειμένες σε πλήγματα με εφαρμογή της μεθόδου της κυλιόμενης σφαίρας. Ακολούθως παρατίθενται υπολογισμοί πληγμάτων σε κρίσιμους ιστούς βάσει ενός στατιστικού μοντέλου που ενσωματώνει την πιθανότητα σύλληψης και διερευνάται η

επιλογή του κατάλληλου επιπέδου αναφοράς. Τέλος αναπτύσσεται μία μεθοδολογία ανάλυσης θωράκισης σε ιστούς πλοίου ενσωματώνοντας την πιθανότητα σύλληψης και τα φαινόμενα γειννίασης και παρουσιάζεται η εφαρμογή της στα εξεταζόμενα πλοία.

**Κεφάλαιο 5:** Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται προσομοιώσεις κεραυνοπληξίας στην τρισδιάστατη δομή πλοίου με ενσωματωμένες βασικές οδεύσεις της καλωδίωσης του ηλεκτρικού δικτύου. Περιγράφονται αρχικά οι παράμετροι της προσομοίωσης και τα βασικά στοιχεία των φορτίων και των καλωδίων και υλοποιούνται διαφορετικά σενάρια με μεταβολή της θέσης και της κυματομορφής του πλήγματος. Ακολούθως παρουσιάζονται τα ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη από το βασικό σενάριο πρωτεύοντος θετικού πλήγματος στην κεραία τηλεπικοινωνιών και στη συνέχεια παρατίθενται για κάθε εξεταζόμενο ζυγό/φορτίο του δικτύου οι επαγόμενες υπερτάσεις συγκριτικά για κάθε σενάριο. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων γίνεται με γνώμονα τη διείσδυση των υπερτάσεων στο εσωτερικό του δικτύου και τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του IEC 60533.

**Κεφάλαιο 6:** Στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται μία σύνοψη της συμβολής και των συμπερασμάτων της εργασίας, αναλύεται η πρωτοτυπία της και γίνονται προτάσεις προς μελλοντική επέκτασή της.

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

Τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, για την αποδοχή μου στη θέση της υποψηφίας διδάκτορα, για την αμέριστη συμπαράστασή του, το άριστο κλίμα συνεργασίας και την καθοριστική συμβολή του σε κάθε βήμα της εργασίας, όχι μόνο με τη διασφάλιση όλων των απαιτούμενων μέσων για την εκπόνηση της διατριβής, αλλά και με την αδιάλειπτη καθοδήγησή του.

Τον Καθηγητή κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έχει πρόθυμα παράσχει και για τη συνεχή ενθάρρυνση και υποστήριξή του στο μέχρι τώρα έργο μου.

Τον Καθηγητή κ. Παντελή Ν. Μικρόπουλο για την αποδοχή συμμετοχής του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή, τις προτάσεις του, με τις οποίες έχει συμβάλει ουσιαστικά στη διαμόρφωση και διάρθρωση της εργασίας και για τα εποικοδομητικά του σχόλια με στόχο την άρτια επιστημονική τεκμηρίωση και τη βελτίωση της εργασίας.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ιωάννη Μ. Προυσαλίδη για την άριστη συνεργασία στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος «ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ», το οποίο αποτέλεσε έναυσμα για την ευρύτερη ερευνητική περιοχή της διατριβής, τη συνεχή ανάδειξη και υποστήριξη των αποτελεσμάτων της διατριβής και για τις πολύτιμες συμβουλές του στον τομέα της ναυτικής ηλεκτρολογίας.

Την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα. Ελευθερία Χ. Πυργιώτη πρωτίστως για τη διαρκή παρακολούθηση της πορείας της εργασίας και τη συμβολή της στην πειραματική υλοποίηση με την εμπειρία και τις προτάσεις της, αλλά και για την αποδοχή συμμετοχής στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο, μέλος της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, για τη διαρκή καθοδήγηση και την ακούραστη συνδρομή του σε κάθε πρόβλημα

που ανέκυπτε, χωρίς την οποία θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη η εκπόνηση της εργασίας. Η παροχή της πολύπλευρης εργαστηριακής του εμπειρίας και οι παρατηρήσεις του για τη σωστή στόχευση της εργασίας τον καθιστούν κινητήρια δύναμη και πολύτιμο αρωγό στο έργο μου.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Ι. Τσεκούρα για την παρότρυνσή του στην επιλογή της συγκεκριμένης ερευνητικής περιοχής, την πολύτιμη βοήθειά του ειδικά στο θεωρητικό υπόβαθρο των πειραμάτων κλίμακας και την ακούραστη ηθική και επιστημονική υποστήριξη που μου παρείχε.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Georgia Tech, Atlanta, κ. Σάκη Μελιόπουλο για την ενθάρρυνσή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής και για την παροχή της άδειας του λογισμικού WinIGS.

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω θερμά όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, παλαιότερα και νεότερα, για το εγκάρδιο κλίμα συνεργασίας με το οποίο με συντρόφευσαν στην πορεία της διατριβής μου. Ιδιαίτερως ευχαριστώ τον κ. Χρήστο Κ. Ηλία και τον κ. Αριστείδη Γιάννακα για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την υλοποίηση των πειραματικών διατάξεων, την κα. Νικολέτα Χ. Ηλία, υπεύθυνη του συστήματος ποιότητας του εργαστηρίου, για την εργαστηριακή της βοήθεια και την κα. Χρύσα Α. Σιγάλα για τη γραμματειακή υποστήριξη που μου παρείχε. Τις θερμές μου ευχαριστίες εκφράζω στην Διδάκτορα κα. Βασιλική Κονταργύρη, για την αμείωτη προθυμία και το ενδιαφέρον της να συνδράμει με τον οποιοδήποτε τρόπο στην πρόοδό μου. Επίσης, ευχαριστώ το συνάδελφο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών του Ε.Μ.Π κ. Κωνσταντίνο Μπουρούση για τις συμβουλές και τη συνδρομή του στην οπτική καταγραφή των πειραμάτων κεραυνοπληξίας.

Κλείνοντας, νιώθω την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά και να αναφέρω όλους τους φίλους και συναδέλφους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς και Μηχανικούς Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., οι οποίοι με την εκπόνηση των διπλωματικών τους εργασιών συνέβαλαν σημαντικά στην υλοποίηση της παρούσας διατριβής: Σοφία Ν. Πέππα, Δημήτριος Κ. Αναγνωστόπουλος, Σωτήριος Ν. Βασιλόπουλος, Ιωάννης Κ. Κριμιτζάς, Ανδρέας Χ. Αλεξάνδρου, Δημήτριος Ε. Βατίστας, Μάρκος Φ. Γεωργόπουλος, Αθανάσιος Α. Οικονομόπουλος, Θεοδόσιος Α. Παυλόπουλος, Αικατερίνη Α. Φορούλη, Παναγιώτης Χ. Μαραθοκαμπίτης και Κωνσταντίνος Κ. Τριανταφύλλου.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και συναισθηματική στήριξη που μου έχει προσφέρει και πάνω απ' όλους την αγαπημένη μου μητέρα, η οποία είναι για μένα διαρκής πηγή αγάπης, δύναμης και πίστης...





# Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	i
ABSTRACT .....	iii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	ix
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Εισαγωγή .....	1
1.2. Ιδιαιτερότητες ηλεκτρικού δικτύου πλοίου .....	3
1.3. Εγγύτητα πλήγματος .....	5
1.3.1. Ανακατανομή φορτίων στην ατμόσφαιρα .....	7
1.4. Μηχανισμοί σύζευξης και διάδοσης πλήγματος .....	7
1.5. Επιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος .....	8
1.5.1. Βλάβες στη γάστρα του πλοίου .....	10
1.5.1.1. Ανύψωση δυναμικού λόγω της μέγιστης τιμής του κεραυνού .....	10
1.5.1.1.1. Η επίδραση της αγωγιμότητας του νερού .....	11
1.5.1.1.2. Αντίσταση πλάκας γείωσης (μη μεταλλικά σκάφη) .....	11
1.5.1.1.3. Βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής (μεταλλικά σκάφη) .....	12
1.5.1.2. Διάτρηση λόγω του φορτίου του κεραυνού .....	14
1.5.2. Καταπόνηση και παραμόρφωση αγωγών καθόδου .....	15
1.5.2.1. Υπερθέρμανση .....	15
1.5.2.2. Ηλεκτρομαγνητική δύναμη .....	16
1.5.3. Βλάβες στα ηλεκτρονικά – Επαγόμενες Υπερτάσεις .....	17
1.6. Φυσικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης του κεραυνού με τη θάλασσα .....	18
1.6.1. Ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω κεραυνού .....	18
1.6.2. Διαχωρισμός φορτίων στην επιφάνεια της θάλασσας .....	20
1.6.3. Η συμπεριφορά του νερού ως ηλεκτρόδιο - Αγωγή ρεύματος μέσα στο νερό .....	23
1.7. Ιδιαιτερότητες μη μεταλλικού πλοίου .....	24
1.7.1. Βασικές έννοιες .....	24
1.7.2. Παράπλευρες εκκενώσεις .....	25
1.7.3. Θεωρία για την έναρξη παράπλευρων εκκενώσεων .....	26
1.7.4. Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας σε μη μεταλλικά σκάφη .....	27
1.7.5. Ομοιότητες με σύστημα αντικεραυνικής προστασίας κτηρίων .....	27
1.8. Ιδιαιτερότητες μεταλλικού πλοίου .....	27
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	ix

1.8.1.	Εξωτερική αντικεραυνική προστασία .....	28
1.8.2.	Εξωτερική αντικεραυνική προστασία για σκοπούς ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης.....	29
1.8.2.1.	Θωράκιση από ακτινοβολούμενο πεδίο.....	30
1.8.2.2.	Θωράκιση από αγόμενο πεδίο .....	30
1.9.	Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων.....	31
1.9.1.	Σκάφη μη μεταλλικού σκελετού .....	31
1.9.2.	Σκάφη μεταλλικού σκελετού .....	32
1.9.3.	Πρόσθετα ζητήματα .....	33
1.10.	Το Πρότυπο IEC 60945: 2002 .....	35
1.10.1.	Σκοπός και πεδίο εφαρμογής .....	35
1.10.2.	Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός πλοίου .....	35
1.10.3.	Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας.....	36
1.11.	Το Πρότυπο IEC 60533: 2015 .....	37
1.11.1.	Σκοπός και πεδίο εφαρμογής .....	37
1.11.2.	Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας.....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΚΡΟΥΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ .....</b>		<b>43</b>
2.1	Εισαγωγή .....	43
2.2	Θεωρία Ομοιότητας – Διαστατική Ανάλυση .....	44
2.2.1	Βασικές έννοιες της Θεωρίας της Ομοιότητας .....	44
2.2.2	Νόμοι υπό κλίμακα .....	44
2.2.3	Διαστατική Ανάλυση .....	45
2.2.3.1	Αξιώματα Διαστατικής Ανάλυσης .....	46
2.2.3.2	Το Θεώρημα Π των Vaschy και Buckingham.....	47
2.2.3.3	Η εφαρμογή του Θεωρήματος Π και η κατασκευή του φυσικού μοντέλου .....	48
2.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων υπό κλίμακα .....	49
2.4	Αντίσταση γείωσης υπό κρουστικό ρεύμα .....	50
2.4.1	Υπολογισμός μεταβατικής αντίστασης γείωσης.....	51
2.4.2	Υπολογισμός Π-παραμέτρων για ταινία γείωσης.....	52
2.4.3	Λόγοι κλίμακας για ταινία γείωσης .....	53
2.5	Πειραματική διαδικασία.....	54
2.5.1	Περιγραφή πειραματικής διάταξης – Εξοπλισμός.....	54
2.5.2	Διαδικασία μετρήσεων .....	56

2.5.2.1 Προετοιμασία.....	56
2.5.2.2 Λήψη μετρήσεων .....	58
2.6 Συμπεράσματα .....	62
2.6.1 Παρατηρήσεις - Σχόλια .....	63
2.6.1.1 Λειτουργία γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων .....	63
2.6.2 Προτάσεις.....	65
2.6.3 Απαιτήσεις σχεδίασης ενός ολοκληρωμένου πειράματος υπό κλίμακα .....	66
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΠΟ ΚΛΙΜΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ.....</b>	<b>69</b>
3.1 Εισαγωγή .....	69
3.2 Πειραματική διάταξη .....	69
3.3 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μεταλλικής πλάκας .....	72
3.3.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	72
3.3.2 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης .....	73
3.3.2.1 Μέθοδος επιπέδων τάσεων .....	73
3.3.2.2 Αναγωγή τάσης διάσπασης.....	75
3.4 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μοντέλου πλοίου .....	76
3.4.1 Διαδικασία μετρήσεων .....	76
3.4.2 Κατανομές πιθανότητας σύλληψης.....	78
3.4.3 Εμπειρικά μοντέλα προσδιορισμού της ζώνης προστασίας .....	80
3.4.3.1 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας .....	80
3.4.3.2 Ελλειπτικό μοντέλο εκτίμησης ακτίνας σύλληψης.....	80
3.4.3.3 Στατιστικό μοντέλο.....	81
3.4.3.4 Τροποποιημένο στατιστικό μοντέλο (φαινόμενα γειτνίασης) .....	82
3.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων.....	84
3.4.5 Συμπεράσματα.....	87
3.4.6 Προσομοιώσεις ηλεκτρικού πεδίου.....	88
3.4.7 Διερεύνηση φαινομένων γειτνίασης .....	91
3.4.8 Συζήτηση .....	93
3.4.9 Ενδεικτικά αποτελέσματα.....	94
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΘΩΡΑΚΙΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΕΡΑΥΝΙΚΩΝ ΠΛΗΓΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΛΟΙΑ .....</b>	<b>101</b>
4.1 Εισαγωγή .....	101
4.2 Υπολογισμός κεραυνικών πληγμάτων .....	102
4.2.1 Γενικά-Μέθοδοι υπολογισμού.....	102
4.2.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό WinIGS.....	104

4.2.2.1	Υπολογισμός αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων.....	104
4.2.2.2	Εφαρμογή στατιστικού μοντέλου .....	110
4.2.2.3	Εφαρμογή Μεθόδου Κυλιόμενης Σφαίρας.....	115
4.3	Ανάλυση θωράκισης .....	118
4.3.1	Προτεινόμενη διαδικασία.....	118
4.3.2	Σενάρια εφαρμογής και αποτελέσματα .....	122
4.3.3	Συζήτηση-Συμπεράσματα .....	130
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ-ΕΠΑΓΟΜΕΝΕΣ ΥΠΕΡΤΑΣΕΙΣ.....</b>		<b>133</b>
5.1	Εισαγωγή .....	133
5.2	Παράμετροι προσομοίωσης .....	133
5.2.1	Το λογισμικό.....	133
5.2.2	Ιδιότητες του μοντέλου πλοίου .....	134
5.2.3	Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου.....	137
5.2.3.1	Φορτία και ισολογισμός ισχύος .....	137
5.2.3.2	Σχεδίαση καλωδίωσης .....	139
5.3	Αποτελέσματα .....	143
5.3.1	Βασικά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη: πλήγμα στη θέση Α.....	143
5.3.2	Επαγόμενες υπερτάσεις.....	150
5.3.3	Συμπεράσματα.....	173
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΒΟΛΗ, ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>		<b>179</b>
6.1	Σύνοψη και συμβολή της διατριβής .....	179
6.2	Πρωτοτυπία διατριβής.....	183
6.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	184
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....		187
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ .....		195

# Βιβλιογραφική ανασκόπηση

## 1.1. Εισαγωγή

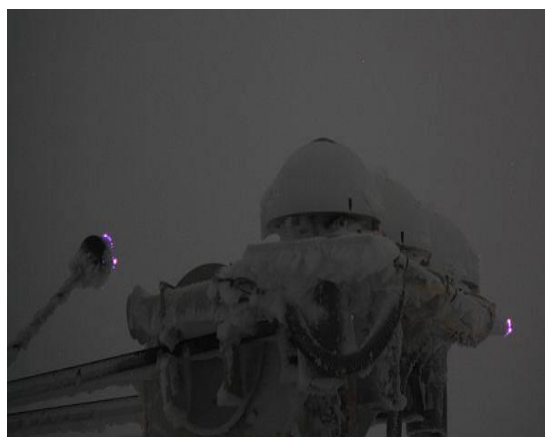
Ο κεραυνός είναι το πλέον αναγνωρίσιμο φυσικό φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με καταστροφές σε εγκαταστάσεις και ηλεκτρικό εξοπλισμό. Εκτεταμένη έρευνα στον τομέα της αντικεραυνικής προστασίας κτηριακών εγκαταστάσεων, γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τηλεπικοινωνιακών γραμμών έχει αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Ωστόσο, δυσανάλογα περιορισμένη έχει υπάρξει η διερεύνηση της αντικεραυνικής προστασίας στον τομέα της ναυτιλίας [1], παρόλο που το φαινόμενο της κεραυνοπληξίας πλοίου είναι γνωστό ήδη από την αρχαιότητα, κατέχοντας μάλιστα ξεχωριστή θέση στη λαϊκή παράδοση.

Συχνά κατά τη διάρκεια έντονης καταιγίδας και τρικυμίας, εμφανίζονται μπλε ή πράσινες φωτεινές λάμπες συνοδευόμενες από χαρακτηριστικό σφύριγμα στα άκρα καταρτιών και γενικά αιχμηρών αντικειμένων πάνω σε πλοία. Οι ναυτικοί ανά τους αιώνες συνέδεαν το φαινόμενο με την παρουσία του προστάτη τους και το θεωρούσαν καλό οιωνό, αφού το ερμήνευαν ως σημάδι ότι καταλαγιάζει η καταιγίδα. Οι αρχαίοι Έλληνες ονόμαζαν αυτές τις μυστηριώδεις φλόγες «ελήνη» που σημαίνει πυρός, εάν εμφανιζόταν κατά μόνας ή «φώτα των Διοσκούρων» εάν εμφανίζονταν ανά δύο, οι οποίοι θεωρούντο προστάτες των ναυτικών. Στις μέρες μας το φαινόμενο είναι ευρύτερα γνωστό ως «Φωτιά του St. Elmo» από τον προστάτη Άγιο των ναυτικών Άγιο Εράσμιο της Φόρμια ή αντίστοιχα Άγιοι Νικόληδες [2].

Όπως γίνεται αντιληπτό, η "Φωτιά του St. Elmo" είναι ουσιαστικά μία περίπτωση του φαινομένου Corona που προκαλείται από τον ιονισμό του αέρα, λόγω των ισχυρών ηλεκτρικών πεδίων που επικρατούν κατά τη διάρκεια των καταιγίδων εν μέσω των ισχυρών εκκενώσεων μεταξύ των νεφών και μπορεί κάλλιστα να αποτελεί προάγγελο κεραυνοπληξίας του πλοίου.



(α)



(β)

**Σχήμα 1.1:** Καταγραφές της «Φωτιάς του St. Elmo» σε μετεωρολογικό σταθμό στο όρος Hoher Sonnblick στην Αυστρία [3]

Καταγραφές κεραυνοπληξίας σε πλοία εντοπίζονται πιο σπάνια στην αρχαία και μεσαιωνική λογοτεχνία. Οι Bernstein και Reynolds [1] παρουσιάζουν μία συλλογή άρθρων που αποτελούν την πρώτη συστηματική προσπάθεια καταγραφής και αντιμετώπισης του ζητήματος, η οποία τοποθετείται στο διάστημα 1761-1850 και αφορά σε πλοία του Βασιλικού Βρετανικού Ναυτικού. Ενδεικτική της αντίληψης που επικρατούσε το 19<sup>ο</sup> αιώνα είναι η δυσκολία του Harris [4] να πείσει τις Βρετανικές αρχές για την αναγκαιότητα της αντικεραυνικής προστασίας, παρόλο που το αλεξικέραυνο του Φραγκλίνου ήταν ήδη γνωστό .

Το 1820 ο Harris πρότεινε αντί μιας αλυσίδας που ριχνόταν στο κατάστρωμα από τη βάση του καταρτιού μέχρι να πέσει στο νερό, μια βελτιωμένη μέθοδο που περιλάμβανε μόνιμη σταθερή σύνδεση αγωγού χαλκού με το κατάρτι και απευθείας όδυσή του προς το νερό μέσα από το σκαρί του πλοίου. Ο κυβερνήτης του θρυλικού «Beagle» με το οποίο ταξίδεψε ο Δαρβίνος το 1830 ήταν από τους πρώτους που εφάρμοσαν αυτή τη μέθοδο και μάλιστα επιτυχώς, καθώς το πλοίο δεν καταστράφηκε, αν και υπέστη πλήγμα τουλάχιστον δύο φορές. Παρόλα αυτά η συνολική υιοθέτηση μέτρων αντικεραυνικής προστασίας για τα πλοία του Βασιλικού Βρετανικού Ναυτικού ήρθε αργότερα, το 1847 [5].

Παρά τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα της ναυτιλίας από τις αρχές του 20ου αιώνα, τις ριζικές αλλαγές στον τρόπο κατασκευής των σκαφών, τις πολλαπλές νέες χρήσεις που εξυπηρετούν τα πλοία πλέον (λ.χ. δεξαμενόπλοια που μεταφέρουν πετρέλαιο) και τον αυξανόμενο εξηλεκτρισμό του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου με την ενσωμάτωση ηλεκτρονικών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, δεν έχει προχωρήσει παράλληλα και η έρευνα στο ζήτημα της αντικεραυνικής προστασίας.

Βασικό εμπόδιο στην ολοκληρωμένη μελέτη της αντικεραυνικής προστασίας και στην εξέλιξή της είναι η έλλειψη συγκεντρωτικών επιστημονικών δεδομένων σχετικά με τη συχνότητα με την οποία τα σκάφη πλήττονται από κεραυνούς και τις συνέπειες των πληγμάτων. Στοιχεία για περιστατικά σε σύγχρονα πολεμικά πλοία που διαθέτουν κρίσιμα οπλικά και τηλεπικοινωνιακά συστήματα όπως είναι κατανοητό, δεν είναι προσβάσιμα για λόγους εμπιστευτικότητας. Ωστόσο τις τελευταίες δεκαετίες αυξάνονται οι καταγραφές περιστατικών σε δεξαμενόπλοια ή πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, όπου η κεραυνοπληξία συνοδεύεται συνήθως και από κάποια έκρηξη [6].

Η κατάσταση είναι καλύτερη όσον αφορά σε ιστιοπλοϊκά και σκάφη αναψυχής, για τα οποία κατά καιρούς είναι πιο εύκολη η συλλογή στοιχείων [1], [7], [8]. Σύμφωνα με την Αμερικανική Μετεωρολογική Υπηρεσία, η πιθανότητα κεραυνοπληξίας ενός ατόμου στην ξηρά είναι σε ετήσια βάση μία στις 700000. Περνώντας όμως στο κατάστρωμα ενός πλοίου, τα στατιστικά στοιχεία αλλάζουν δραματικά: ασφαλιστικές εταιρείες που ειδικεύονται σε προστασία σκαφών αναφέρουν ότι 1.5 στα 1000 σκάφη πλήττονται κάθε χρόνο και ειδικότερα 5 στα 1000 ιστιοπλοϊκά [7]. Κάθε ιστιοφόρο τυπικά δέχεται κάποιο κεραυνικό πλήγμα στη διάρκεια ζωής του με το ρεκόρ να είναι πέντε πλήγματα για ένα μεμονωμένο σκάφος (στη Σαρασότα, Φλόριντα) και τον υψηλότερο ρυθμό επανάληψης 2 πλήγματα μέσα σε 10sec (στον Ινδικό ωκεανό) [9].



(α)



(β)

**Σχήμα 1.2:** Πλήγματα σε ιστιοφόρα που βρίσκονται σε λιμένα, σε κοντινή απόσταση με γειτονικά σκάφη.



(α)



(β)

**Σχήμα 1.3:** (α) Πλήγμα στο ψηλότερο σημείο της γέφυρας κρουαζιερόπλοιου, διακρίνεται η ακαριαία απώλεια ισχύος με τη διακοπή φωτισμού (ο ιστός φωτισμού λειτουργεί, όπως ο εναέριος αγωγός αντικεραυνικής προστασίας στις γραμμές μεταφοράς), (β) Πλήγμα σε υπερκατασκευή πολεμικού πλοίου.

## 1.2. Ιδιαιτερότητες ηλεκτρικού δικτύου πλοίου

Όσον αφορά στο μηχανισμό διάδοσης των πληγμάτων στο περιβάλλον ενός πλοίου, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι διαφορές ανάμεσα στο ηλεκτρικό δίκτυο ενός πλοίου και σε ένα χερσαίο δίκτυο. Το δίκτυο ενός πλοίου είναι πολύ πιο περιορισμένης έκτασης, έχει μεγαλύτερο ρεύμα βραχυκύκλωσης λόγω του ότι η παραγωγή ενέργειας γίνεται πλησιέστερα προς τα τροφοδοτούμενα φορτία και μικρότερη συνολική σύνθετη αντίσταση, επιτρέποντας έτσι πιο εύκολα τη διάδοση των υπερτάσεων. Ιδιαίτερα στο πλαίσιο του πλήρως εξηλεκτρισμένου πλοίου (AES- All Electric Ships) [10], όπου προβλέπεται σύνδεση και τροφοδότηση όλων ανεξαιρέτως των συστημάτων του πλοίου από ένα κοινό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται αντιληπτό ότι η ίδια η δομή και η τοπολογία του δικτύου είναι αυτή που διευκολύνει τη διάδοση των υπερτάσεων.

Η εγκατάσταση του πλοίου αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που πρέπει να χαρακτηρίζεται από αυτάρκεια και αξιοπιστία, προκειμένου να μπορεί το σκάφος να εξυπηρετήσει τους σκοπούς της χρήσης του (εμπορικό, αλιευτικό, αναψυχής, ερευνητικό, πολεμικό κτλ) σε οποιοσδήποτε συνθήκες κι αν βρίσκεται αυτό, με δεδομένο ότι διαρκώς κινείται χωρίς να έχει άμεση πρόσβαση σε εξωτερική βοήθεια, ενώ φέρει περιορισμένα εφόδια και εργαλεία.

Το ηλεκτρικό σύστημα των πλοίων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αυτόνομο, μικρής κλίμακας βιομηχανικού τύπου Σ.Η.Ε, το οποίο όμως παρουσιάζει τις εξής ιδιαιτερότητες σε σχέση με ένα ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα:

- Πρόκειται για συγκεντρωμένα δίκτυα με διακεκριμένα συστήματα παραγωγής και καταναλωτών τοποθετημένα σε πολύ μικρό χώρο ανά μονάδα ισχύος (σε σύγχρονες ναυπηγήσεις με ηλεκτρική πρόωση, η εγκατεστημένη ισχύς φτάνει τα 40-80 MW σε έκταση μερικών τετραγωνικών μέτρων).
- Το όλο σύστημα είναι αυτόνομο και η μόνη εφεδρική πηγή ενέργειας είναι το ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος ανάγκης, το οποίο όμως είναι ικανό να τροφοδοτήσει ορισμένα μόνο φορτία ανάγκης. Για το λόγο αυτό το όλο σύστημα πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστο.
- Σε αντίθεση με τα συστήματα ξηράς, αποτελούνται από υποσυστήματα συνεχούς ρεύματος (DC) και εναλλασσομένου ρεύματος (AC), στο οποίο μάλιστα AC μπορεί κανείς ενίοτε να διακρίνει περισσότερες από μία συχνότητες λειτουργίες (η γνωστή «βιομηχανική συχνότητα» των 50 ή 60Hz, αλλά και αυτή των 400Hz για εξειδικευμένου τύπου καταναλωτές, όπως π.χ. όργανα ναυσιπλοΐας, ραντάρ κ.ο.κ. Στη συντριπτική τους πλειοψηφία βέβαια τα πλοία διαθέτουν δίκτυο διανομής εναλλασσομένου ρεύματος, το οποίο μάλιστα είναι τριφασικό των 440V, 3 αγωγών με μονωμένο τον ουδέτερο. Αυτό σημαίνει ότι ο ουδέτερος του συστήματος των γεννητριών σε συνδεσμολογία αστέρα δεν είναι γειωμένος στη γάστρα του πλοίου. Σε ευρωπαϊκά πλοία η τάση των 380V είναι συνηθέστερη. Τα πλοία με μεγάλα ηλεκτρικά φορτία έχουν γεννήτριες που λειτουργούν σε υψηλές τάσεις των 3.3kV, 6.6kV ακόμη και 11kV. Οι υπεράκτιες κατασκευές παραγωγής πετρελαίου ή αερίου, στις οποίες η εξοικονόμηση σε βάρος από τον εξοπλισμό είναι σημαντική, λειτουργούν με τάση έως και 13.8kV.
- Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω συστήματος διανομής (καλωδιώσεις, μετασχηματιστές, διακόπτες κ.λπ.) πολύ περιορισμένου μήκους (της τάξης των 50 έως το πολύ 1000 μέτρων).
- Το δίκτυο γείωσής του είναι κατά κανόνα αγείωτο (IT), με εξαίρεση τα συστήματα διανομής στις υψηλές τάσεις (άνω του 1kV), τα οποία μπορεί να έχουν τον ουδέτερο γειωμένο, μέσω μιας αντίστασης ή ενός μετασχηματιστή γείωσης υψηλής σύνθετης αντίστασης, στη γάστρα του πλοίου. Η ωμική τιμή αυτής της σύνθετης αντίστασης επιλέγεται έτσι ώστε να περιορίζει το ρεύμα σφάλματος. Ειδικά όσον αφορά στα δεξαμενόπλοια, σύμφωνα με τους κανονισμούς των νηογνομόνων, πρέπει το σύστημα διανομής να είναι αγείωτο. Αυτό έχει σαν στόχο να μειώσει την πιθανότητα να κυκλοφορεί ρεύμα σφάλματος στη γάστρα του πλοίου μέσα σε περιοχές υψηλού κινδύνου, όπου μπορούν να προκληθούν πυρκαγιές λόγω του εύφλεκτου φορτίου.

Ο λόγος που προτιμάται το αγείωτο σύστημα στα πλοία είναι, διότι σε περίπτωση μονοφασικού σφάλματος, επιδιώκεται η αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος σε ζωτικό



εξοπλισμό [11]. Αντίθετα στην ξηρά, προτεραιότητα είναι ο άμεσος εντοπισμός και η απομόνωση του εξοπλισμού όπου συνέβη το σφάλμα, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω ενός γειωμένου συστήματος. Σε ένα γειωμένο σύστημα, μονοφασικό σφάλμα σε γραμμή μεταφοράς είναι ισοδύναμο με βραχυκύκλωμα της γεννήτριας με τη γάστρα του πλοίου. Λόγω του μεγάλου ρεύματος σφάλματος που θα κυκλοφορήσει θα ενεργοποιηθεί η ασφάλεια ή ο αυτόματος διακόπτης και θα απομονωθεί το κύκλωμα του σφάλματος. Ωστόσο, αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει μία επικίνδυνη κατάσταση για τη λειτουργία του πλοίου ειδικά αν επρόκειτο για ουσιώδη εξοπλισμό, π.χ. το μηχανισμό του πηδαλίου. Αντιθέτως σε ένα αγείωτο σύστημα χρειάζονται δύο σφάλματα για τη ροή ρεύματος βραχυκύκλωσης στο δίκτυο και συνεπώς εξασφαλίζεται πιο αποτελεσματικά η αδιάλειπτη παροχή ισχύος σε σύγκριση με το γειωμένο δίκτυο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να διευκρινιστεί η ιδιαιτερότητα του ηλεκτρικού δικτύου ενός πλοίου ως προς την έννοια της γείωσης. Βρισκόμενοι στο υδάτινο περιβάλλον της θάλασσας, εξ ορισμού η λέξη γείωση φαντάζει αδόκιμη, γιατί παραπέμπει νοηματικά σε φυσική σύνδεση με το έδαφος, δηλαδή εν προκειμένω στη σύνδεση του πλοίου με τη γη. Ο μόνος τρόπος που μπορεί να συνδεθεί με πραγματική γείωση το πλοίο, είναι όταν τροφοδοτείται ηλεκτρικά από πηγή που βρίσκεται στην ξηρά και είναι γειωμένη στο έδαφος. Επομένως, εγείρεται το ερώτημα ποια είναι από ηλεκτρικής πλευράς η γη για ένα κύκλωμα που πλέει στο νερό [12].

Ως προς το πλοίο θα οριστεί ως γη το ίδιο το νερό πάνω στο οποίο πλέει το σκάφος και με τον όρο “γείωση” αποδίδεται η επαφή του σκελετού του πλοίου με το νερό. Στις περιπτώσεις που ο σκελετός είναι κατασκευασμένος από μη μεταλλικό (μη αγώγιμο) υλικό, απαιτείται η εγκατάσταση γειωτικής πλάκας κατά μήκος της καρίνας και κάτω από τη στάθμη της θάλασσας έτσι ώστε η πλάκα να βρίσκεται διαρκώς σε επαφή με το νερό. Έτσι είτε ο μεταλλικός σκελετός του πλοίου είτε η πλάκα γείωσης για μη μεταλλικά πλοία καθίσταται το σημείο μηδενικής αναφοράς όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων του πλοίου.

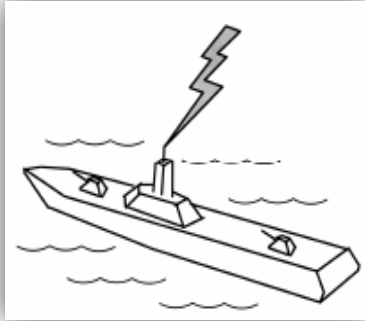
Συγκεντρωτικά, το δίκτυο ενός εξηλεκτρισμένου πλοίου παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το δίκτυο ισχύος ενός παραδοσιακού πλοίου, όπως η μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας, η ηλεκτρική πρόωση, ο μεγάλος αριθμός ηλεκτρονικών συσκευών που εμπλέκονται στη λειτουργία του πλοίου και η ευέλικτη αρχιτεκτονική του που επιτρέπει την προσαρμογή του στις ανάγκες του πλοίου. Αυτά τα στοιχεία επιτείνουν τη μετάδοση και τη σύζευξη των υπερτάσεων στο ηλεκτρικό δίκτυο.

### **1.3. Εγγύτητα πλήγματος**

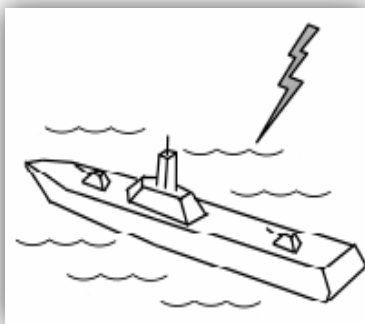
Τα κεραυνικά φαινόμενα που μπορούν να επηρεάσουν το ηλεκτρικό σύστημα ενός πλοίου περιλαμβάνουν άμεσα-απευθείας πλήγματα στο σύστημα ισχύος, κοντινά (έμμεσα) πλήγματα στην περιοχή γύρω από το ηλεκτρικό σύστημα ή την υπό εξέταση κατασκευή και μακρινά πλήγματα που μπορούν να επάγουν υπερτάσεις στο ηλεκτρικό σύστημα. (Σχήμα 1.5) [13].

Οι υπερτάσεις που προέρχονται από ένα απευθείας πλήγμα ασκούν τη μέγιστη καταπόνηση στο ηλεκτρικό σύστημα και τις προστατευτικές του διατάξεις και μπορεί να αποβούν άμεσα καταστροφικές για τον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό, λόγω της άμεσης σύζευξης με το σώμα της κατασκευής ή με εκτεθειμένους ηλεκτρικούς αγωγούς.

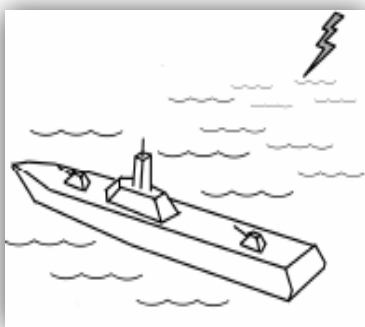
Αυτό το είδος πλήγματος προκαλεί όχι μόνο ηλεκτρικές, αλλά και μηχανικές βλάβες και μπορεί να υποβάλει τη δομή ή/και την καλωδίωση του πλοίου σε έντονη θερμική καταπόνηση [1].



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 1.5:** Εγγύτητα πλήγματος (α) Άμεσο πλήγμα (β) Κοντινό πλήγμα και (γ) Μακρινό πλήγμα [13]

Ένα κοντινό πλήγμα αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό σύστημα και τη δομή ενός πλοίου όχι μόνο μέσω άμεσης ηλεκτρικής σύζευξης, αλλά μέσω μαγνητικής, χωρητικής ή επαγωγικής ζεύξης. Οι επιπτώσεις της άμεσης σύζευξης σε αυτήν την περίπτωση είναι

παρόμοιες με αυτές ενός απευθείας πλήγματος, με τη διαφορά ότι είναι ηπιότερες, λόγω του ότι εμπλέκεται μόνο ένα μέρος του κεραυνικού ρεύματος.

Κατά τη διάρκεια ενός μακρινού πλήγματος ο κίνδυνος εμφάνισης επαγόμενων υπερτάσεων είναι ακόμα μικρότερος, όπως είναι αναμενόμενο και απειλεί κατά κύριο λόγο κυκλώματα που καλύπτουν μεγάλο βρόχο. Ωστόσο, επαναλαμβανόμενα φαινόμενα μπορεί με την πάροδο του χρόνου να προκαλέσουν σωρευτικές βλάβες σε ευαίσθητα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα.

### **1.3.1. Ανακατανομή φορτίων στην ατμόσφαιρα**

Η ανακατανομή φορτίων στην ατμόσφαιρα που οφείλεται στη ραγδαία κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών είναι μία διεργασία παρόμοια με τον κεραυνό - παρόλο που δεν περιλαμβάνει κεραυνικό οχετό γεφύρωσης του νέφους με το πλοίο - καθώς η κίνηση των φορτίων δημιουργεί ηλεκτρομαγνητικά πεδία αντίστοιχα με αυτά ενός κεραυνού μεταξύ των νεφών [13]. Υπό την επίδραση αυτών των πεδίων που είναι ιδιαίτερα έντονα κατά τη διάρκεια καταιγίδων αγωγοί γείωσης, σημάτων, δεδομένων, επικοινωνιών μπορεί να υποστούν υπερτάσεις ή και υπερεντάσεις. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια ή και μετά το πέρας ενός κεραυνικού πλήγματος, αλλά μπορεί κάλλιστα και να μη συνοδεύεται από κεραυνό.

## **1.4. Μηχανισμοί σύζευξης και διάδοσης πλήγματος**

Για τη μελέτη των επιπτώσεων ενός κεραυνού είναι σημαντική η κατανόηση των μηχανισμών σύζευξης και διάδοσης του πλήγματος. Με τον όρο σύζευξη αποδίδεται η μεταφορά ενέργειας από ένα κεραυνικό πλήγμα σε άλλα συστήματα, η οποία οφείλεται στην ύπαρξη αμοιβαίων αντιστάσεων, χωρητικότητων και αυτεπαγωγών μεταξύ των κυκλωμάτων. Οι πρωτεύουσες συνέπειες λόγω άμεσης σύζευξης με το κεραυνικό πλήγμα εντοπίζονται στα εξής σημεία [14]:

- Σε μεταλλικές δομές (διάβρωση και τήξη ή διάτρηση, παραμόρφωση λόγω ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, διάβρωση και παραμόρφωση σε δομικές διεπαφές και σημεία αλλαγής υλικού, υπερθέρμανση, σπινθήρες σε συνδέσμους/αρμούς/αρθρώσεις).
- Σε μη μεταλλικές δομές (διάβρωση, διάτρηση, επιφανειακές εκκενώσεις).
- Σε ηλεκτρικά συστήματα.
- Σε συστήματα καυσίμων, πρόωσης και ηλεκτροκίνησης.

Οι δευτερεύουσες συνέπειες που πλήττουν κυρίως τον ηλεκτρονικό και τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, ο οποίος βρίσκεται συνήθως σε κάποιο περίβλημα ή στο εσωτερικό της γάστρας ή κάποιας υπερκατασκευής του πλοίου και δεν είναι άμεσα εκτεθειμένος στο κεραυνικό πλήγμα, οφείλονται σε φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής τα οποία δρουν με τους παρακάτω τρεις βασικούς μηχανισμούς σύζευξης: ωμική πτώση τάσης, τάσεις λόγω μαγνητικής επαγωγής και χωρητικά ρεύματα.

Η αλληλεπίδραση του προσπίπτοντος εξωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με το εσωτερικό της δομής ενός πλοίου κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος ακολουθεί δύο διαδικασίες σύζευξης [14]:

- Σύζευξη πεδίων λόγω διάχυσης και αναδιανομής μέσα από τη δομή της γάστρας: εκφράζει την αλλοίωση της κυματομορφής της κεραυνικής διέγερσης, λόγω διείσδυσης και διάδοσής της μέσα από το πάχος του υλικού της γάστρας. Ειδικά σε περιπτώσεις μεταλλικών πλοίων, που εν γένει θεωρείται ότι παρέχουν στο εσωτερικό τους ισχυρό βαθμό ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης, τα επαγόμενα φαινόμενα δεν επηρεάζονται αισθητά από αυτή τη μορφή σύζευξης.
- Σύζευξη πεδίων στο εσωτερικό λόγω ανοιγμάτων (πόρτες, παράθυρα στη γέφυρα και σε χώρους ελέγχου, αποσπώμενα καλύμματα εξοπλισμού κ.λπ.): Είναι ο σημαντικότερος παράγοντας δημιουργίας επαγόμενων τάσεων, καθώς εκφράζει τη μοναδική μέθοδο διείσδυσης του προσπίπτοντος πεδίου χωρίς να αλλοιωθεί η μορφή του. Σημαντική είναι η διάκριση ανάμεσα σε μεγάλα και μικρά ανοίγματα, η οποία γίνεται συγκρίνοντας το φυσικό μέγεθος των ανοιγμάτων είτε ως προς το μήκος κύματος του ακτινοβολούμενου πεδίου, είτε ως προς τις συνολικές διαστάσεις της γάστρας.
- Συντονισμός κοιλότητας: Ένας ακόμη παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η πιθανότητα, λόγω εισόδου της κεραυνικής διέγερσης από κάποιο άνοιγμα, να λειτουργήσει ο εσωτερικός χώρος ως κλειστή κοιλότητα σε συντονισμό και να ενεργοποιηθεί μία διαδικασία διαδοχικής ταλάντωσης και ενίσχυσης του πεδίου. Οι συντονισμένες κοιλότητες χαρακτηρίζονται από μικρές απώλειες και μπορούν να διατηρούν στο εσωτερικό τους τη διέγερση για μεγαλύτερο διάστημα από την πραγματική διάρκεια της εξωτερικής πηγής. Η ύπαρξη μεταλλικών δομών ή περιβλημάτων αυξάνει τη συχνότητα συντονισμού, ενώ η επίδραση αγωγών και καλωδίων (που συνήθως υπερισχύει) τη μειώνει.

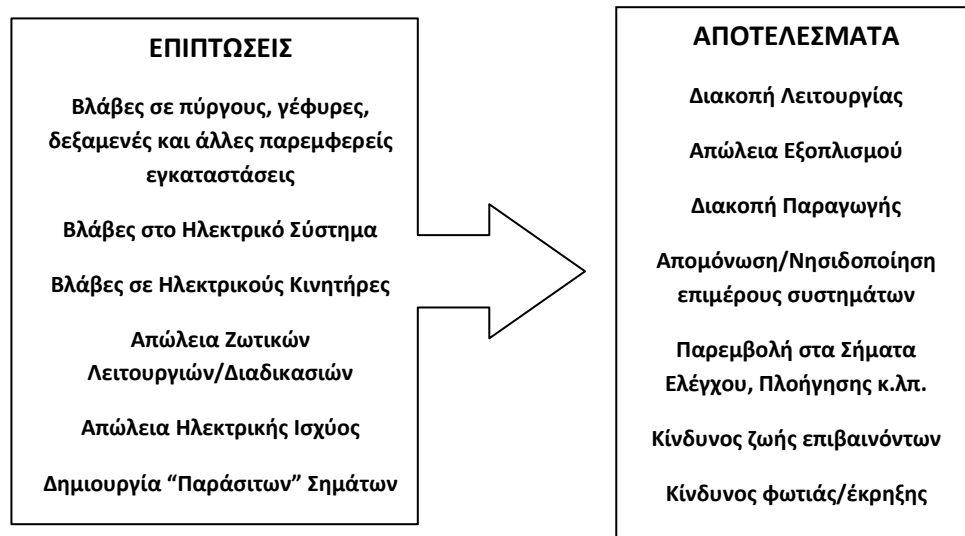
Επιπλέον, δεν πρέπει να θεωρηθεί δεδομένη η εξασθένιση μιας υπέρτασης με την αύξηση της απόστασης. Η διάδοση των υψίσυχνων συνιστωσών μιας υπέρτασης απαιτεί ηλεκτρικά μονοπάτια με χαμηλή σύνθετη αντίσταση σε αυτές τις υψηλές συχνότητες [12]. Το μήκος της καλωδίωσης πρέπει να είναι τέτοιο που να περιλαμβάνει το μέτωπο της κυματομορφής, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η ανάλυση μιας απλής γραμμής μεταφοράς. Οι χαμηλόσυχνες συνιστώσες διαδίδονται σε μεγαλύτερες αποστάσεις και για μεγαλύτερο χρόνο.

## 1.5. Επιπτώσεις κεραυνικού πλήγματος

Σε αντίθεση με τα επίγεια συστήματα ενέργειας, σε ένα πλοίο τα περισσότερα τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου είναι εκτεθειμένα σε κεραυνικά ρεύματα στην περίπτωση ενός άμεσου κεραυνικού πλήγματος λόγω της αναπόφευκτης εγγύτητάς τους προς τις διαδρομές που θα ακολουθήσει το κεραυνικό ρεύμα. Καθώς το κεραυνικό ρεύμα διοχετεύεται από το επίπεδο του καταστρώματος προς το σώμα του νερού, αναπτύσσονται διαφορές δυναμικού μεταξύ των σημείων διέλευσης του κεραυνού και άλλων μεταλλικών σημείων, είτε μονωμένων είτε συνδεδεμένων στη γάστρα, οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες V έως μερικές εκατοντάδες kV [7].

Λαμβάνοντας υπόψη την κατηγορία στην οποία μπορεί να εντάσσεται ένα μεταλλικό πλοίο (επιβατηγό, δεξαμενόπλοιο, πολεμικό πλοίο κ.λπ.) και το είδος του εξοπλισμού που μπορεί να φέρει, οι επιπτώσεις ενός άμεσου κεραυνικού πλήγματος συνοψίζονται σε

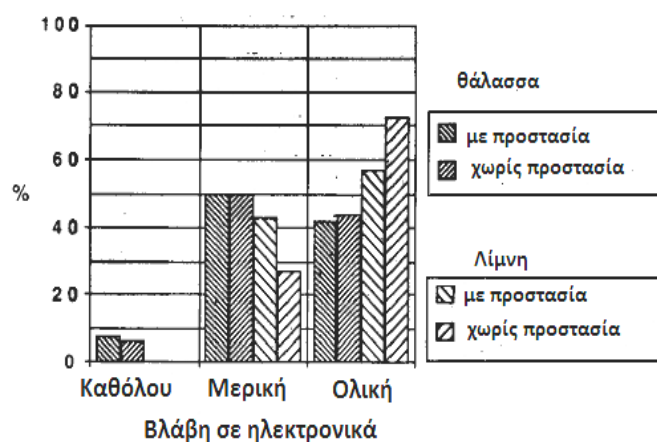
άμεσες βλάβες στο ηλεκτρικό δίκτυο και στις εγκαταστάσεις του εξοπλισμού που οδηγούν σε διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας, σε κίνδυνο φωτιάς ή έκρηξης και σε δημιουργία ηλεκτρικών “παράσιτων”, όπως φαίνεται επιγραμματικά και στο παρακάτω Σχήμα 1.6 [15]:



Σχήμα 1.6: Οι κυριότερες επιπτώσεις ενός άμεσου κεραυνικού πλήγματος σε πλοίο [15]

Μια προσπάθεια συλλογής δεδομένων από επισκευές κεραυνοβολημένων σκαφών στη Φλόριντα των ΗΠΑ δείχνει ότι στο σύνολο των 3000 καταγεγραμμένων σκαφών, περίπου τα 100 έχουν πληγεί από κεραυνούς, ήτοι το 3% [1]. Ενδιαφέρον όμως πέρα από αυτό το ποσοστό, παρουσιάζει η επιμέρους μελέτη των ζημιών και των συνθηκών υπό τις οποίες συνέβησαν τα περιστατικά. Τα σκάφη χωρίς αντικεραυνική προστασία υπέστησαν αισθητά μεγαλύτερες βλάβες. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η έκταση των βλαβών σε περιβάλλον γλυκού νερού είναι μεγαλύτερη από ότι σε περιβάλλον ανοιχτής θάλασσας, διότι η έλλειψη αλάτων δυσχεραίνει τη ροή του ρεύματος στο γλυκό νερό.

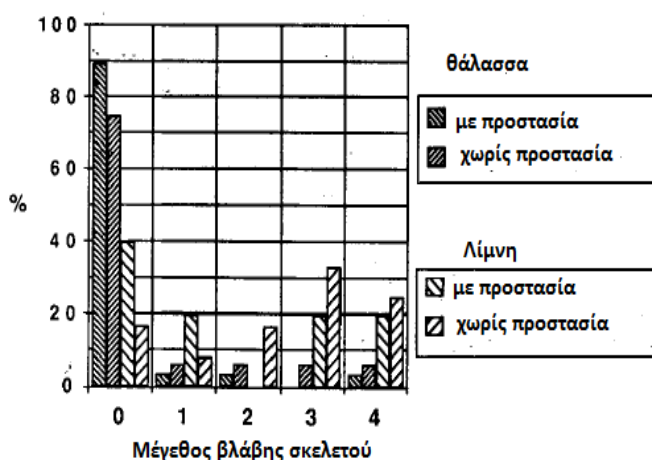
Τα περιστατικά κατηγοριοποιήθηκαν ως προς δύο είδη συνεπειών λόγω κεραυνοπληξίας: βλάβες στο σκελετό του σκάφους και βλάβες στα ηλεκτρονικά συστήματα.



Πίνακας 1. 1: Κατανομή συχνότητας βλαβών στα ηλεκτρονικά συστήματα ως αποτέλεσμα άμεσου κεραυνικού πλήγματος [1]

Συνολικά, παρατηρείται ότι το 96% των μελετηθέντων σκαφών υπέστη τουλάχιστον κάποια βλάβη στα ηλεκτρονικά. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ μεγάλο, όμως παρουσιάζεται μια μικρή διαφορά μεταξύ προστατευμένων (48%) και απροστάτευτων (56%) σκαφών που

υπέστησαν ολική βλάβη στα ηλεκτρονικά τους. Επίσης, ολική βλάβη των ηλεκτρονικών επήλθε στο 64% των περιστατικών σε περιβάλλον γλυκού νερού και αντίστοιχα στο 43% σε περιβάλλον θαλασσινού νερού.



- 0: μη διακριτές φθορές από κάψιμο ή θρυμματισμό
- 1: μικρά ραγίσματα ή καψίματα που δεν προκαλούν διαρροή
- 2: μικρές οπές (περιγράφονται σαν τρύπα από καρφίτσα) διαμέτρου μικρότερης του 1mm που δεν παρουσιάζουν σημαντικό κίνδυνο εισροής
- 3: μεγάλες (αρκετών χιλιοστών) οπές πάνω από την ίσαλο γραμμή
- 4: μεγάλες (αρκετών χιλιοστών) οπές κάτω από την ίσαλο γραμμή

**Πίνακας 1. 2:** Κατανομή συχνότητας βλαβών στο σκελετό του σκάφους με κλίμακα από 0 έως 4 ως αποτέλεσμα άμεσου κεραυνικού πλήγματος [1]

Τα συμπεράσματα για τις βλάβες στο σκελετό του πλοίου είναι πιο ξεκάθαρα δείχνοντας πολύ μεγαλύτερες βλάβες σε γλυκό νερό. Για βλάβες μεγαλύτερες ή ίσες του δείκτη 2, μπορεί να θεωρηθεί ότι το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας αποτυγχάνει. Σε γλυκό νερό το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 56%, ενώ μόνο 11% των σκαφών παρουσίασε τέτοιου μεγέθους βλάβες σε θαλασσινό νερό. Στο γλυκό νερό το 40% των προστατευμένων σκαφών έναντι του 75% των απροστατέυτων σκαφών έπαθε βλάβες με δείκτη μεγαλύτερο ή ίσο του 2.

Από τα συγκεκριμένα στατιστικά στοιχεία που ακόμα και αν δεν είναι αποτέλεσμα μελέτης εκτενούς δείγματος, εξακολουθούν να είναι αντιπροσωπευτικά της κατάστασης προκύπτει μία ποσοτική εικόνα της έκτασης των βλαβών που μπορεί να προκληθούν λόγω κεραυνοπληξίας και της ανάγκης για σωστή κάλυψη του ζητήματος από τους σχετικούς κανονισμούς.

### 1.5.1. Βλάβες στη γάστρα του πλοίου

#### 1.5.1.1. Ανύψωση δυναμικού λόγω της μέγιστης τιμής του κεραυνού

Όπως είναι γνωστό από τις χερσαίες και τις κτηριακές εγκαταστάσεις, η ροή κεραυνικού ρεύματος μέσα από το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας προκαλεί μία πτώση τάσης στην αντίσταση γείωσης  $R_E$ . Συνεπώς η μέγιστη τιμή  $\hat{I}$  του κεραυνικού ρεύματος επιφέρει ανύψωση δυναμικού  $\hat{U}$  στο σύστημα γείωσης (Ground Potential Rise, GPR):

$$\hat{U} = \hat{I} \cdot R_E \quad (1.1)$$

η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για επικίνδυνες τάσεις επαφής (touch voltages) με όλα τα εκτεθειμένα αγωγίμα στοιχεία του συστήματος. Παράλληλα, η διάχυση του κεραυνικού ρεύματος μέσα από τον ομογενή αγωγίμο όγκο του εδάφους δημιουργεί στην

επιφάνεια του εδάφους επικίνδυνες βηματικές τάσεις (step voltages). Όσο πιο αγώγιμο είναι το μέσο διάδοσης, τόσο ομαλότερη είναι η κλίση του δυναμικού και περιορίζονται σε ασφαλή επίπεδα οι βηματικές τάσεις [16].

#### 1.5.1.1.1. Η επίδραση της αγωγιμότητας του νερού

Η αγωγιμότητα της θάλασσας επιδρά πολύ έντονα στην ανύψωση δυναμικού και τις επακόλουθες συνέπειες του κεραυνικού πλήγματος, καθώς μεταβάλλει την ισοδύναμη αντίσταση γείωσης προς το νερό με τρόπο αντίστοιχο με την αγωγιμότητα του εδάφους στα χερσαία συστήματα. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται τιμές ειδικής αντίστασης του θαλασσινού νερού που κυμαίνονται μεταξύ 0.06 – 100Ωm αναλόγως με τη θερμοκρασία, τη χημική σύσταση και τη γεωγραφική περιοχή. Η τιμή 0.06Ωm είναι ένα κάτω όριο που αντιστοιχεί στην ειδική αντίσταση της Great Salt Lake (ΗΠΑ), ενώ για τα νερά των ωκεανών μια τυπική τιμή είναι 0.20Ωm, σε αντίθεση με λίμνες και ποτάμια, όπου συνήθως ισχύει ένα εύρος τιμών 20 – 100Ωm. Το άνω όριο των 200Ωm θεωρείται μια αντιπροσωπευτική τιμή για το πόσιμο νερό [17].

#### 1.5.1.1.2. Αντίσταση πλάκας γείωσης (μη μεταλλικά σκάφη)

Στόχος της μικρής επιφάνειας της πλάκας γείωσης, όπως ορίζεται από τα περισσότερα πρότυπα, είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης, για να μειωθεί η ανύψωση δυναμικού σε τιμή τέτοια που να καθίσταται ακίνδυνη. Μία λογική γεωμετρική προσέγγιση για ένα σκάφος με μία πλάκα γείωσης είναι ένα οριζόντιο κυκλικό ηλεκτρόδιο στην επιφάνεια του νερού. Για αυτήν την προσέγγιση υπολογίζεται αντίσταση [1]:

$$R = \frac{1}{2\sigma D} \quad (1.2)$$

όπου:  $\sigma$  η αγωγιμότητα του νερού [S/m]

$D$  η διάμετρος της πλάκας γείωσης [m]

Με αγωγιμότητα γλυκού νερού  $\sigma = 10^{-3}$ S/m  $D$  και διάμετρο  $D = 34$ cm ο Thomson [1] υπολογίζει αντίσταση 1.45kΩ, που σημαίνει ότι αγνοώντας φαινόμενα μείωσης της αντίστασης γείωσης, η ανύψωση δυναμικού της πλάκας γείωσης πλησιάζει τα 44MV για κεραυνικό ρεύμα 30kA. Θεωρώντας τη ροή του ρεύματος σχεδόν ακτινική και ότι το δυναμικό στο νερό μηδενίζεται σε απόσταση ίση με μερικές ακτίνες της πλάκας γείωσης, δηλαδή σε περισσότερο από 1m αυτή η ανύψωση αντιστοιχεί σε πεδιακή ένταση μεγαλύτερη από την απαιτούμενη της τάξης των 500kV/m για ηλεκτρική διάσπαση.

Χαμηλότερες τιμές αντίστασης μπορούν να επιτευχθούν εφαρμόζοντας διαφορετικές γεωμετρίες στην πλάκα γείωσης. Για παράδειγμα αν η πλάκα γείωσης αποτελείται από μια μακρόστενη λωρίδα μήκους  $L$  και πάχους  $d$ , τοποθετημένη κατά μήκος του κέντρου του πυθμένα του σκάφους, η αντίσταση είναι [1]:

$$R = \frac{\ln(2L/1.36d)}{\pi L \sigma} \quad (1.3)$$

Πιο συγκεκριμένα, για  $L=10$ m και  $d=9.3$ mm (ώστε να προκύπτει εμβαδό που να συμμορφώνεται με τα πρότυπα ABYC και ISO) η αντίσταση είναι 234Ω και το δυναμικό της πλάκας γείωσης για κεραυνικό ρεύμα 30kA παραμένει σε επικίνδυνα υψηλά επίπεδα, στα

7MV. Αντίθετα, θεωρώντας συνθήκες θαλασσινού νερού  $\sigma = 4S/m$ , για το κυκλικό ηλεκτρόδιο η αντίσταση είναι  $0.36\Omega$  με τάση 11kV, ενώ για το ηλεκτρόδιο σε λωρίδα η αντίσταση είναι  $0.06\Omega$  με τάση 1.8kV [1]. 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. Το συμπέρασμα αυτό συμβαδίζει με τα αποτελέσματα των Πινάκων 1.1 και 1.2 και τις πολύ σοβαρότερες βλάβες που υπέστησαν τα σκάφη σε συνθήκες γλυκού νερού.

Έκπληξη, ωστόσο, προκαλεί το γεγονός ότι παρότι σε συνθήκες γλυκού νερού η ανύψωση δυναμικού προκύπτει δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη τάση από αυτήν που απαιτείται για ηλεκτρική διάσπαση, το 60% των σκαφών των Πινάκων 1.1. και 1.2 δεν υπέστησαν διατρήσεις στο σκελετό τους. Από αυτήν τη σκοπιά, ένας παράγοντας μείωσης σύμφωνα με τον Thomson [1] μπορεί να είναι η δυναμική συμπεριφορά της αντίστασης γείωσης που προκύπτει, όταν συντελείται διάσπαση στο νερό, καθώς το ρεύμα ρέει εκτός της πλάκας γείωσης προς το νερό. Η τιμή της είναι μικρότερη από την αντίσταση μόνιμης κατάστασης, καθώς η ενεργός επιφάνεια της πλάκας γείωσης αυξάνεται σημαντικά.

Συνεπώς, λόγω ανύψωσης δυναμικού, πλευρικές εκκενώσεις είναι πολύ πιθανό να αναπτυχθούν μεταξύ της πλάκας γείωσης (ή όποιου υπερθαλάσσιου ηλεκτρικού τμήματος είναι συνδεδεμένο με αυτήν) και του νερού, οι οποίες μπορούν να τρυπήσουν τη μάζα του σκελετού του σκάφους ή ακόμα και να προκαλέσουν τραυματισμούς στους επιβαίνοντες.

#### **1.5.1.1.3. Βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής (μεταλλικά σκάφη)**

Περνώντας στην περίπτωση μεταλλικών πλοίων, επικρατεί η άποψη ότι μειώνεται ο κίνδυνος εμφάνισης τόξων, αλλά και οι τάσεις επαφής σε ανεκτά επίπεδα και ότι εάν όλα τα στοιχεία της εξωτερικής μεταλλικής κατασκευής βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό, τότε μειώνονται εντός ασφαλών ορίων και οι βηματικές τάσεις [15]. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου υπάρχει αλλαγή υλικού, παραδείγματος χάριν σε πλοία όπου υπάρχουν πιθανώς τμήματα από πλαστικό ή fiberglass αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές συμπέρασμα.

Μια σχετική εργασία, αν και όχι με διέγερση κεραυνικό πλήγμα, έχουν παρουσιάσει οι Sulligoi et al. [17], οι οποίοι εξετάζουν την αλληλεπίδραση μεταλλικών πλοίων τροφοδοτούμενων από το σύστημα ΥΤ/ΜΤ του ηπειρωτικού δικτύου με το σύστημα γείωσης του λιμανιού κατά τη διάρκεια μονοφασικού βραχυκυκλώματος στην πλευρά πρωτεύοντος του δικτύου. Οι ερευνητές αντιμετώπισαν το πλοίο ως ένα ιδιόμορφο ηλεκτρόδιο γείωσης που δρα ως προέκταση του συστήματος γείωσης του λιμένα λόγω της εσκεμμένης λειτουργικής σύνδεσης της γάστρας με τη γείωση του λιμένα στο πλαίσιο της ηλεκτρικής τροφοδότησης ή του ανεφοδιασμού καυσίμων (Σχήμα 1.7).

Προσομοιώσεις για διάφορα σενάρια αγωγιμότητας νερού, αγωγιμότητας επίστρωσης, εδάφους γείωσης λιμένα και εγγύτητας με το πλέγμα γείωσης του λιμένα, έδειξαν ότι κατά τη διάρκεια του σφάλματος το δυναμικό της γάστρας λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές (μικρότερες, εάν διαθέτει επίστρωση βαφής). Το αποτέλεσμα είναι επικίνδυνες τάσεις επαφής υπολογισμένες μεταξύ του βυθισμένου τμήματος της γάστρας κάτω από την ίσαλο γραμμή και ενός σημείου 1m μακριά μέσα στη θάλασσα και είναι ενδεικτικές του κινδύνου που διατρέχουν χειριστές, οι οποίοι μπορεί να έρθουν σε επαφή με τη γάστρα είτε κολυμπώντας στη θάλασσα γύρω από το πλοίο είτε βρισκόμενο σε κάποια πλατφόρμα ή αποβάθρα γέφυρας. Μάλιστα οι υπολογιζόμενες τάσεις επαφής υπερβαίνουν κατά πολύ το όριο ασφαλείας των 30V του σχετικού προτύπου ISO/IEC/IEEE

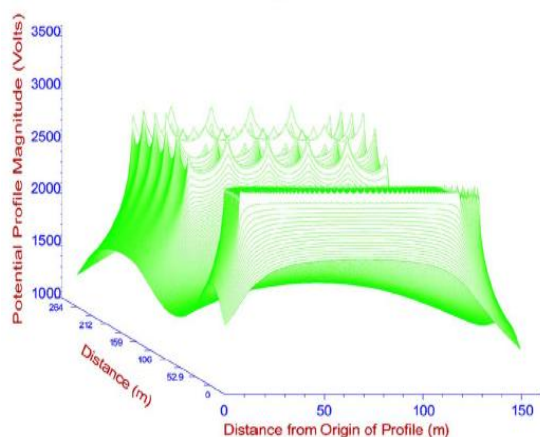


80005-1:2012 [19] για τις βηματικές τάσεις και τις τάσεις επαφής λόγω μονοφασικού βραχυκυκλώματος προς γη στο σύστημα ισχύος λιμένα-πλοίου.

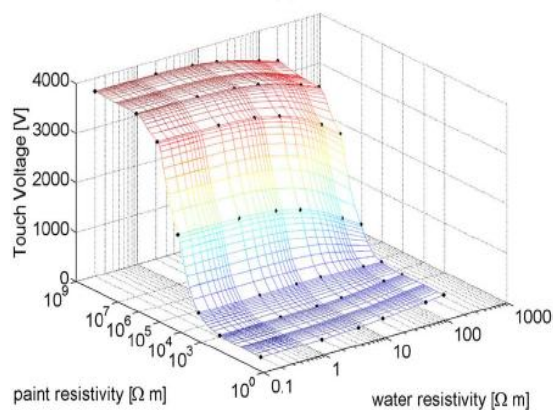
Ένας επιπρόσθετος παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά της μεταλλικής γάστρας ως προς τη διάχυση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η επίστρωση με ειδική αντιδιαβρωτική βαφή, η οποία έχει μονωτική συμπεριφορά. Ορισμένα στοιχεία ως προς την αγωγιμότητα αυτών των υλικών βαφής που συνήθως εφαρμόζονται με τριπλή επίστρωση (στρώμα βάσης, αντιδιαβρωτικό στρώμα κατά της οξείδωσης, προστατευτικό εξωτερικό στρώμα) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3. Εργαστηριακές μετρήσεις σε δείγμα ναυπηγικής λαμαρίνας [17] με επίστρωση υλικού συνολικού πάχους 700 – 1000μm έδειξαν μέση ειδική αντίσταση  $10^9 \Omega m$  και διηλεκτρική αντοχή 1.0-1.5kV. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι η αρχική αγωγιμότητα της επίστρωσης μειώνεται κατά τάξεις μεγέθους σε μεγάλες μεταλλικές δομές οι οποίες βρίσκονται θαμμένες στο έδαφος ή στο νερό, λόγω της ύπαρξης διασκορπισμένων μικρο-ατελειών στο στρώμα της βαφής, αλλά και στην ίδια τη μεταλλική επιφάνεια εφαρμογής. Στην περίπτωση της γάστρας, η γήρανση και η πλήρωση αυτών των ελαττωματικών περιοχών με νερό και η ακανόνιστη ύπαρξη σημείων, όπου έχει φύγει η επίστρωση λόγω γδαρσίματος ή διάσπασης και είναι γυμνό το μέταλλο, μειώνουν την αγωγιμότητα, χωρίς όμως να είναι εύκολος ο προσδιορισμός της τιμής της.

Επίστρωση	Πάχος (mm)	Αντίσταση μόνωσης [ $\Omega m^2$ ] (στο εργαστήριο)	Αντίσταση μόνωσης [ $\Omega m^2$ ] (κατά τη χρήση)
Υαλος βιτουμένιου	2-7	$>10^9$	$10^3$
Ταινία πολυθένιου	2	$>10^{16}$	$10^5$
Εποξειδική ρητίνη	0.4	$>10^{14} \rightarrow 10^{11}$	$10^4$
PVC	1	$>10^{13}$	$10^8$

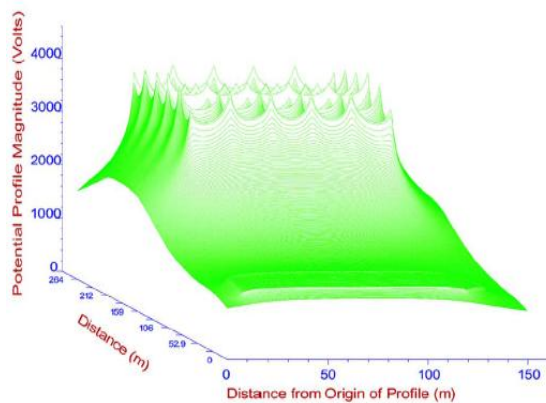
Πίνακας 1.3: Χαρακτηριστικά εμπορικά χρησιμοποιούμενων υλικών επίστρωσης [17]



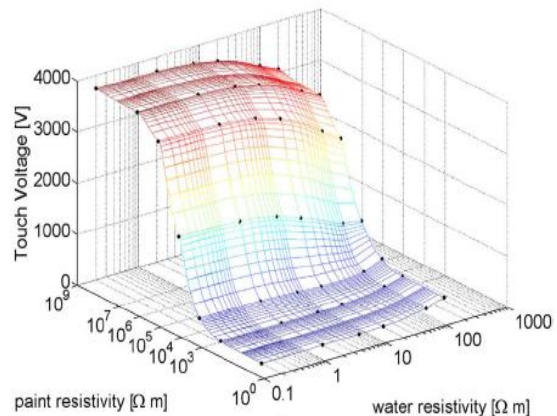
(α)



(γ)



(β)



(δ)

**Σχήμα 1.7:** Σενάριο σφάλματος 10kA, ειδική αντίσταση θάλασσας 100Ωm, απόσταση πλοίου-πλέγματος γείωσης λιμένα 100m **(α)** Ανύψωση δυναμικού του συστήματος για πλοίο χωρίς επίστρωση βαφής **(β)** Ανύψωση δυναμικού του συστήματος για πλοίο με επίστρωση ειδικής αντίστασης  $10^6\Omega\text{m}$  **(γ)** Τάσεις επαφής υπολογισμένες προς την πλευρά του λιμένα **(δ)** Τάσεις επαφής υπολογισμένες προς την πλευρά της θάλασσας [17]

Από το Σχήμα 1.7 (α) και (β) είναι εμφανής η μονωτική συμπεριφορά της βαφής (επίστρωση ειδικής αντίστασης  $10^6\Omega\text{m}$  που αποδίδει καλά διατηρημένη κατάσταση επίστρωσης), καθώς η ανύψωση δυναμικού είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με γάστρα χωρίς επίστρωση. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τη μεγάλη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια της επίστρωσης και την εσωτερική της, δηλαδή τη μεταλλική επιφάνεια, η οποία υπερβαίνει τη διηλεκτρική αντοχή της βαφής, υπάρχουν ενδείξεις ότι κατά τη διάρκεια σφάλματος μπορεί σε πολλαπλά σημεία η επίστρωση να διασπαστεί, επιτρέποντας την επαφή με το μέταλλο της γάστρας. Επίσης, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η μονωτική επίστρωση αυξάνει κατά πολύ τις τάσεις επαφής, όπως προκύπτει από το Σχήμα 1.7 (γ) και (δ).

### 1.5.1.2. Διάτρηση λόγω του φορτίου του κεραυνού

Το φορτίο του κεραυνικού ρεύματος μπορεί να προκαλέσει τήξη σε μεταλλικές επιφάνειες και εν γένει στοιχεία του συστήματος προστασίας που πλήττει απευθείας, ενώ καταπονεί μονωτικά διάκενα και στοιχεία προστασίας (απαγωγείς υπερτάσεων) που περιέχουν σπινθηριστές [16], [20]. Η συσσώρευση του μπορεί να επιφέρει διάτρηση μη αγώγιμων επιφανειών λόγω παράπλευρων εκκενώσεων, βλάβη που απαντάται πολύ συχνά σε σκάφη μη μεταλλικού σκελετού. Πιο δυσχερείς είναι οι συνέπειες του ενδιάμεσου ρεύματος διάρκειας μεταξύ διαδοχικών πληγμάτων, καθώς εκεί η εκκένωση επιμένει περισσότερο [16].

Όταν μία παράπλευρη εκκένωση συμβαίνει σε μια γάστρα από fiberglass, άτομα άνθρακα εκτινάσσονται από τη ρητίνη λόγω της θερμότητας και του μεταφερόμενου φορτίου λεπταίνοντας έτσι το έλασμα. Αυτά τα κατάλοιπα άνθρακα δημιουργούν αγωγίμα ίχνη πάνω στη μέχρι πρότινος μονωτική επιφάνεια του fiberglass. Σε περίπτωση νέας κεραυνοπληξίας αυτά τα κανάλια άνθρακα αποτελούν εύκολη δίοδο για τα ρεύμα οδηγώντας μάλιστα σε υπερθέρμανση λόγω της μεγάλης τους αντίστασης και επακόλουθα σε κίνδυνο διάτρησης της γάστρας, γι' αυτό και θα πρέπει να εντοπίζονται και να αφαιρούνται κατά την επιδιόρθωση ενός σκάφους μετά από κεραυνικό πλήγμα [9].

## 1.5.2. Καταπόνηση και παραμόρφωση αγωγών καθόδου

### 1.5.2.1. Υπερθέρμανση

Ένα κεραυνικό ρεύμα μεγάλου πλάτους, εάν μάλιστα συνοδεύεται από ένα συχνά εμφανιζόμενο ρεύμα διαρκείας (Long Stroke Current), όπως συμβαίνει με τους θετικούς κεραυνούς, μπορεί λόγω της μεγάλης μεταφερόμενης θερμότητας να προκαλέσει διάτρηση μονωτικών επιφανειών ή λεπτών μεταλλικών επιφανειών και συνηθέστερα τήξη των μεταλλικών μερών από τα οποία διέρχεται και δημιουργία καυτών μεταλλικών τηγμάτων. Έτσι αυξάνεται ο κίνδυνος ανάφλεξης ειδικά σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου (εύφλεκτα υλικά, ρύπανση κ.λπ.) [7]. Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του ρεύματος  $\int_0^{\infty} i^2(t)dt$  γνωστό και ως «ειδική ενέργεια» είναι ανάλογο της εκλυόμενης ενέργειας, η οποία προκαλεί θερμικά φαινόμενα (τήξη μετάλλων, έναυση εύφλεκτων ατμών ή αερίων) και μετράται σε  $A^2s$  [21]. Όταν υπολογίζεται η αύξηση της θερμοκρασίας ενός αγωγού, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η διάχυση της θερμότητας θεωρείται αμελητέα, λόγω της μικρής διάρκειας ροής του ρεύματος. Η ενέργεια που εκλύεται σε ένα μέσο με αντίσταση  $R$  όταν διαρρέεται από ρεύμα  $i(t)$  είναι:

$$W = R \int i^2(t)dt \text{ [Joule]} \quad (1.4)$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας του είναι:

$$\Delta\theta = \frac{1}{\alpha} \left[ \exp \frac{(\int i^2(t)dt) \cdot a \cdot \rho}{q^2 \cdot \gamma \cdot C_w} \right] \text{ [K]} \quad (1.5)$$

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

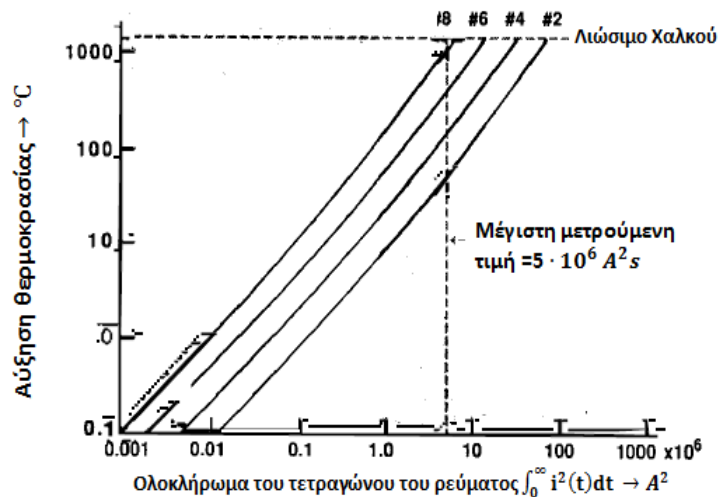
$\rho$  η ειδική αντίσταση αγωγού [ $\Omega m$ ]

$q$  η διατομή του αγωγού [ $m^2$ ]

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

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

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται η αύξηση της θερμοκρασίας αγωγών χαλκού διαφόρων μεγεθών συναρτήσει του ολοκληρώματος ενέργειας ενός κεραυνικού πλήγματος λαμβάνοντας υπόψη το επιδερμικό φαινόμενο. Το μέγιστο ολοκλήρωμα ενέργειας που έχει καταγραφεί είναι  $5 \cdot 10^6 A^2s$  για πλήγμα αρνητικής πολικότητας [1]. Ο Αμερικανικός Κώδικας Αντικεραυνικής Προστασίας στην προηγούμενη έκδοσή του προέβλεπε σύνδεση του καταρτιού με την πλάκα γείωσης μέσω χάλκινου συλλεκτήριου αγωγού καθόδου διατομής τουλάχιστον #8 (8 AWG). Η διάσταση αυτή -σύμφωνα με τις αμερικανικές προδιαγραφές για την ονομασία των καλωδίων- ισοδυναμεί με εμβαδό διατομής  $8.3mm^2$ , πολύ μικρότερο από την αντίστοιχη διατομή των  $29mm^2$  που προβλέπεται από τον Εθνικό Οργανισμό Αντιτυρικής Προστασίας των ΗΠΑ για αγωγούς καθόδου εγκατεστημένους σε κτήρια.



**Σχήμα 1.8:** Μεταβολή θερμοκρασίας χάλκινων αγωγών σε σχέση με το ολοκλήρωμα  $\int_0^{\infty} i^2(t) dt$  [ $A^2 s$ ] [1].

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.8, η μετάδοση ενός τέτοιου ποσού ενέργειας σε έναν αγωγό χαλκού #8 αυξάνει τη θερμοκρασία του σχεδόν μέχρι το σημείο τήξης του ( $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ ), με αποτέλεσμα να εξαντλούνται τα περιθώρια ασφαλείας. Ακόμα και αν δεν επέλθει άμεση τήξη και καταστροφή του αγωγού κατά τη διάρκεια ενός μεμονωμένου πλήγματος, μια τόσο μεγάλη υπερθέρμανση μπορεί να αυξήσει την ηλεκτρική αντίσταση των συνδέσεων αλλοιώνοντας την ηλεκτρική συμπεριφορά τους σε περίπτωση επόμενου πλήγματος. Συνεπώς, για τα θερμικά όρια των αγωγών που απαρτίζουν το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ενός πλοίου θα πρέπει να εφαρμόζεται ένα επιπρόσθετο περιθώριο ασφαλείας λαμβάνοντας υπόψη και τον κίνδυνο τραυματισμού που επιφέρουν πιθανά τήγματα χαλκού. Για τη δυσμενή περίπτωση του πλήγματος των  $5 \cdot 10^6 A^2 s$  ένας αγωγός χαλκού μεγέθους #4 (4 AWG) θερμαίνεται μέχρι τους  $100^\circ\text{C}$ , περίπου δέκα φορές κάτω από το σημείο τήξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Άρα με μια αυθαίρετη επιλογή ενός συντελεστή ασφαλείας 10, όλες οι συνδέσεις θα πρέπει να ισοδυναμούν με αγωγό χαλκού #4 [1].

### 1.5.2.2. Ηλεκτρομαγνητική δύναμη

Η ροή κεραυνικού ρεύματος μέσα από έναν αγωγό προκαλεί ηλεκτρομαγνητική δύναμη  $F$  μεταξύ παράλληλων τμημάτων, η οποία προσεγγιστικά μπορεί να υπολογιστεί ως εξής [16]:

$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} i^2(t) \frac{l}{d} \quad (1.6)$$

όπου:  $i(t)$  το κεραυνικό ρεύμα [A],

$l$  το μήκος του αγωγού [m],

$d$  η απόσταση μεταξύ παράλληλων αγωγών [m],

$\mu_0$  η μαγνητική διαπερατότητα του αέρα [ $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ ].

Ακόμα και στην περίπτωση ενός μεμονωμένου αγωγού, υφίσταται αυτή η ηλεκτρομαγνητική δύναμη ως αποτέλεσμα της μεταφερόμενης ενέργειας, η οποία μπορεί να προκαλέσει κάμψη του αγωγού και σε συνδυασμό με τήξη λόγω υπερθέρμανσης να οδηγήσει μέχρι και σε θραύση του. Η ειδική ενέργεια του σύντομου πλήγματος

χρησιμοποιείται ως μέτρο για τον υπολογισμό της καταπόνησης που προκαλεί μη αναστρέψιμη παραμόρφωση στα δομικά στοιχεία του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας [16].

		Διατομή (mm <sup>2</sup> )	4	10	16	25	50	100
Υλικό	Αλουμίνιο W/R [MJ/Ω]	2.5	-	564	146	52	12	3
		5.6	-	-	454	132	28	7
		10	-	-	-	283	52	12
	Σίδηρος W/R [MJ/Ω]	2.5	-	-	1120	211	37	9
		5.6	-	-	-	913	96	20
		10	-	-	-	-	211	37
	Χαλκός W/R [MJ/Ω]	2.5	-	169	56	22	5	1
		5.6	-	542	143	51	12	3
		10	-	-	309	98	22	5
	Ανοξειδωτος χάλυβας W/R [MJ/Ω]	2.5	-	-	-	940	190	45
		5.6	-	-	-	-	460	100
		10	-	-	-	-	940	190

**Πίνακας 1.4:** Αύξηση θερμοκρασίας ΔΤ [K] για αγωγούς διαφόρων υλικών και διατομών ως συνάρτηση της ειδικής ενέργειας κεραυνικού πλήγματος [16].

### 1.5.3. Βλάβες στα ηλεκτρονικά – Επαγόμενες Υπερτάσεις

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν είναι μόνο η απευθείας ροή κεραυνικού ρεύματος υπεύθυνη για τις βλάβες που επέρχονται, άλλα κυρίως οι υπερτάσεις που επάγονται στα AC ή DC ηλεκτρικά κυκλώματα του σκάφους μέσω μαγνητικής ζεύξης που προκαλείται από κάποιον κοντινό καθοδικό αγωγό που διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα [1]. Σύμφωνα με τη θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, κεραυνικό ρεύμα  $I$  που ρέει ευθύγραμμα και κάθετα στον άξονα  $z$  δημιουργεί ένταση μαγνητικής ροής  $B(\rho)$  σε απόσταση  $\rho$  από αυτόν [1]:

$$\vec{B}(\rho) = \frac{\mu_0 I}{2\pi\rho} \hat{\phi} \quad [Wbm^{-2}] \quad (1.7)$$

άρα η επαγόμενη σε ένα βρόχο επιφάνειας  $S$  ηλεκτρεγερτική δύναμη ( $E$ ) είναι:

$$E = \frac{\mu_0}{2\pi} \iint_S \frac{dI/dt}{\rho} dpdz \quad [V] \quad (1.8)$$

Για τα ιστιοφόρα, η μέγιστη τυπική απόσταση  $\rho$  είναι περίπου 2m που ανταποκρίνεται για παράδειγμα στην καμπίνα πλοήγησης που βρίσκεται σε απόσταση 2m από το κατάρτι. Όντως, καθώς τα περισσότερα ιστιοφόρα έχουν πλάτος περίπου 4m ή λιγότερο, είναι πρακτικά αδύνατο να δρομολογηθούν τα καλώδια σε απόσταση μεγαλύτερη των 2m από το κατάρτι. Για ένα τυπικό πλήγμα με κλίση μετώπου  $dI/dt = 100 \text{ kA}/\mu\text{s}$  [9] η επαγόμενη υπέρταση είναι περίπου  $10\text{kV}/\text{m}^2$  σε αντιστοιχία με το εμβαδό της περικλειόμενης επιφάνειας.

Ενδεικτικό μέγεθος της μέγιστης δυνατής επαγόμενης τάσης σε ανοικτούς ή κλειστούς βρόχους που βρίσκονται κοντά σε αγωγό που διαρρέεται από κεραυνικό ρεύμα είναι η λεγόμενη επαγόμενη τάση «τετραγωνικού παλμού» [16]. Για τον υπολογισμό της

χρησιμοποιείται η κλίση μετώπου του ρεύματος, η οποία θεωρείται ότι είναι σταθερή και ενεργός σε όλο το μέτωπο της κυματομορφής ως εξής:

$$U = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1.9)$$

όπου:  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  η κλίση μετώπου [ $kA/\mu s$ ]

$M$  η αμοιβαία επαγωγή του βρόχου [H]

Χειρότερη περίπτωση όσον αφορά στην επαγόμενη υπέρταση είναι η κυματομορφή ενός δευτερεύοντος πλήγματος, καθώς έχει μεγαλύτερη κλίση μετώπου. Εφόσον οι κατασκευαστές ηλεκτρονικών για ναυτιλιακές εφαρμογές δεν είναι υποχρεωμένοι να εγκαθιστούν προστασία από μεταβατικές υπερτάσεις, ενώ ταυτόχρονα μια υπέρταση μερικών Volt είναι ικανή να βλάψει τα ευαίσθητα ολοκληρωμένα κυκλώματα ενός συστήματος διανομής 12V, τότε δεν προκαλεί έκπληξη το μέγεθος και η έκταση των βλαβών στα ηλεκτρονικά συστήματα του σκάφους. Μια μερική λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η σύνδεση ενός απαγωγέα υπερτάσεων (SPD) κατά μήκος της εισόδου 12V για κάθε μέρος του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, καθώς και η χρήση συνεστραμμένου ζεύγους καλωδίων σε όλη την καλωδίωση του σκάφους. Πάντως ακόμα κι έτσι δεν αποτρέπεται η επαγωγή υπέρτασης της τάξης των 100V λόγω μαγνητικής ζεύξης σε τυπωμένες πλακέτες κυκλωμάτων που έχουν εμβαδό τάξης των 100cm<sup>2</sup> [8].

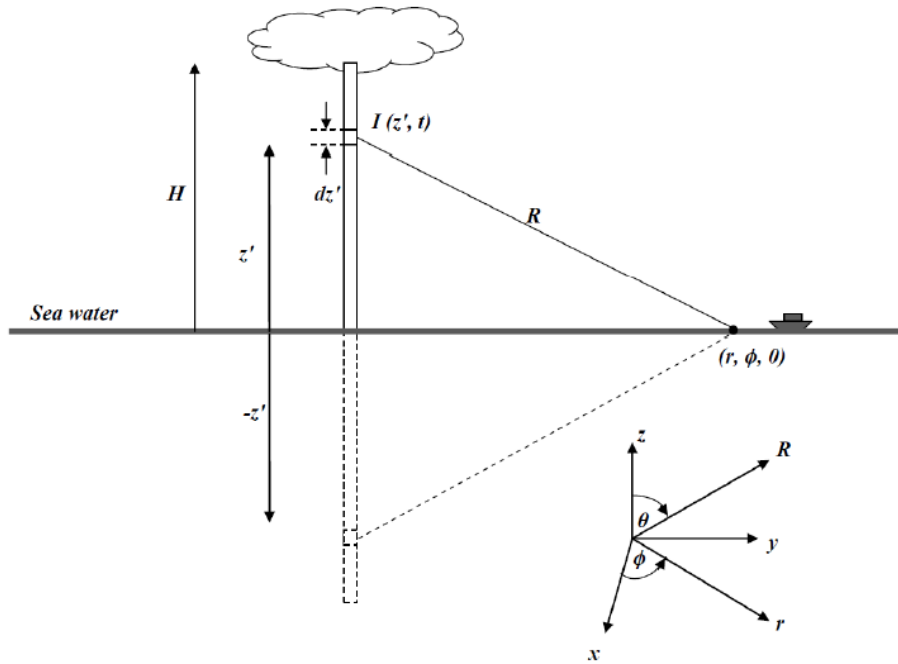
## 1.6. Φυσικοί μηχανισμοί αλληλεπίδρασης του κεραυνού με τη θάλασσα

### 1.6.1. Ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω κεραυνού

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο επίπεδο του εδάφους λόγω ενός κεραυνού δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις σε κυλινδρικές συντεταγμένες, θεωρώντας ότι το κεραυνικό πλήγμα αναπαρίσταται με ένα κατακόρυφο κεραυνικό κανάλι ύψους  $H$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9 και με την παραδοχή ότι η επιφάνεια του εδάφους μεταξύ του σημείου παρατήρησης και του σημείου πτώσης του κεραυνού είναι επίπεδη και τέλεια αγωγίμη [22].

$$E(r, \varphi, 0, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[ \int_h^H \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau dz' + \int_h^H \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', -R/c) dz' - \int_h^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] a_z \quad (1.11)$$

$$B(r, \varphi, 0, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \int_h^H \frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) dz' - \int_h^H \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] a_\varphi \quad (1.12)$$



**Σχήμα 1.9:** Γεωμετρικές παράμετροι που υπεισέρχονται στις εξισώσεις υπολογισμού του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο του εδάφους επί τέλεια αγωγίμης επιφάνειας (κατά προσέγγιση το επίπεδο της θάλασσας) [22]

Οι Gomes και Ab Kadir διερευνώντας την επίδραση της αγωγιμότητας του εδάφους στην τιμή του ηλεκτρικού πεδίου κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος, διατυπώνουν στην [22] τη μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από μία αρνητική κεραυνική εκκένωση έχοντας διανύσει μια απόσταση  $D$  πάνω από έδαφος πεπερασμένης αγωγιμότητας  $\sigma$  με την Εξίσωση (1.12):

$$E_{\sigma} = \left( 0.24 \left\{ \exp \left[ \frac{-D/\sigma}{10^7} \right] + \exp \left[ \frac{-D/\sigma}{50 \times 10^7} \right] \right\} + 0.52 \right) E_{\infty} \quad (1.12)$$

όπου ο λόγος  $D/\sigma$  μετράται σε  $m^2/S$ . Οι όροι  $E_{\sigma}$  και  $E_{\infty}$  αντιπροσωπεύουν το ηλεκτρικό πεδίο στην ίδια απόσταση, αλλά για πεπερασμένη και άπειρη αγωγιμότητα αντίστοιχα. Η εξίσωση αυτή ισχύει για ένα εύρος τιμών του  $D$  από 5km έως 300km.

Σύμφωνα με την Εξίσωση (1.12), σε απόσταση 5km από το σημείο πρόσπτωσης του κεραυνού ο λόγος μεταξύ του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από ξηρό έδαφος αγωγιμότητας 0.0001S/m ( $E_L$ ) με το αντίστοιχο πάνω από τη θάλασσα με αγωγιμότητα 4.8S/m ( $E_S$ ) είναι περίπου 0.75 (75%).

Οι χρονικές παράγωγοι των πεδίων  $dE/dt$  και  $dB/dt$  είναι καθοριστικά μεγέθη για την εμφάνιση φαινομένων ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής πάνω σε αγωγίμα αντικείμενα που βρίσκονται στο μονοπάτι διάδοσης των πεδίων. Η επιλεκτική εξασθένιση στις υψηλές συχνότητες λόγω της πεπερασμένης αγωγιμότητας του εδάφους επηρεάζει σημαντικά τα πλάτη αυτών των χρονικών παραγώγων των πεδίων. Η μέγιστη χρονική παράγωγος του ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση  $D$  από το σημείο πρόσπτωσης πρωτεύοντος αρνητικού πλήγματος πάνω από επιφάνεια πεπερασμένης αγωγιμότητας  $(dE/dt)_{\sigma}$  συνδέεται με την αντίστοιχη χρονική παράγωγο για απόλυτα αγωγίμη επιφάνεια  $(dE/dt)_{\infty}$  μέσω της εμπειρικής σχέσης:

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\sigma} = 22.7 \left(\frac{D}{\sigma}\right)^{-0.31} \left(\frac{dE}{dt}\right)_{\infty} \quad (1.13)$$

Από την εξίσωση (1.13) προκύπτει ότι για διάδοση πάνω από έδαφος αγωγιμότητας 0.0001S/m η παράγωγος  $(dE/dt)_{\sigma}$  σε απόσταση 5km από το πλήγμα είναι μικρότερη του 10% της αντίστοιχης παραγωγού  $(dE/dt)_{\infty}$ . Αύξηση της αγωγιμότητας κατά μία τάξη μεγέθους (0.001S/m) επιφέρει και αύξηση της παραγωγού  $(dE/dt)_{\sigma}$ , η οποία ωστόσο παραμένει κάτω από το 20% της  $(dE/dt)_{\infty}$ . Παράλληλα από υπολογισμούς τους για τη χρονική παράγωγο του μαγνητικού πεδίου, είναι φανερό ότι η μετάβαση από την άπειρη αγωγιμότητα σε μια πεπερασμένη τιμή προκαλεί μια διαπλάτυνση της παραγωγού  $dB/dt$ , ενώ βέβαια όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η πεπερασμένη αγωγιμότητα, τόσο μεγαλύτερο είναι και το πλάτος της.

Η παραπάνω ανάλυση αποδεικνύει ότι ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμη θάλασσα υποβάλλεται σε περίπτωση κοντινού κεραυνικού πλήγματος σε ένα πολύ πιο ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον σε σύγκριση με ένα σύστημα που βρίσκεται σε χερσαίο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η επιφάνεια της θάλασσας, η οποία έχει αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη αγωγιμότητα σε σχέση με το έδαφος και δεν παρουσιάζει τοπογραφικές ανωμαλίες, προσεγγίζει τη συμπεριφορά της απόλυτα αγωγίμης επιφάνειας, επιτρέποντας έτσι τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις χωρίς απόσβεση του πλάτους τους, ενώ είναι σχεδόν αμελητέα η διαταραχή των υψίσυχων συνιστωσών τους. Συστήματα πλοήγησης σε ραδιοθόλους (radomes) από ηλεκτρομαγνητικά “διαφανές” υλικό και ανοιχτά συστήματα ραντάρ μεγάλων πλοίων με εξολοκλήρου μεταλλική γάστρα είναι εκτεθειμένα σε υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία ανεξαρτήτως της θωράκισης που παρέχεται σε άλλα μέρη των συστημάτων αυτών [22].

### 1.6.2. Διαχωρισμός φορτίων στην επιφάνεια της θάλασσας

Υπάρχουν πολύ λίγα στοιχεία δημοσιευμένα στη βιβλιογραφία σχετικά με την καθαυτό περιγραφή της σύνδεσης ενός κεραυνικού καναλιού με την επιφάνεια του νερού, τα οποία να προέρχονται από πραγματικά κεραυνικά πλήγματα, παρόλο που υπάρχουν αναφορές σε περιστατικά πτώσης κεραυνού σε υδάτινο περιβάλλον, όπως οι αναφορές του Berger για κεραυνούς στη λίμνη του Lugano και οι έρευνες των Arnold et al. [23] με τη συνδρομή του Αμερικάνικου Ναυτικού, με τις οποίες έγινε σύνδεση υποβρύχιων ηχητικών παλμών που ανιχνεύτηκαν στον Κόλπο του Μεξικού με κεραυνικά πλήγματα στην επιφάνεια της θάλασσας [23].

Ένα πρώτο ερώτημα που εγείρεται σχετικά με την αλληλεπίδραση κεραυνού και επιφάνειας της θάλασσας είναι, εάν το θαλασσινό νερό περιέχει επαρκή πυκνότητα ιόντων, ώστε να δημιουργηθεί το απαιτούμενο επαγόμενο φορτίο, προκειμένου να εξουδετερωθεί το φορτίο του κατερχόμενου οχετού.

Μια πεδιακή ένταση  $E$  στη βάση ενός καταγιδοφόρου νέφους εξουδετερώνεται από μία μέση πυκνότητα ιόντων  $\epsilon_0 E/4\pi$  στην επιφάνεια της θάλασσας [23]. Θεωρώντας ότι το πεδίο κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας είναι τάξης μεγέθους 180kV/m, αυτή η πυκνότητα κατιόντων αντιστοιχεί σε  $10^{13}$  ιόντα ανά  $m^2$  ή ισοδύναμα μόνο ένα  $Na^+$  ανά  $10^6$  μόρια  $H_2O$  σε ένα επιφανειακό στρώμα πάχους ενός μοριακού μεγέθους [23]. Αυτή η τόσο μικρή συγκέντρωση κατιόντων είναι στην πράξη εφικτή. Καθώς ο κατερχόμενος οχετός πλησιάζει τη θάλασσα, η επιφανειακή πεδιακή ένταση υπερβαίνει κατά πολύ την τιμή των 180kV/m



φτάνοντας μέχρι μια κρίσιμη ένταση διάσπασης 500kV/m, ενώ η έναυση της κύριας εκκένωσης γίνεται, όταν ο κατερχόμενος οχετός συναντήσει έναν μικρό ανερχόμενο οχετό μήκους περίπου 50m. Σε αυτή τη φάση της εκκένωσης αντιθέτου φοράς τα κατιόντα αναμένεται να συγκεντρωθούν στη βάση του ανερχόμενου οχετού με πυκνότητα πολύ μεγαλύτερη από  $10^{13} \text{m}^{-2}$ .

Το επόμενο ερώτημα που προκύπτει είναι εάν, δεδομένης της πεπερασμένης αγωγιμότητας του θαλασσινού νερού, η σταθερά χρόνου για τη συγκέντρωση αυτών των ιόντων είναι επαρκώς μικρή, ώστε να επιτρέπει την εξουδετέρωση των ηλεκτρονίων του κατερχόμενου καναλιού. Σύμφωνα με την ανάλυση του Hill [23] η αντίσταση  $Z$  ενός δίσκου στην επιφάνεια της θάλασσας με εξωτερική ακτίνα  $R$  και εσωτερική ακτίνα  $r$  (βάση κεραυνικού καναλιού) είναι:

$$Z = \frac{\ln(R/r)}{2\pi s \kappa} \quad (1.14)$$

όπου:  $\kappa$  η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού (S/m) και  
 $S$  (m) το πάχος του στρώματος

Υποθέτοντας ότι το πάχος του στρώματος αγωγιμότητας ισούται με το λεγόμενο πάχος διάχυσης που για το νερό είναι περίπου 0,5mm και εξετάζοντας την εκκένωση αντιθέτου φοράς, κατά την οποία ο ανερχόμενος οχετός φτάνει σε ύψος  $D = 50\text{m}$ , η χωρητικότητα μεταξύ νέφους και θάλασσας είναι:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 D}{\ln(D/r)} \quad (1.15)$$

Θέτοντας για λόγους απλότητας  $R = D$  και με  $\kappa = 5\text{S/m}$  η σταθερά χρόνου είναι:

$$\tau = ZC = 0,18\mu\text{s} \quad (1.16)$$

Αυτή η σταθερά χρόνου είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με τους χρόνους προόδου των οχετών. Κατά τη διάρκεια της κύριας εκκένωσης (οχετός επιστροφής) το μήκος του καναλιού που φέρει αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια της θάλασσας αυξάνει με ένα λόγο κλίμακας τάξης μεγέθους 10 ή και μεγαλύτερο. Για την αρχική έναυση του μετώπου του οχετού επιστροφής, η οποία μπορεί να διαρκέσει μέχρι 3μs το μήκος  $D$  του καναλιού μπορεί να έχει φτάσει τα 500m, ωστόσο η σταθερά χρόνου δε θα έχει ξεπεράσει το 1μs. Μετά το μέγιστο του οχετού επιστροφής το ρεύμα με το οποίο πρέπει να τροφοδοτηθεί η βάση του κεραυνικού καναλιού σταδιακά μειώνεται. Φαίνεται λοιπόν ότι η σταθερά χρόνου  $ZC$  είναι αρκετά μικρή [23], ώστε τα κατιόντα να μπορούν να εξουδετερώσουν τα ηλεκτρόνια του οχετού επιστροφής που φτάνουν στη βάση του κεραυνικού καναλιού.

Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Moore, Aulich και Rison προσπαθώντας να ερμηνεύσουν την ακτινική μορφή επιφανειακών «δενδριτών» «κατά τη διάρκεια μιας κεραυνικής εκκένωσης [24]. Εφαρμόζοντας μία απλοποιημένη προσέγγιση θεώρησαν ότι ο κεραυνός αντιστοιχεί σε ένα συγκεντρωμένο αρνητικό φορτίο  $Q$  πάνω από την επίπεδη επιφάνεια ενός στόχου με αγωγιμότητα  $\lambda$  στον όγκο του. Εφαρμόζοντας το Νόμο του Ohm για την εύρεση του ρυθμού με τον οποίο επάγονται θετικά φορτία στην επιφάνεια του νερού εξέφρασαν την επαγόμενη πυκνότητα φορτίου στην επιφάνεια του νερού τη χρονική στιγμή  $t$  μετά την έναρξη του διαχωρισμού φορτίων [24]:

$$\sigma(t) = \epsilon_0 E_0 (1 - e^{-\tau/t}) \quad (1.17)$$

όπου  $\tau$  η σταθερά χρόνου προκειμένου η πυκνότητα φορτίου να υπολείπεται της τελικής τιμής κατά  $1/e$ , δηλαδή να φτάσει περίπου στο 63,2% της τελικής τιμής. Η σταθερά χρόνου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\lambda} \quad (1.18)$$

Υιοθετώντας τις παρακάτω τιμές:  $\varepsilon_r = 81$  για τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του νερού και  $\lambda = 10^{-4} \text{S/m}$  για την αγωγιμότητα του νερού της βρύσης προκύπτει ότι ο απαιτούμενος χρόνος, για να δημιουργηθεί το 63,2% του στρώματος φορτίων μέσω διαδικασιών ιοντικής αγωγής κάτω από την επιφάνεια του νερού είναι της τάξης των 7μs μετά την έναρξη εφαρμογής του πεδίου, ενώ το 95% περίπου του επαγόμενου φορτίου θα έχει δημιουργηθεί μετά την πάροδο  $3\tau$ , περίπου σε 21μs. Ως αποτέλεσμα, κατά τη στιγμή έναρξης της ηλεκτρικής εκκένωσης έχει ήδη δημιουργηθεί στην επιφάνεια του νερού φορτίο ίσο με αυτό που φέρει ο κατερχόμενος οχετός, αλλά αντίθετης πολικότητας.

Η κατακόρυφη συνιστώσα του πεδίου που δημιουργείται στην επιφάνεια του νερού από το φορτίο  $Q$  ενός κατερχόμενου κεραυνικού οχετού δίνεται από τη σχέση [24]:

$$E_{vertical} = \frac{2Q}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{h}{(h^2+x^2)^{3/2}} \quad (1.19)$$

όπου:  $h$  το ύψος όπου βρίσκεται ο οχετός ως προς την επιφάνεια του νερού

$x$  η οριζόντια απόσταση από το σημείο ακριβώς κάτω από το σημειακό φορτίο  $Q$

Το επαγόμενο στην επιφάνεια του νερού φορτίο  $q$  που περικλείεται σε δίσκο ακτίνας  $R$  είναι:

$$q = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \int_0^R \left[ \frac{2\pi\varepsilon_0 h x dx}{(h^2+x^2)^{3/2}} \right] \quad (1.20)$$

Το συμπέρασμα που προκύπτει από αυτή την προσεγγιστική ανάλυση είναι ότι ο κατερχόμενος κεραυνικός οχετός επάγει στην επιφάνεια του νερού φορτίο, το οποίο είναι συγκεντρωμένο σε μία δισκοειδή περιοχή [24]. Επομένως η εκκένωση που προκαλείται από τον κατερχόμενο οχετό διαδίδεται πιο εύκολα, όπου το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρότερο, δηλαδή στην κατεύθυνση των επαγόμενων φορτίων. Έτσι εξηγείται η ακτινική κατεύθυνση ανάπτυξης των επιφανειακών εκκενώσεων που μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος προς την επιφάνεια του νερού.

Από τις παραπάνω αναλύσεις γίνεται σαφές ότι η επιφάνεια του νερού ουσιαστικά “θωρακίζει” το ηλεκτρικό πεδίο που ευθύνεται για την ανάπτυξη του κεραυνικού καναλιού στον αέρα από τον όγκο του νερού. Προκειμένου να μπορέσει να μεταφερθεί στο νερό ακόμα και 1% της ενέργειας που φέρει ένας κεραυνός στον αέρα, απαιτείται διείσδυση του κεραυνικού καναλιού τουλάχιστον 50m στον όγκο του νερού. Ωστόσο δεν αναμένεται ένα ρεύμα ηλεκτρονίων να κινηθεί εντός του νερού και να μπορεί να διαδοθεί σε τέτοια απόσταση. Καθώς το δυναμικό του κατερχόμενου οχετού πλησιάζει τα επίπεδα ηλεκτρικής διάσπασης του αέρα το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί με τέτοιο ρυθμό τη μετακίνηση φορτίων προς την επιφάνεια του νερού που πλέον δεν υπάρχει επαρκές ηλεκτρικό πεδίο και επαγόμενα φορτία στο εσωτερικό του νερού, που θα διευκολύνουν τη διάδοση της εκκένωσης.

### 1.6.3. Η συμπεριφορά του νερού ως ηλεκτρόδιο - Αγωγή ρεύματος μέσα στο νερό

Οι προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες δίνουν μια απλουστευμένη μακροσκοπική και στην ουσία ηλεκτροστατική ερμηνεία για την αλληλεπίδραση του κατερχόμενου κεραυνικού οχetőυ με την επιφάνεια του νερού. Για την περαιτέρω κατανόηση της γενικότερης διαδικασίας διάδοσης της εκκένωσης στον όγκο του νερού, αλλά και ειδικότερα του μηχανισμού ανάπτυξης των παράπλευρων εκκενώσεων, ο οποίος θα αναλυθεί σε επόμενες ενότητες, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η φύση του νερού ως υγρού διηλεκτρικού, καθώς και οι ιδιαιτερότητες του φαινομένου της ηλεκτρικής διάσπασης στο εσωτερικό του.

Τα υγρά παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή από τα αέρια, καθώς έχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα από αυτά (περίπου  $10^3$  φορές μεγαλύτερη). Το νερό συγκεκριμένα παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, διότι εμφανίζει διηλεκτρική σταθερά 30-40 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη των περισσότερων μονωτικών υλικών και πολύ μικρό χρόνο αποκατάστασης. Μια επιπρόσθετη ιδιαιτερότητα είναι το γεγονός ότι η ηλεκτρική διάσπαση ενός υγρού διηλεκτρικού περιλαμβάνει δύο στάδια: 1) την έναυση του νηματίου από το ένα ηλεκτρόδιο και 2) την πρόοδο του νηματίου στον όγκο του υγρού μέχρι τη σύνδεση με το απέναντι ηλεκτρόδιο.

Η αγωγιμότητα είναι ένας καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τη διάδοση μιας ηλεκτρικής εκκένωσης μέσα από τον όγκο του νερού. Όπως φαίνεται και από τις τιμές του Πίνακα 1.5 η πυκνότητα των φορέων ρεύματος στο νερό είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με τα μέταλλα. Όσο μικρότερη αγωγιμότητα έχει το νερό, τόσο πιο έντονη είναι η ανάπτυξη της ηλεκτρικής εκκένωσης ακτινικά στην επιφάνειά του, με τη μέγιστη ανάπτυξη να παρατηρείται στο απιονισμένο νερό.

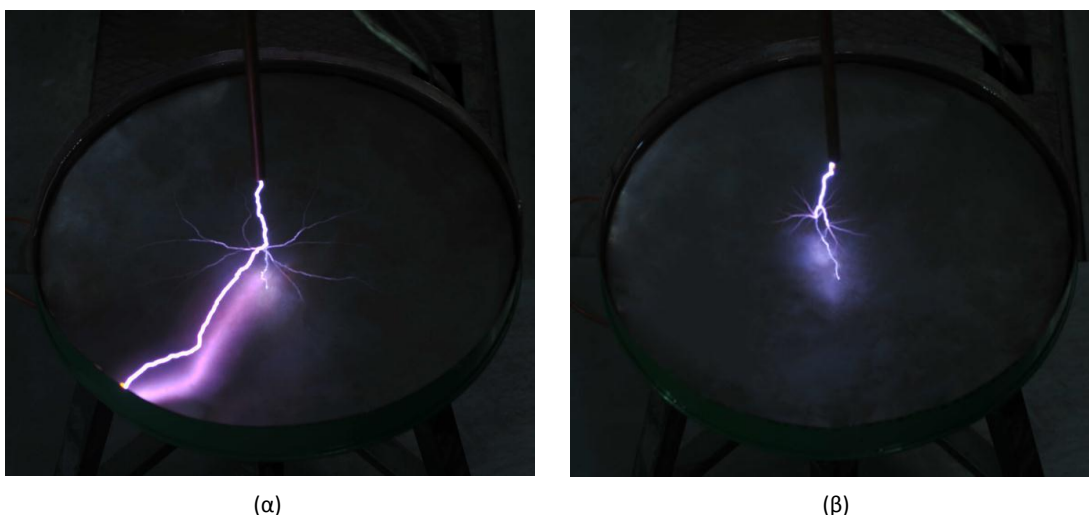
	$\rho$ ( $\Omega m$ )	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$
<b>Αέρας</b>	$1.3 \cdot 10^{16} - 3.3 \cdot 10^{16}$	$3 \cdot 10^{-15} - 8 \cdot 10^{-15}$	1.00054
<b>Νερό βρύσης</b>	$2 \cdot 10^1 - 2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-2}$	80.4
<b>Απιονισμένο νερό</b>	$1.8 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-6} - 5.5 \cdot 10^{-6}$	76.7 - 78.2
<b>Μέταλλα</b>	$10^{-8}$	$10^8$	-

**Πίνακας 1.5:** Ειδική αντίσταση, αγωγιμότητα και διηλεκτρική σταθερά για αέρα, νερό βρύσης, απιονισμένο νερό και μέταλλα στους 20°C [25].

Το απιονισμένο νερό λόγω της μεγάλης διηλεκτρικής του σταθεράς και της σχεδόν μηδενικής του αγωγιμότητας δρα ως μονωτικό. Διακρίνονται δύο στάδια της ηλεκτρικής εκκένωσης: γίνεται πρώτα διάσπαση του αέρα μεταξύ της ράβδου και του νερού και στη συνέχεια ο σπινθήρας έρπει στην επιφάνεια του απιονισμένου νερού οδεύοντας προς τα μεταλλικά τοιχώματα του δοχείου νερού. Το νερό βρύσης -και σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό το νερό της θάλασσας- είναι αγώγιμο. Συνεπώς, μετά τη διάσπαση του αέρα μεταξύ ράβδου και νερού το ρεύμα δεν ακολουθεί τη διεπιφάνεια αέρα-νερού, αλλά εισέρχεται στον όγκο του νερού και διαχέεται μέσω αυτού στη γη (Σχήμα 1.10).

Όπως είναι αναμενόμενο, για ένα δεδομένο διάκενο αέρα όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του νερού, τόσο μικρότερη είναι όχι μόνο η τάση διάσπασης, αλλά και ο χρόνος διάσπασης, εφόσον ο σπινθήρας σε αυτή την περίπτωση πρέπει να γεφυρώσει μικρότερη απόσταση. Πρόσφατα, σε πειράματα που διεξήχθησαν στο ΑΠΘ για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς διακένων αέρα με υγρά στο ρόλο του ενός ηλεκτροδίου υπό

την επίδραση κρουστικής τάσης θετικής πολικότητας  $1.2/50\mu\text{s}$  οι στιγμιαίοι χρόνοι διάσπασης που προέκυψαν για διάκενο αέρα  $5\text{cm}$  κυμαίνονται από  $3.9$  έως  $5.7\mu\text{s}$  για το απιονισμένο νερό, ενώ το νερό βρύσης έδωσε χρόνους διάσπασης στην περιοχή  $1.4\text{-}2.5\mu\text{s}$ . Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη το μέγιστο καταγεγραμμένο χρόνο διάσπασης και την αντίστοιχη διαδρομή του ηλεκτρικού σπινθήρα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η ταχύτητα με την οποία ο σπινθήρας έρπει στην επιφάνεια του νερού είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα με την οποία οδεύει στον αέρα ( $3.45\text{cm}/\mu\text{s}$  στην επιφάνεια του νερού έναντι  $1.32\text{cm}/\mu\text{s}$  στον αέρα) [25].



**Σχήμα 1.10:** Διάσπαση διακένου αέρα **(α)** με απιονισμένο νερό και **(β)** με νερό βρύσης [25].

## 1.7. Ιδιαιτερότητες μη μεταλλικού πλοίου

### 1.7.1. Βασικές έννοιες

Οι βασικές διεργασίες που ακολουθούν την πτώση κεραυνού σε ένα πλοίο μη μεταλλικού σκελετού είναι οι εξής:

- Σύνδεση κεραυνού-αλεξικεραύνου
- Συσσώρευση φορτίων και ροή ρεύματος στο πλοίο
- Διάχυση φορτίου στο νερό
- Δημιουργία παράπλευρων εκκενώσεων από και ανάμεσα σε εξαρτήματα του πλοίου

Πέρα από τις συνήθεις άμεσες επιπτώσεις ενός κεραυνικού πλήγματος, όπως η διάτρηση της γάστρας, η θερμική καταπόνηση και οι επαγόμενες υπερτάσεις, ένα φαινόμενο που απαντάται σε πλοία κατασκευασμένο από μη αγώγιμο υλικό και το οποίο συντελεί σε ακόμα πιο καταστροφικές συνέπειες είναι οι παράπλευρες εκκενώσεις.

Ως παράπλευρη εκκένωση κατά τη διάρκεια κεραυνικού πλήγματος ορίζεται κάθε εκφόρτιση μέσα από ένα κανάλι σπινθήρων που εμπλέκει κάθε άλλη πηγή (όπως αγωγούς πάνω στο πλοίο, δεξαμενές νερού, μεταλλικά εξαρτήματα, μέλη του πληρώματος κ.λπ.) εκτός από τα ίδια τα αλεξικέραυνα και τους αγωγούς του συστήματος γείωσης. Μάλιστα διακρίνονται δύο τύποι παράπλευρων εκκενώσεων: αυτές που σχηματίζονται στο

εσωτερικό του πλοίου μεταξύ αγωγών του και αυτές που σχηματίζονται στο εξωτερικό του πλοίου μεταξύ αγωγών του και της επιφάνειας του νερού.

Ο Ewen Thomson έχει ασχοληθεί επί σειρά ετών με την αντικεραυνική προστασία πλοίων εστιάζοντας κυρίως σε πλοία μη μεταλλικού σκελετού και στον κίνδυνο των παράπλευρων εκκενώσεων και έχει αναπτύξει ένα σύνολο προτάσεων για τη δημιουργία συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας που μεταξύ άλλων θα αποτρέπουν και την ανάπτυξη παράπλευρων εκκενώσεων [26].

Σύμφωνα με τον Thomson στην περίπτωση κεραυνοπληξίας ενός σκάφους, με τον όρο γείωση θα πρέπει να αποδίδεται κάθε μέσο που διευκολύνει τη ροή του κεραυνικού ρεύματος στο νερό και όχι απαραίτητα η απευθείας σύνδεση ενός αγωγού με το νερό, πόσο μάλλον η θεώρηση ότι το δυναμικό αυτού του τερματικού είναι το ιδανικό μηδέν. Αυτός είναι και ο λόγος που διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια γείωσης σε δύο κατηγορίες:

- Βυθισμένα ηλεκτρόδια γείωσης που οδηγούν το ρεύμα απευθείας στο νερό
- Ηλεκτρόδια «σπινθήρα» τα οποία τοποθετούνται στην ίσαλο γραμμή του σκάφους με σκοπό να προκαλέσουν την ηλεκτρική σύνδεση του κεραυνού με το νερό, δημιουργώντας σπινθήρα στην επιφάνεια του νερού [18], [26]

### 1.7.2. Παράπλευρες εκκενώσεις

Η αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού πεδίου κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος με τη δομή και τα εξαρτήματα ενός πλοίου είναι η αφετηρία για την έναυση των παράπλευρων εκκενώσεων. Οποιοσδήποτε αγωγός που δεν ανήκει στο σύστημα προστασίας βρεθεί σε κοντινή απόσταση με αγωγό προστασίας, αναλόγως με το μέγεθος και τη γεωμετρία του είναι δυνατό να μεταβάλει τη μορφή των ισοδυναμικών γραμμών, να τις συμπιέσει και να προκαλέσει τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο λαμβάνοντας υπόψη ότι οι παράπλευρες εκκενώσεις είναι πιο πιθανό να ξεκινήσουν από σημεία, όπου είναι ήδη πιο πυκνή η διάταξη των δυναμικών γραμμών [26]. Επίσης, γίνεται εμφανές ότι το πρόβλημα των παράπλευρων εκκενώσεων είναι πολύ έντονο στο γλυκό νερό λόγω της μικρότερης αγωγιμότητάς του και του πιο έντονου ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται στην επιφάνειά του.

Όλες οι εναλλακτικές μέθοδοι για τη μείωση του κινδύνου των παράπλευρων εκκενώσεων που προτείνει ο Thomson στηρίζονται στη λογική της εξίσωσης δυναμικού. Περιλαμβάνουν χρήση διασυνδετικών αγωγών για την ισοδυναμική σύνδεση όλων των στοιχείων του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, αλλά και των επικίνδυνων μεταλλικών εξαρτημάτων μεταξύ τους με τρόπο, ώστε να σχηματίζονται βρόχοι, για περιπτώσεις μικρών φορητών οργάνων τη θωράκιση με χρήση κλωβού Faraday (η τεχνική αυτή δεν ενδείκνυται κοντά στο νερό λόγω του αυξημένου κινδύνου έναρξης παράπλευρων εκκενώσεων από τις κάτω γωνίες του κλωβού), τη χρήση ενός αγωγού που θα διατρέχει περιμετρικά το σκάφος κάτω από το επίπεδο του καταστρώματος, κοντά στην ίσαλο γραμμή με όλες τις απαραίτητες συνδέσεις να τερματίζουν σε αυτό τον αγωγό και την προσθήκη μιας μακριάς ταινίας γείωσης βυθισμένης στο νερό κάτω από το υπό προστασία αντικείμενο ή εάν αυτό δεν είναι πρακτικά υλοποιήσιμο, τη χρήση σημειακών ηλεκτροδίων έγχυσης του ρεύματος περιμετρικά του αντικειμένου, ώστε να μειωθούν οι διαφορές δυναμικού στις περιοχές των γωνιών του [8], [26].

### 1.7.3. Θεωρία για την έναρξη παράπλευρων εκκενώσεων

Ο Thomson διατυπώνει μια προσεγγιστική ηλεκτροστατική μεθοδολογία, για να ποσοτικοποιήσει την έναυση των παράπλευρων εκκενώσεων στηριζόμενος στην υπόθεση ότι οι διαστάσεις που εμπλέκονται στο πρόβλημα είναι κατά πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος, ώστε το ηλεκτρικό πεδίο να μπορεί πρακτικά να θεωρηθεί ημι-στατικό και σε κάθε σημείο του χώρου ανάλογο με την τάση [26]. Βέβαια, μία παραδοχή ημι-στατικής ανάλυσης δεν μπορεί να ισχύει για ένα σήμα με ευρύ φασματικό περιεχόμενο, το οποίο μπορεί να φτάσει μέχρι και δεκάδες MHz, όπως ο κεραυνός. Ως αφετηρία χρησιμοποιεί ένα απλό μοντέλο, όπου κεραυνικό ρεύμα  $i(t)$  ρέει μέσα από ένα σύστημα αντικεραυνικής προστασίας αποτελούμενο από μία πλάκα γείωσης βυθισμένη στο νερό και ένα αγώγιμο εξάρτημα συνδεδεμένο με το σύστημα γείωσης.

Θεωρώντας ότι η ηλεκτρική διάσπαση συμβαίνει όταν η μέγιστη αναπτυσσόμενη πεδιακή ένταση στο αγώγιμο εξάρτημα υπερβεί τη διηλεκτρική αντοχή του αέρα  $E_{max}$ , διατυπώνει ένα γεωμετρικό συντελεστή, υπό μορφή μίας ενεργού διάστασης  $d_{eff}$  ως εξής [25]:

$$d_{eff} = (E_{max}/V)^{-1} \quad (1.22)$$

Όπου  $V$  η μέγιστη ανύψωση δυναμικού της πλάκας γείωσης

Είναι φανερό η έντονη εξάρτηση της ενεργού διάστασης  $d_{eff}$  από τη γεωμετρία του αγωγού. Θεωρώντας -για την πλειοψηφία των κεραυνικών πλήγμάτων, τα οποία έχουν χρονικές κλίμακες μεγαλύτερες από το χρόνο χαλάρωσης του νερού (βλ. τη σταθερά χρόνου της Εξίσωσης 1.18), με εξαίρεση το χρόνο ανόδου ενός δευτερεύοντος πλήγματος- ότι η συμπεριφορά του κυκλώματος είναι κατά κύριο λόγο ωμική με γραμμική και σε φάση σχέση μεταξύ τάσης και ρεύματος, η αντίσταση γείωσης  $R_g$  μπορεί να υπολογιστεί για διάφορες γεωμετρίες ηλεκτροδίου και με εφαρμογή της σχέσης:

$$v(t) = R_g i(t) \quad (1.23)$$

για τις τιμές κορυφής τυποποιημένων μορφών κεραυνικού πλήγματος και εν συνεχεία με αντικατάσταση στη σχέση (1.22) να υπολογιστεί η ενεργός διάσταση. Ο Thomson αναγνωρίζει ότι με αυτή τη μέθοδο υπολογισμού οι εκτιμήσεις για την αντίσταση γείωσης και την ανύψωση δυναμικού δεν είναι ακριβείς, διότι αγνοούνται η ροή του κεραυνικού ρεύματος στην επιφάνεια του νερού και τα φαινόμενα διάδοσης στον όγκο του νερού, αλλά και διότι είναι αμφισβητήσιμη η ηλεκτροστατική προσέγγιση στο εσωτερικό του νερού, όπου τα μήκη κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι πολύ μικρότερα σε σύγκριση με τον αέρα.

Ωστόσο τονίζει τη χρήση της ενεργού διάστασης  $d_{eff}$  ως μία ένδειξη κατά πόσο ένας αγωγός-εξάρτημα μπορεί να προκαλέσει πλευρική εκκένωση, δεδομένου ότι η ενεργός διάσταση  $d_{eff}$  μπορεί να θεωρηθεί η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας ενός κατακόρυφου εξαρτήματος μακριά από την ίσαλο γραμμή. Στην περίπτωση ενός πλοίου σε γλυκό νερό, ακόμα και η πλέον αποτελεσματική ταινία γείωσης μπορεί να επιτρέψει την έναυση πλευρικών εκκενώσεων από οποιοδήποτε αγώγιμο εξάρτημα. Τα εξαρτήματα που βρίσκονται μακριά από το ηλεκτρόδιο του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, αλλά κοντά στην ίσαλο γραμμή και με τη μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας είναι τα πιο επικίνδυνα να προκαλέσουν πλευρικές εκκενώσεις.

#### **1.7.4. Σύστημα αντικεραυνικής προστασίας σε μη μεταλλικά σκάφη**

Συμπερασματικά, ο κίνδυνος παράπλευρων εκκενώσεων επιβάλλει μια στοχευμένη σχεδίαση του όλου συστήματος προστασίας εφαρμόζοντας τα παρακάτω μέτρα [8], [18], [26]:

- Τοποθέτηση των αγωγών προστασίας κοντά στην εξωτερική πλευρά της γάστρας του πλοίου.
- Εκτεταμένη σύνδεση μεταλλικών εξαρτημάτων με το σύστημα προστασίας.
- Τοποθέτηση αγωγών προστασίας γύρω από αγωγίμα εξαρτήματα σε ευάλωτες περιοχές.
- Βελτιστοποίηση της διάταξης των αγωγών προστασίας κοντά στην ίσαλο γραμμή ή στο νερό, ώστε να μεγιστοποιηθεί η ενεργός επιφάνεια επαφής με το νερό ειδικά κατά την κορυφή του κεραυνικού ρεύματος και να διευκολυνθεί η έγχυσή του στο νερό.
- Χρήση υπαρχόντων βυθισμένων μεταλλικών εξαρτημάτων σαν επιφάνειες γείωσης. Εξάιρεση στο σημείο αυτό αποτελούν οι μηχανές του σκάφους, καθώς ακόμα και με την ύπαρξη κάποιων αγωγών σύνδεσης, μπορεί το σύστημά τους να υποστεί άμεση ζημιά. Εάν οι προπέλες είναι τμήμα του δικτύου ισοδυναμικής ζεύξης, αποτελούν με τη μεγάλη τους επιφάνεια και τις γωνίες τους αξιόπιστο μονοπάτι διοχέτευσης του κεραυνικού ρεύματος, με συνέπεια να υπερφορτίζουν και να καταπονούν τους κινητήρες. Εγκέφαλοι μηχανών τοποθετημένοι σε γειωμένα περιβλήματα είναι προστατευμένοι, αλλά δε συμβαίνει το ίδιο με τους αισθητήρες των κινητήρων, οι οποίοι είναι εκτεθειμένοι στη ροή του κεραυνικού ρεύματος [8].

#### **1.7.5. Ομοιότητες με σύστημα αντικεραυνικής προστασίας κτηρίων**

Η δομή αυτού του συστήματος συμβαδίζει με τις βασικές απαιτήσεις της ανανεωμένης έκδοσης του Προτύπου για την Αντικεραυνική Προστασία Σκαφών (NFPA780-2008) της Αμερικανικής Ένωσης Πυροπροστασίας (NFPA) και βασίζεται στην απαίτηση το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ενός πλοίου να παρομοιάζει με σύστημα αντικεραυνικής προστασίας κτηρίου [18].

Πρώτη ομοιότητα με τα κτηριακά συστήματα αντικεραυνικής προστασίας είναι η αντικατάσταση του μεμονωμένου αλεξικεραύνου με πολλαπλά τερματικά, η θέση των οποίων μπορεί να καθοριστεί με μεθόδους, όπως η κυλιόμενη σφαίρα. Εν συνεχεία, ο μοναδικός αγωγός καθόδου αντικαθίσταται από ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων αγωγών που μοιάζουν με το αντίστοιχο πλέγμα των κτηριακών αγωγών καθόδου και τη σχετική μέθοδο προστασίας του κλωβού [18]. Παράλληλα, ο αγωγός βρόχου περιμετρικά του σκάφους λειτουργεί όπως ο ισοδυναμικός ζυγός. Τέλος, η κατάληξη των αγωγών καθόδου θα πρέπει να είναι σε πολλαπλά ηλεκτρόδια «γείωσης» για την ομαλή διάχυση του κεραυνικού ρεύματος στο νερό, όπως συμβαίνει και με τους αγωγούς καθόδου στην εγκατάσταση ενός κτηρίου που καταλήγουν σε ηλεκτρόδια γείωσης τοποθετημένα στο έδαφος [18].

### **1.8. Ιδιαιτερότητες μεταλλικού πλοίου**

Η συνήθης αντίληψη που επικρατεί αναφορικά με ένα πλοίο μεταλλικής κατασκευής είναι ότι δε διατρέχει κανένα κίνδυνο από κεραυνικό πλήγμα, διότι η μεταλλική μάζα της

γάστρας λειτουργώντας ως μία μεγάλη αγώγιμη ισοδυναμική επιφάνεια θα οδηγήσει στην ακαριαία ομοιόμορφη διοχέτευση του ρεύματος στο νερό χωρίς ανεπιθύμητες συνέπειες. Στη λογική αυτή θα μπορούσε να διατυπωθεί η άποψη ότι οι εκτεταμένες εξωτερικές μεταλλικές κατασκευές ενός πλοίου είναι εξαρχής “αυτοπροστατευόμενες” από τον κεραυνό κι έτσι δεν είναι απαραίτητη περαιτέρω διερεύνηση για την αντικεραυνική προστασία ενός μεταλλικού πλοίου [15].

Υπάρχουν ωστόσο ορισμένα ζητήματα που απαιτούν διερεύνηση, όπως για παράδειγμα, το κατά πόσον εξασφαλίζεται ότι είναι προστατευμένο το τμήμα της εγκατάστασης που βρίσκεται έξω από τη ζώνη προστασίας αυτού του φυσικού αντικεραυνικού τερματικού, όπως αυτή διαμορφώνεται από την ίδια την κατασκευή του πλοίου. Μπορεί το σώμα των μεταλλικών υπερκατασκευών ενός πλοίου να μην υφίσταται εύκολα πρωτεύουσα ζημιά από ένα κεραυνικό πλήγμα, ωστόσο η ύπαρξη σωληνώσεων, βαλβίδων, καλωδιώσεων, εξόδων αερισμού για εγκαταστάσεις με εύφλεκτα αέρια, ευαίσθητων ελεγκτών για αυτοματισμούς (προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές, PLCs) καθιστούν αναγκαία την προστασία αυτών των κατασκευών από μεταβατικά και επαγόμενα φαινόμενα που οφείλονται σε απευθείας κεραυνοπληξία. Οι οροφές χώρων ελέγχου, ηλεκτρικής ισχύος και τηλεπικοινωνιών χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής.

### **1.8.1. Εξωτερική αντικεραυνική προστασία**

Οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα μεταλλικό πλοίο κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος είναι απολύτως ισοδύναμες με αυτές σε μια πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου, καθώς και στις δύο περιπτώσεις πρόκειται για μεταλλικές κατασκευές που πλέουν στη θάλασσα και που διαθέτουν ειδικό εξοπλισμό και αυξημένη ανάγκη για ασφάλεια και αξιόπιστη παροχής ισχύος. Οι προτάσεις που παρουσιάζει ο A.Galvan [15] ως κατευθυντήριες γραμμές για τη διαμόρφωση ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε υπεράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου, λαμβάνοντας υπόψη σχετικές διατάξεις νηογνομόνων, εθνικών και διεθνών κανονισμών που αναφέρονται σε ηπειρωτικά και ναυτικά συστήματα και σε επίγειες εγκαταστάσεις με κίνδυνο ανάφλεξης/πυρκαγιάς, μπορούν κάλλιστα να εφαρμοστούν και σε πλοία με μεταλλική γάστρα. Αυτός ο συνδυασμός μέτρων αντικεραυνικής προστασίας είναι ο ακόλουθος:

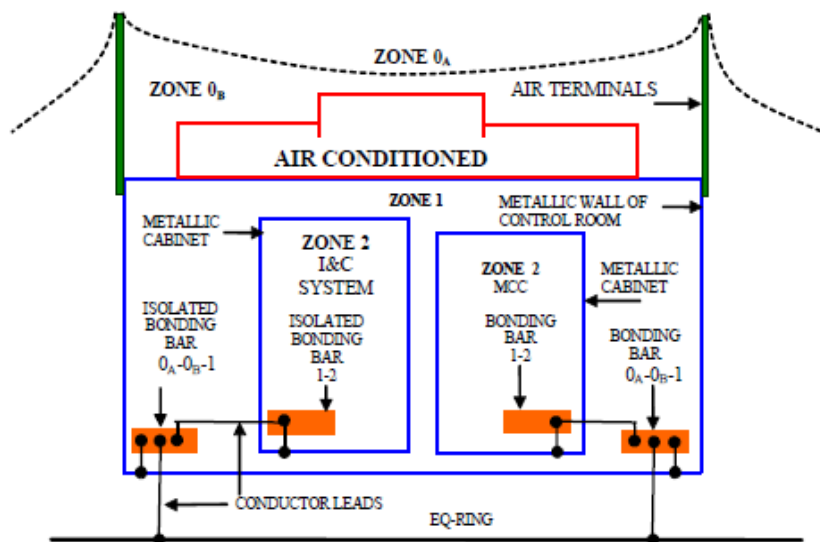
- Επιβεβαίωση ότι όλες οι συσκευές και ο εξοπλισμός βρίσκονται στο εσωτερικό της σιδηρομεταλλικής κατασκευής του πλοίου και επιβεβαίωση της ηλεκτρικής συνέχειας της εξωτερικής μεταλλικής δομής του πλοίου. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η ηλεκτρική συνέχεια, όπου απαιτείται (π.χ. σε σημεία αλλαγής υλικού) τοποθέτηση συνδέσεων-βραχυκυκλωτήρων μεταξύ μεταλλικών τμημάτων.
- Εγκατάσταση δικτύου ισοδυναμικής ζεύξης στις ζώνες του πλοίου, όπου είναι αναγκαία η ισοδυναμική σύνδεση του εξοπλισμού.
- Σε περιπτώσεις εξοπλισμού ο οποίος μπορεί να μετακινηθεί και να βρεθεί εκτεθειμένος σε κεραυνικό πλήγμα θα πρέπει να εγκαθίσταται εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας με τερματικά αέρα, των οποίων η ζώνη προστασίας θα προσδιορίζεται σύμφωνα με το IEC 62305-3 [27] και τα οποία θα πρέπει να συνδέονται στο δίκτυο ισοδυναμικής ζεύξης.



- Χρήση αγωγών διπλάσιας διαμέτρου από αυτές που ορίζονται στο IEC 62305-1 [28] για τα τερματικά αέρα και τους αγωγούς καθόδου σε ηπειρωτικά συστήματα.
- Δε θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σωληνώσεις με εύφλεκτο περιεχόμενο ως αγωγοί καθόδου.

### 1.8.2. Εξωτερική αντικεραυνική προστασία για σκοπούς ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης

Πέρα από την εξωτερική αντικεραυνική προστασία, ζωτικής σημασίας είναι και η διαμόρφωση ενός εσωτερικού συστήματος για την ηλεκτρομαγνητική θωράκιση από τα επακόλουθα ενός κεραυνικού πλήγματος. Για την ηλεκτρομαγνητική θωράκιση μιας εγκατάστασης πλατφόρμας πετρελαίου ο Galvan προτείνει τη διαμόρφωση ζωνών επάνω στην εξεταζόμενη δομή σύμφωνα με το βαθμό έκθεσης στο κεραυνικό πλήγμα (ζώνες  $0_A$ ,  $0_B$ , 1 και 2) όπως ορίζει το IEC 62305-2 [29]. Μια τέτοια διαμόρφωση η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1.11 είναι αντίστοιχα εφαρμόσιμη και για τη γέφυρα ενός πλοίου μεταλλικής κατασκευής, όπου το ρόλο του βασικού διαύλου ισοδυναμικής ζεύξης αναλαμβάνει η ίδια η μεταλλική γάστρα.



**Σχήμα 1.11:** Τυπικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας για ένα χώρο ελέγχου που περικλείει κέντρα ελέγχου κινητήρων και συσκευές και κυκλώματα σήματος και επικοινωνιών σε μια πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου [15]

Ο διαχωρισμός σε ζώνες θα πρέπει να συνοδεύεται και την εφαρμογή των ακόλουθων μέτρων ανά ζώνη:

1. Αλεξικέραυνα για τη σύλληψη των κεραυνών (απευθείας πλήγμα, LPZ  $0_A$ ): Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης έναντι απευθείας πλήγματος που παρέχουν τα αλεξικέραυνα εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο επίπεδο προστασίας, σύμφωνα με το Πρότυπο IEC 62305-1 [28].
2. Έλεγχος του ακτινοβολούμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενός κεραυνικού πλήγματος και των συνεπειών του (LPZ  $0_B$  έως LPZ 1): Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης έναντι ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και των επιπτώσεών

τους πάνω σε ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές και αισθητήρες εξαρτάται από τη διάταξη και το υλικό θωράκισης.

3. Έλεγχος των αγόμενων μεταβατικών σημάτων που προκαλούνται λόγω κεραυνικού πλήγματος στα όρια των ζωνών προστασίας (LPZ 0<sub>B</sub> προς LPZ 1, LPZ 1 προς LPZ 2)
4. Διασυνδεδετικοί αγωγοί, μπάρες και δακτύλιοι για ισοδυναμικές συνδέσεις.

### **1.8.2.1. Θωράκιση από ακτινοβολούμενο πεδίο**

Η θωράκιση από ακτινοβολούμενο πεδίο εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων, όπως η συχνότητα και ο τύπος του πεδίου υπό εξασθένιση, η γεωμετρία και το υλικό του μέσου θωράκισης, η θέση του υπό εξέταση εξοπλισμού στο εσωτερικό του θωρακισμένου περιβλήματος, η πόλωση και η γωνία πρόσπτωσης του πεδίου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η συνολική εξασθένιση που υφίσταται ένα σήμα των 25kHz (η βασική συχνότητα του μαγνητικού πεδίου του πρωτεύοντος πλήγματος [30]) από 0,5mm χαλκού είναι 140dB (10<sup>7</sup>:1) και από 0,5mm χάλυβα 180dB (10<sup>9</sup>:1), ενώ οι αντίστοιχες τιμές για σήματα 1MHz (η βασική συχνότητα του μαγνητικού πεδίου του δευτερεύοντος πλήγματος [30]) είναι μεγαλύτερες [15]. Επομένως, χώροι εντός της γάστρας του πλοίου απόλυτα σφραγισμένοι μέσω συγκολλήσεων είναι κατάλληλοι για θωράκιση από κεραυνικά πλήγματα. Ωστόσο, ανοίγματα όπως πόρτες, παράθυρα και θύρες εξαερισμού μπορούν να μειώσουν την ακεραιότητα της θωράκισης έναντι ακτινοβολούμενων διαταραχών, ενώ πίνακες I/O των σημάτων, εισερχόμενα/εξερχόμενα καλώδια μπορούν να μειώσουν την ακεραιότητα της θωράκισης ιδίως όσον αφορά σε αγόμενες διαταραχές.

### **1.8.2.2. Θωράκιση από αγόμενο πεδίο**

Βασικό συστατικό του εσωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας για την παροχή ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης από αγόμενα μεταβατικά σήματα που προκαλούνται λόγω κεραυνικού πλήγματος είναι οι απαγωγείς υπερτάσεων (surge protective devices SPDs). Κατά τη χρήση τους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράμετροι [15]:

- Η σωστή θωράκιση των καλωδίων ισχύος και σήματος είναι πολύ σημαντική, διότι οι απαγωγείς είναι σχεδιασμένοι, ώστε να μπορούν να διαχειριστούν μόνο ένα μέρος του κεραυνικού ρεύματος.
- Τα επίπεδα προστασίας των SPDs πρέπει να είναι σύμφωνα με τη διαβάθμιση μόνωσης και τα επίπεδα ατρωσίας του υπό προστασία εξοπλισμού σύμφωνα με το IEC 61000-4-5 [31].
- Ως προς τα σημεία εγκατάστασης, τα SPDs θα πρέπει να τοποθετούνται οπωσδήποτε σε διακριτά κρίσιμα σημεία των ζωνών προστασίας, ειδικά σε όρια-σημεία μετάβασης μεταξύ επιπέδων τάσης και φυσικών περιβλημάτων, κατά τα δυνατόν πλησιέστερα στο σημείο εισόδου της υπό προστασία γραμμής ή του εξοπλισμού, με τον αγωγό γείωσης όσο το δυνατόν πιο σύντομο και ευθύ [32]-[36].
- Οι βασικές απαιτήσεις για τη διαστασιολόγηση των SPDs είναι ότι ο πρώτος απαγωγέας θα πρέπει να μπορεί να αντέξει το μεγαλύτερο μέρος του κεραυνικού ρεύματος, ενώ οι επόμενοι απαγωγείς θα πρέπει να μπορούν να διαχειριστούν τους εναπομείναντες κινδύνους από το όριο μεταξύ των ζωνών αντικεραυνικής προστασίας 0<sub>A</sub> προς τη ζώνη 1 (SPDs κλάσης I) και τα επαγόμενα φαινόμενα από το

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο όριο της ζώνης αντικεραυνικής προστασίας  $0_B$  προς τη ζώνη 1 (SDPs κλάσης II) και στο εσωτερικό της ζώνης 1 (στο όριο της ζώνης αντικεραυνικής προστασίας 1 προς τη ζώνη 2 και ανώτερες ζώνες πρέπει να εγκαθίστανται SDPs κλάσης II ή III) [32]-[36].

## 1.9. Πρότυπα αντικεραυνικής προστασίας πλοίων

Η ιδιαιτερότητα που χαρακτηρίζει τα πρότυπα στον τομέα της ναυτιλίας είναι το γεγονός ότι εκδίδονται ταυτόχρονα διαφόρων ειδών κανονισμοί (νομοθετικές οδηγίες, τεχνικές οδηγίες) από πολυάριθμους φορείς, όπως οι εθνικοί οργανισμοί (Εθνικοί νηογνώμονες, Ακτοφυλακή, Διεύθυνση Ηλεκτρικής Ασφάλειας), οι διεθνείς οργανισμοί προτυποποίησης (ειδικότερα στον τομέα των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων οι IEC, ISO, IEEE, CENELEC), αλλά και οι διεθνείς οργανισμοί που ορίζουν το πλαίσιο δράσεων για την ασφάλεια στη ναυτιλία (IMO, SOLAS). Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι οι κανονισμοί αυτοί συχνά δεν εναρμονίζονται και τα συνήθη προβλήματα είναι όχι μόνο η μη συμμόρφωση εθνικών διατάξεων με τις διεθνείς, αλλά ακόμα και η ανεπάρκεια των διεθνών απαιτήσεων σε σχέση με έγγραφα εθνικής εμβέλειας, τα οποία μπορεί να παρέχουν πιο αναλυτικές οδηγίες. Στη συγκριτική μελέτη μεταξύ των διάφορων οδηγιών και κανονισμών ένα επιπρόσθετο εμπόδιο εντοπίζεται στη χρησιμοποιούμενη ορολογία, η οποία διαφέρει από έγγραφο σε έγγραφο, ακόμα και αν στόχος πολλές φορές είναι να περιγραφεί η ίδια έννοια. Πέρα από το γλωσσικό κομμάτι, υπάρχουν και διαφορές ανάμεσα στα πρότυπα ως προς τα ζητήματα που εξετάζονται και ως προς την ακρίβεια των απαιτήσεων, οι οποίες πολλές φορές δεν είναι σαφείς ή δεν ποσοτικοποιούνται.

Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (ΣΑΠ) -και οι σχετικές απαιτήσεις των οδηγιών και των διεθνών κανονισμών- διαφοροποιείται αναλόγως με το αν πρόκειται για σκάφος με μεταλλικό ή μη μεταλλικό σκελετό, καθώς σε κάθε περίπτωση είναι διαφορετική η φυσική διαδικασία διοχέτευσης του κεραυνικού ρεύματος στο νερό, το οποίο στην περίπτωση ενός πλοίου λειτουργεί ως «γη».

### 1.9.1. Σκάφη μη μεταλλικού σκελετού

Σε σκάφη μη μεταλλικού σκελετού, όπου το υλικό της γάστρας είναι μη αγωγίμο, όλα τα Πρότυπα συγκλίνουν στην αναγκαιότητα ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας που αποτελείται από:

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

Ένα σημαντικό θέμα στην περίπτωση μη μεταλλικής γάστρας είναι ο διαχωρισμός των τερματικών γείωσης ανάλογα με το αν αυτά χρησιμοποιούνται για την αντικεραυνική προστασία ή για κοινή ηλεκτρική χρήση. Οι προβλέψεις των κανονισμών ποικίλουν από απαίτηση για ξεχωριστή πλάκα που προορίζεται για αμιγώς ηλεκτρική χρήση σε σχέση με

την πλάκα γείωσης του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, σύμφωνα με το Bureau Veritas NR 566 DT R00 E [37], έως τη δυνατότητα χρήσης κοινής πλάκας που παρέχει το DEF STAN 02-516 [38], όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.6.

	DEF STAN 02-51 [38]	ABYC TE-4 07/06 [39]	IEC 60092-507 [40]	Bureau Veritas NR 566 DT R00 E [37]	ISO 10134 [41]
Γείωση ηλεκτρικού συστήματος		-	Δεν προσδιορίζεται	Ξεχωριστή πλάκα γείωσης από την αντικεραυνική προστασία	Δεν προσδιορίζεται
Γείωση ραδιοεπικοινωνιών	Δυνατότητα κοινής χρήσης μιας πλάκας γείωσης	Κοινή πλάκα για ραδιο-επικοινωνίες και αντικεραυνική προστασία	-	Ξεχωριστό σύστημα ζεύξης για ραδιοεπικοινωνίες	Δεν προσδιορίζεται
Γείωση αντικεραυνικής προστασίας			Πλάκα αντικεραυνικής προστασίας για μη μεταλλικά σκάφη	Πλάκα αντικεραυνικής προστασίας για μη μεταλλικά σκάφη	Δεν προσδιορίζεται
Ελάχιστο εμβαδό πλάκας γείωσης (m <sup>2</sup> )	0.25	0.1	0.25	0.25	0.1
Ελάχιστο πάχος πλάκας γείωσης (mm)	7	5	-	-	5
Ελάχιστο μήκος πλάκας γείωσης (m)	0.4	-	-	-	4
Ελάχιστο πλάτος πλάκας γείωσης (mm)	-	-	-	-	20

Πίνακας 1.6: Διαχωρισμός τερματικών (πλάκας) γείωσης και απαιτήσεις διαστάσεων για μη μεταλλικά σκάφη

### 1.9.2. Σκάφη μεταλλικού σκελετού

Περνώντας στην περίπτωση μεταλλικού σκάφους, το ρόλο ενός συστήματος πολλαπλών αγωγών καθόδου και της πλάκας γείωσης αναλαμβάνει η ίδια η μεταλλική γάστρα του πλοίου. Αν στην περίπτωση μη μεταλλικού σκάφους επιδιώκεται η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ αυτών των στοιχείων, στο μεταλλικό σκάφος θεωρείται ότι η ίδια η αγωγιμότητα του υλικού συνδέει αυτόματα τον κεραυνό με το νερό. Στον Πίνακα 1.7 παρατίθενται συγκεντρωτικά οι βασικές κατασκευαστικές παράμετροι για τα τρία στοιχεία ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, (αλεξικέραυνο, αγωγοί καθόδου, πλάκα γείωσης) σύμφωνα με τις απαιτήσεις των αντίστοιχων κανονισμών.

Οι περισσότεροι κανονισμοί συμφωνούν στη διατύπωση ότι, εάν εξασφαλίζεται η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του μεταλλικού σκελετού και του καταρτιού ή άλλης μεταλλικής υπερδομής κατάλληλου ύψους, τότε δεν χρειάζεται καμία περαιτέρω πρόβλεψη αντικεραυνικής προστασίας. Με αυτό τον τρόπο επιτρέπουν ουσιαστικά στις ψηλές δομές του πλοίου να λειτουργήσουν απευθείας ως αλεξικέραυνα, παρόλο που αυτό θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες στην περίπτωση ενός ιστού κεραιάς ή άλλου κρίσιμου

εξοπλισμού. Η ύπαρξη δομών επαρκούς ύψους μεταφράζεται στη δημιουργία μιας ζώνης αντικεραυνικής προστασίας, η οποία θα περικλείει όλες τις δομές που βρίσκονται χαμηλότερα. Το ελάχιστο πρόσθετο ύψος του αλεξικεραύνου από τον ιστό ή την κατασκευή στήριξης καθορίζεται στα πρότυπα, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.7, ωστόσο η μέθοδος υπολογισμού της ζώνης προστασίας, προκειμένου να διαπιστωθεί η αναγκαιότητα εγκατάστασης αλεξικεραύνου και στη συνέχεια να προσδιοριστεί η ακριβής θέση τοποθέτησης και το απαιτούμενο συνολικό ύψος του (ύψος ιστού και πρόσθετο ύψος) καθορίζεται μόνο στα Πρότυπα [39], [41] που αναφέρονται σε ιστιοπλοϊκά και μικρά σκάφη και στο [42]. Προκύπτει επομένως το συμπέρασμα ότι, ειδικά στην περίπτωση σκαφών μεταλλικού σκελετού, υπάρχουν κενά ή και ασυμφωνίες στις σχετικές απαιτήσεις αντικεραυνικής προστασίας των προτύπων.

Η προτεινόμενη μέθοδος για την εύρεση της ζώνης προστασίας, η οποία προκύπτει από οποιαδήποτε επαλληλία καταρτιών ή άλλων υπερωψωμένων, αγώγιμων, γειωμένων αντικειμένων, σε όλες τις περιπτώσεις είναι ένας συνδυασμός της Μεθόδου της Κυλιόμενης Σφαίρας και της Μεθόδου του Κώνου Προστασίας. Εάν δεν αρκεί η χρήση ενός μόνο τερματικού αέρα, πρέπει να προστεθούν επιπλέον αλεξικέραυνα ώστε να σχηματιστούν αλληλεπικαλυπτόμενες ζώνες προστασίας που τελικά να εμπεριέχουν ολόκληρο το σκάφος.

### **1.9.3. Πρόσθετα ζητήματα**

Πέρα από τις κατευθυντήριες γραμμές του Πίνακα 1.7 για τη γενική διάρθρωση του συστήματος εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας ενός πλοίου, τα Πρότυπα παρέχουν λεπτομερείς οδηγίες σχετικά με κατασκευαστικά ζητήματα όπως: το υλικό, ο τρόπος στήριξης και τα δομικά στοιχεία που επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν ως ιστοί εγκατάστασής του αλεξικεραύνου, το υλικό και η διατομή του αγωγού καθόδου, η βέλτιστη όδυσή του και οι τύποι ενώσεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στη διαδρομή του, καθώς και απαιτήσεις ως προς το σχήμα, το υλικό, το σημείο τοποθέτησης και τον τρόπο σύνδεσης με την πλάκα γείωσης.

Όσον αφορά σε πλοία μη μεταλλικού σκελετού, στα Πρότυπα ISO 10134 [41] και ABYC [39] αναλύεται το ζήτημα της ισοδυναμικής ζεύξης. Οι μεγάλες μεταλλικές μάζες, εσωτερικές ή εξωτερικές, ειδικά εντός ορισμένης ακτίνας από οποιοδήποτε αγωγό του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας, πρέπει να ενώνονται στην εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας με χάλκινο αγωγό κατάλληλων διαστάσεων, προκειμένου να εξαιρεθούν οι διαφορές δυναμικού που εντοπίζονται ανάμεσα στα μεταλλικά μέρη και να αποφευχθούν πλευρικές εκκενώσεις από τους αγωγούς καθόδου προς αυτά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συστήματος δευτερευόντων διασυνδετικών αγωγών που καταλήγουν σε ισοδυναμικό δίαυλο.

Πρότυπο/Κανονισμός	Είδος σκάφους	Εγκατάσταση ΣΑΠ	Διάμετρος αλεξικεραύνου (mm)	Ελάχιστη προεξοχή αλεξικεραύνου από τον ιστό (mm)	Διατομή αγωγού καθόδου (mm <sup>2</sup> )	Προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού της ζώνης προστασίας
ISO 10134 [41]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	-	150mm (μη μεταλλικός ιστός)	21	h<15m: Μέθοδος Κώννου Προστασίας 1:1 h≥15m: Μέθοδος Κυλιόμενης Σφαίρας
	Μεταλλικό	Μη απαιτούμενη <sup>a, b</sup>				
ABYC TE-4 07/06 [39]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	9.5 για Cu 12.7 για Al	152	21.2	h<30m: Μέθοδος Κώννου Προστασίας 1:1 h≥30m: Μέθοδος Κυλιόμενης Σφαίρας
	Μεταλλικό	Μη απαιτούμενη <sup>a, b</sup>				
Bureau Veritas NR 566 DT R00 E [37]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	-	300	>70	-
	Μεταλλικό	Μη απαιτούμενη <sup>a, b</sup>				
DNVGL-OS-D201 & DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8 [43], [44]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	12	300	>70	-
	Μεταλλικό	Μη απαιτούμενη <sup>a, b</sup>				
DNV AS-ts408 [45]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	12	300	>70	-
	Μεταλλικό	Μη απαιτούμενη <sup>a, b</sup>				
NFPA 780 [42]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	Για υπό προστασία κατασκευές ύψους <23m: >9.5(συμπαγές), >15.9(σωλήνας) [Cu] >12.7(συμπαγές), >15.9 (σωλήνας) [Al] Για υπό προστασία κατασκευές ύψους >23m: >12.7 [Cu], >15.9 [Al]	254	>21 για Cu >40 για Al	(i) Απόσταση προστασίας (d) μεταξύ ιστών ύψους h <sub>1</sub> και h <sub>2</sub> $d = \sqrt{h_1(2 \cdot R - h_1)} - \sqrt{h_2(2 \cdot R - h_2)}$ όπου: R=30m η απόσταση πρόσκρουσης της Κυλιόμενης σφαίρας για I=5kA (ii) ύψος αλεξικεραύνου: όλα τα εξαρτήματα πάνω σε ιστούς εντός κώννου προστασίας 90°
	Μεταλλικό	Μη απαιτούμενη <sup>a, b</sup>				
IEC 60092-507 [40]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	>12	300	>70	-
	Μεταλλικό	Απαιτούμενη				
IEC 60092-502 [46]	Μεταλλικό	Απαιτούμενη <sup>c</sup>	-	-	-	-
DEF STAN 02-516 [38]	Μη μεταλλικό	Απαιτούμενη	12	300	-	-
	Μεταλλικό	Απαιτούμενη				

<sup>a</sup> Εάν εξασφαλίζεται η ηλεκτρική συνέχεια μεταξύ του μεταλλικού σκελετού και του καταρτιού ή άλλης μεταλλικής υπερδομής κατάλληλου ύψους, τότε δεν χρειάζεται καμία περαιτέρω πρόβλεψη αντικεραυνικής προστασίας.

<sup>b</sup> Αναγκαίο μόνο για μη μεταλλικούς ιστούς (εκτός της ζώνης προστασίας, εάν προτείνεται μέθοδος υπολογισμού της)

<sup>c</sup> Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κίνδυνοι λόγω κεραυνικού πλήγματος. Επίσης ο κίνδυνος και τα αποτελέσματα πληγμάτων πάνω σε ψηλά σημεία εξαερισμού αερίων ή ατμού ή σε γειτονικές κατασκευές

**Πίνακας 1.7:** Βασικές διαστάσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας πλοίου σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς.

Ειδική αναφορά σε μέτρα αντιμετώπισης φαινομένων από επαγόμενες υπερτάσεις κάνει το DEF STAN 02-516 [38], θέτοντας μάλιστα ως απαίτηση οποιαδήποτε επαγόμενη τάση να μπορεί να συγκρατηθεί σε τιμές κάτω των 2kV. Στην κατεύθυνση αυτή προτείνει την τοποθέτηση του εξοπλισμού εντός θωρακισμένων θαλάμων, την όδευση των καλωδίων κατά τρόπο, ώστε να αποφεύγονται μεγάλοι επαγωγικοί βρόχοι και την εγκατάσταση σπινθηριστών ή συσκευών καταστολής υπερτάσεων στα ηλεκτρικά κυκλώματα των ραδιοεπικοινωνιών ή του ραντάρ, που βρίσκονται στον αέρα και είναι έντονα εκτεθειμένα σε ένα κεραυνικό πλήγμα

## **1.10. Το Πρότυπο IEC 60945: 2002**

### **1.10.1. Σκοπός και πεδίο εφαρμογής**

Το IEC 60945 [47] καθορίζει ελάχιστες απαιτήσεις λειτουργίας, μεθόδους ελέγχου και αποτελέσματα δοκιμών που μπορούν να εφαρμοστούν στον παρακάτω εξοπλισμό:

- i. Εξοπλισμό ραδιοεπικοινωνιών που φέρουν τα πλοία ως τμήμα του ναυτικού συστήματος κινδύνου και ασφάλειας
- ii. Εξοπλισμό ναυσιπλοΐας και άλλα βοηθητικά μέσα ναυσιπλοΐας
- iii. Στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) όλος ο εξοπλισμός που αναρτάται στη γέφυρα, εξοπλισμός πολύ κοντά σε κεραίες λήψης και εξοπλισμός που μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στον εξοπλισμό ναυσιπλοΐας και στον εξοπλισμό ραδιοεπικοινωνιών.

### **1.10.2. Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός πλοίου**

Το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός πλοίου είναι επαρκώς διαφορετικό από άλλα περιβάλλοντα από πλευράς ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, ώστε να δικαιολογείται η εισαγωγή Προτύπου προϊόντος για την οικογένεια εξοπλισμού που καλύπτεται από τους σκοπούς του IEC 60945 [47]. Χαρακτηριστικά, πέρα από τους μηχανισμούς για πρόωση, ελιγμούς και διαχείριση φορτίου που λειτουργούν στην ονομαστική συχνότητα του δικτύου, στη γέφυρα ενός πλοίου βρίσκονται συγκεντρωμένα συστήματα ραδιοεπικοινωνιών, ναυσιπλοΐας και ελέγχου των μηχανικών συστημάτων, τα οποία πρέπει να λειτουργήσουν ταυτόχρονα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από 90kHz για το σύστημα ναυσιπλοΐας LORAN μέχρι 9GHz για ραντάρ.

Σύμφωνα με το IEC 60945 το εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον ενός πλοίου, τουλάχιστον από πλευράς EMC, θεωρείται ιδιαίτερα ευνοϊκό, καθώς το πλοίο δεν είναι συνδεδεμένο σε καλώδια για λόγους τροφοδοσίας ή επικοινωνίας που μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές, ενώ θεωρείται απομονωμένο από πηγές ακτινοβολούμενων ραδιοπαρεμβολών. Επομένως το Πρότυπο [47] θεωρεί ότι όλες οι πηγές εκπεμπόμενων ραδιοπαρεμβολών, είναι οι ίδιοι οι ραδιοπομποί του πλοίου και ο πιο ευαίσθητος εξοπλισμός είναι οι δέκτες του πλοίου. Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να εξεταστεί η συμμόρφωση με τα επιτρεπόμενα όρια ακτινοβολούμενων διαταραχών (radiated emissions limits) θα πρέπει να διενεργούνται μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που εκπέμπεται από το σύνολο του εξοπλισμού στο περιβάλλον ενός πλοίου με έμφαση στην

περιοχή της γέφυρας. Οι μετρήσεις θα πρέπει να εκτελούνται από κατάλληλα εργαστήρια που διαθέτουν διακριβωμένα όργανα και έχουν επικυρώσει την ακρίβεια των μετρήσεων τους μέσω συμμετοχής σε διεργασηριακές μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπως περιγράφεται στις εργασίες [48]-[50].

### 1.10.3. Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας

Συγκεντρωτικά οι απαιτήσεις του IEC 60945 αναφορικά με τις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας στις οποίες θα πρέπει να υποβάλλεται εξοπλισμός ναυσιπλοΐας και ραδιοεπικοινωνιών που εγκαθίσταται σε πλοία φαίνονται στον Πίνακα 1.8, αναλόγως με την κατηγορία του εξοπλισμού ως προς τη θέση και τη μονιμότητα της εγκατάστασής του.

	Φορητός	Προστατευμένος	Εκτεθειμένος	Υποβρύχιος
Αγόμενες ραδιοδιαταραχές (IEC 61000-4-6 [51])	*	3V r.m.s. 150kHz-80MHz, 10V r.m.s σε συγκεκριμένες συχνότητες, ac και dc θύρες τροφοδοσίας, θύρες σημάτων και ελέγχου, κριτήριο A		
Ακτινοβολούμενες διαταραχές (IEC 61000-4-3 [52])	*	10V/m 80MHz-2GHz Περίβλημα, κριτήριο A		*
Ταχέα μεταβατικά φαινόμενα (ριπές) (IEC 61000-4-4 [53])	*	2kV διαφορικά σε ac θύρες τροφοδοσίας 1kV σε θύρες σημάτων και ελέγχου κριτήριο B		
Αργά μεταβατικά φαινόμενα (IEC 61000-4-5 [31])	*	1kV L-PE, 0.5kV L-N ac θύρες τροφοδοσίας κριτήριο B		
Διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας (IEC 61000-4-11 [54])	*	±20% της τάσης τροφοδοσίας για 1.5s, ±10% συχνότητα για 5s ac θύρες τροφοδοσίας κριτήριο B		
Διακοπή της τάσης τροφοδοσίας (IEC 61000-4-11 [54])	*	60s διακοπή ac και dc θύρες τροφοδοσίας κριτήριο C		
Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (IEC 61000-4-2 [55])		6kV εκφορτίσεις επαφής 8kV εκφορτίσεις αέρος Κριτήριο B		*
<b>*Δεν εφαρμόζεται</b>				
<b>Κριτήριο A:</b> ο εξοπλισμός θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί επιτυχώς κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της δοκιμής. Καμία υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια λειτουργίας δεν επιτρέπεται.				
<b>Κριτήριο B:</b> ο εξοπλισμός θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί επιτυχώς μετά το πέρας της δοκιμής. Καμία υποβάθμιση της επίδοσης και απώλεια λειτουργίας δεν επιτρέπεται. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιτρέπεται υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια λειτουργίας υπό την προϋπόθεση ότι είναι αυτοεπανερχόμενη και ότι δεν οδηγεί σε αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας και των αποθηκευμένων δεδομένων				
<b>Κριτήριο C:</b> προσωρινή υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια λειτουργίας επιτρέπεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής υπό την προϋπόθεση ότι είναι αυτοεπανερχόμενη ή ότι μπορεί να ανακτηθεί μετά το πέρας της δοκιμής με χειρισμούς ελέγχου.				

Πίνακας 1.8: Απαιτήσεις δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σύμφωνα με το IEC 60945 [47]

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κεραυνικές υπερτάσεις δε συμπεριλαμβάνονται στο IEC 60945, καθώς θεωρείται ότι δεν υπάρχουν εξωτερικά καλώδια που να επιτρέπουν την αγωγή του κεραυνού στο εσωτερικό του πλοίου. Η αντίστοιχη δοκιμή με αργό μεταβατικό φαινόμενο υψηλού ενεργειακού περιεχομένου θεωρείται ότι προσομοιώνει πιθανές διαταραχές λόγω λειτουργίας των θυρίστορ και περιορίζεται στη θύρα τροφοδοσίας, καθώς δε θεωρείται πιθανή η σύζευξη των αργών μεταβατικών φαινομένων από τους αγωγούς τροφοδοσίας στις γραμμές σημάτων και τροφοδοσίας. Η δοκιμή, διεξάγεται όπως



περιγράφεται στο IEC 61000-4-5 [31]. Οι παλμοί που επιβάλλονται στις υπό εξέταση γραμμές τροφοδοσίας πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- χρόνο ανόδου: 1.2μs (τιμή μεταξύ 10% και 90%)
- χρόνο ημίσεος εύρους: 50μs
- πλάτος: 1kV μεταξύ φάσης και γης (L-PE) και 0.5kV μεταξύ φάσεων (L-N)
- ρυθμό επανάληψης: 1 παλμός/min
- διάρκεια δοκιμής: 5min για κάθε επίπεδο τάσης και πολικότητα παλμού

## 1.11. Το Πρότυπο IEC 60533: 2015

### 1.11.1. Σκοπός και πεδίο εφαρμογής

Το IEC 60533 [56] είναι ένα γενικότερης εφαρμογής Πρότυπο το οποίο πραγματεύεται ζητήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που εγκαθίσταται σε πλοία και σύμφωνα με τροποποίηση, στην τελευταία έκδοση του 2015 αναφέρεται συγκεκριμένα σε πλοία μεταλλικής γάστρας. Όπως προαναφέρθηκε, στο IEC 60945 ένα κεραυνικό πλήγμα θεωρείται ότι δε συνιστά κίνδυνο για την ατρωσία του εξοπλισμού, καθώς δεν υπάρχουν καλώδια εκτεθειμένα τα οποία μπορούν να το οδηγήσουν στο εσωτερικό του πλοίου. Αντιθέτως, στο IEC 60533 αναφέρεται ρητά ότι το κεραυνικό πλήγμα συγκαταλέγεται μεταξύ των ζητημάτων που καλύπτονται. Το γεγονός αυτό έρχεται ως μια πολύ σημαντική επικύρωση των κινδύνων που συνιστά ένα κεραυνικό πλήγμα για ένα πλοίο και από την πλευρά των σχετικών κανονισμών, ειδικά λαμβάνοντας υπόψη ότι το IEC 60533 στηρίζεται στην παραδοχή ότι η μεταλλική γάστρα και τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία εισάγουν μεγάλη απόσβεση στις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές από το εξωτερικό περιβάλλον του καταστρώματος προς το εσωτερικό. Το Πρότυπο καλύπτει το σύνολο σχεδόν του εξοπλισμού που είναι εγκατεστημένος σε ένα πλοίο, τον οποίο διαχωρίζει στις παρακάτω κατηγορίες αναλόγως με τη λειτουργία του [56] (για τις κατηγορίες εξοπλισμού A και C ορίζεται ως βασικό Πρότυπο το IEC 60945):

- κατηγορία A: εξοπλισμός ναυσιπλοΐας και συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών
- κατηγορία B: εξοπλισμός παραγωγής και μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας
- κατηγορία C: εξοπλισμός που τροφοδοτείται με παλμική ισχύ
- κατηγορία D: διακοπτικός εξοπλισμός και εξοπλισμός ελέγχου
- κατηγορία E: εξοπλισμός ενδοεπικοινωνίας και επεξεργασίας σήματος και συστήματα ελέγχου
- κατηγορία F: μη ηλεκτρικά στοιχεία και εξοπλισμός
- κατηγορία G: ενσωματωμένα συστήματα

Στον Πίνακα 1.9. (πηγή ο Πίνακας 1 του IEC 60533: 2015) φαίνονται οι δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (εκπομπή και ατρωσία) στις οποίες πρέπει να υποβάλλονται οι διάφορες κατηγορίες εξοπλισμού με συγκεκριμένα παραδείγματα συσκευών που απαρτίζουν τις κατηγορίες αυτές.

Κατηγορία	Κατηγορίες εξοπλισμού και εγκαταστάσεων	Παραδείγματα συσκευών εφαρμογής		CISPR 16-2-1	CISPR 16-2-3	IEC 61000-4-16	IEC 61000-4-11	IEC 61000-4-11	IEC 61000-4-4	IEC 61000-4-5	IEC 61000-4-6	IEC 61000-4-2	
				Αγόμενες εκπομπές	Ακτινοβολούμενες εκπομπές	Αγόμενες διαταραχές χαμηλών συχνοτήτων	Διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας	Διακοπή της τάσης τροφοδοσίας	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (ριπές)	Αργά μεταβατικά φαινόμενα (υπερτάσεις)	Αγόμενες ραδιοδιαταραχές	Ηλεκτροστατική εκφόρτιση (ESD)	
A	Εξοπλισμός ναυσιπλοΐας και ραδιοεπικοινωνιών	Εξοπλισμός ναυσιπλοΐας και ραδιοεπικοινωνιών	Πομποί και δέκτες για υπηρεσίες ναυσιπλοΐας και ραδιοεπικοινωνιών	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
B	Εξοπλισμός παραγωγής και μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος	Ηλεκτρικές μηχανές	Μηχανές/Γεννήτριες επαγωγής	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
			Σύγχρονες μηχανές	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
			DC Μηχανές	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
			Μηχανές ελεγχόμενες από ηλεκτρονικό εξοπλισμό	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
			Ειδικές ηλεκτρικές μηχανές	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Ηλεκτρονικοί διεγέρτες	Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
			Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης – πρόσθετος εξοπλισμός	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Μετατροπείς	Κυκλο-μετατροπείς	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
			Synchro-μετατροπείς (DC Link)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
			Μετατροπείς πλάτους παλμού	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DC-μετατροπείς	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Μετασχηματιστές			-	-	-	-	-	-	-	-	-		
C	Εξοπλισμός που τροφοδοτείται με παλμική ισχύ	Εξοπλισμός ναυσιπλοΐας	Συστήματα radar και sonar, βυθόμετρα	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
D	Διακοπτικός εξοπλισμός και εξοπλισμός ελέγχου	Αποζεύκτες, επαφείς	Χωρίς ηλεκτρονικά	-	-	x	-	-	-	-	-	-	
		Ηλεκτρονικές συσκευές ελέγχου		x	x	x	x	x	x	x	x	x	
		Συσκευές ελέγχου που λειτουργούν με ρελέ		-	-	-	-	x	-	x	-	-	

<b>E</b>	<b>Εξοπλισμός ενδοεπικοινωνίας και επεξεργασίας σήματος</b>	Ηλεκτρονική οθόνη συναγερμού		x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου		x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Σύστημα αυτοματισμού		x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Η/Υ, αισθητήρες		x	x	x	x	x	x	x	x	x
<b>F</b>	<b>Μη ηλεκτρικά στοιχεία και εξοπλισμός</b>	Μεταλλικά κιγκλιδώματα και εξαρτήματα	Παραγωγή παράσιτης ευρυζωνικής διαταραχής	Μη εφαρμόσιμο								
<b>G</b>	<b>Ολοκληρωμένα συστήματα</b>	Σύστημα παρακολούθησης του φορτίου με αισθητήρες και εξοπλισμό σε διαφορετικές ζώνες	Έλεγχος σε μεμονωμένο εξοπλισμό/σύστημα	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Ολοκληρωμένο σύστημα ναυσιπλοΐας	Έλεγχος σε μεμονωμένο εξοπλισμό/σύστημα	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Ολοκληρωμένο σύστημα γέφυρας	Έλεγχος σε μεμονωμένο εξοπλισμό/σύστημα	x	x	x	x	x	x	x	x	x
X απαιτείται ο έλεγχος - δεν απαιτείται ο έλεγχος												

**Πίνακας 1.9.** Οι δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (εκπομπή και ατρωσία) στις οποίες πρέπει να υποβάλλονται οι διάφορες κατηγορίες εξοπλισμού με συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής σύμφωνα με το IEC 60533:2015 [56]

## 1.11.2. Δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας

Ειδικότερα οι ελάχιστες προδιαγραφές των δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας δίνονται στον Πίνακα 1.10 (πηγή ο Πίνακας 2 του IEC 60533: 2015):

Θύρα	Φαινόμενο	Βασικό πρότυπο	Κριτήριο επίδοσης	Επίπεδο δοκιμής
AC τροφοδοσία	Αγόμενες διαταραχές χαμηλών συχνοτήτων	IEC 61000-4-16	A	10% AC τάση τροφοδοσίας: 50Hz-900Hz 10% έως 1%: 900Hz-6000Hz 1%: 6kHz-10kHz
	Διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας	IEC 61000-4-11	B	Τάση: ±20% για 1.5s, Συχνότητα: ±10% για 5s
	Διακοπή της τάσης τροφοδοσίας	IEC 61000-4-11	C	60s διακοπή
	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (ριπές)	IEC 61000-4-4	B	2kV <sup>c</sup>
	Αργά μεταβατικά φαινόμενα (υπερτάσεις)	IEC 61000-4-5	B	0.5kV <sup>a,h</sup> και 1kV <sup>b,h</sup>
	Αγόμενες ραδιοδιαταραχές	IEC 61000-4-6	A	3Vrms <sup>c</sup> ; (10kHz) <sup>f</sup> 150kHz-80MHz Ρυθμός σάρωσης ≤1.5·10 <sup>-3</sup> δεκάδες/s <sup>g</sup> Διαμόρφωση 80% AM (1kHz)
DC τροφοδοσία	Αγόμενες διαταραχές χαμηλών συχνοτήτων	IEC 61000-4-16	A	10% DC τάση τροφοδοσίας 50Hz-10kHz
	Διακυμάνσεις της τάσης τροφοδοσίας	IEC 61000-4-11	B	Τάση: +20% / -25% για εξοπλισμό μη συνδεδεμένο σε μπαταρία
	Διακοπή της τάσης τροφοδοσίας	IEC 61000-4-11	C	60s διακοπή
	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (ριπές)	IEC 61000-4-4	B	2kV <sup>c</sup>
	Αργά μεταβατικά φαινόμενα (υπερτάσεις)	IEC 61000-4-5	B	0.5kV <sup>a</sup> και 1kV <sup>b</sup>
	Αγόμενες ραδιοδιαταραχές	IEC 61000-4-6	A	3Vrms <sup>c</sup> ; (10kHz) <sup>f</sup> 150kHz-80MHz Ρυθμός σάρωσης ≤1.5·10 <sup>-3</sup> δεκάδες/s <sup>g</sup> Διαμόρφωση 80% AM (1kHz)
I/O θύρες, signal/control	Ταχεία μεταβατικά φαινόμενα (ριπές)	IEC 61000-4-4	B	1kV <sup>d</sup>
	Αγόμενες ραδιοδιαταραχές	IEC 61000-4-6	A	3Vrms <sup>c</sup> ; (10kHz) <sup>f</sup> 150kHz-80MHz Ρυθμός σάρωσης ≤1.5·10 <sup>-3</sup> δεκάδες/s <sup>g</sup> Διαμόρφωση 80% AM (1kHz)
Περίβλημα	Ηλεκτροστατική εκφόρτιση	IEC 61000-4-2	B	6kV εκφορτίσεις επαφής 8kV εκφορτίσεις αέρος
	Ακτινοβολούμενες διαταραχές	IEC 61000-4-3	A	10V/m <sup>e</sup> 80MHz-2GHz Ρυθμός σάρωσης ≤1.5·10 <sup>-3</sup> δεκάδες/s <sup>g</sup> Διαμόρφωση 80% AM (1kHz)

Για μη μόνιμα συνδεδεμένο εξοπλισμό, ο οποίος προορίζεται για χρήση στη ζώνη ενδιαίτησης των επιβατών δεν απαιτείται συμμόρφωση με επίπεδα ατρωσίας. Θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την επαρκή απόζευξη της ζώνης ενδιαίτησης επιβατών από όλες τις άλλες ζώνες

<sup>a</sup> Line to line

<sup>b</sup> Line to ground

<sup>c</sup> Χωρητική σύζευξη

<sup>d</sup> Αρπάγη σύζευξης

<sup>e</sup> Ειδικές συνθήκες πρέπει να αναλύονται

<sup>f</sup> Η μέθοδος ελέγχου πρέπει να περιγράφεται στο πιστοποιητικό δοκιμών

<sup>g</sup> Για εξοπλισμό που εγκαθίσταται στο κατάστρωμα και τη γέφυρα, το επίπεδο ελέγχου θα πρέπει να αυξάνεται στα 10Vrms για σημειακές συχνότητες σε συμφωνία με το IEC 60945 στα 2MHz / 3 MHz / 4 MHz / 6.2 MHz / 8.2 MHz / 12.6 MHz / 16.5 MHz / 18.8 MHz / 22 MHz / 25 MHz.

Για θωρακισμένα καλώδια θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ειδική διάταξη ελέγχου που να επιτρέπει τη σύζευξη με τη θωράκιση του καλωδίου

<sup>h</sup> Τιμές σε συμφωνία με IACS E10, εφαρμόσιμες για χρήση σε περιβάλλον πλοίου

**Κριτήριο A:** ο εξοπλισμός θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί επιτυχώς κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της δοκιμής. Καμία υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια λειτουργίας δεν επιτρέπεται.

**Κριτήριο B:** ο εξοπλισμός θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί επιτυχώς μετά το πέρας της δοκιμής. Καμία υποβάθμιση της επίδοσης και απώλεια λειτουργίας δεν επιτρέπεται. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής επιτρέπεται υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια λειτουργίας υπό την προϋπόθεση ότι είναι αυτοεπανερχόμενη και ότι δεν οδηγεί σε αλλαγή της κατάστασης λειτουργίας και των αποθηκευμένων δεδομένων.

**Κριτήριο C:** προσωρινή υποβάθμιση της επίδοσης ή απώλεια λειτουργίας επιτρέπεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής υπό την προϋπόθεση ότι είναι αυτοεπανερχόμενη ή ότι μπορεί να ανακτηθεί μετά το πέρας της δοκιμής με χειρισμούς ελέγχου.

**Πίνακας 1.10:** Οι προδιαγραφές των δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σύμφωνα με το IEC 60533:2015 [56]

Αναλυτικές οδηγίες για την επίτευξη ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και ατρωσίας παρέχονται για όλες τις κατηγορίες εξοπλισμού και περιλαμβάνουν μέτρα προς τις εξής κατευθύνσεις:

- Θωράκιση
- Γείωση
- Κατάλληλη όδευση των καλωδίων, επιλογή των αποστάσεων διαχωρισμού και επιλογή τύπου καλωδίου
- Χρήση φίλτρων
- Χρήση ειδικών διατάξεων, όπως οι διατάξεις προστασίας από υπερτάσεις
- Χρήση ειδικών διατάξεων, όπως οι διατάξεις για το διαχωρισμό διαφορετικών επιπέδων τάσης

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στη σωστή σχεδίαση της καλωδίωσης. Στον Πίνακα 1.11 παρατίθεται ο διαχωρισμός των καλωδίων σε κατηγορίες, αναλόγως με το σήμα που φέρουν. Βασικό μέτρο ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης θεωρείται η χρήση αποστάσεων διαχωρισμού μεταξύ καλωδίων διαφορετικής κατηγορίας ή μεταξύ αγωγών της ίδιας κατηγορίας που φέρουν διαφορετικά επίπεδα σήματος.

Καλώδια που ανήκουν στην ίδια κατηγορία (για τις κατηγορίες 1 έως και 4) μπορούν να ενωθούν σε μια κοινή δέσμη. Επίσης, καλώδια που ανήκουν στην κατηγορία 1, 4 και 5 θα πρέπει να είναι σταθερά προσδεσμένα σε μια γειωμένη μεταλλική επιφάνεια (απευθείας στο κατάστρωμα, σε σχάρα ή σε σωλήνα καλωδίωσης). Όσον αφορά στον περιορισμό των εμφανιζόμενων υπερτάσεων, θα πρέπει να γίνεται με στοιχεία που διαθέτουν αντιστάσεις εξαρτώμενες από την τάση, όπως απαγωγοί υπερτάσεων, βαρίστορ, δίοδοι κλπ. Τονίζεται ότι η προστασία θα πρέπει να διασφαλίζεται και στην περίπτωση υπερτάσεων με απότομες αιχμές.

Κλείνοντας την επισκόπηση των Προτύπων ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας IEC 60945 και IEC 60533, επισημαίνονται τα εξής: Το Πρότυπο IEC 60533 αποτελεί σαφέστατα έναν πολύ καλό οδηγό ως προς τη διασφάλιση ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σε όλο τον εξοπλισμό του ηλεκτρικού δικτύου ενός πλοίου με αναλυτικές οδηγίες για πρόσθετα ζητήματα, όπως η καλωδίωση. Σε αντίθεση με το προγενέστερο Πρότυπο IEC 60945, όπου λαμβάνεται υπόψη το σημείο εγκατάστασης του εξοπλισμού, με αποτέλεσμα να απαλλάσσονται ορισμένες κατηγορίες εξοπλισμού από δοκιμές, η απαίτηση εφαρμογής των δοκιμών στο IEC 60533 καθορίζεται με γνώμονα μόνο το είδος του εξοπλισμού (με εξαίρεση τις σχετικές κρίσιμες κατηγορίες A και C). Το γεγονός αυτό είναι θετικό ως προς το ότι επιβάλλει την εφαρμογή των δοκιμών σε μεγαλύτερο εύρος εξοπλισμού, ωστόσο συνεπάγεται ότι δε γίνεται καμία διαφοροποίηση των επιπέδων δοκιμής, αναλόγως με το είδος του εξοπλισμού και το σημείο εγκατάστασης. Επιπλέον, παρόλο που γίνεται εκτενής αναφορά στους τύπους καλωδίων και σημάτων, το IEC 60533 περιορίζεται σε απαιτήσεις σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των καλωδίων και τον τρόπο εγκατάστασής τους, χωρίς να τα συνδέει με τα απαιτούμενα επίπεδα δοκιμών ατρωσίας του συνδεδεμένου/τροφοδοτούμενου εξοπλισμού. Παράλληλα, ως προς τον κρίσιμο εξοπλισμό ναυσιπλοΐας και ραδιοεπικοινωνιών, το IEC 60533 παραπέμπει στο IEC 60945, το οποίο, για εξοπλισμό φορητό και θύρες dc τροφοδοσίας και σήματος παραλείπει τη δοκιμή ατρωσίας σε υπερτάσεις που οφείλονται σε κεραυνικά πλήγματα. Τέλος, από τον Πίνακα 1.9 (Πίνακας 1 του IEC 60533) απουσιάζει η δοκιμή ατρωσίας σε ακτινοβολούμενο πεδίο ραδιοσυχνοτήτων

σύμφωνα με το IEC 61000-4-3 για τις διάφορες κατηγορίες εξοπλισμού, παρόλο που συμπεριλαμβάνεται στον Πίνακα 1.10 (Πίνακας 2 του IEC 60533) με απαίτηση ελέγχου δυσμενούς ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος 10V/m, όπως ορίζεται και στο IEC 60945.

Όλα τα παραπάνω συνιστούν σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, έτσι ώστε τα επίπεδα ελέγχου των δοκιμών να καλύπτουν όλες τις δυνατές περιπτώσεις είδους εξοπλισμού, σημείου εγκατάστασης, συνδεδεμένων καλωδίων και εξεταζόμενης θύρας.

Καλώδια για	Επίπεδο	Κατηγοριοποίηση ως προς την εκπομπή/ατρωσία	Κατηγορία καλωδίου	Τύπος καλωδίου	Εφαρμοζόμενο πρότυπο
Σήματα ραδιοφωνικού δέκτη Σήματα τηλεοπτικού δέκτη Σήματα video	0.1mV-500mV	Ιδιαίτερα ευαίσθητα	3	Ομοαξονικό	IEC 60096-1
Αναλογικά και ψηφιακά σήματα Τηλεφωνικά σήματα Σήματα ηχείων Σήματα ελέγχου Σήματα συναγερμού	0.1V-115V	Ευαίσθητα	2	Συνεστραμμένο, μονό θωρακισμένο, θωρακισμένο συνεστραμμένο ζεύγος	IEC 60092-376
Τροφοδοσία Φωτισμός	10V-1000V	Πιθανώς ενοχλητικά	1	<u>Κάτω από το κατάστρωμα:</u> μη-θωρακισμένο <u>Πάνω από το κατάστρωμα:</u> συνεστραμμένο θωρακισμένο	IEC 60092-350 IEC 60092-353
Σήματα μεταφοράς υψηλής ισχύος Σήματα υψηλής παλμικής ισχύος Ημιαγωγικούς μετατροπέας υψηλής ισχύος	10V-1000V	Ιδιαίτερα ενοχλητικά	4	Ομοαξονικό, «θωρακισμένη ισχύς»	Ειδικό καλώδιο
	- <sup>e</sup>	- <sup>e</sup>	- <sup>e</sup>	Συνεστραμμένο θωρακισμένο	IEC 60092-350 IEC 60092-353
Ειδικές εφαρμογές	- <sup>e</sup>	Υπό εξέταση	5	- <sup>e</sup>	- <sup>e</sup>
Οπτικές ίνες	- <sup>e</sup>	-	- <sup>e</sup>	- <sup>e</sup>	- <sup>e</sup>

<sup>a</sup> Εξοπλισμός και βοηθητικός εξοπλισμός για ραδιοεπικοινωνίες και ναυσιπλοΐα θα πρέπει να φέρει θωρακισμένα καλώδια τροφοδοσίας, εάν ο κατασκευαστής το επιθυμεί. Η θωράκιση θα πρέπει να παρέχεται έως το όριο της αντίστοιχης ζώνης. Σημεία διείσδυσης θα πρέπει να γειώνονται περιμετρικά

<sup>b</sup> Τα καλώδια κεραίας-δέκτη θα πρέπει να εγκαθίστανται με διπλή θωράκιση ή ως ομοαξονικά καλώδια εντός προστατευτικού σωλήνα

<sup>c</sup> Καλώδια για radar, sonar και βυθόμετρα θα πρέπει να είναι καλώδια με διπλή θωράκιση ή ομοαξονικά καλώδια εντός προστατευτικού σωλήνα.

<sup>d</sup> Οι απαιτήσεις των σχετικών IEC προτύπων για τον παράγοντα κάλυψης των θωρακίσεων των καλωδίων θα πρέπει να τηρούνται, όπως και η απαίτηση η αντίσταση μεταφοράς στα 10MHz, όπως ορίζεται στο IEC 60096-1 δε θα έπρεπε να υπερβαίνει τα 30mΩ/m

<sup>e</sup> Υπό συζήτηση

**Πίνακας 1.11:** Τύποι σημάτων και κατηγορίες καλωδίων σύμφωνα με το IEC 60533:2015 [56]

# Υπό κλίμακα πείραμα με κρουστικό ρεύμα

---

## 2.1 Εισαγωγή

Στην περίπτωση των μεταλλικών πλοίων η ροή του κεραυνικού ρεύματος γίνεται μέσω του μεταλλικού σώματος του πλοίου, με κατεύθυνση προς την ιδανική γη που θεωρείται το νερό. Για την ποσοτικοποίηση και τη μελέτη αυτού του φαινομένου, κρίνεται αναγκαία η λήψη μετρήσεων και η διεξαγωγή ελεγχόμενων πειραμάτων μέσα σε εργαστήρια υψηλών τάσεων. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί που καθιστούν αδύνατη τη χρήση κατασκευών πλήρους μεγέθους για τη διεξαγωγή αυτών των πειραμάτων. Οι βασικότεροι από αυτούς είναι:

1. ο περιορισμένος χώρος του εργαστηρίου (ανάγκη προσομοίωσης της θάλασσας από μία πεπερασμένων διαστάσεων δεξαμενή με θαλασσινό νερό),
2. οι περιορισμοί στο μέγεθος του δοκιμίου (πρακτικά αδύνατη η διεξαγωγή πειράματος επάνω σε πραγματικού μεγέθους πλοίο),
3. η αδυναμία προσομοίωσης της διέγερσης (κεραυνικού πλήγματος) παρά μόνο μέσω κρουστικών γεννητριών καθορισμένων χαρακτηριστικών.

Μία λύση που εφαρμόζεται σε διάφορους τομείς έρευνας (π.χ. ναυπηγική, υδροδυναμική, τηλεπικοινωνίες κλπ.), προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες ενός πλήρους κλίμακας πειράματος, είναι η διεξαγωγή πειραμάτων υπό κλίμακα, χρησιμοποιώντας δοκίμια, τα οποία έχουν πολλαπλάσια μικρότερες διαστάσεις από τα πρωτότυπα. Όπως γίνεται κατανοητό όχι μόνο η γεωμετρία μιας υπό κλίμακα διάταξης, αλλά και τα σχετιζόμενα φυσικά μεγέθη εξαρτώνται από την επιλογή του λόγου κλίμακας, συνεπώς απαιτείται ειδικός σχεδιασμός του υπό κλίμακα πειράματος έτσι ώστε να υπάρχει σωστή αντιστοιχία μεταξύ μετρήσεων και πραγματικών μεγεθών στο πλήρους κλίμακας φαινόμενο. Ένα εύχρηστο μαθηματικό εργαλείο που επιτρέπει τον υπολογισμό των απαιτούμενων λόγων κλίμακας για την αναγωγή πειραματικά μετρούμενων μεγεθών σε πραγματικά μεγέθη είναι η Θεωρία της Ομοιότητας.

Μία πρώτη προσέγγιση στη μελέτη της συμπεριφοράς της μεταλλικής γάστρας ενός πλοίου στη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος είναι η θεώρηση του μεταλλικού σκελετού του πλοίου ως ενός μεγάλου ηλεκτροδίου γείωσης. Σε αυτό το πλαίσιο σχεδιάστηκε με βάση τη Θεωρία της Ομοιότητας μια προκαταρκτική πειραματική διερεύνηση που περιλάμβανε έγχυση κρουστικού ρεύματος και μέτρηση της μεταβατικής αντίστασης γείωσης σε ηλεκτρόδια τοποθετημένα εντός δεξαμενής με ηλεκτρολυτικό διάλυμα. Στόχος του πειράματος είναι μέσα από τη σύγκριση των μετρήσεων που λαμβάνονται για διαφορετικές διαστάσεις ηλεκτροδίων, τιμές αγωγιμότητας του διαλύματος και τιμές εγχόμενου ρεύματος να αξιολογηθεί η ακρίβεια της Θεωρίας της Ομοιότητας για τον υπολογισμό της μεταβατικής αντίστασης ηλεκτροδίου γείωσης και να διαπιστωθεί κατά πόσο και υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί η συγκεκριμένη θεωρία να εφαρμοστεί για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης ενός πλοίου με τον κεραυνό.

## 2.2 Θεωρία Ομοιότητας – Διαστατική Ανάλυση

Η Θεωρία της Ομοιότητας είναι μία εφαρμοσμένη επιστημονική μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως στο σχεδιασμό και την ανάλυση υπό κλίμακα μοντέλων προκειμένου να επιτευχθεί η έννοια της φυσικής ομοιότητας που επιτρέπει τη μετατροπή των πειραματικών αποτελεσμάτων από το μοντέλο στο πρωτότυπο.

### 2.2.1 Βασικές έννοιες της Θεωρίας της Ομοιότητας

Έστω δύο φυσικά συστήματα, που η κατάσταση τους καθορίζεται από μεγέθη που είναι συναρτήσεις του χώρου  $(x, y, z)$  και του χρόνου  $t$ . Τα δύο συστήματα είναι ομόλογα, εάν σε κάθε σημείο  $(x, y, z, t)$  του πρώτου συστήματος αντιστοιχεί ένα σημείο  $(x', y', z', t')$  του δεύτερου συστήματος έτσι που η αντιστοιχία  $(x, y, z, t) \rightarrow (x', y', z', t')$  να είναι ένα προς ένα και συνεχής. Η περίπτωση της ειδικής αντιστοιχίας, όπου ο λόγος των αριθμητικών τιμών των φυσικών μεγεθών μεταξύ ομολόγων σημείων είναι σταθερός, ανεξάρτητος του σημείου, ονομάζεται γραμμική φυσική ομοιότητα ή απλώς φυσική ομοιότητα [57]. Ο σταθερός λόγος αυτός ονομάζεται λόγος κλίμακας του συγκεκριμένου φυσικού μεγέθους.

### 2.2.2 Νόμοι υπό κλίμακα

Με χρήση της Θεωρίας της Ομοιότητας και των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο μπορούν να προκύψουν αντίστοιχοι «Νόμοι υπό κλίμακα», χωρίς να χρειαστεί επίλυση των εξισώσεων. Οι Νόμοι υπό κλίμακα προκύπτουν μέσω απλών μετασχηματισμών αυτών των εξισώσεων. Υπό την προϋπόθεση ότι το μοντέλο υποβάλλεται σε παρόμοιες φυσικές διαδικασίες με το πρωτότυπο, τα συστήματα εξισώσεων για το πρωτότυπο και το μοντέλο είναι ίδια και διαφέρουν μόνο στο δείκτη των ποσοτήτων των φυσικών μεγεθών - ο δείκτης  $F$  (Full scale) συμβολίζει το πρωτότυπο, ενώ ο δείκτης  $M$  (Model) το μοντέλο. Άρα εν γένει, για ένα μέγεθος  $k$  θα ισχύει:

$$\frac{x_{kF}}{x_{kM}} = const = f_k \quad \text{για όλα τα } k \quad (2.1)$$

όπου:  $x_{kF}$  η ποσότητα του μεγέθους  $k$  για το πρωτότυπο,

$x_{kM}$  η ποσότητα του μεγέθους  $k$  για το μοντέλο,

$f_k$  ο λόγος κλίμακας για το μέγεθος  $k$ .

Επομένως, η φυσική ομοιότητα συνεπάγεται την προϋπόθεση ότι οι εξισώσεις για το πρωτότυπο και το μοντέλο διαφέρουν μόνο κατά ένα σταθερό παράγοντα. Σταθμό στη χρήση μοντέλων υπό κλίμακα για τη μελέτη ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων αποτέλεσε η εργασία του G. Sinclair [58] στην οποία τέθηκαν οι θεωρητικές βάσεις για όλες τις μετέπειτα εφαρμογές. Άρα επιλέγοντας ένα γεωμετρικό λόγο κλίμακας ( $p$ ), ο οποίος οδηγεί σε ένα μοντέλο διαχειρίσιμων διαστάσεων και το λόγο κλίμακας ( $\alpha$ ) για το ηλεκτρικό πεδίο, το λόγο κλίμακας ( $\beta$ ) για το μαγνητικό πεδίο και το λόγο κλίμακας ( $\gamma$ ) για το χρόνο να υπολογιστούν οι λόγοι κλίμακας των υπολοίπων μεγεθών:



Φυσικό Μέγεθος	Γενική Περίπτωση	Πρακτική εφαρμογή (αέρας)
Μήκος	$\rho$	$\rho$
Χρόνος	$\gamma$	$\rho$
Ηλεκτρικό πεδίο	$\alpha$	$\alpha$
Μαγνητικό πεδίο	$\beta$	$\alpha$
Διηλεκτρική σταθερά	$\beta\gamma/\rho\alpha$	1
Μαγνητική επιτρεπτότητα	$\alpha\gamma/\rho\beta$	1
Συχνότητα	$1/\gamma$	$1/\rho$
Μήκος κύματος	$\rho$	$\rho$
Ταχύτητα διάδοσης	$\rho/\gamma$	1
Σταθερά διάδοσης	$1/\rho$	$1/\rho$
Αντίσταση	$\alpha/\beta$	1
Χωρητικότητα	$\beta\gamma/\alpha$	$\rho$
Επαγωγή	$\alpha\gamma/\beta$	$\rho$
αγωγιμότητα	$\beta/(\rho\alpha)$	$1/\rho$
τάση	$\alpha\rho$	$\alpha\rho$
ρεύμα	$\beta\rho$	$\alpha\rho$
Κυματική αντίσταση	$\alpha/\beta$	1
Ενεργός επιφάνεια κεραίας	$\rho^2$	$\rho^2$
Κέρδος κεραίας	1	1
*Όλοι οι λόγοι κλίμακας ορίζονται ως το πηλίκο του μεγέθους στο υπό κλίμακα μοντέλο προς το μέγεθος στο πλήρες σύστημα		

Πίνακας 2.1: Σχέσεις μεταξύ των λόγων κλίμακας όλων των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών που προκύπτουν από τις εξισώσεις του Maxwell [58], [59].

Ακολουθώντας την ανάλυση του Frenzel [60] ο οποίος θεωρεί το μήκος και την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ως ανεξάρτητες μεταβλητές, με αντίστοιχους λόγους κλίμακας  $f_l$  και  $f_I$ , προκύπτουν μετά από μετασχηματισμούς οι παρακάτω λόγοι κλίμακας των υπόλοιπων φυσικών ποσοτήτων του προβλήματος (Πίνακας 2.2).

Πεδιακή ένταση		Ηλεκτρικό φορτίο/ ροή	
$f_H = f_E = \frac{f_I}{f_l}$		$f_Q = f_\Phi = f_\Psi = f_I f_l$	
Τάση	Χρόνος	Γεωμετρία	Χαρακτηριστικά υλικού
$f_U = f_V = f_I$	$f_t = f_l$	$f_A = f_l^2$	$f_\sigma = \frac{1}{f_l}$
Πυκνότητες		Παράμετροι	
$f_J = \frac{f_I}{f_l^2}$		$f_L = f_C = f_I$	
$f_B = f_D = \frac{f_I}{f_l}$		$f_R = 1$	
		$f_{R_m} = \frac{1}{f_l}$	

Πίνακας 2.2: Λόγοι κλίμακας όλων των φυσικών ποσοτήτων ενός ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος, συναρτήσει των λόγων κλίμακας μήκους και ρεύματος [60].

### 2.2.3 Διαστατική Ανάλυση

Η μέθοδος της Διαστατικής Ανάλυσης δίνει τη δυνατότητα παραγωγής αδιάστατων μορφών για τους φυσικούς νόμους, γεγονός που διευκολύνει τη δημιουργία φυσικών

μοντέλων. Αυτό συμβαίνει, διότι η φυσική ομοιότητα μεταξύ μοντέλου και πρωτοτύπου συνεπάγεται την ταυτότητα των αδιάστατων μεγεθών τους και αντιστρόφως.

### 2.2.3.1 Αξιώματα Διαστατικής Ανάλυσης

Για τους σκοπούς της Διαστατικής Ανάλυσης τα φυσικά μεγέθη διακρίνονται σε θεμελιώδη και σε παραγόμενα. Στην παρούσα εργασία τα θεμελιώδη μεγέθη που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα: Μήκος  $L$ , Μάζα  $M$  και Χρόνος  $T$ . Η θερμοκρασία, η ένταση του ρεύματος, ο αριθμός στοιχειωδών σωματιδίων και η ένταση φωτεινής πηγής είναι επίσης θεμελιώδη μεγέθη. Έστω ότι συμβολίζεται με  $q_i$  ένα φυσικό μέγεθος, τότε μπορεί να οριστούν τρεις τελεστές για το μέγεθος [57]:

- ο τελεστής  $[ ]$  που εξάγει τις διαστάσεις του μεγέθους, π.χ.  $[8 s] = [M^0 L^0 T^1] = (0, 0, 1)$
- ο τελεστής  $(\sim)$  που εξάγει τη μονάδα μέτρησης, π.χ.  $(\sim 8 s) = s$
- ο τελεστής  $(\underline{\quad})$  που εξάγει την αριθμητική τιμή του, π.χ.  $(\underline{8 s}) = 8$

Ο G. Birkhoff στο σύγγραμμά του "Hydrodynamics" θεμελιώνει αξιωματικά τη Διαστατική Ανάλυση ως ακολούθως [57], [61]:

1. Υπάρχουν θεμελιώδη μεγέθη  $q_i, i = 1, \dots, m$  που σε αλλαγές συστήματος μονάδων μέτρησης, συμπεριφέρονται ως:

$$\frac{q_i'}{q_i} = a_i, a_i > 0 \quad \forall i \quad (2.2)$$

όπου με  $(')$  συμβολίζεται το μέγεθος στο νέο σύστημα μονάδων και  $a_i = \frac{\tilde{q}_i}{q_i}$  είναι ο λόγος των μονάδων μέτρησης.

2. Υπάρχουν παραγόμενα μεγέθη  $Q_j, j = 1, \dots, r$ , που σε αλλαγή συστήματος μονάδων μέτρησης συμπεριφέρονται ως:

$$\frac{Q_j'}{Q_j} = a_1^{b_{j1}} a_2^{b_{j2}} \dots a_m^{b_{jm}} = a^{b_j} \quad (2.3)$$

όπου ορίζονται τα διανύσματα  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ ,  $b_j = (b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm})$  και ισχύει:  $\alpha^{b_j} \stackrel{\text{def}}{=} a_1^{b_{j1}} a_2^{b_{j2}} \dots a_m^{b_{jm}}$ . Τα  $b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jm}$  ονομάζονται διαστάσεις του  $Q_j$ . Αν  $b_{j1} = b_{j2} = \dots = b_{jm} = 0$ , τότε το  $Q_j$  ονομάζεται αδιάστατο.

3. Υπάρχουν φυσικοί νόμοι υπό μορφή μαθηματικών τύπων:

$$f(\underline{Q}_1, \underline{Q}_2, \dots, \underline{Q}_r) = 0 \quad (2.4)$$

4. Η σχέση του 3<sup>ου</sup> αξιώματος (δηλαδή η μορφή  $\Phi$  του φυσικού νόμου) είναι ανεξάρτητη του συστήματος μονάδων μέτρησης (unit free):

$$f(\underline{Q}_1, \underline{Q}_2, \dots, \underline{Q}_r) = 0 \Leftrightarrow f(\underline{Q}_1', \underline{Q}_2', \dots, \underline{Q}_r') = 0 \quad (2.5)$$

δηλαδή ο φυσικός νόμος ακολουθεί την ίδια μαθηματική μορφή οποιοδήποτε σύστημα μονάδων και αν χρησιμοποιηθεί.

Στον Πίνακα 2.3 καταγράφονται ορισμένα παραγόμενα μεγέθη και φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο παράγονται από τα θεμελιώδη και μπορούν να εκφραστούν στο σύστημα βάσης των θεμελιωδών μεγεθών:

Μέγεθος	Μαθηματικός τύπος	Διάσταση	Διαστατικό σύμβολο	Μονάδα μέτρησης
Εμβαδόν	$A = \int dx dy$	$L^2$	$m^2$	---
Όγκος	$V = \int dx dy dz$	$L^3$	$m^3$	---
Συχνότητα	$f = 1/\tau$	$t^{-1}$	$s^{-1}$	Hertz (Hz)
Ταχύτητα	$v = dx/dt$	$Lt^{-1}$	$m s^{-1}$	---
Επιτάχυνση	$a = d^2x/dt^2$	$Lt^{-2}$	$m s^{-2}$	---
Πυκνότητα	$\rho = M/V$	$ML^{-3}$	$kg m^{-3}$	---
Δύναμη	$F = M \cdot a$	$MLt^{-2}$	$kg m s^{-2}$	Newton (N)
Πίεση	$p = F/A$	$ML^{-1}t^{-2}$	$N m^{-2} = kg m^{-1}s^{-2}$	Pascal (Pa)
Έργο/Ενέργεια	$W = \int F dx$	$ML^2t^{-2}$	$N m = kg m^2s^{-2}$	Joule (J)
Ροπή	$T = F \cdot l$	$ML^2t^{-2}$	$N m = kg m^2s^{-2}$	---
Ισχύς	$P = dW/dt$	$ML^2t^{-3}$	$J s^{-1} = kg m^2s^{-3}$	Watt (W)
Φορτίο	$Q = \int I dt$	$It$	$A s$	Coulomb (C)

Πίνακας 2.3: Παραγόμενα μεγέθη, η μαθηματική και διαστατική περιγραφή τους [57], [61].

### 2.2.3.2 Το Θεώρημα Π των Vaschy και Buckingham

Κεντρικό θεώρημα της Διαστατικής Ανάλυσης είναι το Θεώρημα Π που προκύπτει ως συνεπαγωγή των αξιωμάτων 1 έως 4 (Σχέσεις 2.2-2.5) [57], [61]:

“Εστω ότι οι θετικές μεταβλητές  $Q_1, Q_2, \dots, Q_r$  μετασχηματίζονται μετά από αλλαγή συστήματος θεμελιωδών μονάδων μέτρησης σύμφωνα με το Αξίωμα 2 (τα  $Q_j$  συμβολίζουν εδώ την αριθμητική τιμή, δηλαδή παραλείπεται ο τελεστής ( ) για ευκολία). Εστω επίσης  $n \leq m$  ο βαθμός (rank) της μήτρας  $b_{jk}$  (Μήτρα Διαστάσεων, Αξίωμα 2). Τότε οποιοσδήποτε φυσικός νόμος της μορφής  $f(Q_1, Q_2, \dots, Q_r) = 0$  που υπακούει στο Αξίωμα 4 (unit free) είναι ισοδύναμος με έναν τύπο της μορφής:

$$\Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{r-n}) = 0 \quad (2.6)$$

όπου  $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{r-n}$  είναι  $k = r - n$  αδιάστατα μονώνυμα που παράγονται από τις μεταβλητές  $Q_j$ ”.

Ουσιαστικά, σύμφωνα με το Θεώρημα Π, η σχέση που εκφράζει την εξαρτημένη μεταβλητή συναρτήσει των ανεξάρτητων (φυσικός νόμος):

$$Q_{F_1} = f(Q_{F_2}, Q_{F_3}, \dots, Q_{F_r}) \quad (2.7)$$

μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\Pi_{F_1} = \Phi(\Pi_{F_2}, \Pi_{F_3}, \dots, \Pi_{F_{r-n}}) \quad (2.8)$$

Εάν τα φαινόμενα στο πρωτότυπο και στο μοντέλο είναι όμοια ως προς την εξαρτημένη μεταβλητή  $Q_{F_1}$ , τότε η αδιαστατοποιημένη εξαρτημένη μεταβλητή είναι αναλλοίωτη σε αλλαγή κλίμακας, δηλαδή  $\Pi_{F_1} \equiv \Pi_{M_1}$ . Άρα, η παραπάνω ισότητα (2.6) με χρήση της (2.8) γράφεται:

$$\Phi(\Pi_{F_2}, \Pi_{F_3}, \dots, \Pi_{F_{r-n}}) \equiv \Phi(\Pi_{M_2}, \Pi_{M_3}, \dots, \Pi_{M_{r-n}}) \quad (2.9)$$

και για να ισχύει η (2.9) θα πρέπει:

$$\Pi_{F_2} = \Pi_{M_2}, \Pi_{F_3} = \Pi_{M_3}, \dots, \Pi_{F_{r-n}} = \Pi_{M_{r-n}} \quad (2.10)$$

Αυτό σημαίνει ότι προκειμένου να ικανοποιείται η φυσική ομοιότητα ως προς τα εξαρτημένα μεγέθη, θα πρέπει οι  $\Pi$  παράμετροι που ορίζονται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές στο πρωτότυπο (δείκτης F) και στο μοντέλο (δείκτης M) να είναι ίδιες. Η δυνατότητα κατασκευής ενός φυσικού μοντέλου εξαρτάται από το κατά πόσον υπάρχει λύση  $Q_{M_2}, Q_{M_3}, \dots, Q_{M_r}$  που να είναι φυσικά υλοποιήσιμη ή ισοδύναμα από το αν οι σχέσεις (2.10) των  $\Pi$  παραμέτρων των ανεξάρτητων μεταβλητών μπορεί να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Εάν αυτό είναι δυνατό, τότε πρόκειται για μοντέλα υπό συνθήκες πλήρους ομοιότητας.

### 2.2.3.3 Η εφαρμογή του Θεωρήματος $\Pi$ και η κατασκευή του φυσικού μοντέλου

Είναι κατανοητό πλέον ότι το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου της Διαστατικής Ανάλυσης είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται η ακριβής γνώση των εξισώσεων που περιγράφουν και συνδέουν τα μεγέθη, ούτε φυσικά και η επίλυσή τους. Αρκεί η καταγραφή και ο διαχωρισμός των μεγεθών που συμμετέχουν σε ένα πρόβλημα, σε θεμελιώδη και παραγόμενα για την εφαρμογή του Θεωρήματος  $\Pi$  και τη δημιουργία των αδιάστατων  $\Pi$  παραμέτρων που χρειάζονται για την επίλυση του προβλήματος. Συγκεντρωτικά, η διαδικασία για την εφαρμογή του Θεωρήματος  $\Pi$ , περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Φαινομενολογία: παρατήρηση του φαινομένου και προσδιορισμός των φυσικών μεγεθών που συμμετέχουν, καθώς και της σχέσης που τα συνδέει.
2. Διαχωρισμός των φυσικών μεγεθών σε ανεξάρτητες μεταβλητές (βρίσκονται στο δεύτερο μέλος της Σχέσης 2.7), και μια εξαρτημένη μεταβλητή (βρίσκεται στο πρώτο μέλος της Σχέσης 2.7).
3. Περιγραφή των διαστάσεων όλων των φυσικών μεγεθών του προβλήματος με τη βοήθεια των θεμελιωδών μεγεθών (π.χ.: μάζα M, μήκος L, χρόνος T). Για παράδειγμα η πυκνότητα  $\rho$  θα περιγραφόταν ως εξής:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow [\rho] = [M^1 L^{-3} T^0] = (1, -3, 0) \quad (2.11)$$

4. Κατασκευή της μήτρας διαστάσεων: Ο βαθμός (rank)  $n$  της μήτρας διαστάσεων προσδιορίζει από πόσα μεγέθη θα αποτελείται η διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα, υποσύνολο των φυσικών μεγεθών του προβλήματος που εκλέγεται μεταξύ των

ανεξάρτητων μεταβλητών έτσι, ώστε ο αδιάστατος φυσικός νόμος που θα προκύψει να μην περιέχει πεπλεγμένα την εξαρτημένη μεταβλητή.

5. Προσδιορισμός των Π παραμέτρων: Ο αριθμός των Π παραμέτρων που καθορίζουν το φαινόμενο, προκύπτει αν αφαιρεθεί ο βαθμός της μήτρας διαστάσεων από το συνολικό αριθμό μεγεθών του προβλήματος. Οι Π παράμετροι επομένως είναι τόσες όσα και τα μεγέθη που δεν συμπεριλαμβάνονται στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα.
6. Υπολογισμός των Π παραμέτρων: Με βάση το Θεώρημα Π, οι διαστάσεις των Π παραμέτρων πρέπει να είναι ίσες με 0. Για να ισχύει αυτό, τα μεγέθη της διαστατικά ανεξάρτητης ομάδας πρέπει να υψωθούν σε "άγνωστους" εκθέτες έτσι, ώστε το γινόμενο τους επί το μέγεθος που προσδιορίζει η παράμετρος Π να δίνει έναν αδιάστατο αριθμό. Έτσι προκύπτει ένα σύστημα  $n$  εξισώσεων (όπου  $n$  ο βαθμός της μήτρας διαστάσεων) με  $n$  αγνώστους, τους "άγνωστους" εκθέτες. Επιλύοντας το σύστημα, προκύπτουν οι εκθέτες και κατ' επέκταση το συνολικό γινόμενο που δίνει την αντίστοιχη Π παράμετρο.

Καταλήγοντας, τρία είναι τα διαδοχικά στάδια για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών του πρωτοτύπου από εκτέλεση πειραμάτων σε μοντέλο:

1. Φαινομενολογική έρευνα και διαστατική ανάλυση του φαινομένου με σκοπό τον καθορισμό των αδιάστατων ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών και των αντίστοιχων ανεξάρτητων και εξαρτημένων Π παραμέτρων.
2. Εξίσωση των ανεξάρτητων Π παραμέτρων στο μοντέλο και το πρωτότυπο και υπολογισμός των ανεξάρτητων μεταβλητών που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του μοντέλου. Έλεγχος εφικτότητας των συνθηκών εκτέλεσης των πειραμάτων υπό κλίμακα.
3. Εκτέλεση πειραμάτων στο μοντέλο και μέτρηση της τιμής των εξαρτημένων διαστατών παραμέτρων. Υπολογισμός της τιμής των εξαρτημένων διαστατών παραμέτρων για το πρωτότυπο με χρήση των Π παραμέτρων που έχουν υπολογιστεί. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μεταφορά των μετρήσεων του μοντέλου στις αντίστοιχες τιμές του πρωτοτύπου.

## 2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραμάτων υπό κλίμακα

Η Θεωρία της Ομοιότητας έχει εφαρμοστεί από αρκετούς ερευνητές όπως οι Korsuncev [62], Oettle[63], Popolansky [64], Chisholm και Janischewskyj [64], Rudenberg [65], P.Chowdhuri [66] και Jinliang He et al. [67] για τη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς συστημάτων γείωσης. Επίσης, η διεξαγωγή μετρήσεων σε υπό κλίμακα δοκίμια τοποθετημένα εντός δεξαμενής με ηλεκτρολυτικό διάλυμα απαντάται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία ως μέθοδος για τη μελέτη της συμπεριφοράς πλεγμάτων γείωσης με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις μελέτες των R. Caldecott και D. Kasten [68], I.F. Gonos, F.V. Topalis και I.A. Stathopoulos [69], A. El-Morshedy, A.G. Zeitoun και M.M. Ghourab [70] και των H.R. Armstrong και L.J. Simpkin [71]. Πειράματα σε υπό κλίμακα μοντέλα έχουν εφαρμοστεί και για τη μελέτη φαινομένων που αναπτύσσονται σε κτηριακές εγκαταστάσεις και σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας λόγω κεραυνικού πλήγματος, όπως οι έρευνες των Heidler et al. [72], [73], [74] και των Piantini, Janischewskyj, Borghetti et al. [59].

## 2.4 Αντίσταση γείωσης υπό κρουστικό ρεύμα

Η αντίσταση γείωσης  $R$  χαμηλής συχνότητας δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.12)$$

Όπου  $V$  το ηλεκτρικό δυναμικό μεταξύ των ηλεκτροδίων γείωσης με σημείο αναφοράς την απομακρυσμένη γη. Συνεπώς, ο στόχος ελαχιστοποίησης της τάσης  $V$  επιτυγχάνεται μέσω μιας σχεδίασης που να ελαχιστοποιεί την αντίσταση  $R$ . Ωστόσο, στην περίπτωση κεραυνού η κατάσταση είναι διαφορετική. Το ρεύμα  $I$  που εγχέεται στα ηλεκτρόδια γείωσης είναι ένας γρήγορα μεταβαλλόμενος ηλεκτρικός παλμός με υψηλότερες μέγιστες τιμές. Η δυναμική απόκριση των ηλεκτροδίων γείωσης, που υπόκεινται σε τέτοιους ηλεκτρικούς παλμούς, επηρεάζεται κυρίως από δύο φυσικές διαδικασίες, οι οποίες σχετίζονται με τις ακόλουθες ιδιότητες των κυματομορφών των παλμών αυτών:

- 1) Ο ιονισμός του εδάφους, που βρίσκεται γύρω από το ηλεκτρόδιο, ο οποίος σχετίζεται με την ένταση του ηλεκτρικού παλμού. Αυτή η συμπεριφορά του εδάφους εξαρτάται από το χρόνο και έχει μη γραμμικό χαρακτήρα. Στην περίπτωση παλμού με υψηλή τιμή μεγίστου, το ηλεκτρικό πεδίο στα ηλεκτρόδια γείωσης μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από τη διηλεκτρική αντοχή του εδάφους – για την ακρίβεια των μικροσκοπικών διακένων αέρα μεταξύ των κόκκων σε επίπεδο μικροδομής του εδάφους - οδηγώντας σε διηλεκτρική κατάρρευση και σπινθηρισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης γείωσης, ουσιαστικά λόγω αύξησης του φαινόμενου μεγέθους του ηλεκτροδίου. Συνεπώς το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε βελτίωση της επίδοσης του συστήματος γείωσης σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλών ρευμάτων [75] - [80].
- 2) Η διάδοση του κεραυνικού παλμού κατά μήκος του ηλεκτροδίου, που σχετίζεται με το χρόνο μετώπου του παλμού και έχει να κάνει με το ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου. Είναι ο παράγοντας που εξαρτάται από τη συχνότητα και δηλώνει την επαγωγική συμπεριφορά του εδάφους. Όταν ηλεκτρικοί παλμοί με μικρούς χρόνους μετώπου εγχέονται στο ηλεκτρόδιο, λόγω της περιορισμένης ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρικού παλμού κατά μήκος του ηλεκτροδίου, μόνο ένα μικρό τμήμα του ηλεκτροδίου είναι αποτελεσματικό στην εκφόρτιση του ρεύματος προς τη γη, στις πρώτες στιγμές του παλμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες τιμές διαρροής ρευμάτων και δυναμικών κοντά στο σημείο έγχυσης. Στην περίπτωση αυτή, η επίδοση της γείωσης μπορεί να χειροτερεύσει σε σχέση με τις περιπτώσεις χαμηλών ρευμάτων [75], [76].

Μελετώντας τη διάδοση δυναμικού κατά μήκος του ηλεκτροδίου (αγνοώντας τον ιονισμό), ως απόκριση σε ένα κρουστικό ηλεκτρικό παλμό που εγχέεται στο ένα άκρο του, διακρίνονται δύο περίοδοι [75], [76]:

- 1) η "κρουστική" περίοδος - προτού ο παλμός φτάσει στο άλλο άκρο του ηλεκτροδίου, όπου μόνο ένα μέρος του ηλεκτροδίου συνεισφέρει αποτελεσματικά στην εκφόρτιση του ρεύματος στη γη και χαρακτηρίζεται από μεγάλες τιμές και ανομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού.

- 2) την περίοδο μόνιμης κατάστασης - αμέσως μετά την άφιξη του παλμού στο άλλο άκρο του ηλεκτροδίου, κατά την οποία ολόκληρο το ηλεκτρόδιο συμβάλλει στην εκφόρτιση του ρεύματος στη γη και χαρακτηρίζεται από ομοιόμορφη κατανομή του δυναμικού.

### 2.4.1 Υπολογισμός μεταβατικής αντίστασης γείωσης

Το μοντέλο υπολογισμού της μεταβατικής αντίστασης γείωσης που υιοθετήθηκε στην παρούσα πειραματική διερεύνηση περιλαμβάνει τόσο το φαινόμενο του ιονισμού του εδάφους, όσο και τα φαινόμενα διάδοσης (ενεργό μήκος ηλεκτροδίου), προκειμένου να συμπεριληφθούν στη Διαστατική Ανάλυση κατά το δυνατόν περισσότερα μεγέθη που υπεισέρχονται στο φαινόμενο και ειδικά αυτοί οι δύο αντιτιθέμενοι μηχανισμοί.

Θεωρείται αρχικά ένας παλμός ρεύματος  $i(t)$  που εγχέεται στα ηλεκτρόδια γείωσης και  $v(t)$  το ηλεκτρικό δυναμικό στο σημείο έγχυσης με σημείο αναφοράς την απομακρυσμένη γη. Η κρουστική σύνθετη αντίσταση  $z(t)$  ορίζεται από τη σχέση:

$$z(t) = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.13)$$

όπου  $z(t)$ ,  $V(t)$  και  $I(t)$  οι χρονικές συναρτήσεις αντίστασης, τάσης και έντασης ρεύματος αντίστοιχα. Για τον καθορισμό της μεταβατικής αντίστασης υπάρχουν τέσσερις παράμετροι οι οποίες μπορούν να την εκφράσουν ως εξής [81]:

$$Z_1 = \max(z(t)) \quad (2.14)$$

$$Z_2 = V_m/I_{vm} \quad (2.15)$$

$$Z_3 = V_m/I_m \quad (2.16)$$

$$Z_4 = V_{im}/I_m \quad (2.17)$$

όπου  $\max(z(t))$  είναι η μέγιστη τιμή της χρονομεταβλητής κρουστικής σύνθετης αντίστασης,  $V_m$  η μέγιστη τιμή τάσης,  $I_m$  η μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος,  $V_{im}$  η τάση τη στιγμή κατά την οποία το ρεύμα είναι μέγιστο και  $I_{vm}$  η ένταση ρεύματος τη στιγμή κατά την οποία η τάση είναι μέγιστη. Ωστόσο, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιούνται οι δύο συνηθέστεροι ορισμοί της μεταβατικής αντίστασης:

$$Z = Z_3 \quad \text{ή} \quad (2.18)$$

$$Z = Z_4 \quad (2.19)$$

Η μεταβατική αντίσταση  $Z$  συνδέεται με την αντίσταση γείωσης χαμηλής συχνότητας  $R$  μέσω του αδιάστατου κρουστικού συντελεστή  $A$  με τη σχέση:

$$A = \frac{Z}{R} \quad (2.20)$$

Σε συνθήκες ρευμάτων χαμηλής συχνότητας και χαμηλής έντασης, ισχύει  $Z = R$ , και συνεπώς  $A = 1$ . Είναι ξεκάθαρο ότι για τιμές του  $A$  μεγαλύτερες της μονάδας υπάρχει χειρότερη κρουστική επίδοση, ενώ για τιμές μικρότερες της μονάδας υπάρχει βελτιωμένη

κρουστική επίδοση σε σχέση με την επίδοση της γείωσης σε χαμηλές συχνότητες. Ο κρουστικός συντελεστής  $A$  χωρίς να ληφθεί υπόψη ο ιονισμός του εδάφους, υπολογίζεται ως εξής [75], [76]:

$$A = 1 \quad (\text{για } l \leq l_{eff}) \quad (2.21)$$

$$A = \alpha l + \beta \quad (\text{για } l \geq l_{eff}) \quad (2.22)$$

όπου το ενεργό μήκος του ηλεκτροδίου  $l_{eff}$  (σε  $m$ ) προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$l_{eff} = \frac{1-\beta}{\alpha} l \quad (2.23)$$

και για τους συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  μπορούν να εφαρμοστούν οι εμπειρικοί τύποι:

$$\alpha = 0.025 + \exp[-0.82(\rho T_1)^{0.257}] \quad (2.24)$$

$$\beta = 0.17 + \exp[-0.22(\rho T_1)^{0.555}] \quad (2.25)$$

όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους [ $\Omega \cdot m$ ] και  $T_1$  [s] ο χρόνος ανόδου της κυματομορφής του ρεύματος. Οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  δεν έχουν καμία φυσική σημασία και έχουν προκύψει από αποτελέσματα προσομοίωσης σε υπολογιστή.

Ο κρουστικός συντελεστής  $A_i$ , λαμβάνοντας υπόψη τόσο το φαινόμενο του ιονισμού, όσο και την επίδραση του ενεργού μήκους, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A_i = \frac{1}{\sqrt{1+I_m/I_g}} + A - 1, \quad I_g = \frac{E_0 \rho}{2\pi R^2} \quad (2.26)$$

όπου  $I_m$  είναι η μέγιστη τιμή έντασης ρεύματος του παλμού [ $A$ ],  $E_0$  η κρίσιμη ένταση έναρξης ιονισμού [ $V/m$ ],  $A$  ο κρουστικός συντελεστής χωρίς να ληφθεί υπόψη ο ιονισμός και  $R$  η αντίσταση γείωσης μόνιμης κατάστασης [ $\Omega$ ]. Μία ερμηνεία των τιμών που μπορεί να πάρει ο κρουστικός συντελεστής  $A_i$  είναι [76]:

- $A_i < 1$ : η κρουστική επίδοση βελτιώνεται λόγω του ιονισμού (έντονη μη γραμμική ωμική συμπεριφορά)
- $A_i = 1$ : η κρουστική επίδοση είναι ίδια με αυτή στη μόνιμη κατάσταση (γραμμική ωμική συμπεριφορά)
- $A_i > 1$ : η κρουστική επίδοση χειροτερεύει λόγω επίδρασης  $l_{eff}$  (έντονη επαγωγική συμπεριφορά)

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι ο τύπος (2.26) αμελεί τυχόν επιδράσεις του ιονισμού στη χωρητική συμπεριφορά. Ωστόσο αυτό μπορεί να θεωρηθεί μια ασφαλής και συντηρητική προσέγγιση, καθώς η χωρητική συμπεριφορά βελτιώνει την κρουστική επίδοση.

## 2.4.2 Υπολογισμός Π-παραμέτρων για ταινία γείωσης

Εφαρμόζοντας το Θεώρημα Π της Διαστατικής Ανάλυσης στον τύπο (2.26) για γεωμετρία ταινίας γείωσης γίνεται εύρεση των λόγων κλίμακας των φυσικών μεγεθών που αφορούν στα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν στο πείραμα. Στην περίπτωση χαμηλής



συχνότητας και χαμηλής έντασης ρεύματος, η αντίσταση  $R$  ταινίας γείωσης τοποθετημένης σε βάθος  $h = 0,5 \div 1,0 \text{ m}$  δίνεται από τον τύπο:

$$R (\sigma \varepsilon \Omega) = \frac{\rho}{\pi l} \ln \left( \frac{2l}{d} \right) \quad (2.27)$$

όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του εδάφους [ $\Omega \cdot \text{m}$ ],  $l$  το μήκος της ταινίας γείωσης [ $\text{m}$ ] και  $d$  το πλάτος της ταινίας [ $\text{m}$ ]. Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.20), (2.26) και (2.27) η μεταβατική αντίσταση γείωσης  $Z$  μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση των εξής μεγεθών:

$$Z = f(d, l, \rho, I_m, E_0, T_1) \quad (2.28)$$

Τα μεγέθη  $d, l, \rho, I_m, E_0, T_1$  είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, ενώ η μεταβατική αντίσταση  $Z$  η εξαρτημένη μεταβλητή (συνολικό πλήθος μεταβλητών  $r = 7$ ). Εκφράζοντας τις διαστάσεις των παραπάνω φυσικών μεγεθών στο σύστημα βάσης των θεμελιωδών μεγεθών, προκύπτει η μήτρα των διαστάσεων:

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -3 & -2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Ο βαθμός (rank) της μήτρας των διαστάσεων είναι 4 ( $\Rightarrow n = 4$  διαστατικά ανεξάρτητα μεγέθη). Επομένως, οι  $\Pi$  παράμετροι που θα πρέπει να υπολογιστούν είναι:

$$k = r - n = 7 - 4 = 3 \text{ } \Pi - \text{παράμετροι} \quad (2.30)$$

Επιλέγοντας ως διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα το υποσύνολο  $[\rho, I_m, l, T_1]$  μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών πρέπει να προσδιοριστεί η αντίστοιχη  $\Pi$  παράμετρος για καθεμία από τις υπόλοιπες μεταβλητές [82]:

- 1<sup>η</sup>  $\Pi$  παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος  $Z$ ):

$$\Pi_1 = Z \cdot \rho^{-1} \cdot l^1 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (2.31)$$

- 2<sup>η</sup>  $\Pi$  παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος  $d$ ):

$$\Pi_2 = d \cdot l^{-1} = \frac{d}{l} \quad (2.32)$$

- 3<sup>η</sup>  $\Pi$  παράμετρος (για το φυσικό μέγεθος  $E_0$ ):

$$\Pi_3 = E_0 \cdot \rho^{-1} \cdot I_m^{-1} \cdot l^2 = \frac{E_0 \cdot l^2}{\rho \cdot I_m} \quad (2.33)$$

### 2.4.3 Λόγοι κλίμακας για ταινία γείωσης

Έχοντας υπολογίσει τις  $\Pi$ -παραμέτρους, μπορούν πλέον να προσδιοριστούν οι λόγοι κλίμακας ( $K_x$  ο λόγος κλίμακας για το μέγεθος  $x$ ) για τα φυσικά μεγέθη του προβλήματος. Σύμφωνα με το Θεώρημα  $\Pi$ , για να ικανοποιηθεί η φυσική ομοιότητα, θα πρέπει οι  $\Pi$ -

παράμετροι να είναι ίσες για το μοντέλο και το πρωτότυπο. Συνεπώς, συμβολίζοντας με δείκτη **M** (model) τα μεγέθη που αντιστοιχούν στο **μοντέλο** και με δείκτη **F** (full scale) αυτά που αντιστοιχούν στο **πρωτότυπο**, πρέπει οι λόγοι κλίμακας να συνδέονται ως εξής [82]:

$$\bullet \quad \Pi_{1F} = \Pi_{1M} \Rightarrow \frac{Z_F \cdot l_F}{\rho_F} = \frac{Z_M \cdot l_M}{\rho_M} \Rightarrow \frac{Z_F}{Z_M} = \frac{\rho_F}{\rho_M} \cdot \frac{l_M}{l_F} \Rightarrow K_Z = \frac{K_\rho}{K_l} \Rightarrow K_Z = \frac{1}{K_\sigma \cdot K_l} \quad (2.34)$$

$$\bullet \quad \Pi_{2F} = \Pi_{2M} \Rightarrow \frac{a_F}{l_F} = \frac{a_M}{l_M} \Rightarrow \frac{a_F}{a_M} = \frac{l_F}{l_M} \Rightarrow K_a = K_l = K_d \quad (2.35)$$

$$\bullet \quad \Pi_{3F} = \Pi_{3M} \Rightarrow \frac{E_{0F} \cdot l_F^2}{\rho_F \cdot l_{mF}} = \frac{E_{0M} \cdot l_M^2}{\rho_M \cdot l_{mM}} \Rightarrow \frac{E_{0F}}{E_{0M}} \cdot \left(\frac{l_F}{l_M}\right)^2 = \frac{\rho_F}{\rho_M} \cdot \frac{l_{mF}}{l_{mM}} \Rightarrow K_{E_0} K_l^2 = K_\rho K_{l_m} \quad (2.36)$$

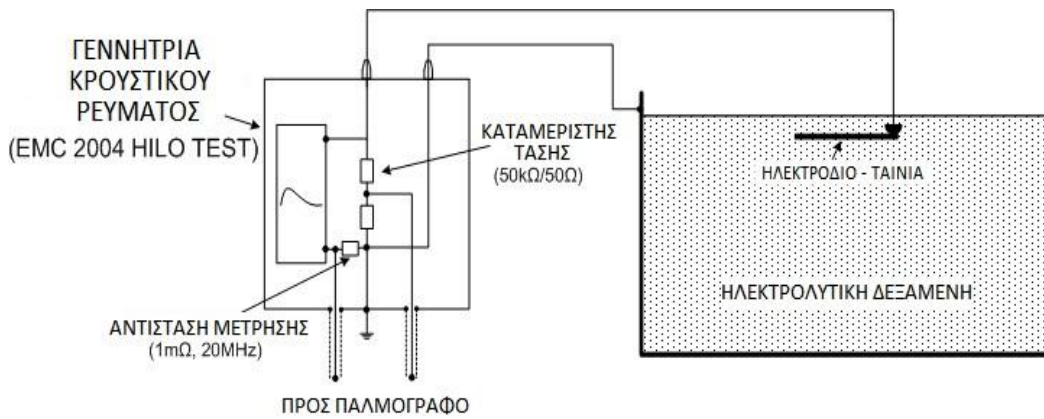
## 2.5 Πειραματική διαδικασία

Στην ακόλουθη ενότητα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη και ο εξοπλισμός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των μετρήσεων. Στη συνέχεια, περιγράφεται αναλυτικά η προεργασία και η διαδικασία λήψης των μετρήσεων.

### 2.5.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης – Εξοπλισμός

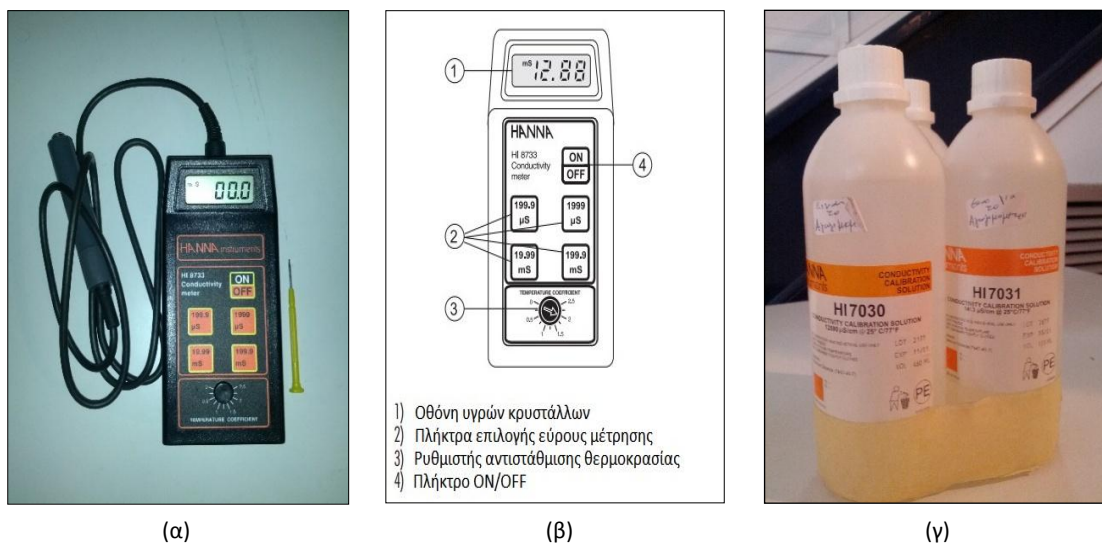
Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος εξοπλισμός ο οποίος απεικονίζεται στα Σχήματα 2.9-2.12, ενώ η συνολική συνδεσμολογία της πειραματικής διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8:

- Δεξαμενή: Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε μια μεταλλική δεξαμενή διαστάσεων 2m x 1m x 0.5m, γεμάτη με ηλεκτρολυτικό διάλυμα.
- Κρουστική γεννήτρια ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004, η οποία παράγει ρεύματα κυματομορφής 8/20  $\mu\text{s} \pm 20\%$  με μέγιστη τιμή 2-25 kA  $\pm 5\%$ , ρυθμιζόμενη αναλόγως με την τάση φόρτισης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0.2 – 10 kV  $\pm 2\%$ . Διαθέτει δύο εξόδους, οι οποίες μέσω ενός καταμεριστή με λόγο καταμερισμού 1000:1 και μίας αντίστασης μέτρησης 1m $\Omega$  δίνουν αντιστοίχως την τάση και το ρεύμα εξόδου.
- Παλμογράφος Tektronix TDS 2014C (με 4 κανάλια εύρους ζώνης 100MHz και ρυθμού δειγματοληψίας 2GS/s) για την καταγραφή των κυματομορφών τάσης και ρεύματος στο άκρο των δοκιμών
- Αγωγιμόμετρο HANNA Instruments 8733 με μέγιστη κλίμακα μέτρησης 0.0 ως 199.9 mS/cm  $\pm 1\%$  για την καταγραφή της αγωγιμότητας του διαλύματος νερού μέσα στη δεξαμενή και πρότυπο διάλυμα για την επαλήθευση-ρύθμιση του αγωγιμομέτρου (για τις τιμές αγωγιμότητας στις οποίες διεξήχθη το πείραμα, το κατάλληλο διάλυμα ρύθμισης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το HI 7030 (12880  $\mu\text{S}/\text{cm}$  στους 25°C).
- Βαρόμετρο Testo 511 και Θερμόμετρο-Υγρόμετρο OMEGAETTE HH314 για την καταγραφή των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων και ειδικότερα της θερμοκρασίας, η οποία επηρεάζει την αγωγιμότητα του διαλύματος.



**Σχήμα 2.8:** Πειραματική διάταξη για τη μέτρηση της μεταβατικής αντίστασης γείωσης ηλεκτροδίων εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής.

- Αγωγοί για τη σύνδεση των δοκιμών και της δεξαμενής με τη γεννήτρια: για την έγχυση του κρουστικού ρεύματος από τη γεννήτρια στο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε αγωγός με διατομή  $4\text{mm}^2$ , ενώ στην επιστροφή συνδέθηκε το σώμα της δεξαμενής με τον άλλο δέκτη της γεννήτριας με αγωγό διατομής  $50\text{mm}^2$ .
- Δοκίμια: Τα ηλεκτρόδια στα οποία γίνεται έγχυση του κρουστικού ρεύματος είναι χάλκινες ταινίες γείωσης. Επελέγησαν πολλαπλάσιες διαστάσεις ώστε να προκύπτουν όσο το δυνατόν περισσότεροι ακέραιοι γεωμετρικοί λόγοι κλίμακας κατά τις διάφορες συγκρίσεις, ενώ για τον καθορισμό του μέγιστου δοκιμίου ακολουθήθηκε η εμπειρική πρόταση προηγούμενων ερευνητών η μέγιστη διάσταση της δεξαμενής να είναι τουλάχιστον τριπλάσια σε σχέση με το δοκίμιο. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν τα εξής δοκίμια (Σχήμα 2.12): **20cm x 2cm, 30cm x 3cm, 40cm x 4cm και 60cm x 6cm.**



**Σχήμα 2.9:** (α) Αγωγιμόμετρο HANNA Instruments 8733 (β) λειτουργική περιγραφή (γ) πρότυπα διαλύματα ρύθμισης.



(α)



(β)

Σχήμα 2.10: (α) Βαρόμετρο Testo 511 (β) Θερμόμετρο-Υγρόμετρο OMEGAETTE HH314.



(α)



(β)

Σχήμα 2.11: (α) Κρουστική γεννήτρια ρεύματος HILO-TEST:EMC-2004 (β) Παλμογράφος Tektronix TDS 2014C.



Σχήμα 2.12: Τα δοκίμια (χάλκινες ταινίες γείωσης) που τοποθετούνται στη δεξαμενή.

## 2.5.2 Διαδικασία μετρήσεων

### 2.5.2.1 Προετοιμασία

Το θαλασσινό νερό έχει αγωγιμότητα της τάξης των 5S/m. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο ακραίες αγωγιμότητες: **0.08 S/m** τιμή ιδιαίτερα μικρή που αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα του πόσιμου νερού βρύσης και **4 S/m** τιμή που πλησιάζει την

περίπτωση του θαλασσινού νερού -και στην οποία αναμένεται το εγχεόμενο στη διάταξη ρεύμα να είναι μεγαλύτερο αυξάνοντας την πιθανότητα να παρατηρηθεί και να μελετηθεί το φαινόμενο του ιονισμού- αλλά και σε δύο ενδιαμέσες τιμές αγωγιμότητας, 1 S/m και 2 S/m, ώστε να γίνουν περισσότερες συγκρίσεις.

Πριν τη ρύθμιση της αγωγιμότητας απαιτείται μέτρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος και ρύθμιση του αγωγιμομέτρου πριν τη χρήση του, ώστε να καταγράφει την πραγματική αγωγιμότητα του διαλύματος. Το πρώτο βήμα για την επίτευξη της εκάστοτε επιθυμητής αγωγιμότητας του διαλύματος είναι η πλήρωση της δεξαμενής με νερό βρύσης (περίπου έως τα 44cm από τα 50cm ύψους της δεξαμενής). Σε ένα δεύτερο μικρότερο δοχείο διαλύεται μερική ποσότητα ιωδιούχου αλατιού μέσα σε νερό και προστίθεται στη δεξαμενή, αναδεύοντας εκ νέου το τελικό διάλυμα. Μετρώντας τη νέα αγωγιμότητα του συνολικού διαλύματος με το αγωγιμόμετρο - αφού έχει προηγηθεί η ρύθμισή του - επαναλαμβάνεται η προσθήκη αλατιού όσες φορές είναι αναγκαίο έως ότου το συνολικό διάλυμα της δεξαμενής να αποκτήσει την επιθυμητή αγωγιμότητα.

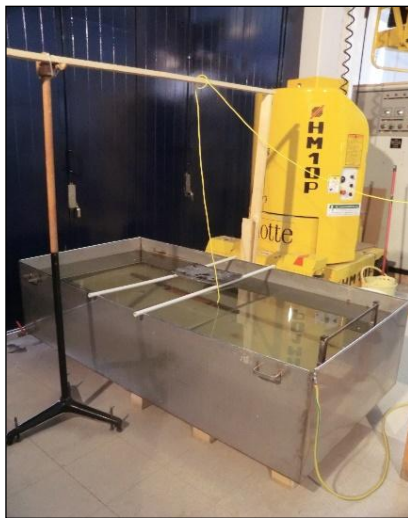
Καταγραφή της ακριβούς τιμής της αγωγιμότητας του διαλύματος γινόταν καθημερινά πριν την έναρξη των μετρήσεων, διότι αλλαγές στις συνθήκες του περιβάλλοντος προκαλούν ανεπαίσθητες αλλαγές και στην τιμή της αγωγιμότητας. Εκτός αυτού πριν την έναρξη των μετρήσεων κάθε ημέρας, αλλά και σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκειά της, είναι απαραίτητη και η ανάδευση του διαλύματος για την επίτευξη ομοιογένειας, ακολουθούμενη από ένα μικρό διάστημα αναμονής ώστε να επέλθει η επιθυμητή ισορροπία στο διάλυμα.

Σημαντικό βήμα της προετοιμασίας για την εκτέλεση του πειράματος αποτελεί το στήσιμο της πειραματικής διάταξης. Για την τοποθέτηση του δοκιμίου στο κατάλληλο σημείο της δεξαμενής χρησιμοποιήθηκαν πλαστικές ράβδοι κατά το πλάτος της δεξαμενής, οι οποίες στερεώθηκαν με εσοχές στα δύο εκατέρωθεν τοιχώματα. Αυτές οι ράβδοι χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία στήριξης από τα οποία κρεμάστηκαν, με τη βοήθεια νήματος, τα εκάστοτε ηλεκτρόδια. Για την ισορρόπηση του δοκιμίου σε θέση, ώστε να μην επηρεάζεται από το καλώδιο, χρησιμοποιήθηκε μια ξύλινη κατασκευή σε σχήμα μονόζυγου (Σχήμα 2.13).

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι, το βάθος του ηλεκτροδίου δεν υπεισέρχεται στους λόγους κλίμακας που προέκυψαν από τις θεωρητικές σχέσεις για την ταινία γείωσης. Ωστόσο διατηρήθηκε ο λόγος κλίμακας  $K_l$  του μήκους και του πλάτους και στο βάθος, ώστε να εξασφαλίζεται η γενικότερη γεωμετρική ομοιότητα μεταξύ των μοντέλων. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο μηχανισμός μηχανικής στήριξης του δοκιμίου και η συνολική συνδεσμολογία της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 2.13: Μηχανισμός στήριξης ηλεκτροδίου μέσα στη δεξαμενή.



(α)



(β)

Σχήμα 2.14: (α) Μηχανισμός στήριξης του καλωδίου τροφοδότησης (β) συνολική εικόνα της διάταξης.

### 2.5.2.2 Λήψη μετρήσεων

Στόχος των μετρήσεων είναι η πειραματική επιβεβαίωση των θεωρητικών τύπων για τους λόγους κλίμακας των μεγεθών που υπεισέρχονται στο πρόβλημα. Με αφετηρία τη σχέση (2.36) η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους ευκολίας:

$$K_{E_0} K_l^2 = K_\rho K_{I_m} \quad (2.37)$$

ελήφθησαν μετρήσεις της μεταβατικής αντίστασης γείωσης σε συγκεκριμένες τιμές ρεύματος για κάθε συνδυασμό αγωγιμότητας-ηλεκτροδίου, προκειμένου να υλοποιηθούν δύο σενάρια σύγκρισης των αποτελεσμάτων: συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων για σταθερή αγωγιμότητα  $\sigma$  και συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων για σταθερό μήκος ηλεκτροδίου  $l$ .

#### 1. Συγκρίσεις μεταξύ ηλεκτροδίων, για σταθερή αγωγιμότητα

Θεωρώντας ότι με σταθερή αγωγιμότητα παραμένει σταθερή και η κρίσιμη ένταση ιονισμού, ( $K_{E_0} = K_\rho = 1$ ), η παραπάνω σχέση (2.37) παίρνει την απλούστερη μορφή  $K_l^2 = K_{I_m}$ . Συνεπώς, οι απαιτούμενες τιμές ρεύματος στις οποίες πρέπει να γίνουν μετρήσεις αξιοποιήσιμες για το συγκεκριμένο σενάριο σύγκρισης εξαρτώνται

αποκλειστικά από το λόγο των μηκών των δοκιμών και προσδιορίζονται με τα ακόλουθα βήματα:

- Υπολογίζεται για κάθε ηλεκτρόδιο ο λόγος μήκους του ως προς τα υπόλοιπα.
- Επιλέγονται ορισμένες τιμές ρεύματος  $I_m$ , ξεκινώντας από τα μικρότερα στο μέγεθος ηλεκτρόδια και πηγαίνοντας προς τα μεγαλύτερα (συνήθως με βήμα 100A, ωστόσο σε περιπτώσεις που δεν προκύπτουν επαρκείς μετρήσεις, το βήμα μειώνεται στα 50A)
- Για καθεμία από τις αρχικές τιμές των  $I_m$  του προηγούμενου βήματος, προκύπτει ένα αντίστοιχο  $I_m$  για τα άλλα ηλεκτρόδια από το λόγο  $K_{I_m}$ .
- Επαναλαμβάνοντας τα παραπάνω βήματα για κάθε δοκίμιο (εκτός του 60x6cm, του οποίου οι απαιτούμενες τιμές προκύπτουν από τους λόγους  $K_{I_m}$  με τα προηγούμενα ηλεκτρόδια) καθορίζονται τα επίπεδα ρεύματος προκειμένου να είναι δυνατές οι συγκρίσεις όλων των ηλεκτροδίων μεταξύ τους.

## 2. Συγκρίσεις μεταξύ αγωγιμοτήτων, για σταθερό μήκος ηλεκτροδίου

Για συγκρίσεις μεταξύ δύο αγωγιμοτήτων για το ίδιο ηλεκτρόδιο, θα ισχύει για το λόγο μηκών,  $K_l = 1$ . Επίσης κάνοντας την παραδοχή ότι η κρίσιμη ένταση ιονισμού  $E_0$  παραμένει σταθερή ( $K_{E_0} = 1$ ) ο τύπος (2.37) παίρνει τη μορφή:

$$K_\rho K_{I_m} = 1 \xrightarrow{\sigma=1/\rho} K_\sigma = K_{I_m} \quad (2.38)$$

Με βάση αυτό τον κανόνα, ξεκινώντας από τις τιμές ρεύματος στις οποίες είχαν γίνει μετρήσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο για  $\sigma=1\text{S/m}$ , προέκυψαν οι αντίστοιχες τιμές ρεύματος (διπλάσιες) για την αγωγιμότητα  $\sigma=2\text{S/m}$  και (τετραπλάσιες) για  $\sigma=4\text{S/m}$ .

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διευκρινιστούν τα εξής: Η σειρά με την οποία ρυθμίστηκε η αγωγιμότητα και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις ήταν διαδοχικά  $\sigma=1\text{S/m}$ ,  $\sigma=2\text{S/m}$ ,  $\sigma=0.08\text{S/m}$  και  $\sigma=4\text{S/m}$ . Ειδικά για την περίπτωση  $\sigma=0.08\text{S/m}$  ελέγχθηκαν μόνο τα ηλεκτρόδια 30x3cm και 40x4cm και οι αναγκαίες τιμές ρεύματος προσδιορίστηκαν με βάση τις ήδη υπάρχουσες μετρήσεις για τις προηγούμενες αγωγιμότητες  $\sigma=1\text{S/m}$  και  $\sigma=2\text{S/m}$ . Το ρεύμα  $I_m$  είναι το μέγιστο του ρεύματος που διαρρέει το δοκίμιο. Αντιθέτως, οι ρυθμιζόμενες τιμές ρεύματος που αναγράφονται στην οθόνη της γεννήτριας, με τιμές 0.5-25kA και βήμα 100A, είναι στην πραγματικότητα τα ισοδύναμα ρεύματα βραχυκύκλωσης που αντιστοιχούν στην εκάστοτε τάση φόρτισης, καθώς υπάρχει μία σημαντική πτώση τάσης στο δοκίμιο. Άρα, στην ουσία το φάσμα των μετρούμενων κρουστικών ρευμάτων είναι αρκετά μικρότερο και διαφέρει ανάλογα με την αντίσταση του ηλεκτροδίου. Επίσης, για λόγους επαναληψιμότητας και ακρίβειας η μέτρηση επαναλαμβάνεται 5 φορές σε κάθε επίπεδο ρεύματος και ως τελική τιμή χρησιμοποιείται στις συγκρίσεις ο μέσος όρος των αυτών των μετρήσεων.

Ακολουθούν ορισμένοι πίνακες με ενδεικτικές περιπτώσεις συγκρίσεων μεταξύ ηλεκτροδίων για κάθε μεμονωμένο επίπεδο αγωγιμότητας (Πίνακες 2.4-2.7) και ενδεικτικές περιπτώσεις συγκρίσεων μεταξύ αγωγιμοτήτων για κάθε μεμονωμένο μήκος ηλεκτροδίου (Πίνακες 2.8-2.11). Απεικονίζονται οι θεωρητικές τιμές ρεύματος που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση, οι αναμενόμενοι θεωρητικοί λόγοι κλίμακας, οι πειραματικές τιμές ρεύματος και μεταβατικής αντίστασης, οι αντίστοιχοι πειραματικοί λόγοι κλίμακας και οι επί τοις εκατό αποκλίσεις που προκύπτουν. Σε ορισμένους πίνακες παρουσιάζονται δύο τιμές για το

θεωρητικό λόγο μεταβατικών αντιστάσεων και την επακόλουθη πειραματική απόκλιση: Ο θεωρητικός λόγος κλίμακας  $K_Z(\alpha)$  προκύπτει από τη θεωρητική τιμή «στόχο» του λόγου κλίμακας αγωγιμοτήτων, ενώ ο  $K_Z(\beta)$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ακριβείς τιμές αγωγιμοτήτων, όπως προέκυπταν από την καταγραφή με το αγωγιμόμετρο κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Οι αναλυτικοί πίνακες όλων των συγκρίσεων, αλλά και οι αρχικοί πίνακες των μετρήσεων με τις 5 επαναλήψεις σε κάθε επίπεδο ρεύματος, καθώς και τα αντίστοιχα παλμογραφήματα παρατίθενται στις εργασίες [83], [84].

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$ [ $K_I = 2.25$ ]		$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_{Z\ \theta\epsilon\omega\rho.}$	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)
$I_{l=60}$ (A)	$I_{l=40}$ (A)	$I_{l=60}$ (A)	$I_{l=40}$ (A)	$K_I$			$Z_{l=60}$ ( $\Omega$ )	$Z_{l=40}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	
225	100	220.8	118.0	1.871	-16.86	0.667	0.60	0.84	0.711	6.705
450	200	446.1	192.6	2.316	2.916		0.61	0.90	0.677	1.600
675	300	664.0	295.1	2.250	-0.003		0.61	0.86	0.710	6.502
900	400	891.2	395.7	2.252	0.103		0.60	0.89	0.678	1.713
1125	500	1116.8	490.9	2.275	1.115		0.60	0.86	0.692	3.873
1350	600	1324.0	594.1	2.229	-0.949		0.57	0.87	0.660	-1.022
$K_I = 1.5$		Μέσος Όρος		2.199	-2.280		Μέσος Όρος			0.688

Πίνακας 2.4: Συγκρίσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 60x6 και 40x4 για επίπεδο αγωγιμότητας  $\sigma=4S/m$ , (με εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης)

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$ [ $K_I = 2.25$ ]		$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_{Z\ \theta\epsilon\omega\rho.}$	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)
$I_{l=30}$ (A)	$I_{l=20}$ (A)	$I_{l=30}$ (A)	$I_{l=20}$ (A)	$K_I$			$Z_{l=30}$ ( $\Omega$ )	$Z_{l=20}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	
225	100	225.2	99.4	2.266	0.693	0.667	1.62	2.44	0.664	-0.415
450	200	450.4	198.8	2.266	0.693		1.64	2.52	0.649	-2.642
675	300	674.4	302.0	2.233	-0.751		1.63	2.51	0.649	-2.645
900	400	899.2	401.6	2.239	-0.487		1.62	2.52	0.642	-3.691
1125	500	1124.0	500.0	2.248	-0.089		1.65	2.50	0.662	-0.766
1350	600	1350.0	599.2	2.253	0.134		1.62	2.48	0.650	-2.460
1575	700	1574.0	700.0	2.249	-0.063		1.64	2.56	0.641	-3.808
$K_I = 1.5$		Μέσος Όρος		2.250	0.019	Μέσος Όρος			0.651	-2.346

Πίνακας 2.5: Συγκρίσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 30x3 και 20x2 για επίπεδο αγωγιμότητας  $\sigma=2S/m$ , (με εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης)

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$ [ $K_I = 1.78$ ]		$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_{Z\ \theta\epsilon\omega\rho.}$	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)	
$I_{l=40}$ (A)	$I_{l=30}$ (A)	$I_{l=40}$ (A)	$I_{l=30}$ (A)	$K_I$			$Z_{l=40}$ ( $\Omega$ )	$Z_{l=30}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	$K_Z(\alpha)$	$K_Z(\beta)$
177.8	100	171.2	102.8	1.665	-6.323	$K_{Z(\alpha)}$ 0.750	2.76	3.77	0.732	-2.403	2.157
355.6	200	352.0	198.8	1.771	-0.402		2.70	3.85	0.702	-6.423	-2.050
533.3	300	535.2	300.8	1.779	0.083		2.79	3.81	0.731	-2.591	1.960
711.1	400	710.4	399.2	1.780	0.100		2.71	3.72	0.727	-3.062	1.468
888.9	500	880.0	500.0	1.760	-1.000		2.74	3.77	0.727	-3.011	1.521
1066.7	600	1062.0	600.0	1.770	-0.437		2.81	3.72	0.754	0.574	5.274
1244.4	700	1240.0	699.2	1.773	-0.243	$K_{Z(\beta)}$ 0.717	2.72	3.82	0.712	-5.092	-0.657
1422.2	800	1420.0	800.0	1.775	-0.156		2.77	3.84	0.721	-3.831	0.663
1600.0	900	1600.0	897.6	1.783	0.267		2.72	3.78	0.720	-4.030	0.454
1777.8	1000	1784.0	1010.0	1.766	-0.644		2.83	3.76	0.753	0.436	5.129
Μέτρηση $K_\sigma = 1.046$		Μέσος Όρος		1.762	-0.876		Μέσος Όρος			0.728	-2.943

Πίνακας 2.6: Συγκρίσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 40x4 και 30x3 για επίπεδο αγωγιμότητας  $\sigma=1S/m$ , (με εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης)



$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$ [ $K_I = 1.778$ ]		$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_Z$ $\theta\epsilon\omega\rho.$	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)	
$I_{l=40}$ (A)	$I_{l=30}$ (A)	$I_{l=40}$ (A)	$I_{l=30}$ (A)	$K_I$			$Z_{l=40}$ ( $\Omega$ )	$Z_{l=30}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$		
7.1	4	7.7	4.7	1.624	-8.623	0.750	25.14	40.08	0.627	-16.367	
14.2	8	14.0	6.8	2.047	15.132		24.63	38.13	0.646	-13.876	
16.0	9	15.6	9.1	1.719	-3.324		24.86	36.57	0.680	-9.367	
21.3	12	21.8	11.8	1.854	4.273		25.10	35.17	0.714	-4.840	
28.4	16	27.7	16.9	1.640	-7.761		25.29	34.17	0.740	-1.323	
32.0	18	30.7	17.9	1.717	-3.419		25.69	35.08	0.732	-2.337	
35.6	20	35.5	20.3	1.745	-1.839		25.36	35.20	0.720	-3.938	
42.7	24	41.8	23.5	1.774	-0.212		25.36	34.35	0.739	-1.474	
48.0	27	46.1	25.7	1.797	1.101		25.88	34.54	0.749	-0.107	
49.8	28	49.1	27.7	1.774	-0.212		25.53	35.18	0.726	-3.243	
56.9	32	55.8	31.1	1.796	1.026		26.03	35.47	0.734	-2.164	
64.0	36	63.6	35.8	1.777	-0.045		25.77	34.79	0.741	-1.240	
71.1	40	69.5	39.3	1.770	-0.452		25.39	34.48	0.736	-1.817	
78.2	44	77.2	42.2	1.829	2.907		25.43	35.19	0.723	-3.649	
80.0	45	78.8	44.4	1.776	-0.079		25.13	35.53	0.707	-5.700	
85.3	48	84.0	47.9	1.755	-1.292		25.04	35.26	0.710	-5.293	
92.4	52	91.6	51.1	1.793	0.849		25.68	35.63	0.721	-3.893	
96.0	54	94.8	53.1	1.785	0.428		25.14	35.39	0.710	-5.299	
99.6	56	98.2	55.3	1.774	-0.190		25.27	35.29	0.716	-4.532	
112.0	63	111.0	61.8	1.795	0.948		25.16	35.64	0.706	-5.883	
113.8	64	113.0	63.0	1.794	0.939		25.21	35.58	0.709	-5.530	
128.0	72	126.9	70.9	1.789	0.654		25.18	35.47	0.710	-5.348	
142.2	80	141.4	80.9	1.748	-1.660		25.43	35.41	0.718	-4.242	
156.4	88	154.7	87.2	1.775	-0.162		25.34	35.15	0.721	-3.891	
170.7	96	169.2	95.0	1.781	0.163		25.44	34.52	0.737	-1.746	
184.9	104	182.3	103.4	1.764	-0.779	25.45	34.99	0.727	-3.006		
192.0	108	189.9	106.8	1.778	0.009	25.57	34.75	0.736	-1.895		
224.0	126	221.4	124.9	1.773	-0.256	25.29	34.72	0.728	-2.888		
256.0	144	251.8	143.3	1.758	-1.131	25.41	34.84	0.729	-2.747		
<b><math>K_I = 1.333</math></b>		<b>Μέσος Όρος</b>			<b>1.776</b>	<b>-0.104</b>	<b>Μέσος Όρος</b>			<b>0.717</b>	<b>-4.401</b>

Πίνακας 2.7: Συγκρίσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 40x4 και 30x3 για επίπεδο αγωγιμότητας  $\sigma=0.085/m$ , (με εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης)

$I_{\theta\epsilon\omega\rho.}$ [ $K_I = 2$ ]		$I_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_Z$ $\theta\epsilon\omega\rho.$	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho.}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)		
$I_{\sigma=4}$ (A)	$I_{\sigma=2}$ (A)	$I_{\sigma=4}$ (A)	$I_{\sigma=2}$ (A)	$K_I$			$Z_{\sigma=4}$ ( $\Omega$ )	$Z_{\sigma=2}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	$K_Z$ ( $\alpha$ )	$K_Z$ ( $\beta$ )	
200	100	200.4	99.4	2.016	0.805	0.500	1.39	2.44	0.571	14.123	9.346	
300	150	297.4	150.0	1.982	-0.880		1.40	2.45	0.573	14.515	9.722	
400	200	402.1	198.8	2.023	1.127		1.38	2.52	0.546	9.137	4.569	
500	250	489.4	250.4	1.955	-2.268		1.37	2.52	0.544	8.813	4.258	
600	300	589.8	302.0	1.953	-2.358		1.38	2.51	0.550	9.977	5.373	
700	350	689.8	351.6	1.962	-1.911	0.522	1.37	2.49	0.550	9.948	5.346	
800	400	780.5	401.6	1.943	-2.829		1.39	2.52	0.550	10.064	5.457	
900	450	891.8	450.4	1.980	-0.995		1.41	2.54	0.555	11.091	6.441	
1000	500	988.2	500.0	1.976	-1.184		1.40	2.50	0.561	12.226	7.528	
<b>Μέτρηση <math>K_\sigma = 1.919</math></b>		<b>Μέσος Όρος</b>			<b>1.977</b>	<b>-1.164</b>	<b>Μέσος Όρος</b>			<b>0.555</b>	<b>10.959</b>	<b>6.314</b>

Πίνακας 2.8: Συγκρίσεις μεταξύ των επιπέδων αγωγιμότητας  $\sigma=4S/m$  και  $\sigma=2S/m$  για το ηλεκτρόδιο 20x2cm (με εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης)

$I_{\theta\epsilon\omega\rho}$ $[K_I = 4]$		$I_{\pi\epsilon\iota\rho}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_Z$ θεωρ.	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)	
$I_{\sigma=4}$ (A)	$I_{\sigma=1}$ (A)	$I_{\sigma=4}$ (A)	$I_{\sigma=1}$ (A)	$K_I$			$Z_{\sigma=4}$ ( $\Omega$ )	$Z_{\sigma=1}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	$K_Z(\alpha)$	$K_Z(\beta)$
400	100	387.0	102.8	3.765	-5.875	$K_Z(\alpha)$ <b>0.250</b>	1.03	3.77	0.274	9.754	5.651
800	200	786.6	198.8	3.957	-1.087		1.02	3.85	0.266	6.386	2.409
900	225	896.3	224.8	3.987	-0.320	$K_Z(\beta)$ <b>0.260</b>	1.04	3.80	0.272	8.963	4.890
1600	400	1570.0	399.2	3.932	-1.703		0.99	3.72	0.267	6.669	2.681
1800	450	1779.0	448.0	3.971	-0.714		0.99	3.78	0.262	4.767	0.851
<b>Μέτρηση <math>K_\sigma = 3.817</math></b>		<b>Μέσος Όρος</b>		<b>3.922</b>	<b>-1.940</b>	<b>Μέσος Όρος</b>			<b>0.268</b>	<b>7.308</b>	<b>3.296</b>

Πίνακας 2.9: Συγκρίσεις μεταξύ των επιπέδων αγωγιμότητας  $\sigma=4S/m$  και  $\sigma=1S/m$  για το ηλεκτρόδιο 30x3cm (με εφαρμογή του 2<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης).

$I_{\theta\epsilon\omega\rho}$ $[K_I = 2]$		$I_{\pi\epsilon\iota\rho}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_Z$ θεωρ.	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)	
$I_{\sigma=2}$ (A)	$I_{\sigma=1}$ (A)	$I_{\sigma=2}$ (A)	$I_{\sigma=1}$ (A)	$K_I$			$Z_{\sigma=2}$ ( $\Omega$ )	$Z_{\sigma=1}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	$K_Z(\alpha)$	$K_Z(\beta)$
200	100	202.4	98.2	2.061	3.055	$K_Z(\alpha)$ <b>0.500</b>	1.58	2.94	0.537	7.399	3.083
400	200	400.8	198.4	2.020	1.008		1.59	2.98	0.532	6.494	2.215
600	300	600.8	298.0	2.016	0.805		1.59	3.01	0.527	5.390	1.156
800	400	800.0	400.0	2.000	0.000		1.60	3.00	0.533	6.667	2.381
1000	500	998.4	499.2	2.000	0.000	$K_Z(\beta)$ <b>0.521</b>	1.60	3.00	0.532	6.372	2.098
1200	600	1200.0	600.8	1.997	-0.133		1.59	3.00	0.530	5.919	1.663
1400	700	1400.0	700.8	1.998	-0.114		1.57	2.98	0.527	5.484	1.246
1600	800	1600.0	798.4	2.004	0.200		1.59	3.01	0.527	5.446	1.209
2000	1000	2000.0	1000.4	1.999	-0.040		1.59	3.00	0.530	6.042	1.782
<b>Μέτρηση <math>K_\sigma = 1.919</math></b>		<b>Μέσος Όρος</b>		<b>2.011</b>	<b>0.531</b>	<b>Μέσος Όρος</b>			<b>0.531</b>	<b>6.135</b>	<b>1.870</b>

Πίνακας 2.10: Συγκρίσεις μεταξύ των επιπέδων αγωγιμότητας  $\sigma=2S/m$  και  $\sigma=1S/m$  για το ηλεκτρόδιο 40x4cm (με εφαρμογή του 1<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης).

$I_{\theta\epsilon\omega\rho}$ $[K_I = 2]$		$I_{\pi\epsilon\iota\rho}$			Απόκλιση $K_I$ (%)	$K_Z$ θεωρ.	$Z_{\pi\epsilon\iota\rho}$			Απόκλιση $K_Z$ (%)	
$I_{\sigma=2}$ (A)	$I_{\sigma=1}$ (A)	$I_{\sigma=2}$ (A)	$I_{\sigma=1}$ (A)	$K_I$			$Z_{\sigma=2}$ ( $\Omega$ )	$Z_{\sigma=1}$ ( $\Omega$ )	$K_Z$	$K_Z(\alpha)$	$K_Z(\beta)$
450	225	441.6	233.2	1.893	-5.317	$K_Z(\alpha)$ <b>0.500</b>	1.21	2.20	0.550	10.058	3.670
800	400	801.6	401.6	1.996	-0.199		1.22	2.21	0.549	9.751	3.382
900	450	900.8	444.8	2.025	1.259		1.22	2.19	0.557	11.467	4.998
1350	675	1348.0	674.4	1.998	-0.059		1.22	2.17	0.561	12.208	5.696
1600	800	1600.0	803.2	1.992	-0.398		1.22	2.18	0.558	11.658	5.178
1800	900	1800.0	896.0	2.008	0.446	$K_Z(\beta)$ <b>0.531</b>	1.21	2.17	0.556	11.232	4.776
2250	1125	2260.0	1112.0	2.032	1.619		1.21	2.18	0.557	11.420	4.953
2400	1200	2400.0	1184.0	2.027	1.351		1.20	2.20	0.545	8.973	2.649
2700	1350	2700.0	1358.0	1.988	-0.589		1.19	2.25	0.530	5.984	-0.167
3200	1600	3200.0	1604.0	1.995	-0.249		1.20	2.16	0.556	11.235	4.779
<b>Μέτρηση <math>K_\sigma = 1.883</math></b>		<b>Μέσος Όρος</b>		<b>1.995</b>	<b>-0.214</b>	<b>Μέσος Όρος</b>			<b>0.555</b>	<b>10.398</b>	<b>3.991</b>

Πίνακας 2.11: Συγκρίσεις μεταξύ των επιπέδων αγωγιμότητας  $\sigma=2S/m$  και  $\sigma=1S/m$  για το ηλεκτρόδιο 60x6cm (με εφαρμογή του 1<sup>ου</sup> ορισμού της μεταβατικής αντίστασης).

## 2.6 Συμπεράσματα

Εν γένει, παρατηρείται καλή συμπεριφορά της Θεωρίας της Ομοιότητας μέσω της μεθόδου της Διαστατικής Ανάλυσης, για τις συγκρίσεις των  $K_Z$ . Τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ήταν σχετικά ικανοποιητικά, καθώς επαληθεύθηκαν σε ένα βαθμό για την πλειοψηφία των μετρήσεων οι αναμενόμενοι λόγοι κλίμακας.

Ένα βασικό συμπέρασμα που προέκυψε είναι η αναγκαιότητα χρήσης του δεύτερου ορισμού της μεταβατικής αντίστασης, ο οποίος, σύμφωνα με την εξίσωση (2.19),

χρησιμοποιεί την τιμή της τάσης κατά το μέγιστο του ρεύματος, διότι η συμπεριφορά των δοκιμών είναι έντονα επαγωγική και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η χρονική υστέρηση μεταξύ τάσης και ρεύματος.

Η τιμή της αγωγιμότητας  $\sigma=4$  S/m φαίνεται να είναι οριακή για τα μεγάλα ηλεκτρόδια (40x4, 60x6), καθώς παρατηρήθηκε μία παραμόρφωση στην καμπύλη της τάσης εξόδου. Πιθανώς στην αγωγιμότητα αυτή να εξαντλείται το περιθώριο για την αποδεκτή απόσταση από τη "γη". Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των ηλεκτροδίων, τόσο πιο έντονη είναι η επίδραση του περιορισμένου μεγέθους της δεξαμενής, της οποίας τα τοιχώματα θα έπρεπε ιδανικά να βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση από το ηλεκτρόδιο. Ειδικά για το ηλεκτρόδιο 60x6 αναγκαστικά έγινε περιορισμένος αριθμός μετρήσεων, καθώς η παραμόρφωση της τάσης εξόδου γινόταν όλο και πιο έντονη. Ωστόσο, οι μετρήσεις που λήφθηκαν για αυτά τα ηλεκτρόδια συμπεριλήφθηκαν στους πίνακες αποτελεσμάτων, διότι η παραμόρφωση φαίνεται να επηρεάζει την ουρά της κυματομορφής και όχι το μέτωπο βάσει του οποίου γίνεται ο υπολογισμός της αντίστασης.

Όσον αφορά στην ακρίβεια του πειράματος μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Μικρές αποκλίσεις στο βάθος τοποθέτησης, πιθανόν να είχαν κάποια επίδραση στις αποκλίσεις των  $K_Z$ .
- Η χρήση probe ρεύματος και διαφορικού probe τάσης, ενδεχομένως να οδηγούσε σε μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Με τις συσκευές αυτές εκτείνεται η περιοχή μέτρησης των παλμογράφων, σε αρκετά υψηλές τιμές τάσεων.
- Όταν η θεωρητικά αναμενόμενη τιμή του  $K_Z$  είναι πολύ μικρή, τότε η οποιαδήποτε απόκλιση στις πειραματικές τιμές οδηγεί αυτομάτως σε μεγάλη % διαφορά. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στις συγκρίσεις μεταξύ των αγωγιμοτήτων  $\sigma=4$  S/m -  $\sigma=0.08$  S/m και  $\sigma=2$  S/m -  $\sigma=0.08$  S/m, όπου οι θεωρητικά αναμενόμενες τιμές των  $K_Z$  είναι πολύ μικρές, 0.02 και 0.04 αντίστοιχα και οδηγούν σε μεγάλες % αποκλίσεις  $K_Z$ .

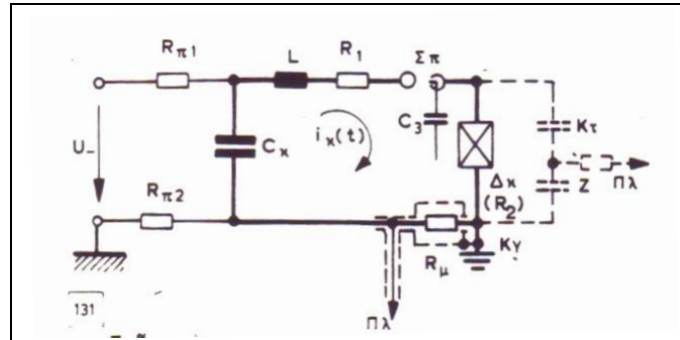
## 2.6.1 Παρατηρήσεις - Σχόλια

Σε αυτές τις συγκρίσεις θεωρήθηκε, ότι η κρίσιμη ένταση έναρξης του φαινομένου του ιονισμού είναι σταθερή. Αν ληφθούν υπόψη όμως οι μεγάλες αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ενδεχομένως να υπάρχει εξάρτηση από την αγωγιμότητα του διαλύματος  $\sigma$ , και επομένως θα πρέπει να διερευνηθεί η επίδραση της παραμέτρου  $E_0$ .

### 2.6.1.1 Λειτουργία γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων

Ένα φαινόμενο που παρατηρείται στα παλμογραφήματα είναι η αλλαγή της κυματομορφής του παραγόμενου ρεύματος για διαφορετικά μεγέθη δοκιμών, ουσιαστικά δηλαδή για διαφορετικές τιμές των  $R$  και  $L$  μεγεθών τους. Συγκεκριμένα παρατηρείται, ότι για ηλεκτρόδια μεγαλύτερων διαστάσεων, δηλαδή αντίστοιχα για μικρότερες τιμές αντίστασης  $R$ , η κυματομορφή παρουσίαζε μεγαλύτερο χρόνο ανόδου. Παρατηρείται δηλαδή μια διαπλάτυνση της κυματομορφής του ρεύματος στην έξοδο, καθώς χρησιμοποιούνται μεγαλύτερου μεγέθους ηλεκτρόδια.

Μια γεννήτρια, όμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα αυτό, παράγει εκθετικά κρουστικά ρεύματα μέσω της εκφόρτισης ενός πυκνωτή  $C_k$ , φορτισμένου από πηγή συνεχούς τάσεως σε τάση  $U_-$ , σε ένα εν σειρά κύκλωμα μίας αυτεπαγωγής  $L$  και μίας αντίστασης  $R$ . Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας εκθετικών κρουστικών ρευμάτων [85]

Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η αυτεπαγωγή  $L$  είναι η συνολική αυτεπαγωγή του βρόχου εκφόρτισης και περιλαμβάνει τις παράσιτες αυτεπαγωγές των διαφόρων αντιστάσεων και του  $C_k$ . Συνεπώς, στην περίπτωση του πειράματος της εργασίας αυτής συμπεριλαμβάνει και τις αυτεπαγωγές  $L_{\text{ταινίας γείωσης}} + L_{\text{νερού}}$ . Η αντίσταση  $R$  είναι η συνολική αντίσταση που "βλέπει" η κρουστική γεννήτρια (ηλεκτρόδιο και εσωτερικές αντιστάσεις της γεννήτριας) και συγκεκριμένα ισχύει:  $R = R_1 + R_2 + R_\mu$ , όπου  $R_2$  είναι η ωμική αντίσταση του δοκιμίου, δηλαδή  $R_2 = R_{\text{ταινίας γείωσης}} + R_{\text{νερού}}$ . Η διαφορική εξίσωση του ρεύματος εκφόρτισης  $i_k(t)$  του  $C_k$  είναι η εξής [85]:

$$\frac{1}{C_k} \int i_k dt + R i_k + L \frac{di_k}{dt} = 0 \quad (2.39)$$

Θεωρώντας ότι βρίσκεται στην περιοχή της κρίσιμης απόσβεσης, όταν δηλαδή είναι  $R = 2\sqrt{L/C_k}$ , τότε επιλύοντας την παραπάνω διαφορική εξίσωση προσδιορίζεται ότι για:

$$t = t_m = T_1 = 2 \frac{L}{R} \text{ (χρόνος ανόδου)} \quad (2.40)$$

$$i_k = \hat{I}_k = I_m = 0.736 \frac{U_-}{R} \quad (2.41)$$

Οπότε ο χρόνος ημίσεως εύρους προκύπτει [85], [86]:

$$T_\eta = 4.9 \cdot \frac{L}{R} \quad (2.42)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η αυτεπαγωγή μιας ταινίας δίνεται από τη σχέση [87]:

$$L(\sigma\epsilon \mu H) = 0.002 \cdot l \cdot \left[ 2.303 \cdot \log \left( \frac{2l}{d+t} \right) + 0.5 + 0.235 \cdot \left( \frac{d+t}{l} \right) \right] \quad (2.43)$$

όπου  $l$  το μήκος,  $d$  το πλάτος και  $t$  το πάχος (όλες οι διαστάσεις σε  $cm$ ) της ταινίας γείωσης και ότι για κάθε ένα από τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν ισχύει  $l/d = 10$ , για μεγαλύτερο μήκος δοκιμίου αυξάνεται η αυτεπαγωγή (θεωρώντας αμελητέο το πάχος  $t$ ). Συνεπώς από τις Σχέσεις (2.42), (2.43) παρατηρείται, ότι κρατώντας τα υπόλοιπα μεγέθη

σταθερά, για μεγαλύτερο μήκος προκύπτει μικρότερη αντίσταση ηλεκτροδίου και ο χρόνος ανόδου του εγχεόμενου ρεύματος αυξάνεται. Με την παραπάνω ανάλυση δηλαδή, επαληθεύθηκε το φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στα παλμογραφήματα.

## 2.6.2 Προτάσεις

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της κρουστικής γεννήτριας συμπεραίνεται ότι η μεταβατική αντίσταση γείωσης  $Z$  μπορεί να γραφεί πλέον σαν συνάρτηση των εξής μεγεθών:

$$Z = f(d, l, \rho, I_m, E_0, T_1, U_-, C_k, L) \quad (2.44)$$

Υπεισέρχονται επομένως και άλλες παράμετροι (τάση φόρτισης  $U_-$ ,  $L$ ,  $C_k$ ) στην εφαρμογή του Θεωρήματος Π, της Διαστατικής Ανάλυσης για την περίπτωση της ταινίας γείωσης. Μπορεί να θεωρηθεί επιπλέον, ότι τα μεγέθη  $L$ ,  $C_k$  εξαρτώνται από τις διαστάσεις. Με βάση την (2.44) και θεωρώντας το πάχος  $t$  της ταινίας γείωσης αμελητέο σε σχέση με το βάθος εγκατάστασης  $h = 0,5 \div 1,0 \text{ m}$ , η μεταβατική αντίσταση γείωσης  $Z$  γράφεται τελικά:

$$Z = f(d, l, \rho, I_m, E_0, T_1, U_-) \quad (2.45)$$

Σε αυτόν το φυσικό νόμο, που συνδέει τα 8 φυσικά μεγέθη που εμπλέκονται στην παραπάνω συνάρτηση, θα εφαρμοστεί το Θεώρημα Π της Διαστατικής Ανάλυσης. Επιλύοντας, όπως αναλύθηκε στις ενότητες 2.4.2 και 2.4.3, προσδιορίζονται οι Π-παραμέτροι για καθεμία από τις μεταβλητές που δεν επιλέχθηκαν στη διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα:

$$\Pi_1 = \frac{d}{l}, \Pi_2 = \frac{E_0 \cdot l^2}{\rho \cdot I_m}, \Pi_3 = \frac{U_- \cdot l}{\rho \cdot I_m}, \Pi_4 = \frac{Z \cdot l}{\rho} \quad (2.46)$$

Έχοντας υπολογίσει τις Π-παραμέτρους, μπορούν πλέον να προσδιοριστούν οι λόγοι κλίμακας για τα φυσικά μεγέθη του προβλήματος.

$$K_Z = \frac{1}{K_\sigma \cdot K_l}, K_l = K_d, K_{I_m} = K_{E_0} K_l^2 K_\sigma, K_{U_-} K_l = \frac{K_{I_m}}{K_\sigma} \quad (2.47)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να παρατηρηθεί, ότι στην προσέγγιση που εφαρμόστηκε στο πείραμα αγνοήθηκαν οι εξαρτήσεις ορισμένων μεγεθών, οι οποίες όμως λαμβάνονται υπόψη στην εναλλακτική προσέγγιση που διερευνάται παραπάνω. Ενδεχομένως αυτό να είχε αντίκτυπο και να εξηγεί ορισμένες μεγάλες αποκλίσεις που συναντήθηκαν στις συγκρίσεις, ειδικά για τις πιο ακραίες συνθήκες (υψηλότερη αγωγιμότητα και μεγάλα ηλεκτρόδια). Τέλος μια άλλη πρόταση, θα ήταν να διερευνηθεί και η άλλη μέθοδος εφαρμογής της Θεωρίας της Ομοιότητας, οι Νόμοι υπό κλίμακα, που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 2.2.2. Οι Νόμοι υπό κλίμακα θα μπορούσαν να προσδιοριστούν είτε α) από τη διαφορική εξίσωση κρουστικού ρεύματος (σχέση 2.39) είτε β) από τις εξισώσεις ηλεκτρομαγνητισμού (λόγοι κλίμακας για  $E$ ,  $L$ ,  $C$  κλπ.).

### 2.6.3 Απαιτήσεις σχεδίασης ενός ολοκληρωμένου πειράματος υπό κλίμακα

Στους Πίνακες 2.12 και 2.13 παρατίθενται συγκεντρωτικά για τα διάφορα σενάρια σύγκρισης οι αποκλίσεις των πειραματικών λόγων κλίμακας για τη μεταβατική αντίσταση από τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές βάσει της Διαστατικής Ανάλυσης. Στόχος των μετρήσεων ήταν η διερεύνηση των απαιτήσεων ενός υπό κλίμακα πειράματος ακολουθώντας μια διαδικασία σχεδίασης σύμφωνη με τη Θεωρία της Ομοιότητας, καθώς το φαινόμενο της κεραυνοπληξίας ενός πλοίου είναι αρκετά σύνθετο. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τις μετρήσεις σχετίζεται με την ανάγκη χρήσης κλίμακας και στο πεδίο του χρόνου. Αναλυτικότερα, παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή του δοκιμίου αλλάζει το εγχεόμενο ρεύμα και το χρόνο ανόδου της κυματομορφής του και συγκεκριμένα μεγαλύτερου μεγέθους ηλεκτρόδια, προκαλούν διαπλάτυνση της κυματομορφής του ρεύματος.

Αγωγιμότητες	Ηλεκτρόδιο							
	2x20cm		3x30cm		4x40cm		6x60cm	
	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>
0.08 S/m - 2 S/m	x	x	>>	15.7%	>>	22.3%	x	x
1 S/m - 2 S/m	-0.5%	-10.7%	1.4%	-12.1%	1.9%	-13.2%	4.0%	-23.4%
1 S/m - 4 S/m	19.1%	-4.1%	>>	3.3%	>>	13.3%	>>	>>
2 S/m - 4 S/m	18.4%	6.3%	>>	18.4%	>>	>>	>>	>>

**Πίνακας 2.12:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συγκρίσεων μεταξύ αγωγιμοτήτων για κάθε ηλεκτρόδιο, με τους δύο ορισμούς της μεταβατικής αντίστασης. Παραλείπονται αποκλίσεις μεγαλύτερες του 30% (συμβολίζονται με >>) και συγκρίσεις που δεν πραγματοποιήθηκαν (συμβολίζονται με x).

Ηλεκτρόδια (cm)	Αγωγιμότητα							
	0.08 S/m		1 S/m		2 S/m		4 S/m	
	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>	1 <sup>ος</sup>	2 <sup>ος</sup>
(6x60)-(2x20)	x	x	9.4%	-1.6%	23.9%	-13.6%	>>	>>
(6x60)-(3x30)	x	x	7.7%	-1.6%	19.4%	-11.6%	>>	>>
(6x60)-(4x40)	x	x	7.7%	1.1%	14.2%	-9.4%	28.6%	3.2%
(4x40)-(3x30)	-5.6%	-4.4%	-0.4%	-2.9%	5.0%	-5.9%	15.4%	11.2%
(4x40)-(2x20)	x	x	1.0%	-2.4%	8.2%	-4.5%	45.1%	22.3%
(3x30)-(2x20)	x	x	1.1%	0.8%	2.5%	-2.3%	27.6%	10.8%

**Πίνακας 2.13:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα συγκρίσεων μεταξύ ηλεκτροδίων για κάθε επίπεδο αγωγιμότητας, με τους δύο ορισμούς της μεταβατικής αντίστασης. Παραλείπονται αποκλίσεις μεγαλύτερες του 30% (συμβολίζονται με >>) και συγκρίσεις που δεν πραγματοποιήθηκαν (συμβολίζονται με x).

Η παράμετρος του χρόνου απαλείφεται κατά την εφαρμογή του Θεωρήματος Π της Διαστατικής Ανάλυσης και δεν εμφανίζεται στις Π-παραμέτρους. Είναι χαρακτηριστικό ότι η παράμετρος  $T_1$  δεν υπεισέρχεται σε καμία από τις εξισώσεις (2.31)-(2.33). Άλλωστε η επίδραση της διαστατικά χάνεται μέσω του πηλίκου της εμπειρικής σχέσης (2.23). Από τα καταγεγραμμένα παλμογραφήματα είναι φανερό ότι το μοντέλο (συνδυασμός ταινίας γείωσης και δεξαμενής με ηλεκτρολυτικό διάλυμα) εμφανίζει έντονα επαγωγική συμπεριφορά, καθώς η κυματομορφή του ρεύματος έχει χρονική υστέρηση σε σχέση με την τάση. Εφόσον οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς να ληφθεί υπόψη η απαιτούμενη ρύθμιση στην κλίμακα του χρόνου, δικαιολογείται η μειωμένη ακρίβεια του πρώτου ορισμού στις παρούσες μετρήσεις, με δεδομένο ότι στον πρώτο ορισμό της μεταβατικής αντίστασης, υπεισέρχεται ο χρόνος έμμεσα μέσω της χρονικής διαφοράς μεταξύ των

μεγίστων  $V_{max}$  και  $I_{max}$ . Αντιθέτως, ο χρόνος δεν υπεισέρχεται ουσιαστικά στο δεύτερο ορισμό της μεταβατικής αντίστασης σύμφωνα με τον οποίο οι καταγραφές τάσης και ρεύματος γίνονται την ίδια χρονική στιγμή. Γι' αυτό άλλωστε, με το δεύτερο ορισμό λαμβάνονται εμφανώς βελτιωμένα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά η επίδραση της παραμέτρου του χρόνου παραμένει ιδιαίτερα σημαντική, διότι αναλόγως με τη συνδεσμολογία μετατοπίζεται χρονικά το μέγιστο του ρεύματος.

Πολύ σημαντικό ζήτημα είναι και η επιλογή του γεωμετρικού λόγου κλίμακας, από τον οποίο εν συνεχεία καθορίζεται και η απαιτούμενη πειραματική διέγερση. Στην πλειοψηφία τους τα μεγάλα εμπορικά/πολεμικά πλοία και τα δεξαμενόπλοια έχουν μήκος που κυμαίνεται από 100m έως 200m. Με βάση τον κανόνα που ορίζει μέγιστη διάσταση δοκιμίου τουλάχιστον 2-3 φορές μικρότερη από τη διάσταση της δεξαμενής και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο διαθέσιμος ελεύθερος χώρος για την τοποθέτηση δεξαμενής στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων είναι το πολύ 3m x 3m, η μέγιστη διάσταση του μοντέλου του πλοίου θα μπορούσε να είναι τάξης μεγέθους του 1.0m-1.5m. Με αυτούς τους πρακτικούς περιορισμούς διαμορφώνεται λόγος κλίμακας 1:100-1:200. Η θεωρητική ανάλυση που έχει προηγηθεί υπαγορεύει να χρησιμοποιηθεί για την παράμετρο του χρόνου λόγος κλίμακας ίδιος με το γεωμετρικό λόγο, πρακτική η οποία έχει υιοθετηθεί σε όλα τα πειράματα που έχουν αναλυθεί στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Στον Πίνακα 2.14 απεικονίζονται οι χρονικές παράμετροι των κυριότερων προτυποποιημένων κυματομορφών κεραυνικού ρεύματος [88], [28], [30] και [89] και στον Πίνακα 2.15 με εφαρμογή των δύο ακραίων τιμών του λόγου κλίμακας οι νέες κυματομορφές που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Οι δύο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες κυματομορφές 8/20μs και 10/350μs απαιτούν υποβιβασμό σε κυματομορφές με χρόνο ανόδου της τάξης των ns, γεγονός που είναι πολύ δύσκολο υλοποίησιμο.

IEC 60060-1	IEC 62305-1, IEC 62305-4
1/20μs	10/350μs, 200kA πρωτεύον θετικό πλήγμα
	1/200μs, 100kA πρωτεύον αρνητικό πλήγμα
4/10μs	0.25/100μs, 50kA δευτερεύον αρνητικό πλήγμα
8/20μs	<b>MILS STD 188-125 E1 PULSE</b>
30/80μs	20/500ns, 5kA

**Πίνακας 2.14:** Χρονικές παράμετροι προτυποποιημένων κυματομορφών κεραυνικού ρεύματος.

Πλήρεις διαστάσεις (μs)	Κλίμακα 1:100 (ns)	Κλίμακα 1:200 (ns)
1/20	10/200	5/100
4/10	40/100	20/50
8/20	80/200	40/100
30/80	300/800	150/800
10/350	100/3500	50/1750
1/200	10/2000	5/1000
0.25/100	2.5/1000	1.75/500

**Πίνακας 2.15:** Χρονικές παράμετροι των απαιτούμενων κυματομορφών ρεύματος για τη διεξαγωγή πειράματος με γεωμετρικό λόγο κλίμακας 1:100-1:200.





# Υπό κλίμακα πείραμα με κρουστική τάση

---

## 3.1 Εισαγωγή

Το πιθανότερο σενάριο είναι η σύλληψη ενός κατερχόμενου οχητού να γίνει από το υψηλότερο σημείο του πλοίου, συνήθως από κάποιο κατάρτι, μία κεραία ή εν γένει οποιαδήποτε ράβδος αναλαμβάνει να λειτουργήσει ως αλεξικέραυνο. Οι μέθοδοι υπολογισμού της ζώνης προστασίας αλεξικεραύνου που έχουν διατυπωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν αξιολογηθεί διεξοδικά ως προς το ζήτημα της προστασίας γραμμών μεταφοράς και κτηριακών εγκαταστάσεων. Αντίστοιχη έρευνα σχετικά με την εφαρμογή των μεθόδων αυτών στο περιβάλλον ενός πλοίου υπάρχει περιορισμένη.

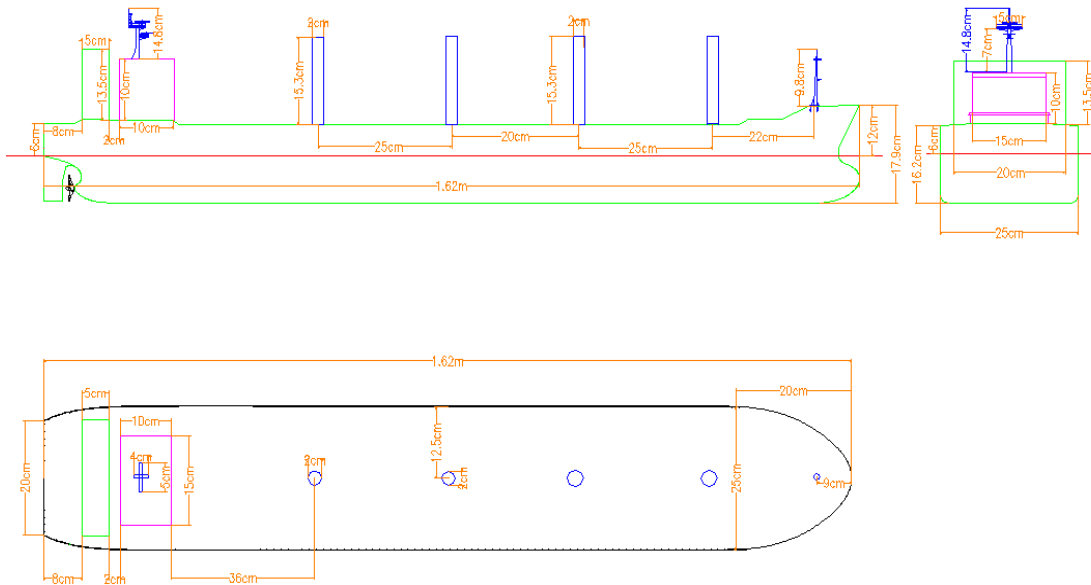
Ένα υπό κλίμακα πείραμα για τη μελέτη της ζώνης προστασίας αλεξικεραύνων σε μοντέλο πλοίου πραγματοποίησαν ο Gzybowski και η ομάδα του στο Πανεπιστήμιο της πολιτείας του Μισισσιππή [90]. Ο κατερχόμενος κεραυνικός οχητός προσομοιώθηκε με χρήση μιας ράβδου, η οποία τοποθετήθηκε σε απόσταση 1m και 3m πάνω από αγωγίμη λαμαρίνα γείωσης που προσομοίωνε τη θάλασσα και στην οποία επιβαλλόταν κρουστική τάση 1.2/50μs. Με μετακίνηση της ράβδου σε διάφορες σχετικές θέσεις πάνω από την επιφάνεια του μοντέλου προέκυψαν ποιοτικά συμπεράσματα σχετικά με τα σημεία τα οποία πλήττονται και τα σημεία από τα οποία ξεκινούν ανοδικοί οχητοί, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν ποσοτικά αποτελέσματα και σύγκριση με υπάρχοντα μοντέλα εκτίμησης της ζώνης προστασίας.

Με αφορμή τα κενά και τις ασυμφωνίες μεταξύ των σχετικών κανονισμών στο ζήτημα της αντικεραυνικής προστασίας που συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 1, ειδικά στην περίπτωση πλοίων με μεταλλική γάστρα, όπως εμπορικά πλοία μεταφοράς φορτίου, δεξαμενόπλοια, πολεμικά πλοία ή ακόμα και κρουαζιερόπλοια, διεξήχθησαν μετρήσεις σε ένα υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου, προκειμένου να εξαχθούν ποσοτικοποιημένα συμπεράσματα από τη μελέτη συγκεκριμένων μεθόδων εκτίμησης ζώνης προστασίας και να αξιολογηθεί η εφαρμογή τους σε πλοία. Η πειραματική διαδικασία συνίσταται σε κεραυνοπληξίες με επιβολή κρουστικής τάσης διαδοχικά στις διάφορες υπερκατασκευές-ακίδες του μοντέλου, με στόχο να υπολογιστεί η εκάστοτε παρεχόμενη ζώνη προστασίας και να μελετηθεί εν γένει το φαινόμενο της σύλληψης του κεραυνού στη σύνθετη δομή ενός πλοίου.

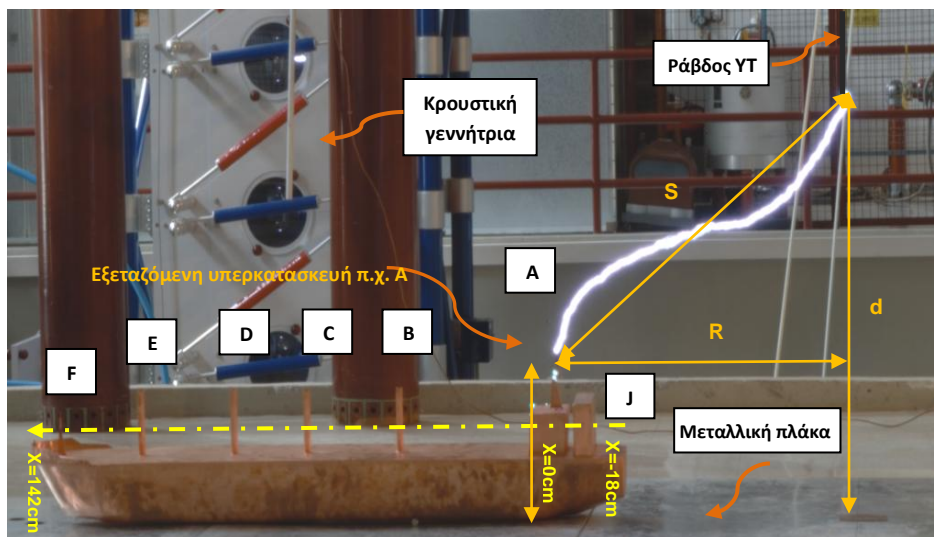
## 3.2 Πειραματική διάταξη

Το μοντέλο πλοίου που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική διερεύνηση είναι κατασκευασμένο από χαλκό, έχει μήκος 162cm και πλάτος 25cm (στο επίπεδο του «καταστρώματος») και είναι σχεδιασμένο υπό κλίμακα 1:150 (ως προς τις βασικές του διαστάσεις) με βάση ένα εμπορικό δεξαμενόπλοιο πραγματικών διαστάσεων, απλοποιώντας τη λεπτομερή γεωμετρία και διατηρώντας τις βασικές δομές που επηρεάζουν τη σύλληψη του κεραυνού. Η πρόοψη, η πλάγια όψη και η κάτοψη με τις ακριβείς διαστάσεις του απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1. Οι βασικές διαστάσεις του μοντέλου

που είναι αναγκαίες για τους υπολογισμούς των επόμενων παραγράφων απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2 και στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.1: Οι όψεις του υπό κλίμακα σχεδίου μοντέλου πλοίου.

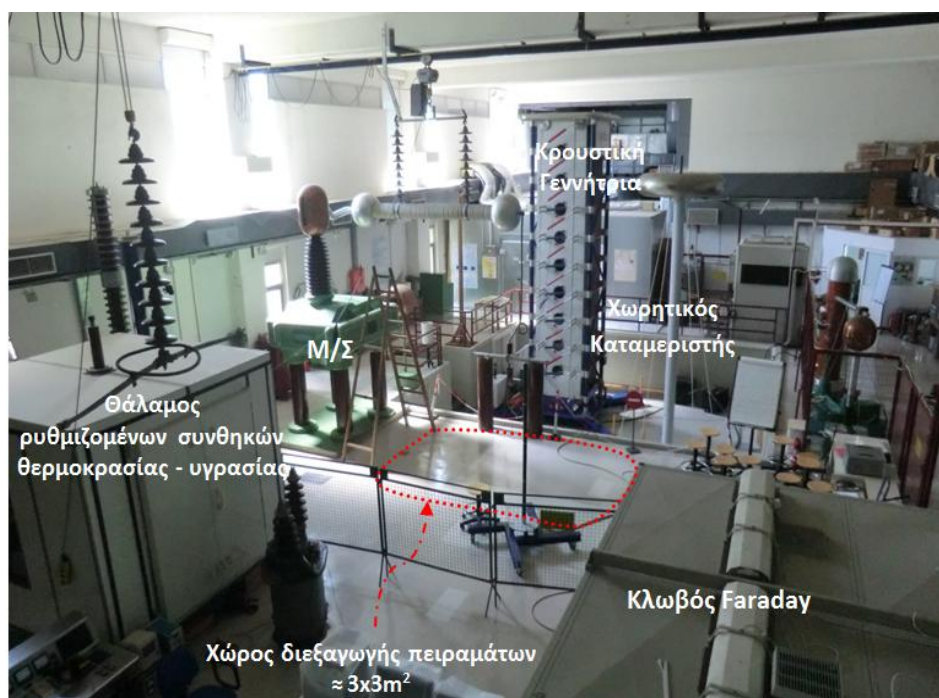


Σχήμα 3.2: Η πειραματική διάταξη και το υπό κλίμακα μοντέλο του πλοίου, στο οποίο φαίνονται αριθμημένες οι υπερκείμενες ράβδοι και κατασκευές του και οι βασικές διαστάσεις του [91], [92].

Ύψος εξεταζόμενης θέσης (cm) (από το κατάστρωμα)		Οριζόντια απόσταση L (cm)	
A	24.8	A-B	43
B	15.3	B-C	25
C	15.3	C-D	20
D	15.3	D-E	25
E	15.3	E-F	22
F	9.8	F-πλώρη	9
J	13.5	A-J	10
πλώρη	1.7	Ύψος καταστρώματος: 16.2cm	

Πίνακας 3.1: Οι βασικές διαστάσεις του υπό κλίμακα μοντέλου [92].

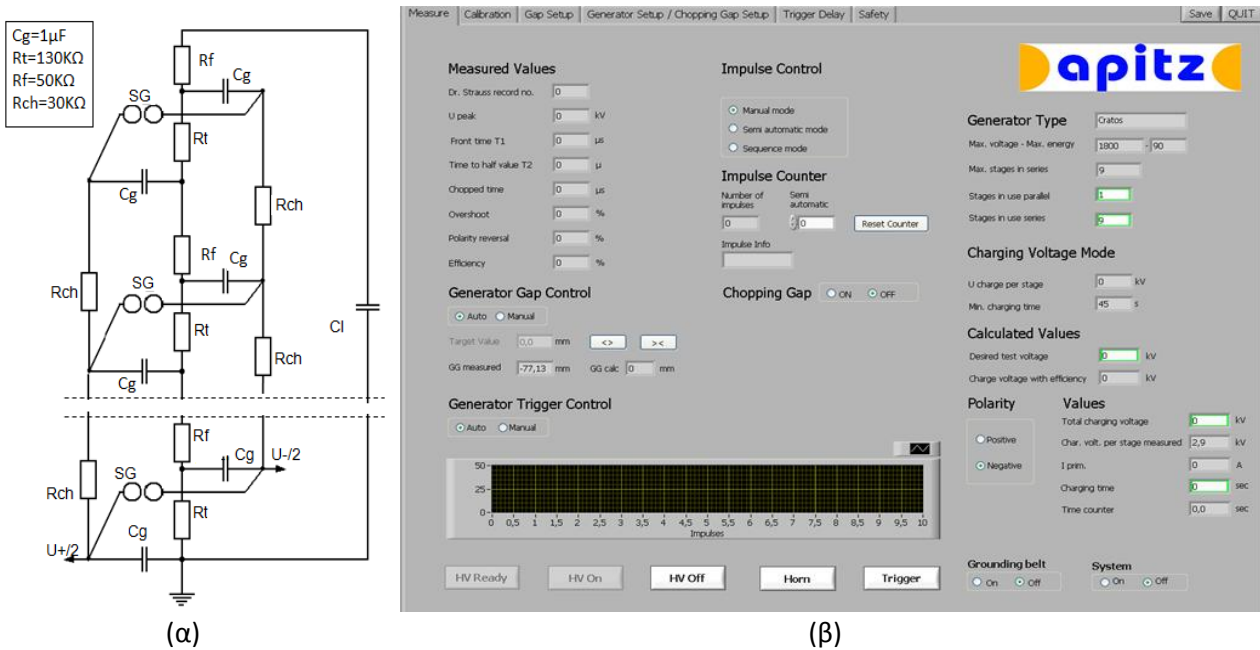
Ο συγκεκριμένος λόγος κλίμακας προέκυψε με βάση τις διαστάσεις του πλήρους κλίμακας πλοίου σε συνδυασμό με τις μέγιστες δυνατές διαστάσεις του υπό κλίμακα μοντέλου, λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο χώρο διεξαγωγής του πειράματος (περίπου  $9\text{m}^2$  στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3) και τις απαιτούμενες αποστάσεις ασφαλείας. Όσον αφορά στην επιλογή του συγκεκριμένου είδους πλοίου, έγινε με γνώμονα τη συνύπαρξη σχετικά απλών πολλαπλών δομών με διαφορετικά ύψη και αποστάσεις που επιτρέπει τη διερεύνηση διαφόρων περιπτώσεων γειννίας. Συγκεκριμένα, η αντιστοίχιση των υπερκατασκευών του υπό κλίμακα μοντέλου, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.2 με τις πραγματικές δομές του πλήρους κλίμακας πλοίου είναι η εξής: Η θέση (A) είναι η κεραία τηλεπικοινωνιών που βρίσκεται στην οροφή της γέφυρας του πλοίου, οι θέσεις (B)-(E) αναπαριστούν τους πυλώνες στήριξης των περιστρεφόμενων γερανών φορτίου, ενώ η θέση (F) αντιστοιχεί στην κεραία ναυσιπλοΐας στην πλώρη του πλοίου και η δομή (J) σε άλλους χώρους ναυσιπλοΐας και θαλάμους διαμονής προσωπικού.



**Σχήμα 3.3:** Χώρος διεξαγωγής πειράματος στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π.

Το υπό κλίμακα μοντέλο είναι τοποθετημένο πάνω σε μια γειωμένη μεταλλική πλάκα πάχους περίπου  $2\text{mm}$ , η οποία αντιπροσωπεύει την επιφάνεια της θάλασσας. Μια φορτισμένη κυλινδρική ράβδος μήκους  $50\text{cm}$  και διαμέτρου  $5\text{mm}$  με ημισφαιρική απόληξη αναπαριστά την κεφαλή του κατερχόμενου οχητού. Η φορτισμένη ράβδος καταπονείται με εξωτερική κρουστική υψηλή τάση κυματομορφής  $1.2/50\mu\text{s}$  μέσω της εννιαβάθμιας κρουστικής γεννήτριας  $1.8\text{MV}/10\text{kJ}$  του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ, η οποία αποτελεί ουσιαστικά μια τροποποίηση της πολυβάθμιας κρουστικής γεννήτριας τύπου Marx, όπως φαίνεται στη συνδεσμολογία του Σχήματος 3.4(α). Η καταγραφή της κρουστικής τάσης γίνεται μέσω ενός χωρητικού καταμεριστή με λόγο καταμερισμού  $K = 2068$  (ο πυκνωτής φορτίου  $C_l = 449.8\text{pF}$  στην έξοδο της κρουστικής γεννήτριας αποτελείται από τον εν σειρά συνδυασμό ενός πυκνωτή υψηλής τάσεως  $C_1 = 450\text{pF}$  και

ενός πυκνωτή χαμηλής τάσης  $C_2 = 930nF$ ) και ενός ψηφιακού μετρητικού συστήματος. Οι υπολογιστές για τον έλεγχο και το χειρισμό τόσο του μετρητικού συστήματος, όσο και της κρουστικής γεννήτριας βρίσκονται εντός του Κλωβού Faraday.

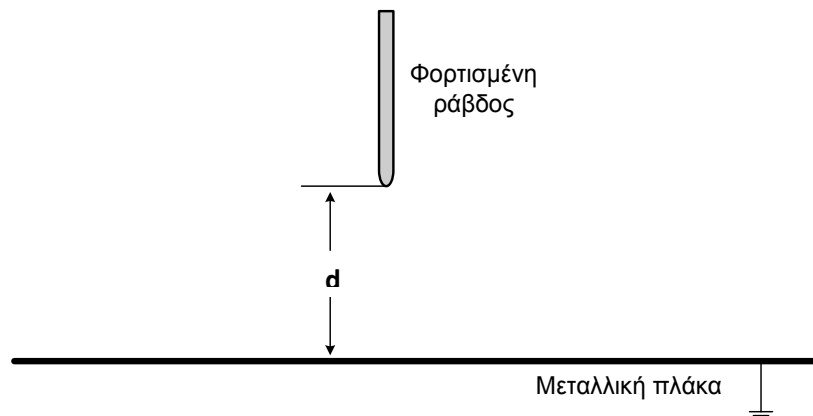


**Σχήμα 3.4:** (α) Σχηματικό διάγραμμα της εννιαβάθμιας γεννήτριας APITZ/CRATOS (β) Βασική οθόνη λογισμικού του συστήματος ελέγχου CRATOS.

### 3.3 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μεταλλικής πλάκας

#### 3.3.1 Διαδικασία μετρήσεων

Στο αρχικό στάδιο του πειράματος μελετήθηκαν τα διάκενα ράβδου-πλάκας χωρίς το μοντέλο πλοίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



**Σχήμα 3.5:** Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης ράβδου-πλάκας όπου  $d$  είναι η απόσταση πρόσκρουσης της φορτισμένης ράβδου από τη γη.

Στο στάδιο αυτό στόχος είναι η εύρεση της καμπύλης διάσπασης του διακένου για διάφορες αποστάσεις πρόσκρουσης στη γη ( $d$ ), η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή. Η

φορτισμένη ράβδος τοποθετήθηκε διαδοχικά πάνω από τη γειωμένη πλάκα σε ύψος  $d=50\text{cm}$ ,  $d=75\text{cm}$  και  $d=100\text{cm}$  και έγιναν επιβολές τάσεων αρνητικής και θετικής πολικότητας. Πραγματοποιήθηκαν 20 επιβολές τάσεων ανά επίπεδο τάσης με το χρονικό διάστημα μεταξύ 2 διαδοχικών επιβολών να είναι 2 λεπτά. Έτσι προσδιορίστηκαν οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης, μέσα από τις οποίες υπολογίστηκαν οι 97.5% τάσεις διάσπασης  $U_s$  για όλα τα διάκενα ράβδου-πλάκας.

### 3.3.2 Προσδιορισμός τάσης διάσπασης

Η ηλεκτρική διάσπαση μπορεί να περιγραφεί ως μία στοχαστική διαδικασία. Επομένως, ο αξιόπιστος προσδιορισμός της τάσης διάσπασης γίνεται μέσω στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων από δοκιμές ηλεκτρικής διάσπασης. Στην πράξη, βρίσκεται μια κατανομή πιθανότητας διάσπασης, η οποία μπορεί αναλυτικά να οριστεί ως συνάρτηση δύο παραμέτρων: της 50% τάσης διάσπασης ( $U_{50}$ : η τιμή τάσης για την οποία η πιθανότητα διάσπασης είναι 50%) και της συμβατικής απόκλισης,  $z$ , η οποία υπολογίζεται ως η διαφορά  $U_{50} - U_{16}$ , όπου  $U_{16}$  η τιμή της τάσης για την οποία η πιθανότητα διάσπασης είναι 16%. Οι χαρακτηριστικές αυτές παράμετροι μπορούν εύκολα να υπολογιστούν μέσω της προσέγγισης της κατανομής πιθανότητας διάσπασης με μία γνωστή συνάρτηση κατανομής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η κατανομή πιθανότητας διάσπασης μπορεί να προσεγγιστεί πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή και συνεπώς τα πειραματικά δεδομένα διάσπασης ικανοποιούν την πιο κάτω σχέση:

$$p(U) = \frac{1}{z \cdot \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^U e^{-(U-U_{50})^2/(2 \cdot z^2)} dU \quad (3.1)$$

Οι παράμετροι  $U_{50}$  και  $z$  ταυτίζονται με τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, αντίστοιχα. Σύμφωνα με το IEC 60060-1 [88] οι δοκιμές ηλεκτρικής διάσπασης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τη διαδικασία απόκτησης των αποτελεσμάτων:

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

#### 3.3.2.1 Μέθοδος επιπέδων τάσεων

Στην παρούσα εργασία για τον προσδιορισμό της τάσης διάσπασης χρησιμοποιείται η μέθοδος των επιπέδων τάσεων. Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο επιβάλλονται στο διάκενο τάσεις εύρους  $U_i$ , όπου ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Εάν κάθε επίπεδο τάσης  $U_i$  επιβληθεί  $m_i$  φορές και από αυτές το διάκενο διασπασθεί  $d_i$  φορές, τότε η πιθανότητα διάσπασης στην τάση  $U_i$ , ή  $p(U_i)$ , θεωρείται ίση με τη συχνότητα της διάσπασης  $f_i = \frac{d_i}{m_i}$ .

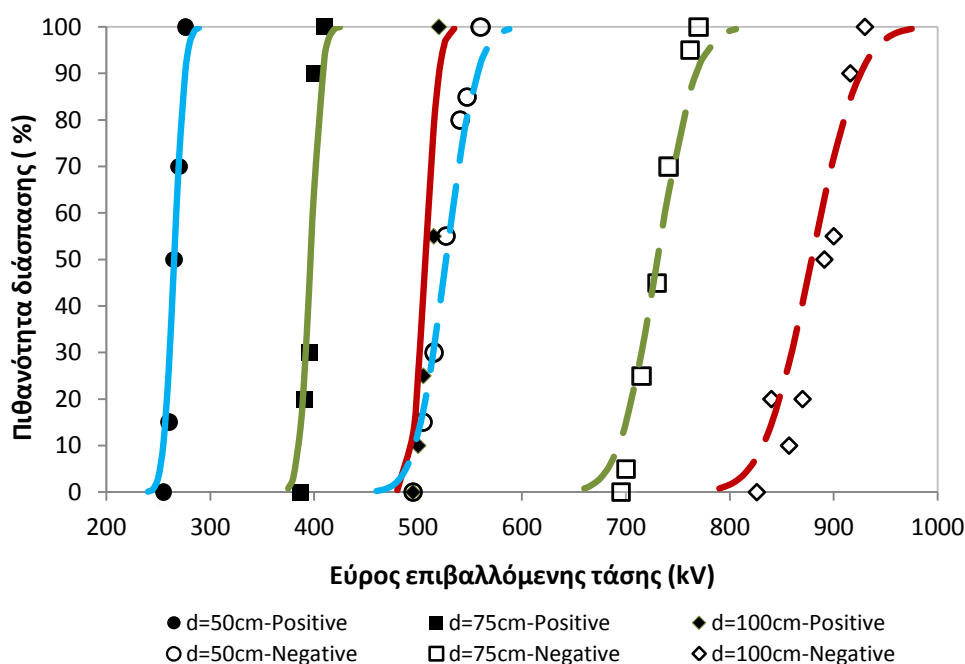
Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι τα ζεύγη τιμών  $U_i$ ,  $p(U_i)$  από τα οποία, μετά τη συσχέτιση τους μέσω του γραφήματος κανονικής κατανομής, προκύπτουν η 50% τάσης διάσπασης,  $U_{50}$ , και η συμβατική τυπική απόκλιση,  $z$ . Για να έχει αξιοπιστία η μέθοδος αυτή πρέπει ο αριθμός των ανά επίπεδο επιβολών της τάσης να είναι αρκετά μεγάλος ( $m \geq 10$ ). Το πρώτο επίπεδο τάσης  $U_1$  πρέπει να έχει πιθανότητα διάσπασης  $p(U_1)=0$  και η αύξηση της τάσης  $\Delta U$  ανά επίπεδο πρέπει να κυμαίνεται περίπου από 1%-3%. Η διαδικασία

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

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που καταγράφηκαν βρέθηκαν οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης του Σχήματος 3.6, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Από τις καμπύλες αυτές βρέθηκαν οι τάσεις διάσπασης  $U_s$  που αντιστοιχούν σε πιθανότητα διάσπασης 97.5%. (Πίνακας 3.2) για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων επικρατούσαν περιβαλλοντικές συνθήκες: περίπου 991mbar ατμοσφαιρική πίεση,  $11.5 \text{ g/m}^3$  απόλυτη υγρασία και  $25^\circ\text{C}$  θερμοκρασία.

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

**Πίνακας 3.2:** Τάσεις διάσπασης  $U_s$  (97.5%) για όλα τα διάκενα τόσο για θετική όσο και για αρνητική πολικότητα, όπως εξήχθησαν από τα πειράματα ράβδου-πλάκας.



**Σχήμα 3.6:** Καμπύλες πιθανότητας διάσπασης διακένων ράβδου-πλάκας οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τις καμπύλες πιθανότητας διάσπασης του Σχήματος 3.6 και τις τάσεις διάσπασης του Πίνακα 3.2 είναι τα εξής:

- Οι καμπύλες πιθανότητας διάσπασης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή.
- Για κάθε ζεύγος μετρήσεων θετικής και αρνητικής πολικότητας για σταθερή απόσταση φορτισμένης ράβδου - πλάκας ( $d=50\text{cm}$ ,  $d=75\text{cm}$ ,  $d=100\text{cm}$ ), η καμπύλη πιθανότητας διάσπασης αρνητικής πολικότητας αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή

και τυπική απόκλιση συγκρινόμενη με την καμπύλη πιθανότητας σύλληψης θετικής πολικότητας.

- Η τάση διάσπασης αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης της φορτισμένης ράβδου από την πλάκα ( $d$ ).

### 3.3.2.2 Αναγωγή τάσης διάσπασης

Η τάση διάσπασης στο διάκενο αέρα γενικά εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες (πίεση αέρα, υγρασία, θερμοκρασία) και συνήθως αυξάνεται είτε με την αύξηση πίεσης του αέρα είτε με την αύξηση της υγρασίας. Για αυτό το λόγο εισάγονται κάποιοι διορθωτικοί παράγοντες ώστε να αναχθεί η τάση διάσπασης  $U_s$  του πειράματος ράβδου-πλάκας με πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία ( $t$ ), πίεση ( $p$ ), υγρασία ( $h$ )) σε μια τάση  $U_o$  με βάση τις πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες ( $t_o, p, h_o$ ). Οι πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες σύμφωνα με το Πρότυπο [88] είναι:

- Θερμοκρασία:  $t_o = 20^\circ\text{C}$
- Ατμοσφαιρική πίεση:  $p = 1013 \text{ mbar}$
- Απόλυτη υγρασία:  $h_o = 11 \text{ g/m}^3$

Η σχέση που συνδέει την πειραματική/διορθωμένη τάση διάσπασης  $U_s$  με την πρότυπη τάση  $U_o$  είναι:

$$U_s = U_o \cdot k_1 \cdot k_2 \Leftrightarrow U_o = \frac{U_s}{k_1 \cdot k_2} \quad (3.2)$$

όπου:  $k_1$  ο συντελεστής διόρθωσης πυκνότητας αέρα .

$k_2$  ο συντελεστής διόρθωσης υγρασίας.

Για τους συντελεστές διόρθωσης  $k_1$  και  $k_2$  ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$k_1 = \delta^m \quad (3.3)$$

$$\delta = \frac{p}{p_o} \cdot \frac{273+t_o}{273+t} \quad (3.4)$$

$$k_2 = k^w \quad (3.5)$$

$$k = 1 + 0.010 \cdot \left( \frac{h}{\delta} - 11 \right) \text{ για } 1 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \leq \frac{h}{\delta} \leq 20 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (3.6)$$

όπου:  $t_o, p_o, h_o$  οι πρότυπες ατμοσφαιρικές συνθήκες

$t$  [ $^\circ\text{C}$ ] η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια του πειράματος

$p$  [ $\text{mbar}$ ] η πίεση του αέρα κατά τη διάρκεια του πειράματος

$h$  [ $\text{g/m}^3$ ] η υγρασία κατά τη διάρκεια του πειράματος

Οι εκθέτες  $m$  και  $w$  βρίσκονται από τον Πίνακα 3.3, αφού πρώτα υπολογιστεί ο συντελεστής  $g$  από τη Σχέση (3.7):

$$g = \frac{U_B}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} \quad (3.7)$$

όπου:  $U_B$  [ $\text{kV}$ ] η τάση διάσπασης που αντιστοιχεί σε πιθανότητα 50% στις πειραματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες ράβδου-πλάκας

$L$  [ $\text{m}$ ] το μήκος του εξεταζόμενου διακένου

$\delta$  η σχετική πυκνότητα αέρα όπως υπολογίζεται από τη σχέση (3.4)

$k$  ο συντελεστής που υπολογίζεται από τη σχέση (3.6)

$g$	$m$	$w$
<0.2	0	0
0.2 to 1.0	$g(g - 0.2)/0.8$	$g(g - 0.2)/0.8$
1.0 to 1.2	1.0	1.0
1.2 to 2.0	1.0	$(2.2 - g)(2.0 - g)/0.8$
<2.0	1.0	0

**Πίνακας 3.3:** Τιμές των εκθετών  $m$  και  $w$  για το συντελεστή διόρθωσης πυκνότητας αέρα και για το συντελεστή διόρθωσης της υγρασίας αντίστοιχα, ως συνάρτηση της παραμέτρου  $g$  [88].

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία στις πειραματικές τάσεις διάσπασης  $U_s$  του Πίνακα 3.2 υπολογίστηκαν οι πρότυπες 97.5% τάσεις διάσπασης  $U_0$  για κάθε διάκενο και πολικότητα, οι οποίες παρατίθενται στον Πίνακα 3.4:

Απόσταση φορτισμένης ράβδου- πλάκας	Τάση διάσπασης $U_0$ (kV)	
	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
d=50cm	291.7	594.9
d=75cm	421.5	817.6
d=100cm	543.8	985.3

**Πίνακας 3.4:** Οι 97.5% τάσεις διάσπασης των διακένων ανηγμένες σε πρότυπες συνθήκες ( $U_0$ ).

## 3.4 Διεξαγωγή πειράματος ράβδου-μοντέλου πλοίου

### 3.4.1 Διαδικασία μετρήσεων

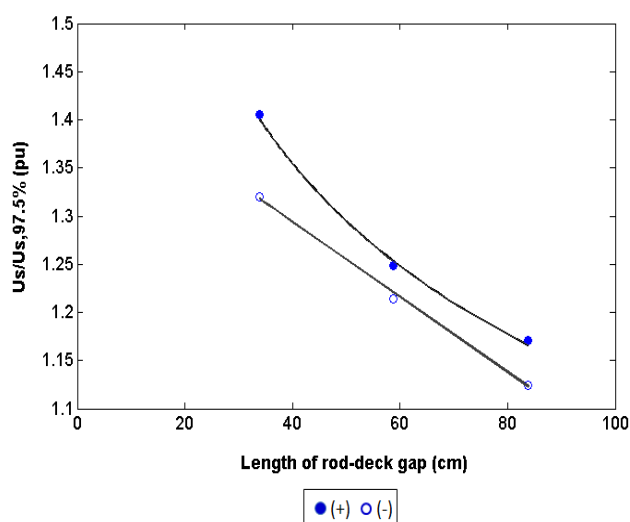
Στο δεύτερο στάδιο του πειράματος τοποθετείται το μοντέλο του πλοίου στη μεταλλική γειωμένη πλάκα και για διαφορετικές αποστάσεις φορτισμένης ράβδου – μεταλλικής πλάκας ( $d=50\text{cm}$ ,  $d=75\text{cm}$ ,  $d=100\text{cm}$ ), τόσο για θετική πολικότητα, όσο και για αρνητική πολικότητα, διεξάγονται πειράματα “επιπέδων απόστασης” σε αναλογία με τα πειράματα “επιπέδων τάσης”, προκειμένου να προσδιοριστούν οι κατανομές της πιθανότητας σύλληψης της εκάστοτε εξεταζόμενης κατασκευής του μοντέλου. Συγκεκριμένα ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία: η σύλληψη του κεραυνού από μία κατασκευή διερευνάται φέρνοντας πλησιέστερα τη ράβδο του κατερχόμενου οχετού από την πλευρά της γεινιάζουσας κοντύτερης κατασκευής. Έτσι, ξεκινώντας από τη θέση Α και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για τις υπόλοιπες κατασκευές διερευνώνται όλες οι περιοχές κατά μήκος του οριζόντιου άξονα του μοντέλου: η θέση (Α) με προσέγγιση από τη μεταλλική πλάκα, η θέση (Α) με προσέγγιση από τη θέση (Β), η θέση (Β) με προσέγγιση από τη θέση (C), η θέση (C) με προσέγγιση από τη θέση (D), η θέση (D) με προσέγγιση από τη θέση (E), η θέση (E) με προσέγγιση από τη θέση (F) και η θέση (F) με προσέγγιση από τη μεταλλική πλάκα.

Με σταθερή απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης ράβδου προς γη ( $d$ ) και ξεκινώντας από μια θέση του πλοίου στην οποία για όλες τις επιβολές της τάσης η εκκένωση καταλήγει πάντα σε αστοχία, (δηλαδή στην πλάκα ή σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του μοντέλου εκτός της κεραίας που μελετάται), η πλευρική απόσταση ( $R$ ) μεταξύ



φορτισμένης ράβδου και εξεταζόμενης κατασκευής μειώνεται με καθορισμένα βήματα, μέχρι τη θέση, στην οποία για όλες τις επιβολές της τάσης η εκκένωση συλλαμβάνεται πάντα από την κεραία. Σε κάθε μία από αυτές τις πλευρικές αποστάσεις γίνονται 20 εφαρμογές της τάσης διάσπασης  $U_s$  (σε χρονικά διαστήματα 2 λεπτών μεταξύ διαδοχικών επιβολών). Η επιβαλλόμενη τάση  $U_s$  προκύπτει για τον εκάστοτε συνδυασμό διακένου ( $d$ ) και πολικότητας από τις πρότυπες  $U_0$  τάσεις του Πίνακα 3.3 με αναγωγή στις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες κατά την ημέρα διεξαγωγής των συγκεκριμένων μετρήσεων, σύμφωνα με τις Σχέσεις (3.2)-(3.7).

Για λόγους ομοιομορφίας οι τάσεις διάσπασης των αρχικών διακένων ράβδου-πλάκας εφαρμόστηκαν σε όλες τις εξεταζόμενες θέσεις, παρόλο που μόνο στις περιπτώσεις των θέσεων (A) (από γη), (F) και (E) (για  $d=100\text{cm}$ ) παρατηρήθηκαν εκκενώσεις να καταλήγουν στη γειωμένη μεταλλική πλάκα. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η διάσπαση του διακένου έλαβε χώρα στην ουρά της κυματομορφής, όπως και κατά τη διάσπαση των αρχικών διακένων ράβδου-πλάκας. Ωστόσο για τις μετρήσεις αρνητικής πολικότητας των θέσεων (A), (B), (C), (D) και (E) για τα διάκενα  $d=50\text{cm}$  και  $d=75\text{cm}$ , παρατηρήθηκε διάσπαση στο μέτωπο της κυματομορφής και μείωση του χρόνου διάσπασης. Συνεπώς, οι μετρήσεις για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις έλαβαν χώρα υπό συνθήκες υπερφόρτισης, καθώς στο ρόλο της γειωμένης πλάκας βρίσκεται το κατάστρωμα και έτσι το πραγματικό διάκενο ράβδου-«καταστρώματος» είναι μικρότερο από το αρχικό διάκενο ράβδου-μεταλλικής πλάκας. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης των διακένων που προκύπτει ως ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης διάσπασης  $U_0$  του Πίνακα 3.4 προς την 97.5% τάση διάσπασης του πραγματικού διακένου ράβδου-«καταστρώματος» (33.8cm, 58.8cm και 83.8cm) υπολογιζόμενη κατά προσέγγιση από τις τιμές του Πίνακα 3.4. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων οι περιβαλλοντικές συνθήκες ήταν περίπου 991mbar ατμοσφαιρική πίεση, 8.4 g/m<sup>3</sup> απόλυτη υγρασία και 23°C θερμοκρασία.



**Σχήμα 3.7:** Συντελεστής υπερφόρτισης των διακένων (33.8cm, 58.8cm και 83.8cm).

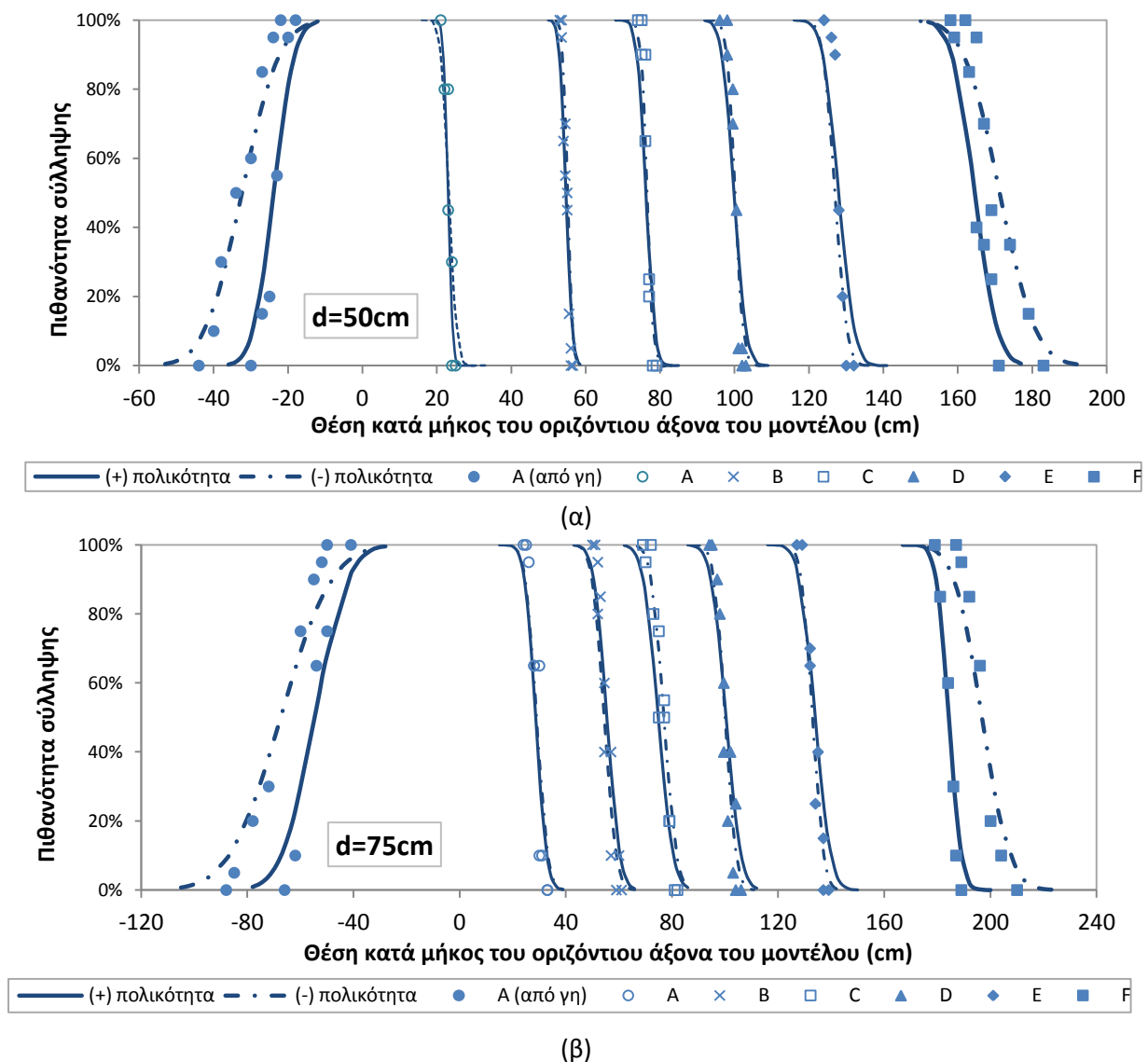
Αφού ολοκληρωθούν οι επιβολές των τάσεων, εξάγονται οι καμπύλες κατανομής πιθανότητας σύλληψης που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.8. Η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην προς μελέτη κατασκευή είναι  $p$  (πιθανότητα σύλληψης), ενώ η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει σε οποιοδήποτε άλλο μέρος του μοντέλου είτε στη

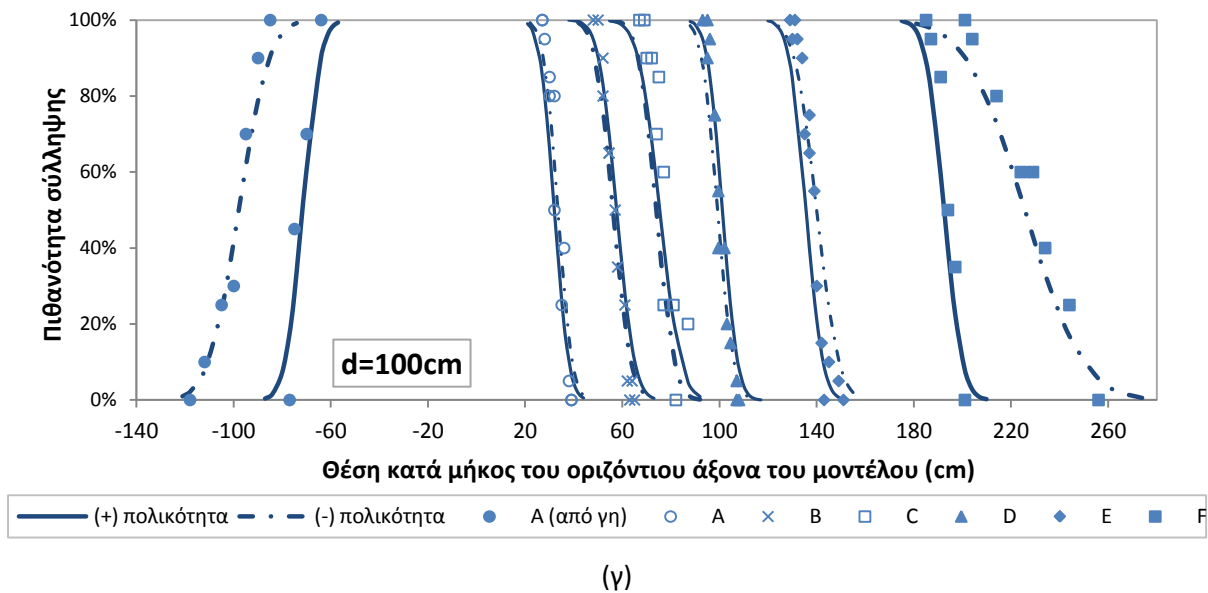
γειωμένη πλάκα είναι  $(1 - p)$ . Περιπτώσεις κατά τις οποίες η σύλληψη της εκκένωσης γίνεται από πολλαπλά σημεία του μοντέλου θεωρούνται αστοχίες, καθώς στόχος είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς των δομών του πλοίου ως αλεξικεραύνων και των δημιουργούμενων ζωνών αντικεραυνικής προστασίας. Οι κατανομές πιθανότητας σύλληψης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Έτσι, για κάθε κατανομή πιθανότητας σύλληψης υπολογίζεται η μέση τιμή της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης ράβδου και κεραίας, στην οποία με 50% πιθανότητα η εκκένωση καταλήγει στην κεραία (μέση ακτίνα σύλληψης  $R_c$ ), καθώς και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση  $\sigma$ . Ακολούθως γνωρίζοντας τη μέση ακτίνα σύλληψης  $R_c$  μπορεί να υπολογιστεί η αντίστοιχη μέση απόσταση πρόσκρουσης  $S_c$  από το Πυθαγόρειο θεώρημα (3.8):

$$S_c = \sqrt{R_c^2 + (d - H)^2} \quad (3.8)$$

### 3.4.2 Κατανομές πιθανότητας σύλληψης

Οι κατανομές πιθανότητας σύλληψης που προέκυψαν με την παραπάνω πειραματική διαδικασία για όλες τις θέσεις του υπό κλίμακα μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8:





**Σχήμα 3.8:** Καμπύλες πιθανότητας σύλληψης της εκκένωσης από τις κατασκευές του μοντέλου πλοίου οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή ( $\alpha$ )  $d=50\text{cm}$ , ( $\beta$ )  $d=75\text{cm}$  και ( $\gamma$ )  $d=100\text{cm}$ .

Στο Σχήμα 3.8 το σημείο αναφοράς  $x=0$  του οριζόντιου άξονα για τον προσδιορισμό της θέσης των κατανομών σύλληψης κατά μήκος του μοντέλου είναι η θέση του ψηλότερου ιστού κεραιάς που βρίσκεται στην οροφή της γέφυρας (θέση A). Από τις κατανομές πιθανότητας σύλληψης του Σχήματος 3.8 μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Οι καμπύλες πιθανότητας σύλληψης προσεγγίζονται πολύ ικανοποιητικά με την κανονική κατανομή. Η πιθανότητα σύλληψης αυξάνεται με τη μείωση της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης ράβδου-κεραιάς.
- Αύξηση του διακένου  $d$  επιφέρει αύξηση της ακτίνας σύλληψης. Μετατόπιση των κατανομών σύλληψης σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την εξεταζόμενη θέση παρατηρείται επίσης στην αρνητική πολικότητα μαζί με αύξηση της τυπικής απόκλισης της κατανομής σε σύγκριση με τη θετική πολικότητα, όπως υπαγορεύεται από το φαινόμενο της πολικότητας.
- Στις περιπτώσεις ισοϋψών ράβδων -θέσεις (B), (C) και (D)- η μετατόπιση των κατανομών σύλληψης μεταξύ διακένων και πολικότητας είναι πολύ μικρή, σε σύγκριση με τις θέσεις (A) (από γη) και (F), οι οποίες προσεγγίζουν τη συμπεριφορά απομονωμένης ράβδου με φαινόμενα γεινίασης που επιδρούν αναλόγως με το εξεταζόμενο διάκενο (συνεπώς το κεραυνικό ρεύμα). Επίσης, μικρή μετατόπιση παρουσιάζουν και οι κατανομές πιθανότητας σύλληψης των θέσεων (A) και (E), γεγονός που οφείλεται στην επικράτηση των φαινομένων γεινίασης λόγω της σχετικής θέσης και του ύψους της παρακείμενης κατασκευής σε όλα τα διάκενα.
- Παράλληλα θα πρέπει να σημειωθεί η επίδραση της αυξημένης επιβαλλόμενης τάσης στις κατανομές σύλληψης των θέσεων (A), (B), (C), (D) και (E), καθώς είναι γνωστό ότι σε μικρά διάκενα αέρα, οι συνθήκες υπερφόρτισης επηρεάζουν όχι μόνο τη χρονική στιγμή της διάσπασης, αλλά και τη σχετική εξέλιξη των δύο εκκενώσεων αντίθετου φοράς κατά τη διάσπαση και συνεπώς την πιθανότητα σύλληψης.

### 3.4.3 Εμπειρικά μοντέλα προσδιορισμού της ζώνης προστασίας

Τα ζητούμενα  $R_c$  και  $S_c$ , αφού υπολογιστούν για τα διάφορα διάκενα  $d$  και για διαφορετική πολικότητα, στη συνέχεια συγκρίνονται με ορισμένα εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης της ζώνης προστασίας αλεξικεραυνού: τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας [28], ένα ελλειπτικό μοντέλο που προτάθηκε από το S.Grzybowski [90]-[94] και ένα στατιστικό μοντέλο σύλληψης κεραυνού στην αρχική του μορφή [95]-[98] και σε μία τροποποιημένη εκδοχή που λαμβάνει υπόψη φαινόμενα γειτνίασης [99], [100]. Να σημειωθεί ότι όλες οι εξισώσεις των προς εξέταση μεθόδων ισχύουν για 50% πιθανότητα σύλληψης.

#### 3.4.3.1 Μέθοδος κυλιόμενης σφαίρας

Με τη μέθοδο αυτή προσδιορίζονται τα πιθανά σημεία τερματισμού του κεραυνικού πλήγματος σε μία κατασκευή με τη θεώρηση μιας σφαίρας προκαθορισμένης ακτίνας η οποία κυλιέται πάνω από τερματικά αέρα, καλώδια θωράκισης και άλλα γειωμένα μεταλλικά αντικείμενα που προορίζονται για αντικεραυνική προστασία. Αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κάτω από την κυρτή επιφάνεια της σφαίρας προστατεύονται από το άμεσο κεραυνικό πλήγμα, εν αντιθέσει με άλλα αντικείμενα που αγγίζουν ή διεισδύουν στην επιφάνεια της κεραυνικής σφαίρας, με αποτέλεσμα να μην είναι προστατευμένα. Η άκρη του κατερχόμενου οχető βρίσκεται στο κέντρο της σφαίρας η οποία έχει ακτίνα ίση με την απόσταση πρόσκρουσης ( $S$ ). Η απόσταση πρόσκρουσης  $S$  ισούται με την απόσταση πρόσκρουσης προς τη γη  $d$ , ενώ ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της απόστασης πρόσκρουσης προς γη ( $d$ ) και της ακτίνας σύλληψης ( $R$ ) [28]:

$$d = 10 \cdot I_p^{0.65} \quad (3.9)$$

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

$$R = \sqrt{2 \cdot h \cdot d - h^2} \quad (3.10)$$

όπου  $h$  το ύψος του αλεξικέραυνου (συμπεριλαμβανομένου του ύψους της κατασκευής) από το έδαφος. Όταν δύο ισοϋψείς ράβδοι χρησιμοποιούνται ως τερματικά αέρα για προστασία σε επίπεδες επιφάνειες, η απόσταση διείσδυσης της σφαίρας στο χώρο μεταξύ τους δίνεται από τη σχέση:

$$p = d - \sqrt{d^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (3.11)$$

Όπου:  $p$  η απόσταση διείσδυσης [ $m$ ],

$d$  η απόσταση πρόσκρουσης προς γη [ $m$ ],

$L$  η απόσταση μεταξύ των δύο ράβδων [ $m$ ]

#### 3.4.3.2 Ελλειπτικό μοντέλο εκτίμησης ακτίνας σύλληψης

Το 2007 ο S. Grzybowski και η ομάδα του, στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου της Πολιτείας του Μισσισιππή, παρουσίασαν ένα ελλειπτικό μοντέλο για την εκτίμηση της απόστασης πρόσκρουσης και της ακτίνας σύλληψης αλεξικεραυνού [90]-[94]. Η βασική ιδέα αυτού του μοντέλου που το διαφοροποιεί από το μοντέλο της κυλιόμενης σφαίρας είναι ότι η απόσταση πρόσκρουσης προς την κορυφή του

αλεξικέρανου ( $S$ ) δεν ταυτίζεται με την απόσταση πρόσκρουσης προς το έδαφος ( $d$ ) και μάλιστα παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά αναλόγως με την πολικότητα του κεραυνού. Έτσι, δημιουργήθηκε για την αξιολόγηση της ζώνης προστασίας μιας ράβδου το ελλειπτικό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο η ζώνη προστασίας της ράβδου καθορίζεται από το χαμηλότερο τμήμα μιας έλλειψης, το οποίο εφάπτεται στην κορυφή της ράβδου και στο έδαφος.

Η απόσταση πρόσκρουσης υπολογίζεται για κεραυνό θετικής πολικότητας από τη Σχέση (3.12) και για κεραυνό αρνητικής πολικότητας από τη Σχέση (3.13) [90]-[94]:

$$S = d \cdot \left[ 0.8 \cdot e^{-(0.125 \cdot h/d)} + 0.17 \right] \quad (3.12)$$

$$S = d \cdot \left[ 1 + 0.24 \cdot e^{-(h/d)} \right] \quad (3.13)$$

Από τις Σχέσεις (3.12) και (3.13) γίνεται αντιληπτό ότι στη θετική πολικότητα η απόσταση πρόσκρουσης  $S$  είναι μεγαλύτερη από την απόσταση πρόσκρουσης προς το έδαφος  $d$  και αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης  $d$ , ενώ στην αρνητική πολικότητα η απόσταση πρόσκρουσης  $S$  είναι μικρότερη από την απόσταση πρόσκρουσης προς γη  $d$  και αυξάνεται και πάλι με την αύξηση της απόστασης  $d$ , ωστόσο με μικρότερο ρυθμό. Η ακτίνα σύλληψης είναι η πλευρική απόσταση μεταξύ του κατερχόμενου οχετού και της γειωμένης ράβδου, επομένως υπολογίζεται ως ο οριζόντιος άξονας της έλλειψης σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = a_o = d \cdot \sqrt{\frac{S^2 - (d-h)^2}{d^2 - (d-h)^2}} \quad (3.14)$$

Όπως προκύπτει από τις (3.12)-(3.14), η ζώνη προστασίας είναι μικρότερη από την προκύπτουσα σύμφωνα με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας για κεραυνό θετικής πολικότητας και αντιστοίχως μεγαλύτερη για κεραυνό αρνητικής πολικότητας [90]-[94], [101].

Από την παραπάνω αρχική μορφή του ελλειπτικού μοντέλου απουσιάζει η παράμετρος του κεραυνικού ρεύματος. Ενσωματώνοντας στις Σχέσεις (3.12) και (3.13) την εξάρτηση της απόστασης πρόσκρουσης από το ρεύμα του κεραυνού προέκυψε μια βελτιωμένη διατύπωση του ελλειπτικού μοντέλου [93], [94] για κεραυνό θετικής πολικότητας (Σχέση (3.15)) και αρνητικής πολικότητας (Σχέση (3.16)):

$$S = 9.8959 \cdot I_p^{0.7251} + 1.7872 \cdot h^{-0.6092} \quad (3.15)$$

$$S = 6.0519 \cdot I_p^{0.6228} + 0.0027 \cdot h^{0.7029} \quad (3.16)$$

### 3.4.3.3 Στατιστικό μοντέλο

Σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν πρόσφατα στο ΑΠΘ αναπτύχθηκε ένα στατιστικό μοντέλο για τη σύλληψη του κεραυνού που λαμβάνει υπόψη την πιθανοκρατική φύση του φαινομένου [95]. Από τη μελέτη διατάξεων τριών ηλεκτροδίων, προέκυψαν καμπύλες πιθανότητας σύλληψης, οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή. Για κάθε κατανομή πιθανότητας σύλληψης η μέση τιμή της πλευρικής απόστασης μεταξύ φορτισμένης και γειωμένης ράβδου για την οποία η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει

στη γειωμένη ράβδο αντιστοιχεί σε 50% χαρακτηρίστηκε “κρίσιμη ακτίνα σύλληψης  $R_c$ ” και η αντίστοιχη απόσταση πρόσκρουσης “κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης  $S_c$ ”. Κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων για διαφορετική πολικότητα, διαφορετική απόσταση πρόσκρουσης φορτισμένης ράβδου-γης ( $d$ ) και διαφορετικό ύψος γειωμένης ράβδου ( $h$ ) βρέθηκε ότι τόσο η ακτίνα σύλληψης όσο και η απόσταση πρόσκρουσης μεταβάλλονται λογαριθμικά συναρτήσει του ύψους της γειωμένης ράβδου [95]-[98]:

$$R_c = d \cdot \left[ c_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{d}\right) + c_2 \right] \quad (3.17)$$

$$S_c = d \cdot \left[ a \cdot \ln\left(\frac{h}{d}\right) + b \right] \quad (3.18)$$

Η παραπάνω γενική μορφή λογαριθμικής εξάρτησης ισχύει για κάθε τιμή πιθανότητας σύλληψης. Συγκεκριμένα, για πιθανότητα σύλληψης 50% (κρίσιμη σύλληψη) οι συντελεστές  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a$ ,  $b$  παίρνουν τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

Απόσταση πρόσκρουσης	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα	Ακτίνα σύλληψης	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 3.5: Οι τιμές των συντελεστών  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $a$ ,  $b$  των εξισώσεων 3.17 και 3.18 [95]-[98].

#### 3.4.3.4 Τροποποιημένο στατιστικό μοντέλο (φαινόμενα γειννίας)

Στη συνέχεια διερευνήθηκαν τα φαινόμενα γειννίας κατά τη σύλληψη του κεραυνού, δηλαδή η μείωση στην αποτελεσματικότητα σύλληψης ενός αλεξικεραυνού λόγω της ύπαρξης ενός γειτονικού αντικειμένου. Για αυτό το σκοπό έγιναν πειράματα επιπέδων αποστάσεων σε διάταξη 4 ηλεκτροδίων, όπου μεταξύ ψηλής εξεταζόμενης ράβδου ύψους  $h$  και φορτισμένης ράβδου τοποθετήθηκε μια κοντή ράβδος ύψους  $h'$ .

Η κοντή «υπό προστασία» ράβδος τοποθετήθηκε σε σταθερή απόσταση ως προς τη φορτισμένη ράβδο, στην κρίσιμη ακτίνα σύλληψης σύμφωνα με τον Πίνακα 3.5. Συνεπώς, εάν  $p$  είναι η πιθανότητα η ηλεκτρική εκκένωση να καταλήξει στην ψηλή ράβδο (πιθανότητα σύλληψης), τότε η πιθανότητα η εκκένωση να καταλήξει στην πλάκα είναι  $0.5(1 - p)$  και ομοίως  $0.5(1 - p)$  στην κοντή ράβδο, καθώς το δύο ενδεχόμενα είναι ισοπίθανα. Έτσι, στην περίπτωση αυτή ως κρίσιμη ακτίνα σύλληψης ( $R_{cn}$ ) θεωρήθηκε η πλευρική απόσταση της ψηλής ράβδου που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης ίση με 33%.

Λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις γειννίας κατά τη σύλληψη της εκκένωσης η κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης ( $S_{cn}$ ) και η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης ( $R_{cn}$ ) της ψηλής ράβδου παρουσία της κοντύτερης ράβδου τροποποιούνται κατά ένα συντελεστή  $\lambda$  σε σχέση με τις προηγούμενες Σχέσεις (3.17), (3.18) που αναφέρονται σε μόνη γειωμένη ράβδο [95] – [97]:

$$R_{cn} = \lambda \cdot R_c \quad (3.19)$$

$$S_{cn} = \lambda \cdot S_c \quad (3.20)$$

Για κρίσιμη σύλληψη (ορισμένη εδώ στο 33%) ο συντελεστής  $\lambda$  παίρνει τις πιο κάτω τιμές:

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

**Πίνακας 3.6:** Οι τιμές του συντελεστή  $\lambda$  που δηλώνει την επίδραση των φαινομένων γεινιάσης κατά τη σύλληψη της εκκένωσης [95]-[97].

Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε από το συγκεκριμένο πείραμα είναι ότι η παρουσία γεινιάζουσας ράβδου επηρεάζει την κατανομή πιθανότητας σύλληψης της ψηλής ράβδου, καθώς η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης μειώνεται κατά μια ποσότητα  $\Delta R_C$ .

Στα παραπάνω πειράματα υπήρχε η δυνατότητα μεταβολής της απόστασης μεταξύ αλεξικεραύνου και γεινιάζουσας υπό προστασία ράβδου και παράλληλα, η θέση της γεινιάζουσας ράβδου διατηρήθηκε σταθερή, στην κρίσιμη ακτίνα σύλληψής της, ώστε να μπορεί να απαλειφθεί η επίδραση του ύψους της  $h$  από τις λογαριθμικές σχέσεις του στατιστικού μοντέλου [95]-[98]. Αντιθέτως, στην πειραματική διαδικασία που θα αναλυθεί παρακάτω, το υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου έχει δεδομένη γεωμετρία με σταθερές αποστάσεις μεταξύ κατασκευών και υπό προστασία κατασκευές μη τοποθετημένες στην κρίσιμη ακτίνα τους ως προς την ακίδα υψηλής τάσης. Επομένως, για τις υπό εξέταση ψηλές ράβδους η κρίσιμη σύλληψη δε θα οριστεί στο 33%, αλλά σε πιθανότητα σύλληψης 50% και δε θα χρησιμοποιηθούν οι τροποποιημένες σχέσεις (3.19), (3.20) και οι συντελεστές του Πίνακα 3.6.

Το τροποποιημένο στατιστικό μοντέλο με γεινιάση που θα χρησιμοποιηθεί ως θεωρητική βάση σύγκρισης στην παρούσα πειραματική διαδικασία ακολουθεί τη μορφή των λογαριθμικών εξισώσεων του απλού στατιστικού μοντέλου [95]-[98] με συντελεστές που προσδιορίζονται ως εξής: από τα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται στην εργασία [95] είναι εμφανές ότι η ακτίνα σύλληψης και η απόσταση πρόσκρουσης της ψηλής ράβδου μεταβάλλονται και πάλι λογαριθμικά συναρτήσει του ύψους της ψηλής ράβδου. Απομονώνοντας για πιθανότητα σύλληψης 50% την απόσταση πρόσκρουσης και την ακτίνα σύλληψης για τα διάφορα ύψη ψηλής ράβδου  $h$  και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εν λόγω μετρήσεις έχουν ληφθεί για διάκενο  $d = 75\text{cm}$ , η κρίσιμη απόσταση πρόσκρουσης ( $S_{cn}$ ) και η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης ( $R_{cn}$ ) της ψηλής ράβδου παρουσία της κοντύτερης ράβδου εκφράζονται με τις Σχέσεις (3.21), (3.22), των οποίων οι συντελεστές  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  παίρνουν τις τιμές του Πίνακα 3.7 [99], [100]:

$$R_C = d \cdot \left[ a_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{d}\right) + a_2 \right] \quad (3.21)$$

$$S_C = d \cdot \left[ b_1 \cdot \ln\left(\frac{h}{d}\right) + b_2 \right] \quad (3.22)$$

Απόσταση πρόσκρουσης	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα	Ακτίνα σύλληψης	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
$b_1$	-0.0320	0.0266	$a_1$	0.2416	0.2516
$b_2$	0.8873	1.1486	$a_2$	0.8958	1.1439

**Πίνακας 3.7:** Οι τιμές των συντελεστών  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  των εξισώσεων 3.21 και 3.22 [99], [100].

### 3.4.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Η σύγκριση των πειραματικών τιμών της μέσης απόστασης πρόσκρουσης και της μέσης ακτίνας σύλληψης με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές των μεθόδων της ενότητας 3.4.2 παρατίθεται αναλυτικά στους Πίνακες 3.8 και 3.9 και γραφικά απεικονίζεται στα Σχήματα 3.9-3.14. Για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων μεγεθών  $h/d$ ,  $R_c/d$  και  $S_c/d$  και την εφαρμογή των μοντέλων της παραγράφου 3.4.3 θεωρήθηκε επίπεδο αναφοράς η γειωμένη μεταλλική πλάκα για τις θέσεις (A) (από γη) και (F), ενώ για τις υπόλοιπες θέσεις (A), (B), (C), (D) και (E) χρησιμοποιήθηκε το επίπεδο του καταστρώματος. Οι εξωτερικές θέσεις (A) (από γη) και (F) έχουν μεγαλύτερο κανονικοποιημένο ύψος σε σύγκριση με τις θέσεις (A) (προσέγγιση από B) και (E), γεγονός που εξηγεί τη μικρότερη κλίση και τη μεγάλη τυπική απόκλιση των κατανομών σύλληψής τους.

d (cm)	Θέση	Ακτίνα σύλληψης $R_c$ (cm)									
		Θετική πολικότητα					Αρνητική πολικότητα				
		Πειραματικά	Κυλ. σφαίρα	Ελλειπτ.	Στατιστ.	Τροποπ. Στατιστ.	Πειραματικά	Κυλ. σφαίρα	Ελλειπτ.	Στατιστ.	Τροποπ. Στατιστ.
50	A (από γη)	23.8	49.2	44.4	42.7	42.4	32.4	49.2	55.5	59.3	54.7
	A	22.5	32.3	30.2	27.7	27.5	23.3	32.4	38.1	38.8	35.8
	B	12.7	28.3	30.2	24.1	23.8	13.2	28.3	41.0	34.6	31.9
	C	9.2	28.3	30.2	24.1	23.8	9.5	28.3	41.0	34.6	31.9
	D	12.8	28.3	30.2	24.1	23.8	13.1	28.3	41.0	34.6	31.9
	E	16.0	28.3	30.2	24.1	23.8	15.0	28.3	41.0	34.6	31.9
	F	30.6	43.9	44.7	37.3	36.9	37.3	43.9	59.1	53.1	49.0
75	A (από γη)	54.6	66.9	67.1	56.9	56.2	67.5	66.9	87.9	80.7	74.4
	A	28.7	47.4	52.4	40.5	39.9	29.0	47.4	72.7	58.6	54.0
	B	13.5	39.6	51.3	34.3	33.5	12.5	39.6	80.9	51.4	47.3
	C	7.9	39.6	51.3	34.3	33.5	10.0	39.6	80.9	51.4	47.3
	D	13.4	39.6	51.3	34.3	33.5	13.1	39.6	80.9	51.4	47.3
	E	22.0	39.6	51.3	34.3	33.5	21.0	39.6	80.9	51.4	47.3
	F	50.3	56.8	66.4	48.8	48.0	62.9	56.8	96.1	71.4	65.8
100	A (από γη)	71.5	80.7	89.0	69.0	68.0	97.8	80.7	123.6	99.7	92.0
	A	32.0	58.7	73.5	50.8	49.8	33.5	58.7	112.5	75.4	69.5
	B	15.6	48.3	71.0	41.9	40.6	14.3	48.3	127.8	65.1	60.0
	C	8.4	48.3	71.0	41.9	40.6	7.0	48.3	127.8	65.1	60.0
	D	14.3	48.3	71.0	41.9	40.6	12.3	48.3	127.8	65.1	60.0
	E	23.7	48.3	71.0	41.9	40.6	28.0	48.3	127.8	65.1	60.0
	F	58.5	67.3	87.2	58.3	57.0	91.8	67.3	137.6	87.4	80.5

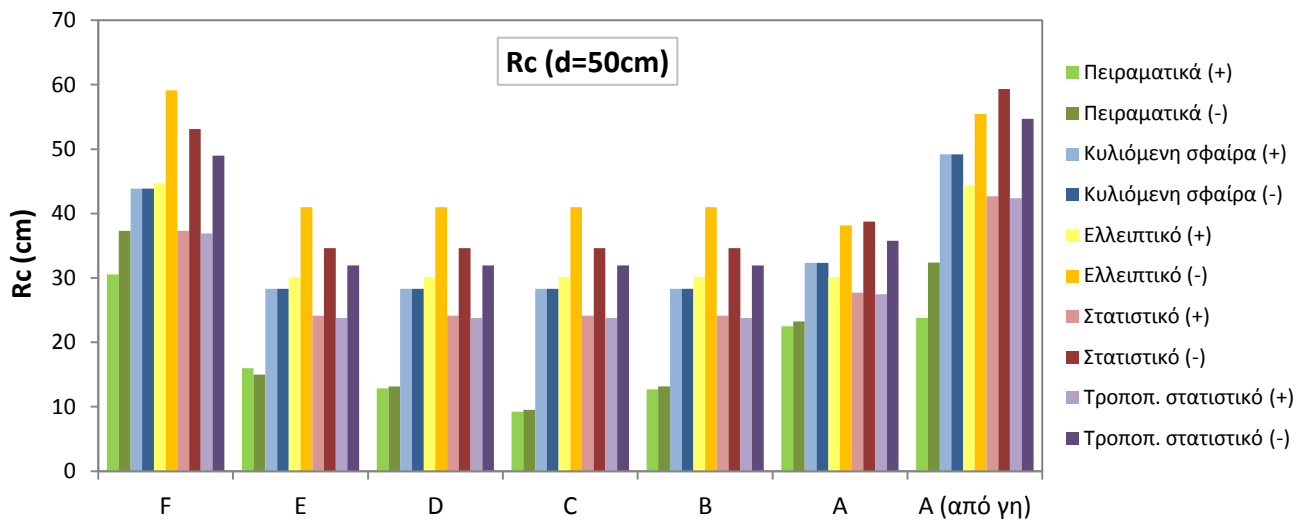
Πίνακας 3.8: Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη μέση ακτίνα σύλληψης .

d (cm)	Θέση	Απόσταση πρόσκρουσης $S_c$ (cm)									
		Θετική πολικότητα					Αρνητική πολικότητα				
		Πειραματικά	Κυλ. σφαίρα	Ελλειπτ.	Στατιστ.	Τροποπ. Στατιστ.	Πειραματικά	Κυλ. σφαίρα	Ελλειπτ.	Στατιστ.	Τροποπ. Στατιστ.
50	A (από γη)	25.4	50.0	44.6	45.3	44.7	33.6	50.0	55.3	61.4	57.2
	A	24.5	33.8	30.5	30.8	30.4	25.2	33.8	37.8	41.2	38.5
	B	22.4	33.8	31.3	31.3	30.8	22.7	33.8	39.0	40.2	38.1
	C	20.7	33.8	31.3	31.3	30.8	20.8	33.8	39.0	40.2	38.1
	D	22.5	33.8	31.3	31.3	30.8	22.7	33.8	39.0	40.2	38.1
	E	24.5	33.8	31.3	31.3	30.8	23.8	33.8	39.0	40.2	38.1
	F	38.9	50.0	46.0	46.0	45.4	44.4	50.0	57.1	59.9	56.6

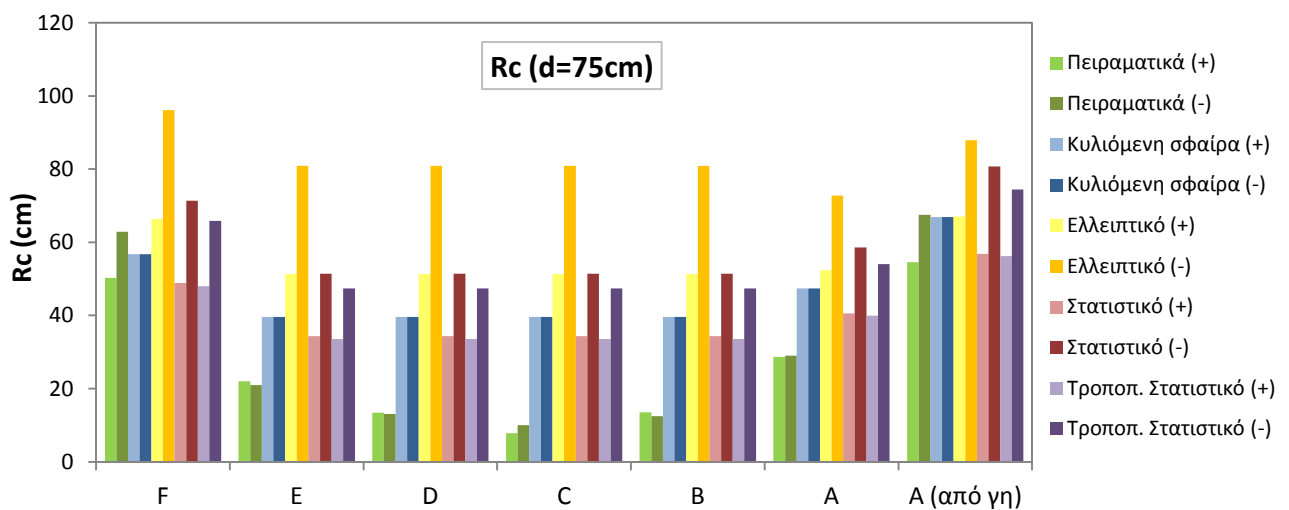


A (από γη)	64.3	75.0	68.8	68.9	68.0	75.6	75.0	85.4	90.1	84.9
A	45.1	58.8	54.7	54.6	53.9	45.3	58.8	68.2	69.5	66.1
B	45.5	58.8	55.5	55.5	54.7	45.3	58.8	69.7	67.8	65.4
75 C	44.2	58.8	55.5	55.5	54.7	44.6	58.8	69.7	67.8	65.4
D	45.5	58.8	55.5	55.5	54.7	45.4	58.8	69.7	67.8	65.4
E	48.7	58.8	55.5	55.5	54.7	48.3	58.8	69.7	67.8	65.4
F	70.2	75.0	70.2	70.0	69.1	79.7	75.0	87.7	87.8	84.0
A (από γη)	92.7	100.0	93.0	92.9	91.6	114.2	100.0	115.9	118.2	112.5
A	67.8	83.8	78.9	78.8	77.7	68.5	83.8	98.9	97.1	93.5
B	70.3	83.8	79.8	80.0	78.9	70.0	83.8	100.6	94.6	92.5
100 C	69.0	83.8	79.8	80.0	78.9	68.9	83.8	100.6	94.6	92.5
D	70.0	83.8	79.8	80.0	78.9	69.6	83.8	100.6	94.6	92.5
E	72.5	83.8	79.8	80.0	78.9	74.0	83.8	100.6	94.6	92.5
F	94.3	100.0	94.4	94.3	93.0	117.9	100.0	118.5	115.2	111.3

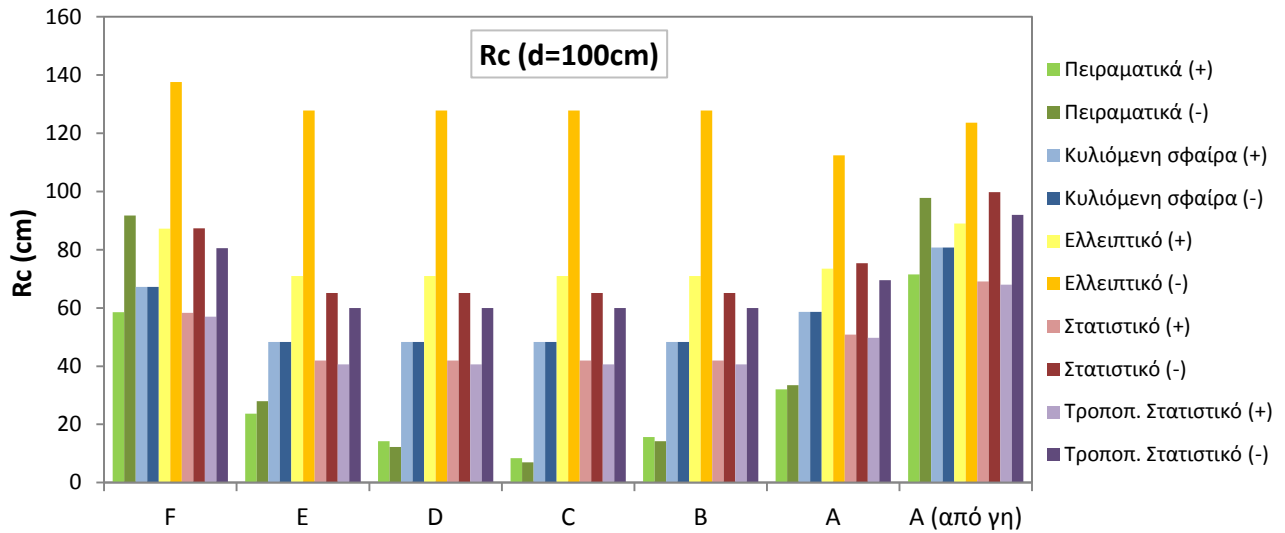
**Πίνακας 3.9:** Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών αποτελεσμάτων για τη μέση απόσταση πρόσκρουσης.



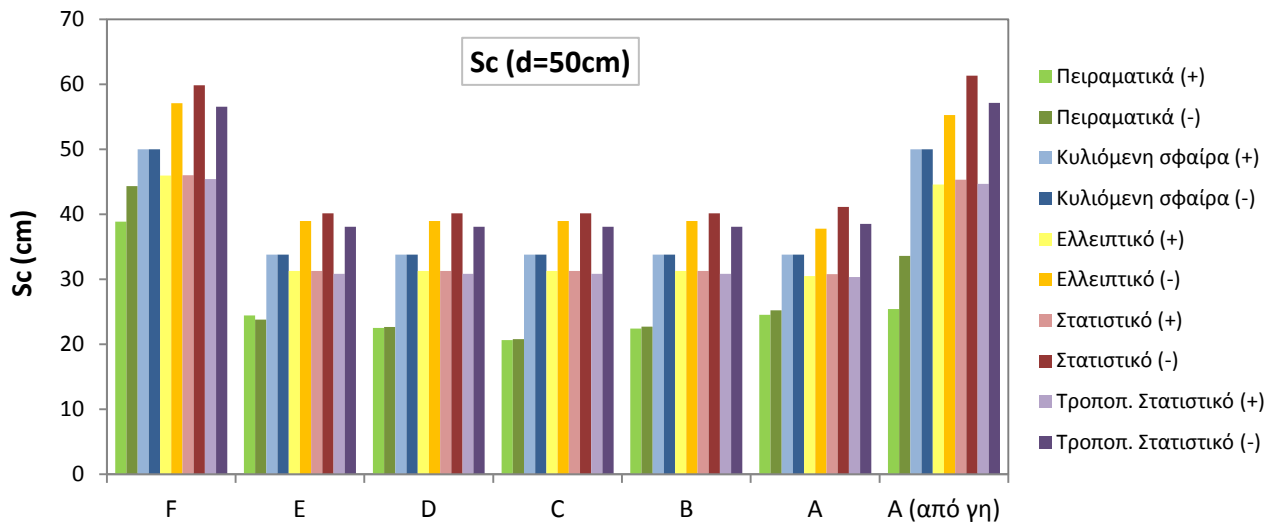
**Σχήμα 3.9:** Συγκεντρικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης για d=50cm.



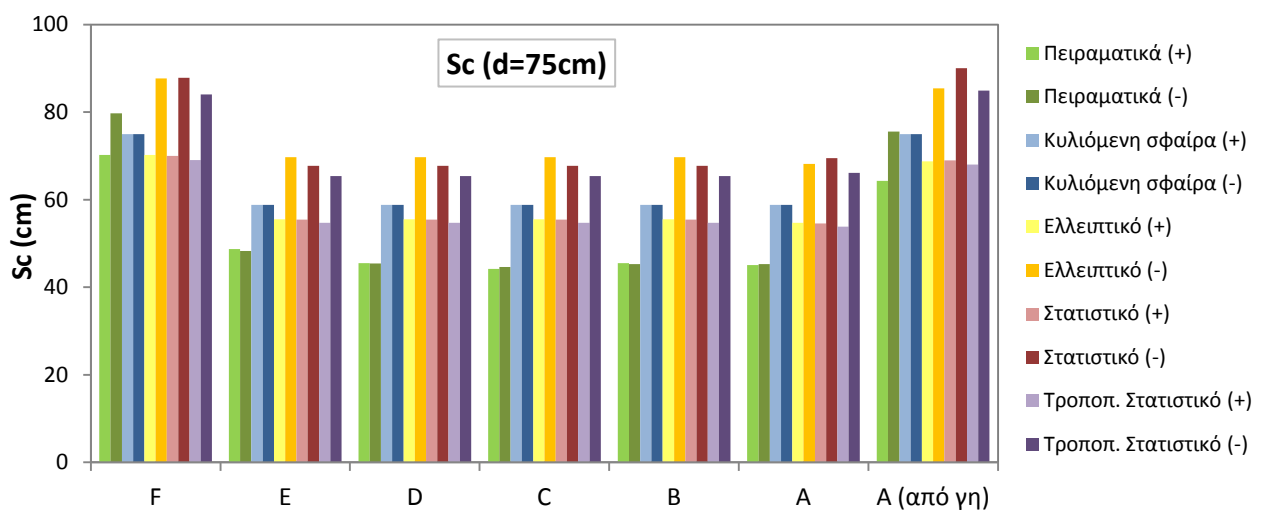
**Σχήμα 3.10:** Συγκεντρικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης για d=75cm.



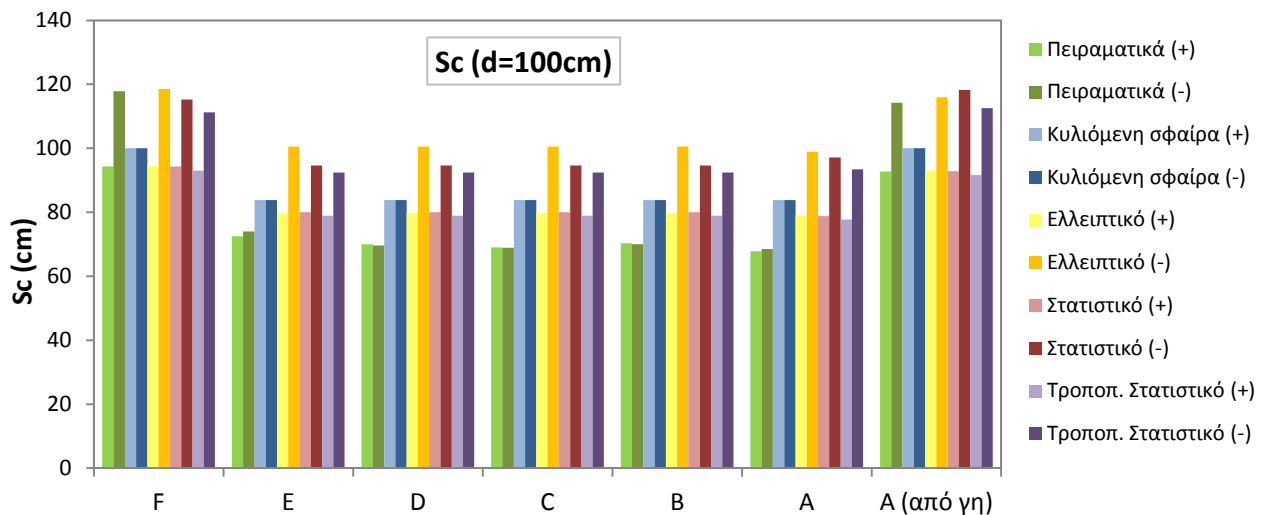
Σχήμα 3.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της ακτίνας σύλληψης για d=100cm.



Σχήμα 3.12: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης για d=50cm.



Σχήμα 3.13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης για d=75cm.



Σχήμα 3.14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της απόστασης πρόσκρουσης για  $d=100\text{cm}$ .

### 3.4.5 Συμπεράσματα

Το στατιστικό μοντέλο, τόσο στην αρχική [95]-[98], όσο και στην τροποποιημένη εκδοχή του, παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη της ακτίνας σύλληψης για θετική πολικότητα εκκένωσης ακόμα και για τις περιοχές ισοϋψών ράβδων (B), (C) και (D), όπου η απόκλιση μεταξύ πειραματικών και θεωρητικά αναμενόμενων τιμών είναι μεγάλη, ακριβώς διότι τα μοντέλα έχουν διατυπωθεί για τη ζώνη προστασίας που παρέχει μια απομονωμένη ακίδα. Στην αρνητική πολικότητα η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας παρουσιάζει βελτιωμένη ακρίβεια, αν και είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι για τις ακραίες θέσεις (A) (από γη) και (F), καθώς αυξάνει το διάκενο, τα στατιστικά μοντέλα υπερέχουν και πάλι σε ακρίβεια.

Όσον αφορά στην απόσταση πρόσκρουσης, στο σύνολο των περιπτώσεων παρατηρείται μεγαλύτερη συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών. Στις μετρήσεις θετικής πολικότητας υπερέχει το τροποποιημένο στατιστικό μοντέλο. Ωστόσο, ανάλογης ακρίβειας σε όλες τις θέσεις μέτρησης είναι το στατιστικό και το ελλειπτικό μοντέλο. Τα ευρήματα είναι διαφορετικά στην αρνητική πολικότητα, όπου η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας εμφανίζει τη μικρότερη απόκλιση στις εσωτερικές περιοχές (B), (C), (D) και (E). Το ίδιο ισχύει και για το διάκενο  $d=50\text{cm}$  στις εξωτερικές θέσεις (A) (από γη) και (F), αλλά καθώς αυξάνει το διάκενο, τα άλλα τρία μοντέλα έχουν παραπλήσια βελτιωμένη επίδοση. Ειδικά για  $d=100\text{cm}$ , το ελλειπτικό μοντέλο -που έχει προκύψει από μετρήσεις σε διάκενα  $100\text{cm}-300\text{cm}$  [90]-[94]- παρέχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια.

Οι πειραματικές τιμές των  $R_c$  και  $S_c$  για τις ακραίες θέσεις (A) (από γη) και (F) είναι πλησιέστερα στις προβλέψεις των μοντέλων, διότι η προσέγγιση των συγκεκριμένων ράβδων έγινε από τη γειωμένη μεταλλική πλάκα. Αντιθέτως, η μεγάλη απόκλιση των θέσεων (A)-(E) μπορεί να αποδοθεί στην τοποθέτηση της ράβδου Υ.Τ. εντός του συλλεκτήριου όγκου πολλαπλών κατασκευών. Η μείωση αυτής της απόκλισης, καθώς αυξάνεται το διάκενο, ενδεχομένως σχετίζεται με το μειούμενο συντελεστή υπερφόρτισης.

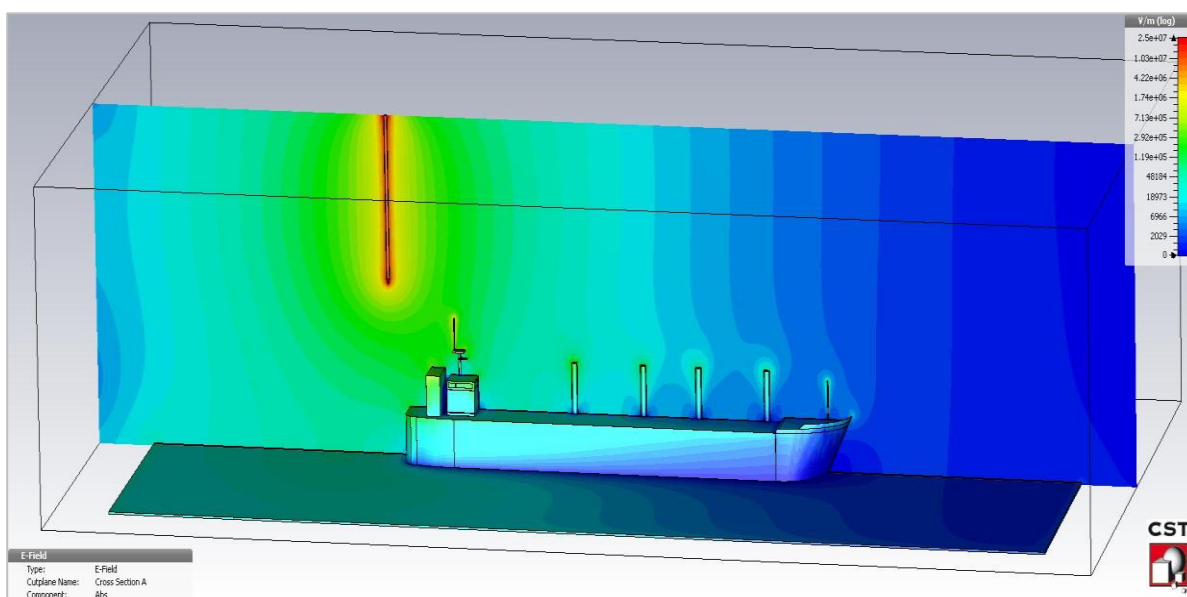
Η πειραματική διαδικασία ανέδειξε τα φαινόμενα γειννίασης και την πιθανότητα σύλληψης ως παράγοντες που επηρεάζουν ιδιαίτερα τη ζώνη προστασίας που παρέχεται από μια δομή. Η μέθοδος της κυλιόμενης σφαίρας υπήρξε ανεπαρκής για περιοχές, όπως η

γέφυρα, η πλήρη ή άλλοι χώροι ελέγχου που μπορεί να φέρουν κεραιές τηλεπικοινωνιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να χρησιμοποιείται η ίσαλος γραμμή του πλοίου ως επίπεδο αναφοράς, ενώ για τις εσωτερικές ζώνες θα πρέπει να χρησιμοποιείται το κατάστρωμα.

### 3.4.6 Προσομοιώσεις ηλεκτρικού πεδίου

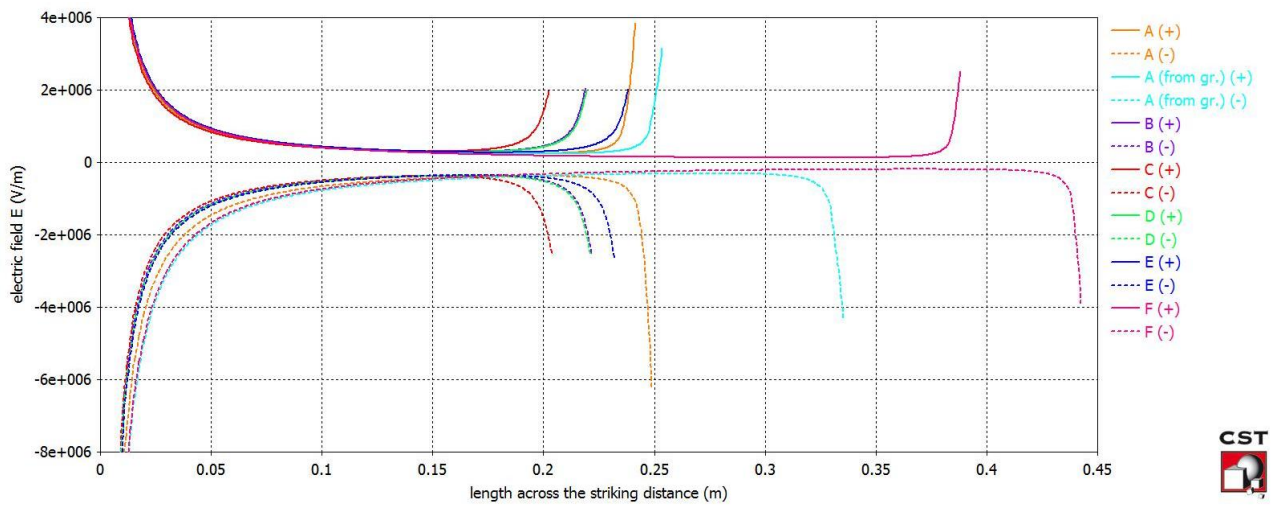
Για την καλύτερη κατανόηση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τις κατανομές πιθανότητας σύλληψης των Σχημάτων 3.8 (α), (β) και (γ), πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις της πειραματικής διαδικασίας με το λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής επίλυσης CST Studio Suite [102]. Η ακριβής γεωμετρία της πειραματικής διάταξης (υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου, ράβδος Υ.Τ. και γειωμένη μεταλλική πλάκα) σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του CST Studio και για κάθε συνδυασμό εξεταζόμενης θέσης, διακένου  $d$  και πολικότητας η ράβδος Υ.Τ. στο τρισδιάστατο μοντέλο τοποθετήθηκε στην πειραματική μέση ακτίνα σύλληψης  $R_c$  και τέθηκε στην αντίστοιχη στιγμιαία τάση διάσπασης, όπως αυτή προέκυψε από τα παλμογραφήματα των εκκενώσεων που κατέγραψε το ψηφιακό μετρητικό σύστημα.

Ενδεικτικά στο Σχήμα 3.15 φαίνεται μία απεικόνιση της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μοντέλου και στο κατακόρυφο επίπεδο που περιλαμβάνει τη μέση απόσταση πρόσκρουσης, για την περίπτωση προσέγγισης της θέσης (A) από γη (για  $d=50\text{cm}$  και θετική πολικότητα επιβαλλόμενης τάσης).

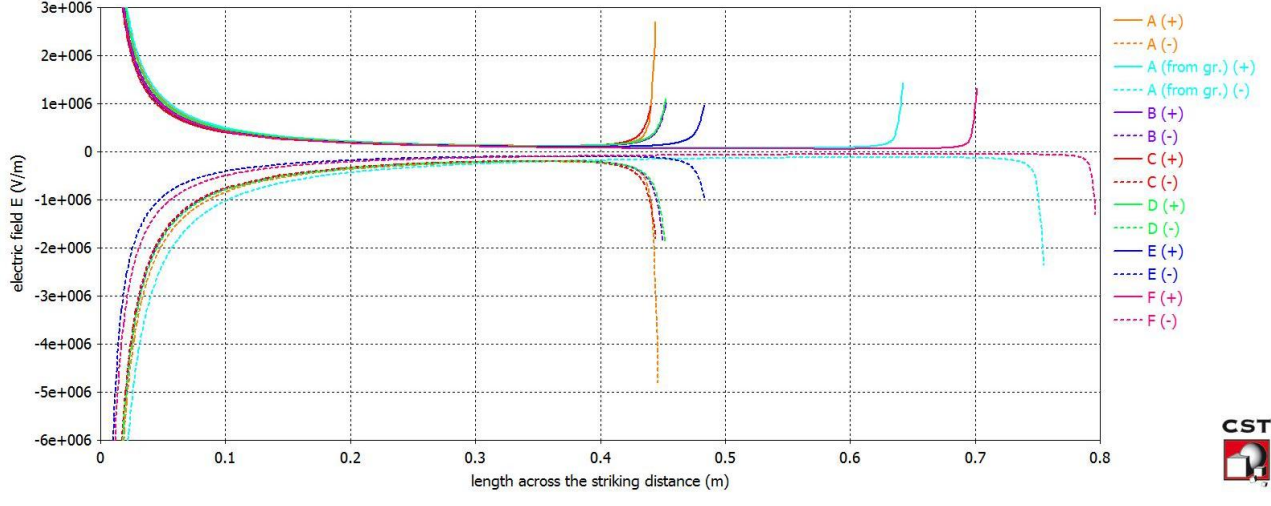


**Σχήμα 3.15:** Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του μοντέλου και στο κατακόρυφο επίπεδο της μέσης απόστασης πρόσκρουσης. Προσέγγιση θέσης (A) από γη για  $d=50\text{cm}$  (+).

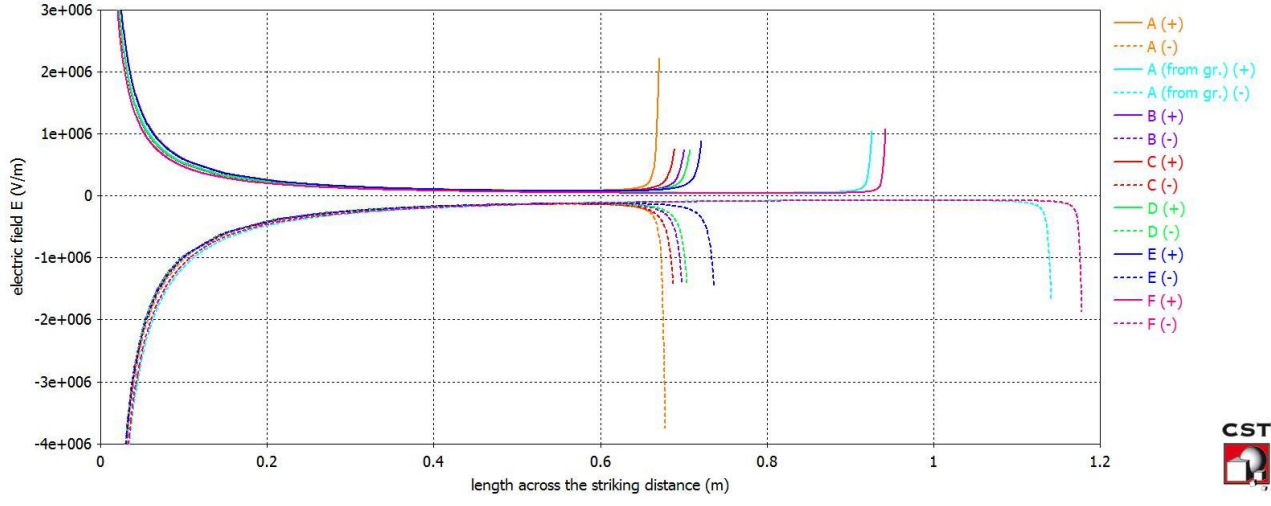
Το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της μέσης απόστασης πρόσκρουσης  $S_c$  για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.16 (α), (β) και (γ), όπου για λόγους ευκρίνειας οι κατανομές για αρνητική πολικότητα επιβαλλόμενης τάσης απεικονίζονται με αρνητικές τιμές. Επίσης, στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην άκρη της εξεταζόμενης θέσης του μοντέλου συναρτήσει του αντίστοιχου κανονικοποιημένου ύψους της (τα αποτελέσματα προσεγγίζονται ικανοποιητικά με λογαριθμικές καμπύλες).



(α)

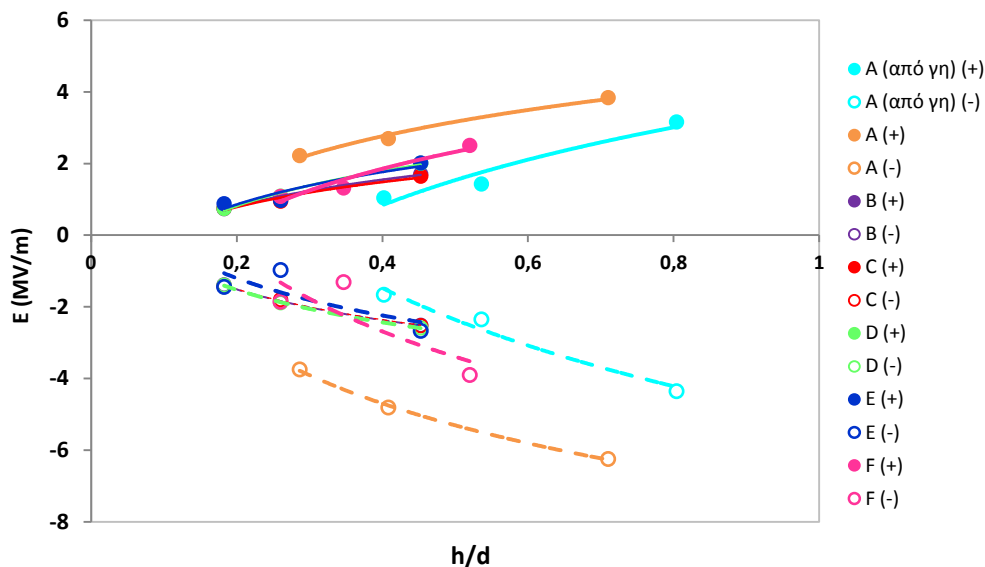


(β)



(γ)

**Σχήμα 3.16:** Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της μέσης απόστασης πρόσκρουσης  $S_c$  για (α)  $d=50\text{cm}$  (β)  $d=75\text{cm}$  και (γ)  $d=100\text{cm}$ .



**Σχήμα 3.17:** Ηλεκτρικό πεδίο στην άκρη της γειωμένης ακίδας του μοντέλου (μέση απόσταση πρόσκρουσης  $S_c$ ).

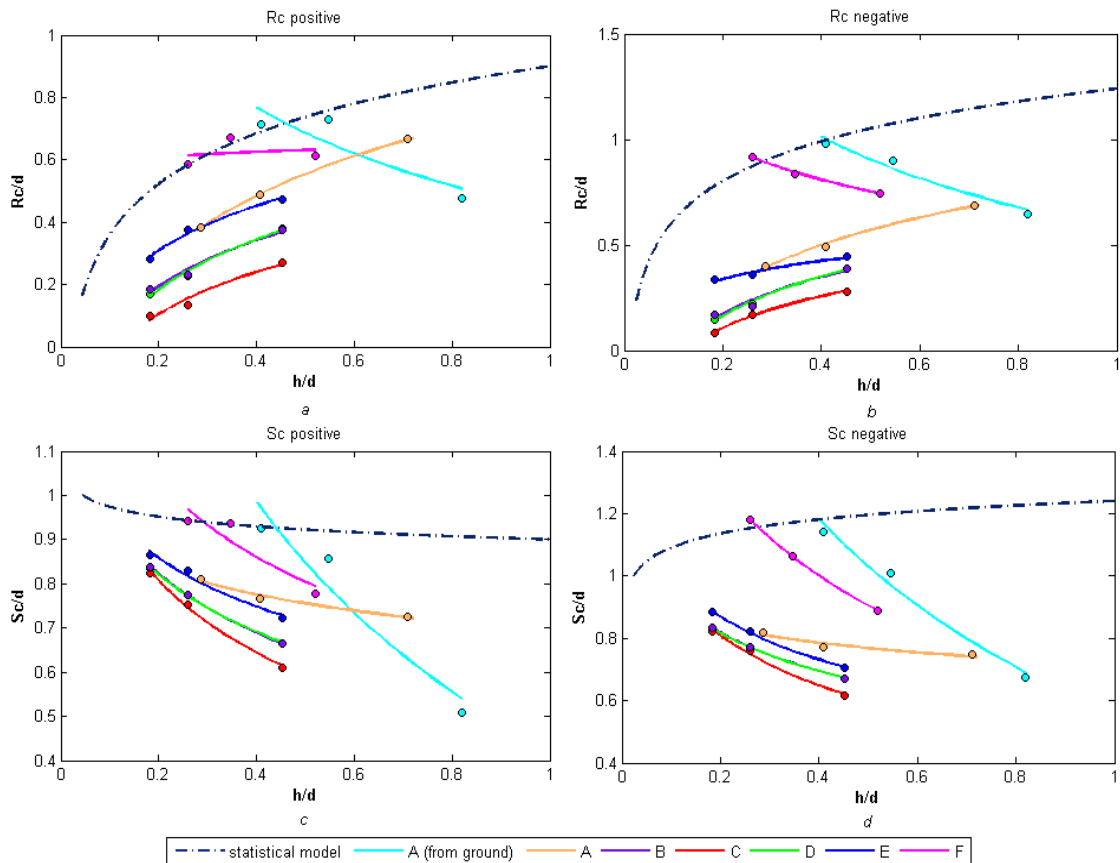
Οι εν λόγω προσομοιώσεις δεν μπορούν να αναπαράγουν πλήρως το φυσικό μηχανισμό της διάσπασης, ο οποίος στο τελικό του στάδιο περιλαμβάνει την ανάπτυξη εκκενώσεων αντίθετης πολικότητας, οι οποίες γεφυρώνουν το διάκενο, ωστόσο μπορούν να παρέχουν ορισμένα ποιοτικά συμπεράσματα. Για δεδομένο διάκενο  $d$  οι αυξημένες τιμές ηλεκτρικού πεδίου στην αρνητική πολικότητα, που σχετίζονται και με την αυξημένη επιβαλλόμενη στιγμιαία τάση διάσπασης σε σύγκριση με τη θετική πολικότητα, δικαιολογούν τη μετατόπιση των αντίστοιχων κατανομών σύλληψης του Σχήματος 3.8 σε μεγαλύτερες αποστάσεις, καθώς ο αναπτυσσόμενος θετικός ανερχόμενος οχετός στην περίπτωση αυτή, επαρκεί για τη γεφύρωση του διακένου ακόμα και σε θέσεις πιο απομακρυσμένες από τον κατερχόμενο οχετό. Αυτή η διαφοροποίηση των  $R_c$  και  $S_c$  ανάμεσα στις δύο πολικότητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16, είναι έντονη για το διάκενο  $d=100\text{cm}$ , αλλά μειώνεται στα μικρότερα διάκενα  $d=50\text{cm}$  και  $d=75\text{cm}$ , λόγω της ανταγωνιστικής ανερχόμενης εκκένωσης που αναπτύσσεται από τις γειτνιάζουσες δομές, οι οποίες μειώνουν την πιθανότητα σύλληψης της εξεταζόμενης ακίδας σε μια δεδομένη απόσταση. Η αύξηση των  $R_c$  και  $S_c$  στην αρνητική πολικότητα παρατηρείται έντονα στις θέσεις (A) (από γη) και (F), οι οποίες (όπως φαίνεται και από τις συγκρίσεις των Πινάκων 3.7 και 3.8) προσεγγίζουν τη συμπεριφορά απομονωμένης ακίδας στα μεγαλύτερα διάκενα, λιγότερο για τις θέσεις (A) και (E), όπου επικρατούν έντονα φαινόμενα γειτνίασης, ενώ δεν παρατηρείται στις θέσεις (B), (C) και (D). Πρόκειται για περιπτώσεις ισοϋψών ακίδων με έντονη επικάλυψη των συλλεκτήριων όγκων τους, η οποία, όπως φαίνεται και από τις τιμές ηλεκτρικού πεδίου του Σχήματος 3.17 παρουσιάζει λιγότερες μεταβολές με την πολικότητα και το διάκενο.

Η ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου σε μια ακίδα όσο μικραίνει το διάκενο (βλ. Σχήμα 3.17) δεν αποδίδεται μόνο στη μείωση της απόστασης μεταξύ φορτισμένης και γειωμένης ράβδου, αλλά και στην επίδραση των φαινομένων γειτνίασης, τα οποία διαταράσσουν την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου επιφέροντας αυξημένες τιμές ηλεκτρικού πεδίου σε σύγκριση με συνθήκες απομονωμένης ράβδου. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στις περιπτώσεις των θέσεων (A) (από γη) και (F), όπου όσο μικραίνει το διάκενο, τόσο ενισχύονται τα φαινόμενα γειτνίασης από τη δομή (J) και την πλήρη αντίστοιχα.

Αξιοσημείωτη είναι η συμπεριφορά της ακίδας (A), η οποία όταν προσεγγίζεται από τη θέση (B) «βλέπει» σε πολύ κοντινή απόσταση ως γειτνιάζουσες δομές όχι μόνο την οροφή της γέφυρας, αλλά κυρίως τις δικές της οριζόντιες διαμορφώσεις ως «κεραία», οι οποίες διατηρούν την έντονη επίδρασή τους ακόμα και στα μεγάλα διάκενα. Ως αποτέλεσμα, υφίσταται μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρικού πεδίου σε σύγκριση με την προσέγγιση από τη γειωμένη μεταλλική πλάκα, ενώ δεν παρατηρείται αύξηση της ακτίνας σύλληψης στην αρνητική πολικότητα, λόγω της αυξημένης επίδρασης των φαινομένων γειτνίασης.

### 3.4.7 Διερεύνηση φαινομένων γειτνίασης

Προκειμένου να εξαχθούν περαιτέρω συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους που επιδρούν στα φαινόμενα γειτνίασης, η μεταβολή των πειραματικών τιμών  $R_c$  και  $S_c$  των Πινάκων 3.8 και 3.9, κανονικοποιημένων ως προς το διάκενο  $d$ , με το κανονικοποιημένο ύψος της εξεταζόμενης θέσης  $h/d$  προσεγγίστηκε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.18, με λογαριθμικές σχέσεις, σε αντιστοιχία προς τις λογαριθμικές σχέσεις της μορφής των (3.17) και (3.18) του στατιστικού μοντέλου [95]-[98], με συντελεστές που παρατίθενται στους Πίνακες 3.10 και 3.11.



**Σχήμα 3.18:** Κανονικοποιημένα μεγέθη συναρτήσει του κανονικοποιημένου ύψους της εξεταζόμενης θέσης  $h/d$  (α)  $R_c/d (+)$ , (β)  $R_c/d (-)$ , (γ)  $S_c/d (+)$  και (δ)  $S_c/d (-)$

Στην παρούσα πειραματική διαδικασία η μεταβολή του κανονικοποιημένου ύψους  $h/d$  για κάθε εξεταζόμενη θέση του μοντέλου επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας το διάκενο  $d$ , επομένως τα συμπεράσματα συνδέονται με το κεραυνικό ρεύμα. Για την περίπτωση της θέσης (F) χρησιμοποιήθηκε το ύψος της πλώρης ως το ύψος  $h_m$  της γειτνιάζουσας κατασκευής. Ομοίως, για την προσέγγιση της θέσης (A) από τη γειωμένη πλάκα θεωρήθηκε

γεινιάζουσα κατασκευή η δομή (J). Οι συντελεστές των Πινάκων 3.10 και 3.11 δεν έχουν γενική ισχύ, αλλά μόνο εντός του εύρους των λόγων  $h/d$  που μετρήθηκαν και συνδέονται αποκλειστικά και μόνο με τη συγκεκριμένη γεωμετρία του υπό κλίμακα μοντέλου και τις συνθήκες φόρτισης, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.3.2.

Με εξαίρεση τις θέσεις (A) (από γη) και (F), οι κανονικοποιημένες  $R_c/d$  καμπύλες του Σχήματος 3.18 ακολουθούν τη μορφή του στατιστικού μοντέλου με μια κατακόρυφη μετατόπιση σε χαμηλότερες  $R_c/d$  τιμές. Η μετατόπιση αυτή είναι αναμενόμενη με δεδομένη τη γεωμετρία των συγκεκριμένων περιοχών και πιθανώς λόγω των συνθηκών υπερφόρτισης. Οι θέσεις (A) (από γη) και (F) παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά με τις καμπύλες  $R_c/d$  να είναι φθίνουσες λόγω της γεωμετρίας των περιοχών αυτών. Συγκεκριμένα, για  $d=100\text{cm}$  οι θέσεις (F) και (A) (από γη) προσεγγίζουν την κατάσταση απομονωμένης ράβδου, ενώ για  $d=75\text{cm}$  και πολύ περισσότερο για  $d=50\text{cm}$  εντείνονται τα φαινόμενα γεινιάσης από την πλήρη και από τη δομή (J) σε συνδυασμό με την πρύμνη αντίστοιχα. Αυτή η μείωση της ακτίνας σύλληψης σε υψηλές τιμές του λόγου  $h/d$  -που αναλογούν σε μικρά κεραυνικά ρεύματα- λόγω πολλαπλών φαινομένων γεινιάσης αλλάζει την κλίση της καμπύλης. Για όλες τις περιπτώσεις εξεταζόμενων θέσεων, η απόκλιση από την καμπύλη του στατιστικού μοντέλου είναι μεγαλύτερη στην αρνητική πολικότητα, επιβεβαιώνοντας τα ευρήματα στις [95]-[98] ότι τα φαινόμενα γεινιάσης είναι πιο σημαντικά στην αρνητική πολικότητα.

Όσον αφορά στις καμπύλες  $S_c/d$ , για όλες τις εξεταζόμενες θέσεις και στις δύο πολικότητες, είναι φθίνουσες, με αποτέλεσμα να έρχονται σε συμφωνία με την κλίση του στατιστικού μοντέλου στη θετική πολικότητα και σε αντίθεση στην αρνητική πολικότητα. Στις περιπτώσεις των θέσεων (A) (από γη) και (F) η έντονη μείωση της ακτίνας σύλληψης λόγω των φαινομένων γεινιάσης στα μικρά διάκενα προκαλεί αντιστοίχως και έντονη μείωση στην απόσταση πρόσκρουσης.

Οι συντελεστές που εκφράζουν την κλίση ( $a$ ,  $c_1$ ) και την κατακόρυφη μετατόπιση ( $b$ ,  $c_2$ ) των λογαριθμικών εξισώσεων εξαρτώνται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά, όπως η οριζόντια απόσταση μεταξύ εξεταζόμενης ράβδου και γεινιάζουσας (L) και ο λόγος των υψών τους ( $h_p/h_m$ , όπου  $h_p$ =το ύψος της γεινιάζουσας υπό προστασία ράβδου και  $h_m$ =το ύψος της εξεταζόμενης ράβδου).

Θέση	Εύρος εξεταζόμενων λόγων $h/d$	$\frac{h_p}{h_m}$	L(cm)	Μέση ακτίνα σύλληψης $R_c$ (cm)			
				$C_1$		$C_2$	
				Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
<b>A (από γη)</b>	0.41-0.82	0.72	10	-0.363	-0.486	0.44	0.57
<b>A</b>	0.28-0.71	0.62	43	0.313	0.320	0.77	0.79
<b>B</b>	0.18-0.45	1	25	0.214	0.249	0.54	0.58
<b>C</b>	0.18-0.45	1	20	0.194	0.216	0.42	0.46
<b>D</b>	0.18-0.45	1	25	0.235	0.270	0.56	0.60
<b>E</b>	0.18-0.45	0.64	22	0.208	0.124	0.64	0.54
<b>F</b>	0.26-0.52	0.69	9	0.026	-0.246	0.65	0.58
<b>Στατιστικό μοντέλο (χωρίς φαινόμενα γεινιάσης)</b>				0.235	0.272	0.90	1.24

**Πίνακας 3.10:** Συντελεστές σύμφωνα με την εξίσωση 3.17 του στατιστικού μοντέλου για τη μέση ακτίνα σύλληψης  $R_c$  όλων των εξεταζόμενων θέσεων.



Θέση	Εύρος εξεταζόμενων λόγων $h/d$	$\frac{h_p}{h_m}$	L(cm)	Μέση απόσταση πρόσκρουσης $S_c$ (cm)			
				a		b	
				Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
A (από γη)	0.41-0.82	0.72	10	-0.623	-0.687	0.42	0.55
A	0.28-0.71	0.62	43	-0.090	-0.076	0.69	0.72
B	0.18-0.45	1	25	-0.193	-0.179	0.51	0.53
C	0.18-0.45	1	20	-0.236	-0.230	0.43	0.44
D	0.18-0.45	1	25	-0.187	-0.176	0.52	0.53
E	0.18-0.45	0.64	22	-0.158	-0.198	0.60	0.55
F	0.26-0.52	0.69	9	-0.249	-0.422	0.63	0.61
<b>Στατιστικό μοντέλο (χωρίς φαινόμενα γειννίασης)</b>				-0.032	0.065	0.90	1.24

**Πίνακας 3.11:** Συντελεστές σύμφωνα με την εξίσωση 3.18 του στατιστικού μοντέλου για τη μέση απόσταση πρόσκρουσης  $S_c$  όλων των εξεταζόμενων θέσεων

Μια γενική εκτίμηση που προκύπτει από τους Πίνακες 3.10 και 3.11 και τις καμπύλες του Σχήματος 3.18 και ισχύει για το εύρος των εξεταζόμενων λόγων  $h/d$  είναι ότι και για τις δύο πολικότητες επιβαλλόμενης τάσης οι συντελεστές  $b$ ,  $c_2$  φαίνεται να εξαρτώνται κυρίως από το λόγο των υψών. Η οριζόντια απόσταση  $L$  φαίνεται να έχει μεγαλύτερη επίδραση στους συντελεστές  $a$ ,  $c_1$ . Αύξηση της απόστασης  $L$  οδηγεί σε μεγαλύτερες κλίσεις  $c_1$  και σε μείωση της απόλυτης τιμής του  $a$ , με εξαίρεση τις θέσεις (A) (από γη) και (F).

### 3.4.8 Συζήτηση

Η σύλληψη του κεραυνού είναι μία σύνθετη φυσική διαδικασία που δεν μπορεί να αναπαραχθεί πλήρως στο περιβάλλον ενός εργαστηρίου, μόνο να προσεγγιστεί ποιοτικά μέσα από κατάλληλα πειράματα κλίμακας. Στη βιβλιογραφία οι εσωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις (υπερτάσεις χειρισμών) με χρόνους ανόδου εκατοντάδες  $\mu s$  έχουν χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να διερευνηθεί η έναυση και η πρόοδος της ανερχόμενης εκκένωσης αντιθέτου φοράς, διότι στην πράξη η μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου, την οποία υφίσταται μια κατασκευή, καθώς την προσεγγίζει ο κατερχόμενος κεραυνικός οχετός είναι πολύ αργή, με χρόνους αυτής της τάξης μεγέθους. Είναι αποδεκτό, ωστόσο, ότι το τελικό στάδιο της εκκένωσης που περιλαμβάνει τη διάσπαση του διακένου και τη σύλληψη μπορεί επαρκώς να αναπαραχθεί με χρήση εξωτερικών κρουστικών υψηλών τάσεων [90]-[94], [95]-[98], [103]-[106], διότι είναι μία πολύ πιο σύντομη διαδικασία. Βέβαια, στο περιβάλλον του εργαστηρίου η διάσπαση σε διάκενα ακίδας-πλάκας και ακίδας-ακίδας συντελείται κατά κύριο λόγο με το μηχανισμό νηματίων (streamers), ενώ στο πλήρους κλίμακας φαινόμενο επικρατούν οι οχετοί (leaders). Σύμφωνα με τα ευρήματα στις [95]-[98] αυτή η διαφορετική αναλογία στην ανάπτυξη οχετών και νηματίων μεταξύ πλήρους και υπό κλίμακα μοντέλου λαμβάνεται ουσιαστικά υπόψη με τη χρήση του κανονικοποιημένου λόγου  $S/d$ . Επιπλέον, τόσο το ελλειπτικό [90]-[94], [105], όσο και το στατιστικό μοντέλο [95]-[98] έχουν προκύψει μέσα από πειράματα κλίμακας με κεραυνικές τάσεις 1.2/50 και στη σύγκριση με δεδομένα πεδίου έχουν επιδείξει ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας.

Η παρούσα πειραματική διαδικασία μπορεί συνεπώς να θεωρηθεί επαρκής για την αναπαράσταση του φαινομένου της σύλληψης του κεραυνού από τη γεωμετρία ενός

πλοίου και τη διατύπωση χρήσιμων ποιοτικών συμπερασμάτων σχετικά με τις ζώνες προστασίας που διαμορφώνονται από τις δομές που βρίσκονται στην επιφάνειά του.


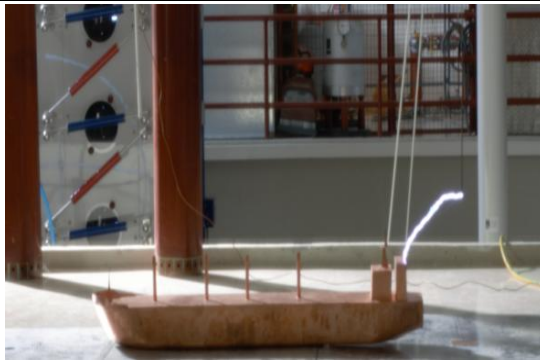


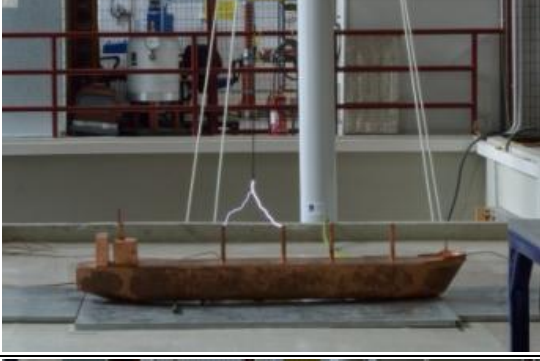





Για την επέκταση των διαγραμμάτων του Σχήματος 3.18 στις περιοχές, όπου ο λόγος  $h/d$  πλησιάζει το μηδέν ή τη μονάδα, απαιτούνται πρόσθετες μετρήσεις σε περισσότερα διάκενα ράβδου-πλάκας ή σε μοντέλο διαφορετικού λόγου κλίμακας. Διατηρώντας το ίδιο πλήρους κλίμακας πλοίο ως αναφορά, επιλογή ενός διαφορετικού λόγου κλίμακας θα επέφερε αλλαγή των διαστάσεων και αναλόγως με τα εξεταζόμενα διάκενα ράβδου-πλάκας  $d$  θα προέκυπταν διαφορετικά κανονικοποιημένα μεγέθη  $h/d$ ,  $Sc/d$  και  $Rc/d$  υπό τις ίδιες γεωμετρικές συνθήκες γειτνίασης.

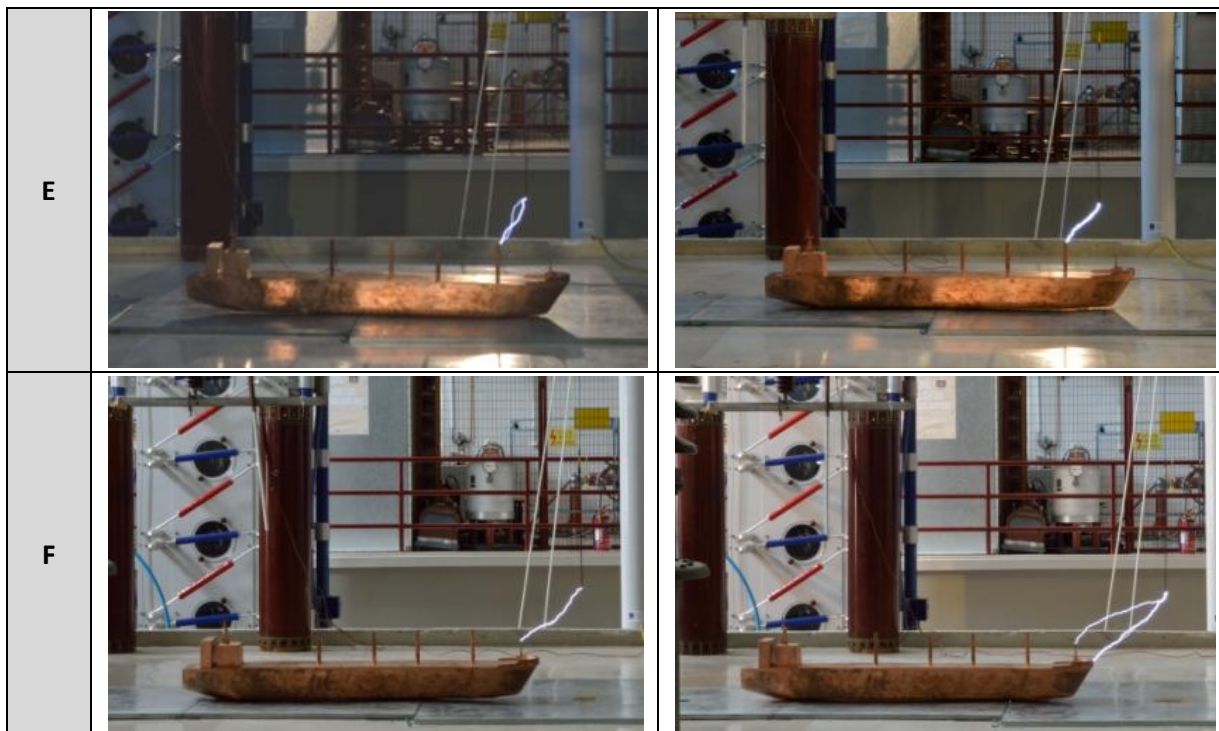
Από την άλλη πλευρά, η μελέτη διαφόρων μοντέλων πλοίων με διαφορετική γεωμετρία, διαφορετικά ύψη υπερκατασκευών και σχετικές μεταξύ τους αποστάσεις θα επέτρεπε να παραχθούν τα ανάλογα γραφήματα του Σχήματος 3.18 και να υπολογιστούν οι σχετικοί συντελεστές των Πινάκων 3.9 και 3.10 υπό διαφορετικές συνθήκες γειτνίασης και να διερευνηθεί εκτενέστερα η εξάρτησή τους από τις γεωμετρικές παραμέτρους.

Σε σύνθετες γεωμετρικές με πολλαπλές γειτνιάζουσες κατασκευές, όπως η περίπτωση ενός πλοίου, αποδείχθηκε ότι τα εμπειρικά μοντέλα στην πλειοψηφία τους, συμπεριλαμβανομένης και της μεθόδου της κυλιόμενης σφαίρας, υπερεκτιμούν την ακτίνα σύλληψης, οδηγώντας σε εσφαλμένη επιλογή του ύψους και της θέσης εγκατάστασης ενός αλεξικεραύνου. Επιπλέον παρατηρήθηκε αισθητή μείωση της ακτίνας σύλληψης λόγω φαινομένων γειτνίασης με παρακείμενες κατασκευές και επιβεβαιώθηκε η έντονη επίδρασή τους για αρνητική πολικότητα εκκένωσης και λόγους υψών  $h_p/h_m$  που υπερβαίνουν το 0.6 και οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή σε βασικές δομές ενός πλοίου. Επομένως, αναδείχθηκε μέσα από τα εν λόγω πειράματα η ανάγκη για στοχευμένη εφαρμογή συστημάτων εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας στη δομή ενός πλοίου σε αντίθεση προς τις συνήθεις απλουστευμένες απαιτήσεις των προτύπων. Στατιστικά μοντέλα που ενσωματώνουν την πιθανότητα σύλληψης παρέχουν βελτιωμένες εκτιμήσεις για την προκύπτουσα ζώνη προστασίας. Σε περιπτώσεις, όπου δεν κυριαρχούν τα φαινόμενα γειτνίασης, προτείνεται η χρήση του απλού στατιστικού μοντέλου με υπολογισμούς που αντιστοιχούν σε 50% πιθανότητα σύλληψης. Σε συνθήκες γεωμετρίας με λόγους υψών  $h_p/h_m$  μεγαλύτερους από 0.6 μπορεί και πάλι να εφαρμοστεί το απλό στατιστικό μοντέλο [95]-[98] σε μια πιο συντηρητική ανάλυση, στη βάση ακτίνας σύλληψης που αντιστοιχεί σε 97.5% πιθανότητα σύλληψης, καθώς δεν υπάρχει μια γενικευμένη έκφραση του μοντέλου υπό γειτνίαση που να καλύπτει όλες τις δυνατές περιπτώσεις οριζόντιας τοποθέτησης και σχετικής διαφοράς ύψους γειτονικών δομών. Περαιτέρω ακρίβεια για τη στοχευμένη προστασία κρίσιμων ιστών μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή ανάλυσης θωράκισης που θα ενσωματώνει και τα φαινόμενα γειτνίασης, όπως θα παρουσιασθεί στο επόμενο Κεφάλαιο.

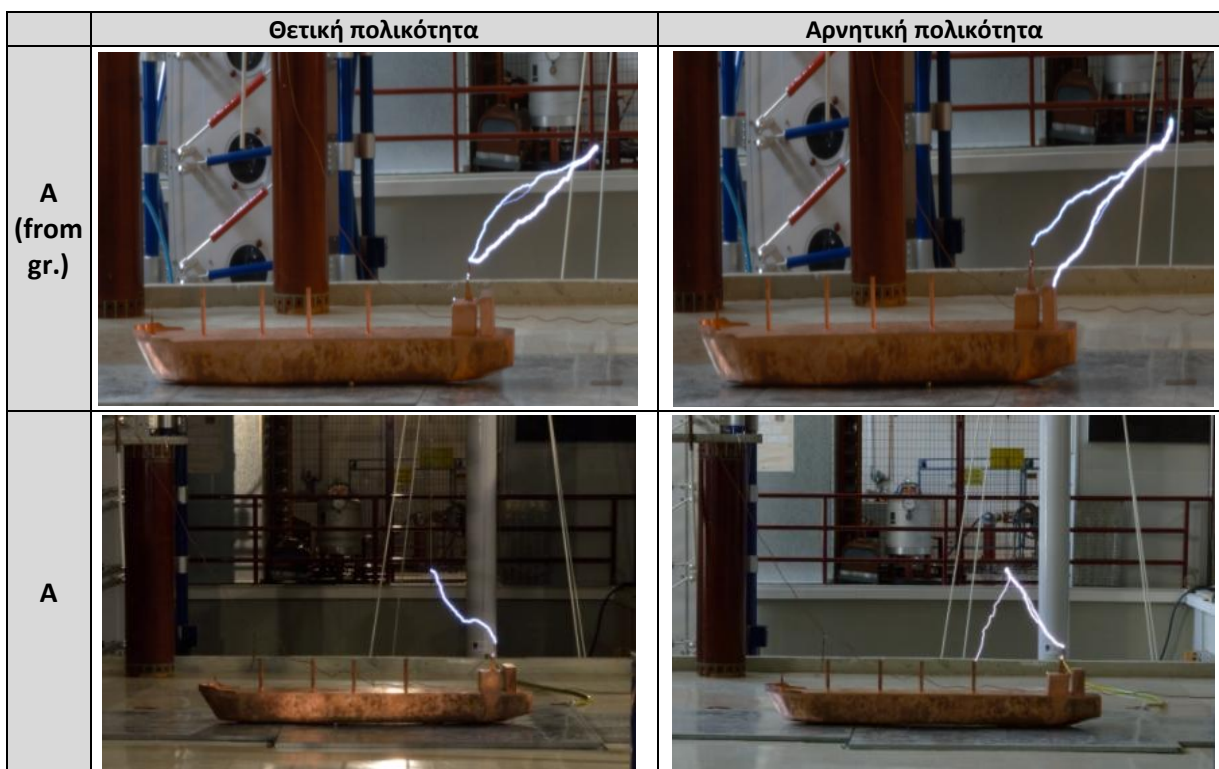
### 3.4.9 Ενδεικτικά αποτελέσματα

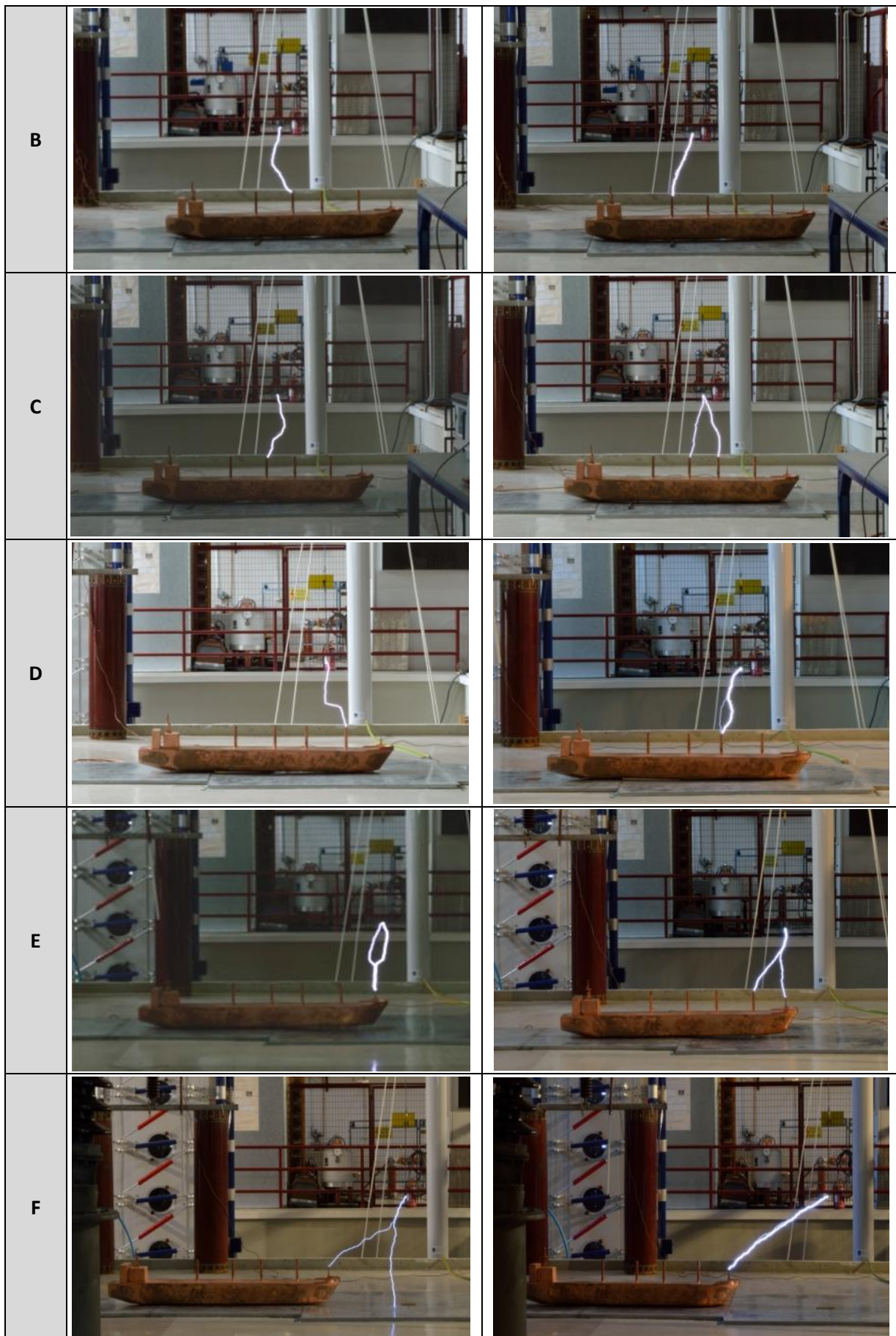
Στους Πίνακες 3.12-3.14 που ακολουθούν παρουσιάζονται κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες από τη διεξαγωγή του πειράματος για κάθε τιμή διακένου, πολικότητα υπέρτασης και εξεταζόμενη θέση του μοντέλου.

	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
A (from gr.)		
A		
B		
C		
D		

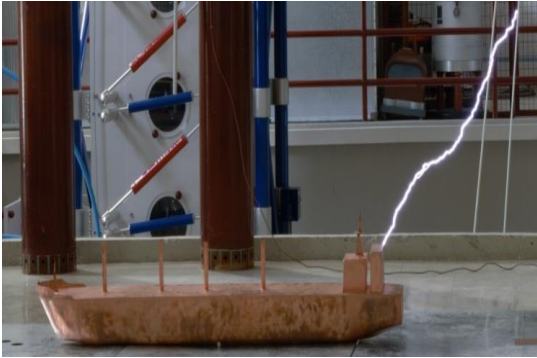
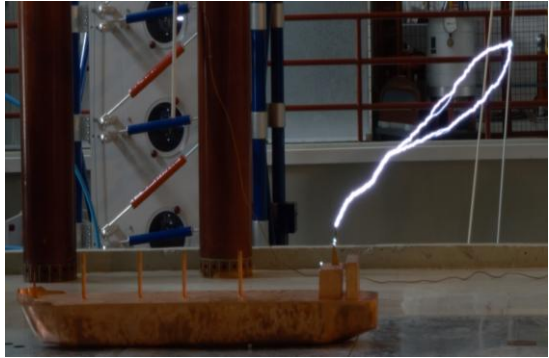




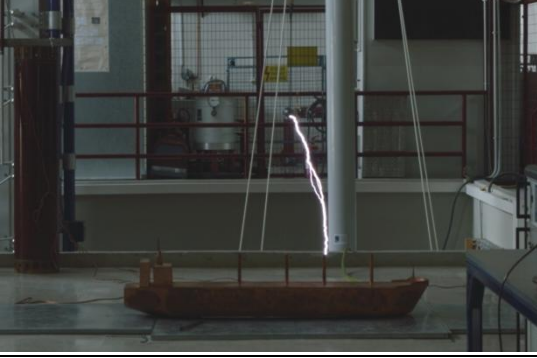
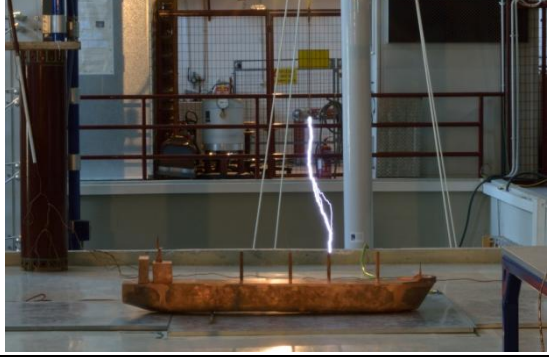
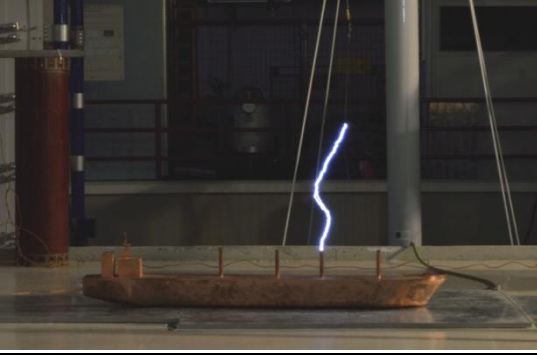
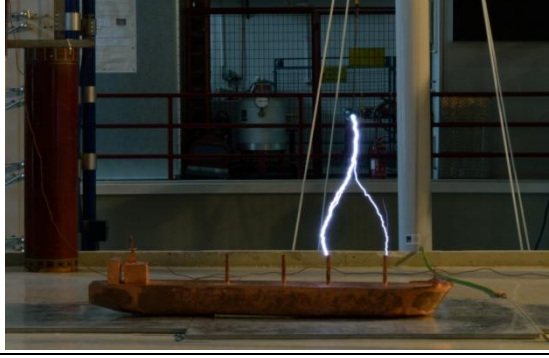


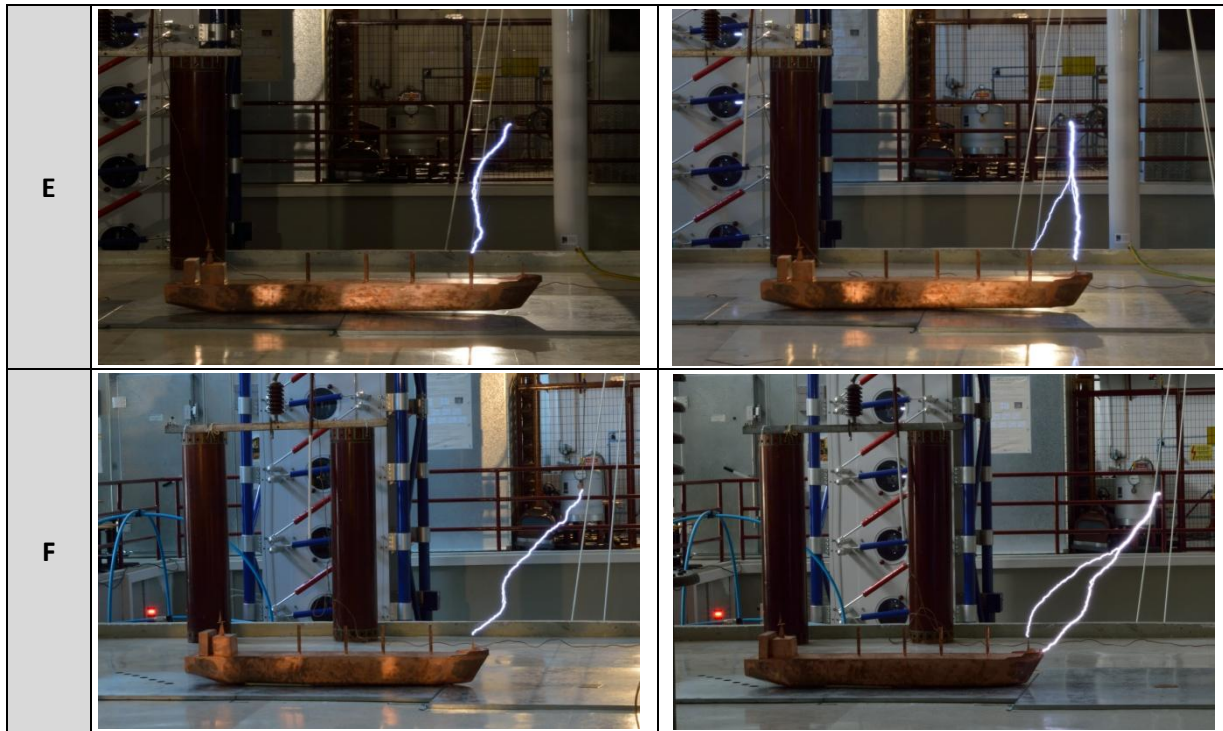
Πίνακας 3.12: Εκκενώσεις για απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $d=50\text{cm}$ .





**Πίνακας 3.13:** Εκκενώσεις για απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $d=75\text{cm}$ .

	Θετική πολικότητα	Αρνητική πολικότητα
A (from gr.)		
A		
B		
C		
D		



**Πίνακας 3.14:** Εκκενώσεις για απόσταση φορτισμένης ράβδου-μεταλλικής πλάκας  $d=100\text{cm}$ .





# Ανάλυση θωράκισης έναντι κεραυνικών πληγμάτων σε πλοία

## 4.1 Εισαγωγή

Ένα πλοίο ως η υψηλότερη δομή που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας και περνώντας συχνά από περιοχές που πλήττονται από καταιγίδες είναι πιθανό να δεχτεί ένα κεραυνικό πλήγμα. Παράλληλα, στα περισσότερα σκάφη κεραίες και ζωτικός εξοπλισμός τηλεπικοινωνιών και ναυσιπλοΐας τοποθετούνται σε ψηλούς ιστούς που προεξέχουν από την υπόλοιπη δομή του πλοίου, με αποτέλεσμα να είναι πιο εκτεθειμένοι σε κεραυνικά πλήγματα.

Πέρα από τις ιδιαίτερα καταστροφικές συνέπειες που μπορεί να επιφέρει ένα κεραυνικό πλήγμα σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο με μεγάλες ανάγκες σε αξιοπιστία, αδιάλειπτη παροχή ισχύος και συνέχιση κρίσιμων λειτουργιών πλοήγησης, όπως είναι το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, το ίδιο το κεραυνικό πλήγμα είναι πιο σφοδρό στο περιβάλλον της θάλασσας. Παρόλο που η πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων στην επιφάνεια της θάλασσας είναι μικρότερη σε σχέση με την ξηρά, καταγράφονται τιμές κεραυνικών ρευμάτων κατά 20% μεγαλύτερες [107]. Μάλιστα η μετάβαση από την ξηρά στη θάλασσα φαίνεται να επιδρά στις τιμές του κεραυνικού ρεύματος πιο έντονα από ότι το γεωγραφικό πλάτος [107]. Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον κατά τη διάρκεια ενός πλήγματος είναι πιο δυσμενές στο περιβάλλον της θάλασσας, καθώς η εξασθένιση του ακτινοβολούμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι μικρότερη σε σύγκριση με την ξηρά, λόγω της αγωγιμότητας του νερού [22].

Ορισμένα στατιστικά στοιχεία κεραυνικών πληγμάτων σε μικρά σκάφη, κυρίως ιστιοπλοϊκά, συλλέγονται κατά καιρούς στις ΗΠΑ από αναφορές ατυχημάτων σε ασφαλιστικές εταιρείες, ωστόσο δεδομένα σχετικά με άλλους τύπους πλοίων, όπως επιβατηγά, εμπορικά, πετρελαιοφόρα, στρατιωτικά κλπ. δεν υπάρχουν. Μία ολοκληρωμένη προσπάθεια καταγραφής κεραυνικών πληγμάτων σε διεθνές επίπεδο θα προσέφερε πολύτιμες πληροφορίες για τη συχνότητα και τις περιοχές εμφάνισης κεραυνικών πληγμάτων σε πλοία, ωστόσο με την πληθώρα των εμπλεκόμενων φορέων και των τύπων των πλοίων που θα πρέπει να ερευνηθούν, μια τέτοια βάση δεδομένων είναι πολύ δύσκολο να υλοποιηθεί.

Στο πλαίσιο αυτό παρουσιάζονται υπολογισμοί των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων σε οκτώ μοντέλα πλοίων, διερευνάται η επίδραση του μοντέλου σύλληψης του κεραυνού και της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος και αναδεικνύονται οι εκτεθειμένες περιοχές της επιφάνειας των πλοίων με προσομοιώσεις σε κατάλληλο λογισμικό. Επιπλέον, προτείνεται μία εκτενής μέθοδος για την εφαρμογή ανάλυσης θωράκισης σε κρίσιμους ιστούς ενός πλοίου, προκειμένου να διαπιστωθεί, εάν παρέχεται θωράκιση από παρακείμενες δομές και να προσδιοριστεί η θέση και το ύψος του κατάλληλου αλεξικέραυνου.

## 4.2 Υπολογισμός κεραυνικών πληγμάτων

### 4.2.1 Γενικά-Μέθοδοι υπολογισμού

Η πιθανότητα να πληγεί ένα πλοίο από κεραυνικό πλήγμα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τον υπολογισμό των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων στην επιφάνειά του σε ετήσια βάση. Γενικά, ο αριθμός κεραυνικών πληγμάτων που αναμένεται να συλληφθούν από ένα αλεξικέραυνο δίνεται από την παρακάτω σχέση [29]:

$$N_d = 10^{-6} A_{eq} N_g T \quad (4.1)$$

Όπου:  $T$  η περίοδος υπολογισμού, συνήθως 1 χρόνος

$N_g$  κεραυνικά πλήγματα/ $\text{km}^2/\text{yr}$

$A_{eq}$  η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια του αλεξικέραυνου [ $\text{m}^2$ ]

Η αναμενόμενη πυκνότητα κεραυνικών πληγμάτων στην επιφάνεια του εδάφους  $N_g$  [πλήγματα/ $\text{km}^2/\text{yr}$ ] προκύπτει από το ισοκεραυνικό επίπεδο (αλλιώς ημέρες καταιγίδας κατ' έτος  $T_d$ ) σύμφωνα με την εξίσωση (4.2) [29]:

$$N_g = 0.1 T_d \quad (4.2)$$

Η ισοδύναμη συλλεκτήρια επιφάνεια  $A_{eq}$  [ $\text{m}^2$ ], ως το βασικό μέγεθος που εκφράζει την επίδραση της γεωμετρίας του αλεξικέραυνου στο πλήθος των κεραυνικών πληγμάτων, συνδέεται με την ισοδύναμη ακτίνα σύλληψης  $R_{eq}$  ως εξής [108]:

$$A_{eq} = \pi R_{eq}^2 \quad (4.3)$$

Με τη σειρά της η ισοδύναμη ακτίνα σύλληψης ενσωματώνει, σύμφωνα με την (4.4) την εξάρτηση από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος  $f(I)$  και από το μοντέλο σύλληψης του κεραυνού, το οποίο εκφράζει την ακτίνα σύλληψης  $R(I, h)$  συναρτήσει του κεραυνικού ρεύματος ( $I$ ) και του ύψους του αλεξικεραυνού ( $h$ ) [108]- [110]:

$$R_{eq} = \sqrt{\int_0^{\infty} R^2(I, h) f(I) dI} \quad (4.4)$$

Η συνήθης θεώρηση για το κεραυνικό ρεύμα είναι ότι ακολουθεί μια λογαριθμική κανονική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της μορφής:

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ln I}} \exp\left[-\frac{(\ln I - \ln \bar{I})^2}{2\sigma_{ln}^2}\right] \quad (4.5)$$

Όπου:  $\bar{I}$  η μέση τιμή της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος

$\sigma_{ln}$  η τυπική απόκλιση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής του κεραυνικού ρεύματος

Όσον αφορά στα μοντέλα σύλληψης του κεραυνού, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί πολυάριθμες εκδοχές, οι οποίες μπορεί να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με τη βασική φυσική αρχή που τα διέπει: τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα και τα λεγόμενα γενικευμένα μοντέλα [95]. Τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα βασίζονται στη γεωμετρική θεώρηση ότι η σύλληψη λαμβάνει χώρα, όταν ο κατερχόμενος

οχετός βρεθεί πλησιέστερα στην εξεταζόμενη κατασκευή από ότι προς το έδαφος. Συνδέουν επομένως την απόσταση πρόσκρουσης προς την κατασκευή ( $S$ ) με την απόσταση πρόσκρουσης προς το έδαφος ( $D$ ) και το κεραυνικό ρεύμα ( $I$ ) με σχέσεις της μορφής (4.6), ενώ υιοθετώντας το παραπάνω γεωμετρικό κριτήριο, η ακτίνα σύλληψης προκύπτει από την (4.7) :

$$S = AI^B = cD \quad (4.6)$$

$$R = \begin{cases} \sqrt{S^2 - (D - h)^2}, & h < D \\ S, & h \geq D \end{cases} \quad (4.7)$$

Όπου:  $A, B, c$  = σταθερές

Τα γενικευμένα μοντέλα από την άλλη πλευρά, μελετώντας το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του φαινομένου, στηρίζουν τη σύλληψη σε κριτήρια έναυσης του ανερχόμενου οχετού. Ορίζουν έτσι την ακτίνα σύλληψης ( $R$ ) ως τη μέγιστη πλευρική απόσταση από το αλεξικέραυνο, εντός της οποίας είναι η δυνατή η σύλληψη του κεραυνού με σχέσεις της γενικής μορφής της (4.8). Σε αντίθεση με τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα, από την (4.8) γίνεται φανερή η άμεση σύνδεση της ακτίνας σύλληψης με το ύψος του αλεξικεραύνου:

$$R = \xi h^E I^F + \zeta h^G \quad (4.8)$$

Όπου:  $E, F, G, \xi, \zeta$  = σταθερές

Στον Πίνακα 4.1 παρατίθενται ορισμένα από τα βασικότερα ηλεκτρογεωμετρικά και γενικευμένα μοντέλα σύλληψης, τα οποία είναι ενσωματωμένα στην εφαρμογή “Lightning Shielding Analysis” του λογισμικού WinIGS [111], [112]. Με το συγκεκριμένο λογισμικό είναι δυνατός ο υπολογισμός των κεραυνικών πληγμάτων σε μία δομή και η οπτικοποίηση των σημείων που πλήττονται. Το λογισμικό επίσης παρέχει διάφορες επιλογές για την κατανομή του κεραυνικού ρεύματος είτε στη μορφή των γενικών κατανομών που έχουν υιοθετηθεί και από διεθνείς κανονισμούς, όπως οι λογαριθμικές κανονικές κατανομές του Mousa και του Anderson στη μορφή της (4.5) ή αθροιστικές κατανομές πιθανότητας από μακροχρόνιες τοπικές καταγραφές κεραυνικών πληγμάτων στις Η.Π.Α., όπως η επιλογή “Historical Data” με πηγή το EPRI Red Book [107], που ισοδυναμεί με μια μέση τιμή κεραυνικού ρεύματος 18-20kA.

Ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα $S = AI^B = cD$			
Μοντέλο σύλληψης	A	B	C
Brown and Whitehead [113]	7.1	0.74	1.11
IEEE Working Group (1985) [114]	8	0.65	$1/\beta^*$
Darveniza [115]	9.4	0.67	-
Love [116]	10	0.65	1
Suzuki [117]	3.3	0.78	1
* $\beta=0.64$ για UHV γραμμές, 0.8 για EHV γραμμές και 1 για άλλες γραμμές			
Γενικευμένα μοντέλα $R = \xi h^E I^F$			
Μοντέλο σύλληψης	$\xi$	E	F
Eriksson [118]	0.67	0.60	0.74
Rizk [108]	1.57	0.45	0.69

Κατανομές κεραυνικού ρεύματος		
Παράμετροι κανονικής λογαριθμικής κατανομής	$\bar{I}$ (kA)	$\sigma_{ln}$ (kA)
Anderson [119] (IEEE Std.1243-1997) [120]	30.1	0.76
Mousa [121] (IEEE Std.998-1996) [122]	24.1	0.72

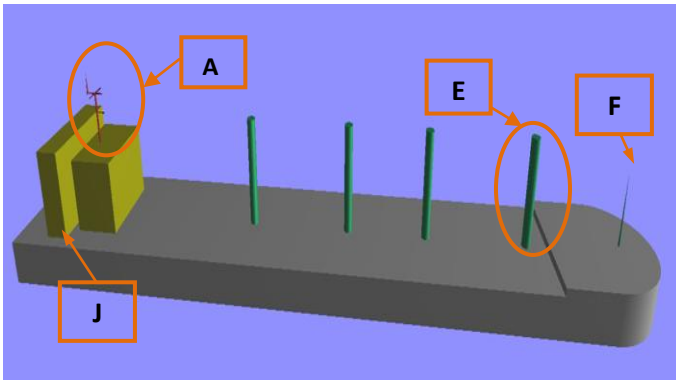
**Πίνακας 4.1:** Παράμετροι των μοντέλων σύλληψης και των κατανομών του κεραυνικού ρεύματος που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα ανάλυση θωράκισης (βιβλιοθήκες λογισμικού WinIGS) [111]

## 4.2.2 Προσομοιώσεις με το λογισμικό WinIGS

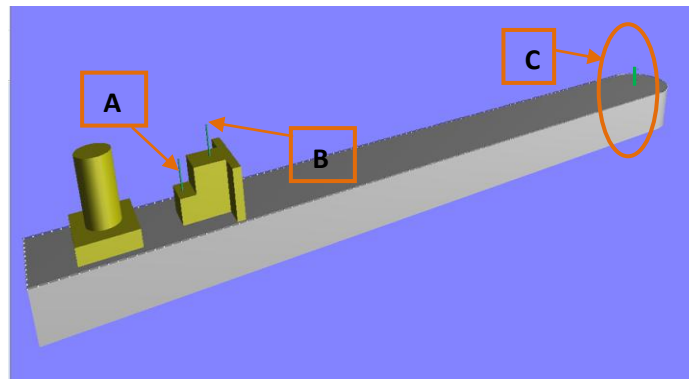
### 4.2.2.1 Υπολογισμός αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων

Με στόχο την ποσοτική εκτίμηση των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων πάνω σε διαφορετικές γεωμετρίες πλοίων, σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον του WinIGS τα 8 μοντέλα πλοίων του Σχήματος 4.1 (το εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου είναι το πλοίο βάσει του οποίου κατασκευάστηκε το υπό κλίμακα μεταλλικό μοντέλο του Κεφαλαίου 3). Ο αλγόριθμος της ανάλυσης θωράκισης διακρίτοποιεί διαδοχικά την περιοχή πάνω από το μοντέλο του πλοίου σε ένα ορθογωνικό πλέγμα σημείων, κάθε ένα από τα οποία θεωρείται σημείο εμφάνισης κατερχόμενου οχετού και αναλόγως με το επιλεγμένο μοντέλο σύλληψης καθορίζεται σε ποια σημεία του πλοίου θα τερματίσει ο συγκεκριμένος οχετός [111]. Το εξεταζόμενο εύρος του κεραυνικού ρεύματος τέθηκε από 3kA έως 200kA, σύμφωνα με το αυστηρότερο επίπεδο προστασίας I του IEC 62305-1 [28]. Το ισοκεραυνικό επίπεδο τέθηκε στο 30 ( $N_g = 3$  κεραυνικά πλήγματα/km<sup>2</sup>/yr), τιμή αντιπροσωπευτική συνθηκών ανοιχτής θάλασσας και κεραυνικής δραστηριότητας που αντιστοιχεί σε περιοχές, όπως π.χ. η Μεσόγειος.

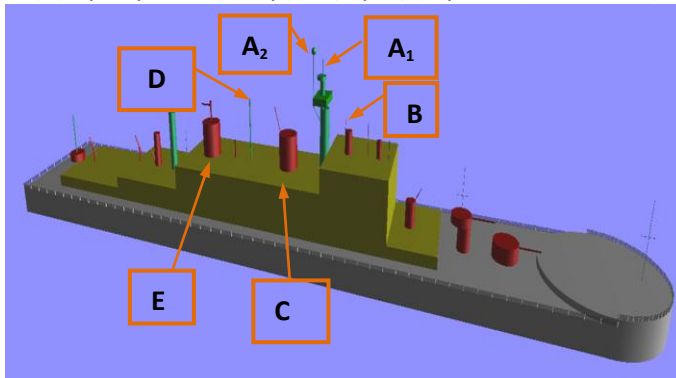
Για κάθε ένα από τα πλοία του Σχήματος 4.1 ο υπολογισμός των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων γίνεται για όλους τους συνδυασμούς μοντέλων σύλληψης και κατανομών κεραυνικού ρεύματος του Πίνακα 4.1, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση αυτών των παραμέτρων. Επίσης, δομές της επιφάνειας του πλοίου που επιτελούν την ίδια λειτουργία ή έχουν τον ίδιο βαθμό σπουδαιότητας ομαδοποιήθηκαν σε «Επίπεδα»: το Επίπεδο No.1 αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του καταστρώματος, το Επίπεδο No.2 περιλαμβάνει τις βασικές υπερκατασκευές (π.χ. χώροι γέφυρας, ναυσιπλοΐας, διαμονής πληρώματος κλπ.), το Επίπεδο No.3 περιλαμβάνει ψηλούς ιστούς που μπορούν να λειτουργήσουν ως αλεξικέραυνα, στο Επίπεδο No.4 συγκεντρώνεται ο κρίσιμος εξοπλισμός που χρήζει θωράκισης από κεραυνικά πλήγματα και δε βρίσκεται κατ' ανάγκη στο ψηλότερο σημείο του πλοίου, ενώ στο Επίπεδο No.5 βρίσκονται τα μεταλλικά κιγκλιδώματα περιμετρικά του καταστρώματος. Στο Σχήμα 4.1 διακρίνεται η χρωματική κατηγοριοποίηση των Επιπέδων σε κάθε μοντέλο πλοίου, ορισμένες από τα βασικότερες δομές του πλοίου που θα μελετηθούν διεξοδικότερα στις επόμενες παραγράφους, καθώς και το συνολικό μήκος του πλοίου (length overall, LOA). Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια τα συνολικά αναμενόμενα πλήγματα στη δομή κάθε πλοίου ( $N_d$ ), ενώ στα Σχήματα 4.2-4.5 απεικονίζεται η ποσοστιαία κατανομή τους ανά Επίπεδο. Δεδομένου ότι το λογισμικό υιοθετεί τη γραμμική σχέση (4.2) μεταξύ  $N_g$  και  $T_d$  τα υπολογιζόμενα κεραυνικά πλήγματα για οποιοδήποτε άλλο ισοκεραυνικό επίπεδο μπορούν να υπολογιστούν αναλογικά.



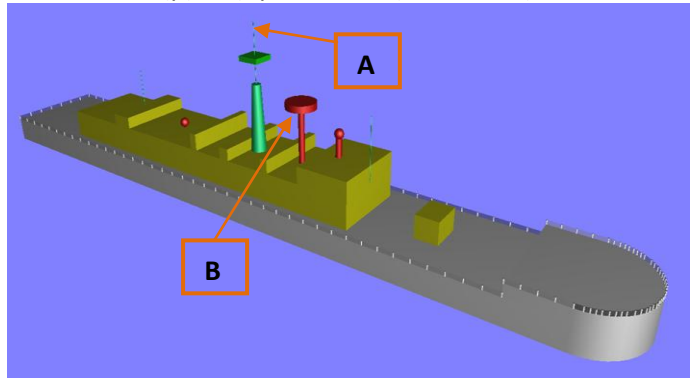
(α) Εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου (LOA 243m)



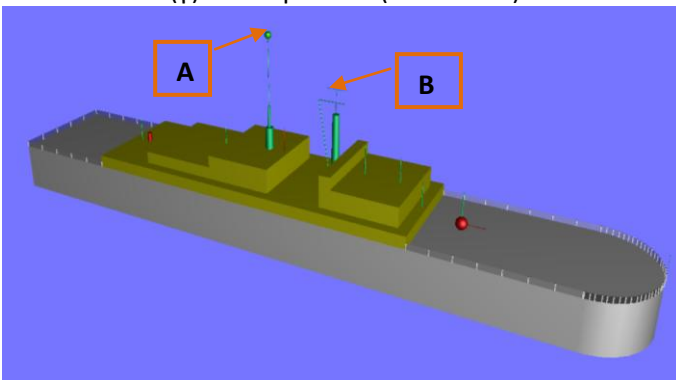
(β) Δεξαμενόπλοιο (LOA 330m)



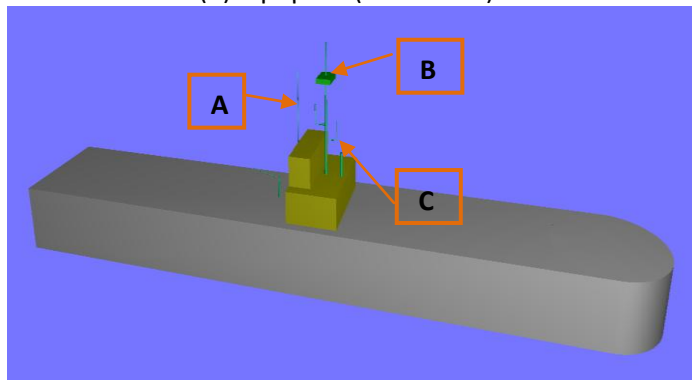
(γ) Αντιτορπλικό (LOA 172m)



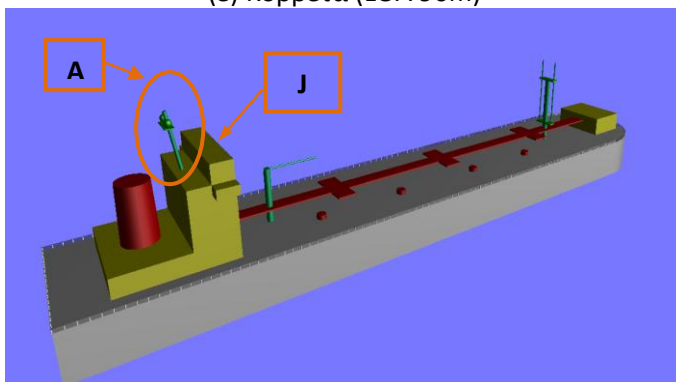
(δ) Φρεγάτα (LOA 145m)



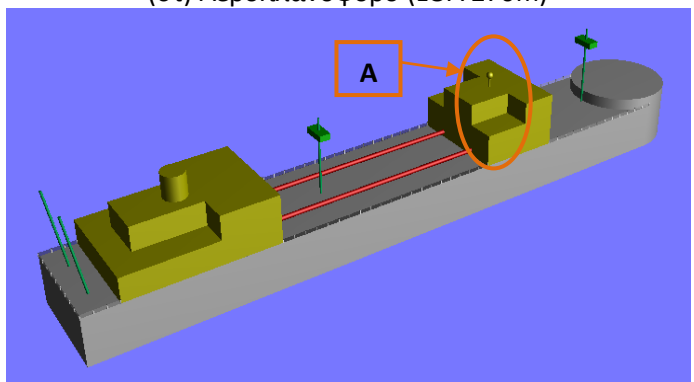
(ε) Κορβέτα (LOA 90m)



(στ) Αεροπλανοφόρο (LOA 270m)



(ζ) Πετρελαιοφόρο No.1 (LOA 274m)



(η) Πετρελαιοφόρο No.2 (LOA 183m)

Κατηγοριοποίηση σε Επίπεδα



**Σχήμα 4.1:** Η γεωμετρία των πλοίων (α) – (η), όπως σχεδιάσθηκαν στο λογισμικό WinIGS. Απεικονίζονται τα Επίπεδα και ορισμένες κρίσιμες δομές που θα μελετηθούν στην ανάλυση θωράκισης.

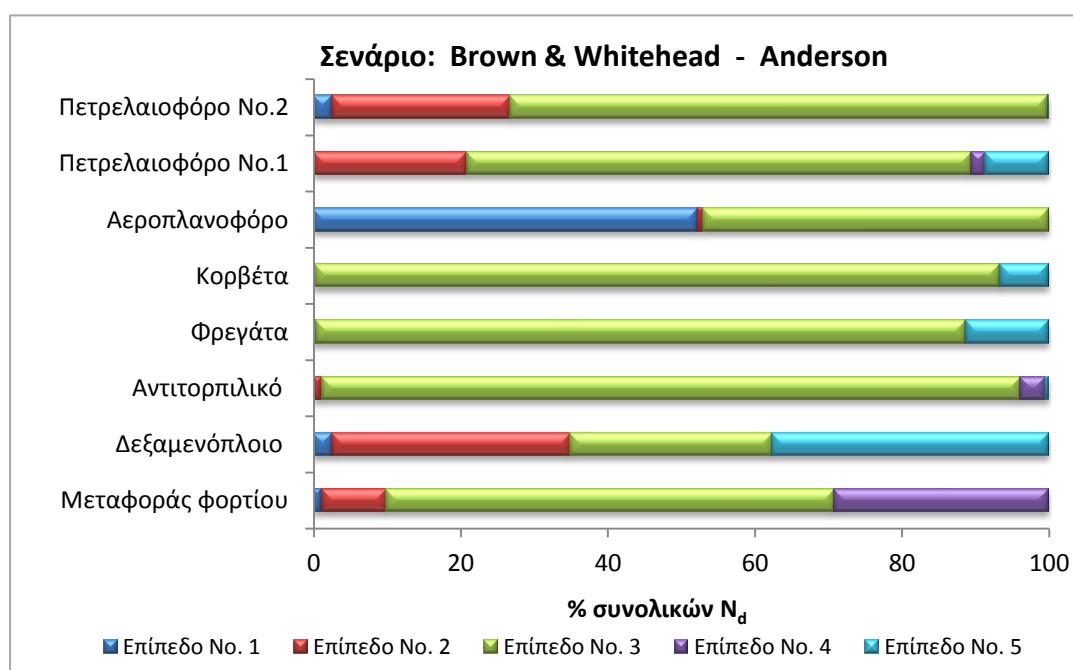
	Εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου			Δεξαμενόπλοιο		
Μοντέλο σύλληψης	Κατανομή κεραμικού ρεύματος			Κατανομή κεραμικού ρεύματος		
	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)
Br. & Whiteh.	0.18199	0.18027	0.15677	0.25201	0.24969	0.22005
IEEE (1985)	0.15055	0.14933	0.13272	0.21360	0.21224	0.19129
Eriksson	0.13043	0.12987	0.11440	0.14690	0.14447	0.12158
Darveniza	0.18193	0.17982	0.15665	0.25290	0.25014	0.22120
Love	0.17702	0.17578	0.15560	0.24768	0.24584	0.22049
Suzuki	0.11448	0.11312	0.10007	0.16671	0.16542	0.14748
Rizk	0.13085	0.13009	0.11518	0.13401	0.13204	0.11545
	Αντιτορπλικό			Φρεγάτα		
Μοντέλο σύλληψης	Κατανομή κεραμικού ρεύματος			Κατανομή κεραμικού ρεύματος		
	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)
Br. & Whiteh.	0.11476	0.11351	0.09803	0.09239	0.09131	0.07857
IEEE (1985)	0.09437	0.09354	0.08262	0.07525	0.07456	0.06569
Eriksson	0.05576	0.06838	0.05576	0.06299	0.06178	0.05034
Darveniza	0.11554	0.11407	0.09868	0.09303	0.09179	0.07915
Love	0.11207	0.11111	0.09770	0.08987	0.08905	0.07815
Suzuki	0.07065	0.06979	0.06117	0.05607	0.05540	0.04836
Rizk	0.06404	0.06270	0.05292	0.05808	0.05703	0.04756
	Κορβέτα			Αεροπλανοφόρο		
Μοντέλο σύλληψης	Κατανομή κεραμικού ρεύματος			Κατανομή κεραμικού ρεύματος		
	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)
Br. & Whiteh.	0.06357	0.06269	0.05342	0.23768	0.23531	0.20784
IEEE (1985)	0.05095	0.05047	0.04420	0.20111	0.19970	0.18040
Eriksson	0.04249	0.04173	0.03365	0.20698	0.20302	0.16180
Darveniza	0.06406	0.06303	0.05381	0.23791	0.23513	0.20773
Love	0.06151	0.06084	0.05301	0.23246	0.23062	0.20684
Suzuki	0.03728	0.03682	0.03178	0.15679	0.15562	0.13878
Rizk	0.04010	0.03948	0.03234	0.15869	0.15573	0.12525
	Πετρελαιοφόρο Νο.1			Πετρελαιοφόρο Νο.2		
Μοντέλο σύλληψης	Κατανομή κεραμικού ρεύματος			Κατανομή κεραμικού ρεύματος		
	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)	EPRI Red Book	Anderson (IEEE)	Mousa (IEEE)
Br. & Whiteh.	0.24218	0.23927	0.20946	0.16024	0.15861	0.13760
IEEE (1985)	0.20198	0.20029	0.18035	0.13237	0.13138	0.11642
Eriksson	0.23471	0.23238	0.19427	0.13491	0.13360	0.11492
Darveniza	0.24347	0.24008	0.21072	0.16086	0.15885	0.13818
Love	0.23656	0.23439	0.20959	0.15604	0.15479	0.13687
Suzuki	0.15895	0.15763	0.14125	0.09875	0.09776	0.08499
Rizk	0.20616	0.20387	0.17176	0.12794	0.12678	0.11013

**Πίνακας 4.2:** Ο συνολικός αριθμός αναμενόμενων κεραμικών πληγμάτων στην επιφάνεια των 8 πλοίων για όλους τους συνδυασμούς μοντέλου σύλληψης-κατανομής κεραμικού ρεύματος.

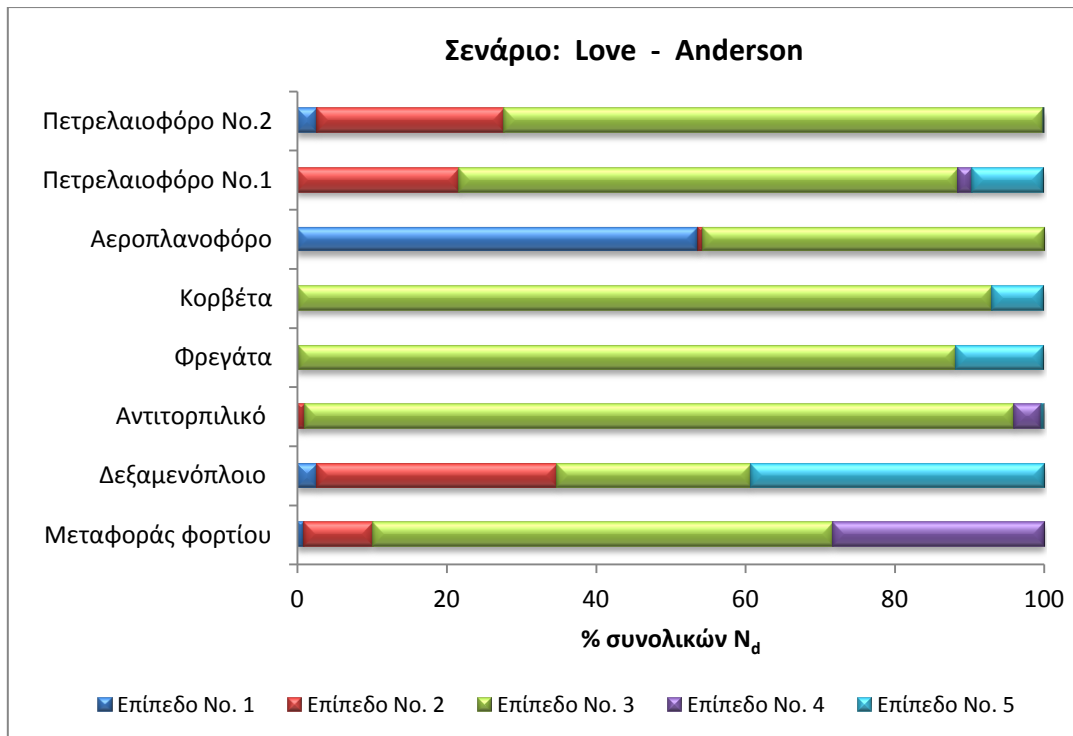
Από τον Πίνακα 4.2 γίνεται εμφανές ότι η επίδραση του μοντέλου σύλληψης στην εκτίμηση των αναμενόμενων κεραμικών πληγμάτων είναι ιδιαίτερα έντονη. Μοντέλα που στηρίζονται στην ίδια θεωρητική βάση έχουν παραπλήσια αποτελέσματα (μεγάλη συμφωνία παρατηρείται ανάμεσα στα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα των Brown &

Whitehead, Darveniza και Love και στα γενικευμένα μοντέλα των Rizk και Eriksson). Σε αισθητή υποεκτίμηση των αναμενόμενων πληγμάτων οδηγεί το μοντέλο του Suzuki. Μικρότερη επίδραση έχει η επιλογή της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος. Η κατανομή του Anderson βρίσκεται πλησιέστερα στην “Historical Method” (δεδομένα του EPRI Red Book), ενώ η κατανομή του Mousa παράγει λιγότερα σφάλματα. Ο λόγος της μέγιστης εκτιμώμενης τιμής των  $N_d$  (συνήθως επιλέγοντας το συνδυασμό EPRI και Brown&Whitehead ή Darveniza) προς την ελάχιστη εκτιμώμενη τιμή (συνήθως με το συνδυασμό Mousa και Suzuki ή Rizk) κυμαίνεται από 1.72 (για το πετρελαιοφόρο No.1) έως 2.19 (για το δεξαμενόπλοιο).

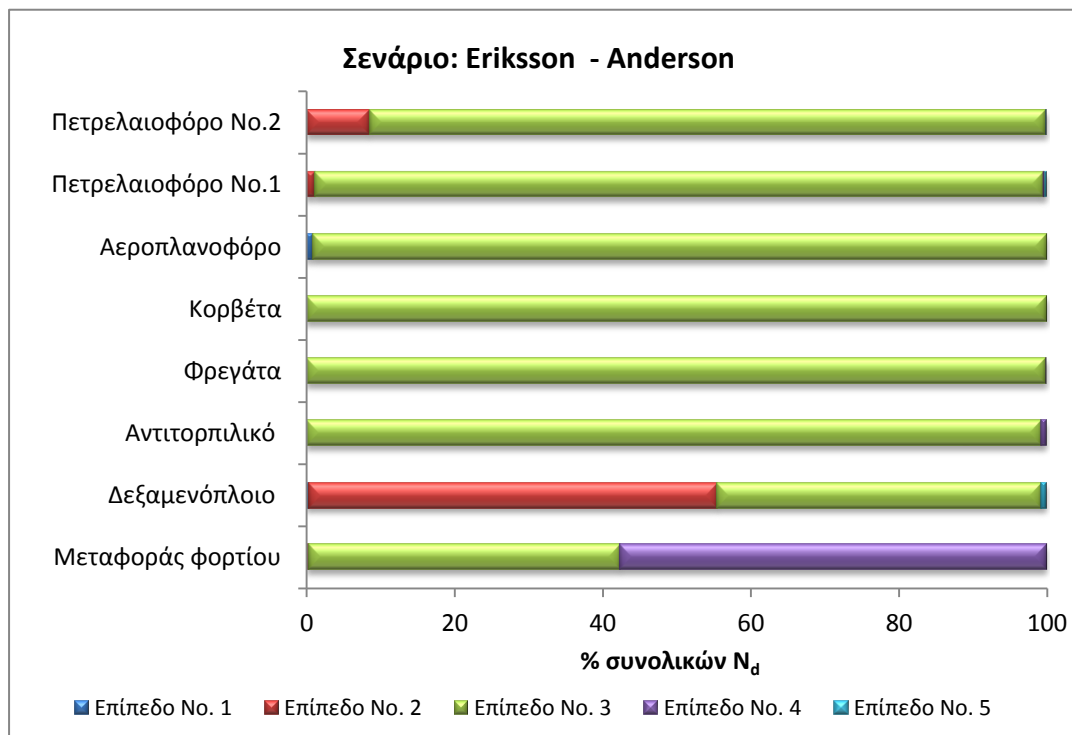
Οι παραπάνω υπολογισμοί στηρίζονται στην παραδοχή ότι το πλοίο βρίσκεται κατά τη διάρκεια του έτους συνεχώς στην ίδια περιοχή με το ίδιο κεραυνικό επίπεδο. Αυτό δεν ισχύει στην πραγματικότητα, καθώς ένα πλοίο διέρχεται για διαφορετικά διαστήματα από περιοχές με διαφορετική κεραυνική δραστηριότητα και μία ακριβής εκτίμηση των αναμενόμενων πληγμάτων θα απαιτούσε τη χρήση ενός μέσου κεραυνικού επιπέδου που θα προκύπτει από το «σταθμισμένο» -αναλόγως με τα διαστήματα παραμονής- μέσο όρο κάποιων βασικών κεραυνικών επιπέδων, από τα οποία διέρχεται. Οι υπολογισμοί του Πίνακα 4.2, βάσει των οποίων ένα πλοίο θα υποστεί κατά μέσο όρο ένα κεραυνικό πλήγμα περίπου κάθε 4-5 χρόνια (αναλόγως με τη δομή του και τις χρησιμοποιούμενες θεωρητικές μεθόδους υπολογισμού), είναι μετριοπαθείς εκτιμήσεις. Με υψηλότερες τιμές της τάξης του  $N_g = 9$ , καταγεγραμμένες κοντά σε ακτογραμμές με έντονη κεραυνική δραστηριότητα, υιοθετώντας τη γραμμική εξίσωση (4.2) (ισοκεραυνικό επίπεδο 90), την κατανομή του Anderson και το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο του Love, προκύπτει ένα άνω όριο για τις εκτιμήσεις των αναμενόμενων πληγμάτων: περίπου 1 πλήγμα στο πλοίο μεταφοράς φορτίου και το πετρελαιοφόρο No.2 κάθε 2 χρόνια, 1.48 πλήγματα στο δεξαμενόπλοιο κάθε 2 χρόνια, περίπου 1 πλήγμα κάθε 3 χρόνια στο αντιτορπιλικό, την κορβέτα και τη φρεγάτα και περίπου 1.4 πλήγματα κάθε 2 χρόνια στο αεροπλανοφόρο και το πετρελαιοφόρο No.1.



**Σχήμα 4.2:** Η ποσοστιαία κατανομή των συνολικών πληγμάτων  $N_d$  ανά Επίπεδο (μοντέλο σύλληψης Brown & Whitehead, κατανομή κεραυνικού ρεύματος: Anderson).

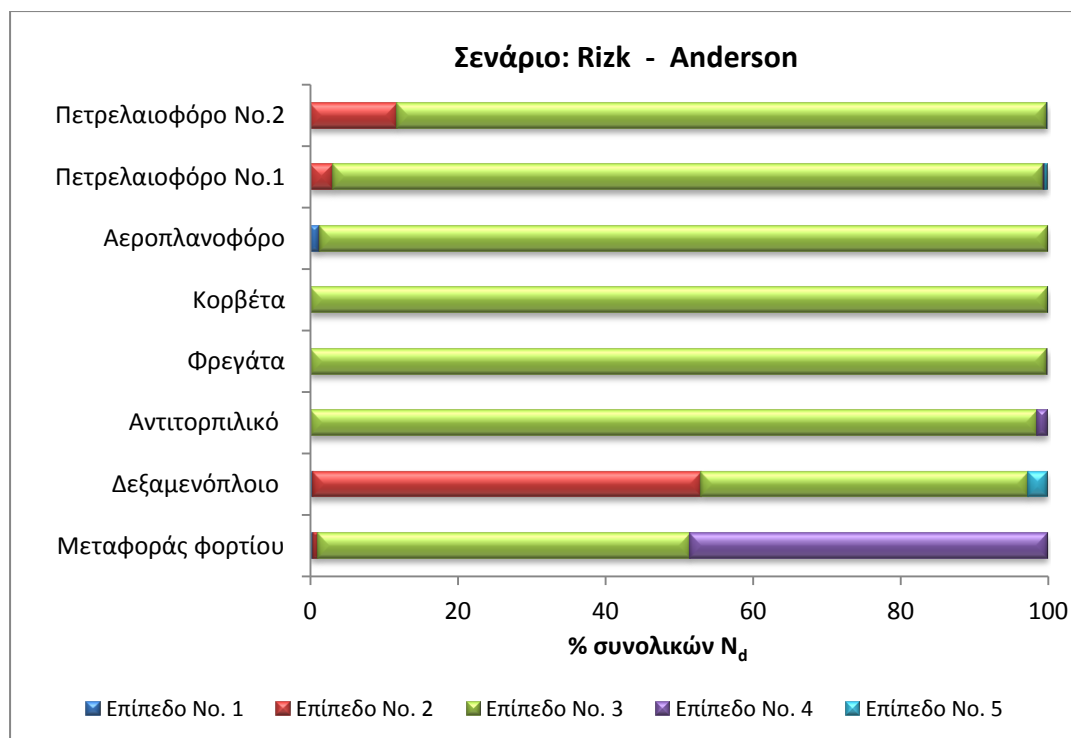


**Σχήμα 4.3:** Η ποσοστιαία κατανομή των συνολικών πληγμάτων  $N_d$  ανά Επίπεδο (μοντέλο σύλληψης Love, κατανομή κεραυνικού ρεύματος: Anderson).



**Σχήμα 4.4:** Η ποσοστιαία κατανομή των συνολικών πληγμάτων  $N_d$  ανά Επίπεδο (μοντέλο σύλληψης Eriksson, κατανομή κεραυνικού ρεύματος: Anderson).





**Σχήμα 4.5:** Η ποσοστιαία κατανομή των συνολικών πληγμάτων  $N_d$  ανά Επίπεδο (μοντέλο σύλληψης Rizk, κατανομή κεραυνικού ρεύματος: Anderson).

Η κατανομή των πληγμάτων στα «Επίπεδα» εξαρτάται από τη σχετική θέση και τις γεωμετρικές διαφορές μεταξύ τους. Σύμφωνα με τα γενικευμένα μοντέλα των Eriksson και Rizk, τα πλήγματα είναι σχεδόν ισομοιρασμένα ανάμεσα στο «Επίπεδο No.3» και στο «Επίπεδο No.4» στην περίπτωση του εμπορικού πλοίου μεταφοράς φορτίου, όπου οι ιστοί του «Επιπέδου No.3» βρίσκονται μεν χαμηλότερα από την κεραία της γέφυρας, η οποία αποτελεί τον κρίσιμο εξοπλισμό του «Επιπέδου No.4», ωστόσο είναι πιο αραιά τοποθετημένοι και περισσότερο εκτεθειμένοι. Αντιθέτως, σε περιπτώσεις όπως η φρεγάτα, το αντιτορπλικό, η κορβέτα και τα πετρελαιοφόρα, όπου οι ιστοί του «Επιπέδου No.3» βρίσκονται ψηλότερα από τις κρίσιμες δομές του «Επιπέδου No.4», το «Επίπεδο No.3» συγκεντρώνει έως και 99% των  $N_d$ , για υπολογισμούς με τα γενικευμένα μοντέλα. Το ποσοστό αυτό μειώνεται κατά περίπτωση μέχρι και στο 60% με τη χρήση των ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων, όπου εμφανίζεται ένα 10%-30% των πληγμάτων να καταλήγει στις δομές του «Επιπέδου No.2». Εξαιρέση σε αυτό αποτελούν η κορβέτα, η φρεγάτα και το αντιτορπλικό, όπου λόγω του πλήθους των ψηλών ιστών που είναι τοποθετημένοι σε κοντινή απόσταση στο «Επίπεδο No.3», υπάρχει σε μεγάλο βαθμό συμφωνία μεταξύ ηλεκτρογεωμετρικών και γενικευμένων μοντέλων.

Χαρακτηριστική περίπτωση απόκλισης μεταξύ των μοντέλων αποτελεί το αεροπλανοφόρο, ένας τύπος πλοίου με μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια και ολιγάριθμες χωρικά συγκεντρωμένες υπερδομές. Σύμφωνα με τα γενικευμένα μοντέλα, η συνεισφορά του καταστρώματος είναι αμελητέα, με τα πλήγματα να καταλήγουν σχεδόν εξολοκλήρου στο «Επίπεδο No.2», ενώ για τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα εμφανίζεται ένα 50% στο «Επίπεδο No.1». Το ίδιο ισχύει και για τα περιμετρικά κιγκλιδώματα του «Επιπέδου No.5» τα οποία λαμβάνονται υπόψη μόνο από τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα, είτε σε συνδυασμό με την εκτεθειμένη επιφάνεια του καταστρώματος είτε ουσιαστικά

αντικαθιστώντας την (βλέπε πετρελαιοφόρο No.1, κορβέτα, φρεγάτα στα Σχήματα 4.2 και 4.3).

Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι ειδικά στην περίπτωση του «Επιπέδου No.4», το πλήθος των  $N_d$  εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το ποιες κατασκευές θεωρούνται κρίσιμος εξοπλισμός. Εάν σε αυτή την κατηγορία συμπεριληφθούν περισσότεροι από τους ψηλούς ιστούς του «Επιπέδου No.3» λόγω ύπαρξης π.χ. κάποιας κεραίας, προφανώς το ποσοστό του «Επιπέδου No.4» θα αυξηθεί αντίστοιχα.

#### 4.2.2.2 Εφαρμογή στατιστικού μοντέλου

Σύμφωνα με τα ευρήματα στην εργασία [95] η μέση τιμή της ακτίνας σύλληψης που αντιστοιχεί σε πιθανότητα σύλληψης 50% (κρίσιμη ακτίνα σύλληψης  $R_c$ ) μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση (4.9) με την τυπική απόκλιση της (4.10), για κεραυνό αρνητικής πολικότητας:

$$\frac{R_c}{h} = 1.24 \left(\frac{h}{D}\right)^{-k}, k = \begin{cases} 0.7, & 0 \leq \frac{h}{D} \leq 1 \\ 1, & \frac{h}{D} > 1 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\sigma(\%) = 5.0 \left(\frac{h}{D}\right)^{-0.43} \quad (4.10)$$

Με εφαρμογή της (4.4) και της (4.11):

$$D = 10I^{0.65} \quad (4.11)$$

η στατιστική κατανομή της ισοδύναμης ακτίνας σύλληψης για αρνητικό κεραυνό μπορεί να εκφραστεί με τη μέση τιμή  $Req_c$  και την τυπική απόκλιση  $\sigma$  των εξισώσεων (4.12) και (4.13) αντίστοιχα [95], [97]:

$$Req_c = 6.21 \exp \left[ -\frac{\ln^2 \bar{I}}{2\sigma_{ln}^2} + \frac{\sigma_{ln}^2}{2} \left( 0.455 + \frac{\ln \bar{I}}{\sigma_{ln}^2} \right)^2 \right] h^{0.3} \quad (4.12)$$

$$\sigma(\%) = 13.3e^{0.18\sigma_{ln}\bar{I}^{0.27}} h^{-0.43} \quad (4.13)$$

Όπου:  $\bar{I}$  η μέση τιμή της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος,

$\sigma_{ln}$  η τυπική απόκλιση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής του κεραυνικού ρεύματος.

Με εφαρμογή των στατιστικών κατανομών του Anderson και του Mousa στις (4.12) και (4.13) προκύπτουν οι μέσες τιμές των (4.14) και (4.16) και οι τυπικές αποκλίσεις των (4.15) και (4.17) αντίστοιχα:

$$Req_c = 31.04h^{0.3} \quad (4.14)$$

$$\sigma(\%) = 38.24h^{-0.43} \quad (4.15)$$

$$Req_c = 27.82h^{0.3} \quad (4.16)$$

$$\sigma(\%) = 35.71h^{-0.43} \quad (4.17)$$

Στους Πίνακες 4.4-4.15 παρουσιάζονται υπολογισμοί του αναμενόμενου αριθμού πληγμάτων στον ψηλότερο από τους ιστούς που έχουν επισημανθεί στα σχήματα του Πίνακα 4.1 για κάθε μοντέλο πλοίου μέσω του λογισμικού WinIGS (με τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα των Brown & Whitehead και Love και τα γενικευμένα μοντέλα των Eriksson και Rizk) και με τις παραπάνω εξισώσεις του στατιστικού μοντέλου (για πιθανότητες σύλληψης 2.5%, 50% και 97.5%). Η εφαρμογή του στατιστικού μοντέλου γίνεται θεωρώντας ως επίπεδο αναφοράς την ίσαλο γραμμή και ένα εναλλακτικό επίπεδο αναφοράς που διαφοροποιείται ανά περίπτωση, αναλόγως με τις εξεταζόμενες θέσεις και τις γεωμετρικές συνθήκες γύρω από αυτές:

- Εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου: οροφή γέφυρας για την κεραία A και επίπεδο καταστρώματος για την κεραία E
- Δεξαμενόπλοιο: επίπεδο καταστρώματος
- Αντιτορπλικό: οροφή στην οποία είναι εγκατεστημένες οι δομές A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, C, D και E.
- Φρεγάτα: οροφή στην οποία είναι εγκατεστημένες οι δομές A και B.
- Κορβέτα: οροφή στην οποία είναι εγκατεστημένη η δομή B.
- Αεροπλανοφόρο: οροφή στην οποία είναι εγκατεστημένες οι δομές A και B.
- Πετρελαιοφόρο No.1: οροφή στην οποία είναι εγκατεστημένη η κεραία A.
- Πετρελαιοφόρο No.2: οροφή στην οποία είναι εγκατεστημένη η κεραία A.

Μοντέλο σύλληψης			Κατανομή κεραυνικού ρεύματος						
			Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)		
Brown & Whitehead			0.05117				0.03933		
Eriksson			0.07463				0.05895		
Love			0.04804				0.03792		
Rizk			0.06277				0.04997		
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.10915	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.07017	Ίσαλος γραμμή	0.08613	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.05496
	50%		0.08181		0.04608		0.06571		0.03702
	97.5%		0.05840		0.02704		0.04806		0.02261

Πίνακας 4.4: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία A του εμπορικού πλοίου μεταφοράς φορτίου.

Μοντέλο σύλληψης			Κατανομή κεραυνικού ρεύματος						
			Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)		
Brown & Whitehead			0.02888				0.02407		
Eriksson			0.02094				0.01936		
Love			0.02745				0.02349		
Rizk			0.02400				0.02086		
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.09850	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.08418	Ίσαλος γραμμή	0.07761	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.06616
	50%		0.07195		0.05880		0.05780		0.04723
	97.5%		0.04956		0.03796		0.04090		0.03149

Πίνακας 4.5: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία E του εμπορικού πλοίου μεταφοράς φορτίου.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.03583				0.02799			
Eriksson		0.06045				0.04887			
Love		0.03400				0.02737			
Rizk		0.05114				0.04139			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.11986	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.09466	Ίσαλος γραμμή	0.09470	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.07454
	50%		0.09177		0.06842		0.07372		0.05496
	97.5%		0.06743		0.04642		0.05537		0.03835

Πίνακας 4.6: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Β του δεξαμενόπλοιου.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.05560				0.04397			
Eriksson		0.06692				0.05335			
Love		0.05311				0.04315			
Rizk		0.05916				0.04749			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.10358	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.08238	Ίσαλος γραμμή	0.08167	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.06472
	50%		0.07665		0.05716		0.06157		0.04591
	97.5%		0.05376		0.03653		0.04430		0.03033

Πίνακας 4.7: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία  $A_2$  του αντιτορπιλικού.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.00375				0.00409			
Eriksson		0.00046				0.00073			
Love		0.00388				0.00425			
Rizk		0.00086				0.00125			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.08553	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.05848	Ίσαλος γραμμή	0.06724	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.04562
	50%		0.06003		0.03561		0.04822		0.02861
	97.5%		0.03904		0.01839		0.03236		0.01555

Πίνακας 4.8: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Ε του αντιτορπιλικού.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.04931				0.03888			
Eriksson		0.04156				0.03335			
Love		0.04708				0.03820			
Rizk		0.03914				0.03177			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.10161	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.08551	Ίσαλος γραμμή	0.08009	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.06719
	50%		0.07482		0.05950		0.06010		0.04780
	97.5%		0.05212		0.03819		0.04298		0.03170

Πίνακας 4.9: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Α της φρεγάτας.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.00205				0.00245			
Eriksson		0.00008				0.00012			
Love		0.00218				0.00251			
Rizk		0.00020				0.00032			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.08109	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.06212	Ίσαλος γραμμή	0.06369	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.04853
	50%		0.05598		0.03885		0.04497		0.03121
	97.5%		0.03551		0.02102		0.02950		0.01770

Πίνακας 4.10: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Β της φρεγάτας.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.04931				0.03888			
Eriksson		0.04156				0.03335			
Love		0.04708				0.03820			
Rizk		0.03914				0.03177			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.08887	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.07548	Ίσαλος γραμμή	0.06991	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.05921
	50%		0.06309		0.05088		0.05068		0.04087
	97.5%		0.04172		0.03112		0.03454		0.02593

Πίνακας 4.11: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Α της κορβέτας.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.00205				0.00245			
Eriksson		0.00008				0.00012			
Love		0.00218				0.00251			
Rizk		0.00020				0.00032			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.07945	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.06420	Ίσαλος γραμμή	0.06237	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.05019
	50%		0.05448		0.04072		0.04377		0.03271
	97.5%		0.03422		0.02255		0.02845		0.01895

Πίνακας 4.12: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Β της κορβέτας.

Μοντέλο σύλληψης		Κατανομή κεραυνικού ρεύματος							
		Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)			
Brown & Whitehead		0.07742				0.05925			
Eriksson		0.14084				0.10734			
Love		0.07356				0.05619			
Rizk		0.10760				0.08277			
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.14858	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.11210	Ίσαλος γραμμή	0.11768	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.08849
	50%		0.11871		0.08455		0.09535		0.06792
	97.5%		0.09218		0.06088		0.07537		0.05006

Πίνακας 4.13: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία Β του αεροπλανοφόρου

Μοντέλο σύλληψης			Κατανομή κεραυνικού ρεύματος						
			Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)		
Brown & Whitehead			0.05371				0.03959		
Eriksson			0.13391				0.10410		
Love			0.04998				0.03802		
Rizk			0.10182				0.07789		
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.13261	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.07663	Ίσαλος γραμμή	0.10490	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.06013
	50%		0.10370		0.05193		0.08330		0.04171
	97.5%		0.07834		0.03202		0.06419		0.02666

Πίνακας 4.14: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία A του πετρελαιοφόρου No.1.

Μοντέλο σύλληψης			Κατανομή κεραυνικού ρεύματος						
			Anderson (IEEE)				Mousa (IEEE)		
Brown & Whitehead			0.00766				0.00589		
Eriksson			0.00225				0.00165		
Love			0.00776				0.00594		
Rizk			0.00297				0.00223		
Στατιστικό μοντέλο	2.5%	Ίσαλος γραμμή	0.09606	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.03799	Ίσαλος γραμμή	0.07566	Τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	0.02925
	50%		0.06970		0.01772		0.05599		0.01424
	97.5%		0.04756		0.00509		0.03928		0.00457

Πίνακας 4.15: Πλήθος κεραυνικών πληγμάτων  $N_d$  που καταλήγουν στην κεραία A του πετρελαιοφόρου No.2.

Μία πρώτη παρατήρηση αναφορικά με τα αποτελέσματα του στατιστικού μοντέλου είναι το γεγονός ότι η θεώρηση του επιπέδου αναφοράς στην ίσαλο γραμμή παράγει μεγαλύτερο αριθμό αναμενόμενων πληγμάτων, εφόσον θεωρεί μεγαλύτερο ύψος ακίδας, ενώ στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων η τροποποίηση του επιπέδου αναφοράς, οδηγεί σε αποτελέσματα που συγκλίνουν με τις προσομοιώσεις του WinIGS.

Τα αποτελέσματα των ηλεκτρογεωμετρικών και γενικευμένων μοντέλων μπορεί κατά περίπτωση να αποκλίνουν, στο σύνολό τους, ωστόσο, βρίσκονται εντός του εύρους τιμών των  $N_d$ , που προκύπτει για τις διάφορες πιθανότητες σύλληψης σύμφωνα με το στατιστικό μοντέλο, όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.4, 4.6, 4.7, 4.9 και 4.11. Μάλιστα, στις περιπτώσεις των κεραίων  $A_2$  στο αντιτορπιλικό, A στη φρεγάτα και A στην κορβέτα, οι οποίες αποτελούν τον ψηλότερο ιστό του πλοίου, χωρίς ιδιαίτερα έντονα φαινόμενα γειννίας, παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ ηλεκτρογεωμετρικών και γενικευμένων μοντέλων και προσέγγιση της 50% ή ακόμα και της 97.5% τιμής του στατιστικού μοντέλου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η εφαρμοζόμενη εδώ εκδοχή του στατιστικού μοντέλου είναι διατυπωμένη για απομονωμένη ράβδο, ενώ ως προς τις γεωμετρικές συνθήκες οι προσομοιώσεις έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια, διότι συνυπολογίζεται ολόκληρη η δομή του πλοίου, αναδεικνύεται η ικανοποιητική επίδοση του στατιστικού μοντέλου. Ενισχύεται έτσι η ανάγκη για ενσωμάτωση της πιθανότητας σύλληψης στον υπολογισμό των κεραυνικών πληγμάτων, ειδικά σε μια σύνθετη γεωμετρία όπως ένα πλοίο, όπου οι διάφορες μέθοδοι μπορούν να παράγουν αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα.

Πέρα από τις ψηλότερες θέσεις κάθε μοντέλου, εξετάστηκαν στους παραπάνω Πίνακες 4.8, 4.10 και 4.12 οι κεραίες E στο αντιτορπιλικό, B στη φρεγάτα και B στην κορβέτα αντίστοιχα, οι οποίες είναι χαμηλότερες κατασκευές που βρίσκονται στη ζώνη προστασίας κοντινών ψηλότερων κατασκευών. Οι υπολογισμοί που έγιναν με τα γνωστά

ηλεκτρογεωμετρικά και γενικευμένα μοντέλα οδηγούν σε μικρότερο αριθμό αναμενόμενων πληγμάτων σε σύγκριση με το εφαρμοζόμενο στατιστικό μοντέλο που έχει διατυπωθεί για απομονωμένη ράβδο, ακριβώς διότι στο λογισμικό WinIGS έχει εισαχθεί ολόκληρη η γεωμετρία και μπορούν να αναπαραχθούν περιπτώσεις αστοχίας της θωράκισης, δηλαδή σύλληψη του κεραυνού από τη γειτονική υπό προστασία κατασκευή. Αποδεικνύεται βέβαια ότι, αν και συλλαμβάνουν πολύ μικρό αριθμό κεραυνικών πληγμάτων, οι εν λόγω κατασκευές δεν είναι απόλυτα θωρακισμένες, όπως θα φανεί αναλυτικά και στα επόμενα με τη διαδικασία της ανάλυσης θωράκισης. Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις αναδεικνύεται επίσης και η γενικά παρατηρούμενη αυξημένη εκτίμηση των  $N_d$  από τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα σε σχέση με τα γενικευμένα μοντέλα. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι για την κεραία A του πετρελαιοφόρου Νο.2, οι μειωμένες εκτιμήσεις των γενικευμένων μοντέλων δε συναληθεύουν με το στατιστικό μοντέλο και τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα προσεγγίζουν την 97.5% εκτίμηση του στατιστικού μοντέλου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.15.

Περίπτωση αυξημένου  $N_d$  σύμφωνα με το στατιστικό μοντέλο σε σχέση με τις προσομοιώσεις αποτελεί και η κεραία E του πλοίου μεταφοράς φορτίου, η οποία βρίσκεται σε περιβάλλον με δομές παρόμοιου ύψους, δεν «σκιάζεται» από ψηλότερους ιστούς και λειτουργεί ως ακίδα προστασίας για τη γειτονική κοντύτερη κεραία, με αποτέλεσμα οι υπολογισμοί ηλεκτρογεωμετρικών και γενικευμένων μοντέλων να συγκλίνουν.

Αντίστροφη συμπεριφορά, δηλαδή μεγαλύτερη εκτίμηση του  $N_d$  από τα γενικευμένα μοντέλα, παρατηρείται στις περιπτώσεις της κεραίας B του αεροπλανοφόρου και της κεραίας B του δεξαμενόπλοιου, ενδεχομένως λόγω της παρακείμενης μεγάλης εκτεθειμένης επιφάνειας του καταστρώματος.

Εξαίρεση στη βελτιωμένη επίδοση των τροποποιημένων επιπέδων αναφοράς αποτελεί η κεραία A του πετρελαιοφόρου Νο.1, για την οποία τα γενικευμένα μοντέλα συμφωνούν με τους υπολογισμούς από την ίσαλο γραμμή. Η εγγύτητα της κατασκευής αυτής με την πρύμνη καθιστά την ίσαλο γραμμή πιο ενδεδειγμένη επιλογή. Το ίδιο μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση της κεραίας A του πλοίου μεταφοράς φορτίου.

Όσον αφορά στους υπολογισμούς από την ίσαλο γραμμή, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει κάποια συναλήθευση των προσομοιώσεων με το στατιστικό μοντέλο, μπορούν να ειπωθούν τα εξής: Για τις κεραίες των Πινάκων 4.7 και 4.11 οι υπολογισμοί των ηλεκτρογεωμετρικών μοντέλων είναι πλησιέστερα στην 97.5% ακτίνα σύλληψης του στατιστικού μοντέλου, ενώ για τις κεραίες των Πινάκων 4.13 και 4.14 τα γενικευμένα μοντέλα, προσεγγίζουν την 97.5% ακτίνα σύλληψης.

Με βάση τις ασυμφωνίες που παρατηρήθηκαν μεταξύ των μεθόδων ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες της γεωμετρίας, προκύπτει η ανάγκη για στοχευμένη προσέγγιση της θωράκισης των κρίσιμων ιστών ενός πλοίου και για διαμόρφωση μιας διαδικασίας η οποία θα ενσωματώνει την πιθανότητα σύλληψης στον υπολογισμό των κεραυνικών πληγμάτων.

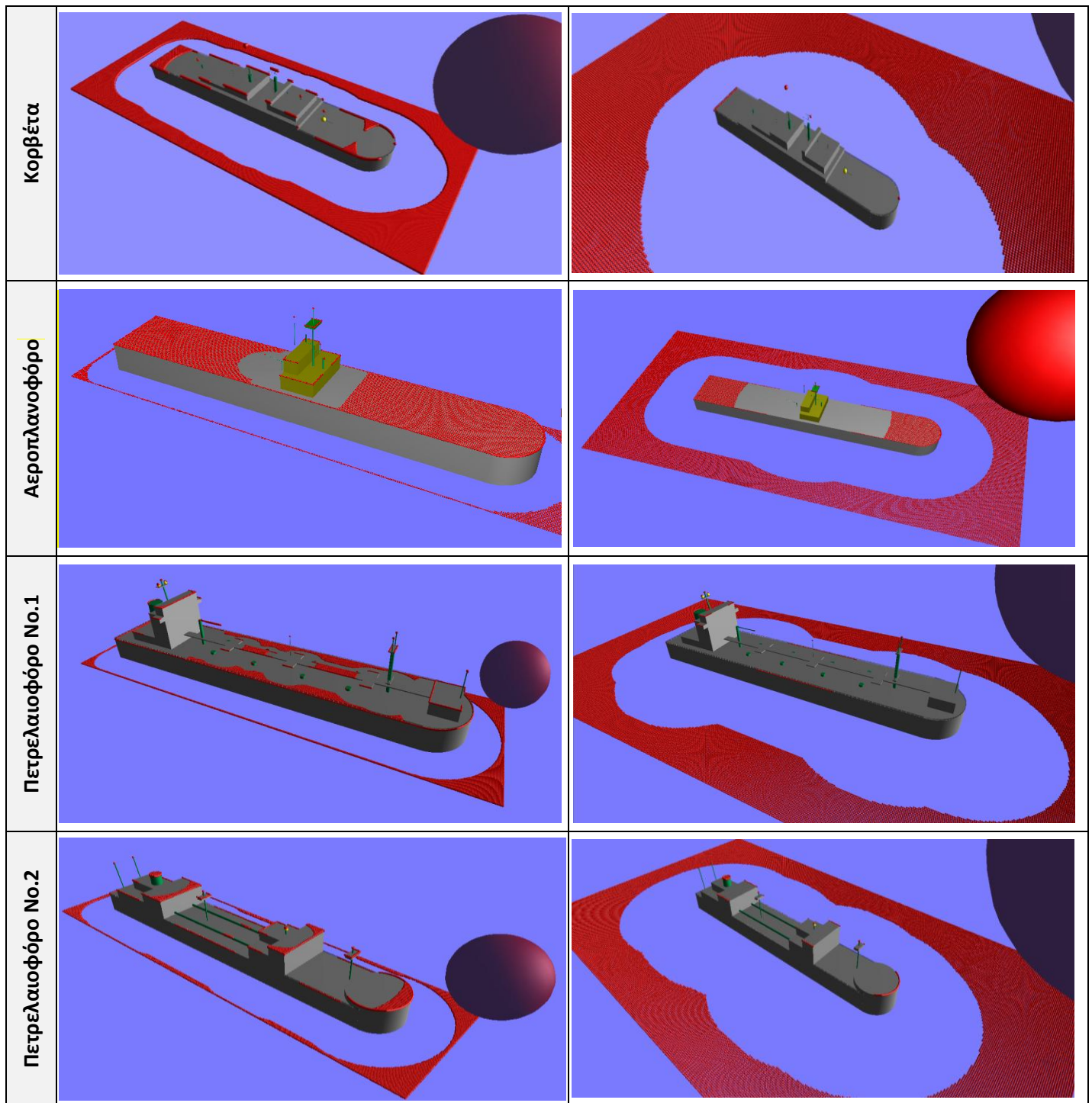
#### **4.2.2.3 Εφαρμογή Μεθόδου Κυλιόμενης Σφαίρας**

Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή της Μεθόδου της Κυλιόμενης Σφαίρας στο περιβάλλον του WinIGS, προκειμένου να αναδειχθούν οι περιοχές πάνω στα πλοία του Πίνακα 4.1, οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε μια δεδομένη τιμή κεραυνικού ρεύματος. Τα σημεία του μοντέλου που έρχονται σε επαφή με τη σφαίρα κατά την κύλισή της πάνω στην επιφάνεια του πλοίου απεικονίζονται στα γραφήματα του Πίνακα 4.16 με κόκκινο χρώμα

(για λόγους ευκρίνειας των κόκκινων σημείων επαφής της κυλιόμενης σφαίρας στον Πίνακα 4.16 δεν έχει διατηρηθεί η χρωματική κωδικοποίηση των Επιπέδων, όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 4.1). Για τον υπολογισμό της ακτίνας της σφαίρας επελέγη το ηλεκτρογεωμετρικό μοντέλο του Love, όπως άλλωστε διατυπώνεται η μέθοδος και στο IEC 62305-1 [28]. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε για κεραυνικό ρεύμα 3kA, (ελάχιστη εξεταζόμενη τιμή για επίπεδο αντικεραυνικής προστασίας I [28]) και αναδεικνύει τη μέγιστη δυνατή έκταση εκτεθειμένων περιοχών σε μια δομή, καθώς αντιστοιχεί σε μικρή ακτίνα σφαίρας, αλλά και για κεραυνικό ρεύμα 30kA, που αποτελεί κατά προσέγγιση τη μέση τιμή της κατανομής του Anderson.

	3kA	30kA
Πλοίο μεταφοράς φορτίου		
Δεξαμενόπλοιο		
Αντιτορπιλικό		
Φρεγάτα		





**Πίνακας 4.16:** Περιοχές των πλοίων εκτεθειμένες σε κεραυνικά ρεύματα 3kA και 30kA σύμφωνα με τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας.

Πράγματι, για όλες τις περιπτώσεις πλοίων, σε κεραυνικό ρεύμα 3kA είναι εκτεθειμένη συνολικά μεγαλύτερη επιφάνεια. Οι κεραιές, οι ψηλότεροι ιστοί και οι ακμές/γωνίες των παρακείμενων χώρων διαμονής και ναυσιπλοΐας είναι σημεία εκτεθειμένα τόσο στα 3kA όσο και στα 30kA. Αποδεικνύεται έτσι ότι, για ένα συχνά εμφανιζόμενο κεραυνικό ρεύμα της τάξης των 30kA οι ψηλότεροι ιστοί, οι οποίοι, όπως είναι αναμενόμενο λειτουργούν ως αλεξικέραυνα, δεν είναι δεδομένο ότι παρέχουν προστασία σε παρακείμενους κρίσιμους χώρους, κεραιές ή και εξοπλισμό. Σε πλοία, όπου υπάρχει πιο ομοιόμορφη κάλυψη της επιφάνειας του καταστρώματος από πολλαπλές

υπερκατασκευές όπως το πλοίο μεταφοράς φορτίου, το αντιτορπιλικό και η φρεγάτα, τα κεραυνικά πλήγματα συγκεντρώνονται σε ιστούς που προεξέχουν και συνήθως αποτελούν κρίσιμο εξοπλισμό που χρήζει και ο ίδιος προστασίας. Σε πλοία με περιορισμένες σε έκταση υπερκατασκευές όπως τα αεροπλανοφόρα, το δεξαμενόπλοιο και τα πετρελαιοφόρα στις εκτεθειμένες ζώνες προστίθεται και το κατάστρωμα, γεγονός που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για την προστασία πιθανώς εύφλεκτου φορτίου. Αναλόγως με τη γεωμετρία και τον τύπο του πλοίου, οι ζώνες αυτές περιορίζονται ασφαλώς για το κεραυνικό ρεύμα των 30kA, ωστόσο δεν εξαλείφονται πλήρως. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι οι περιοχές αυτές έχουν προκύψει με βάση τις φυσικές αρχές και θεωρήσεις της κυλιόμενης σφαίρας επομένως έχουν αγνοηθεί ορισμένες βασικές παράμετροι, όπως η πιθανότητα σύλληψης (αντιστοιχούν σε πιθανότητα σύλληψης 50%), η πολικότητα της εκκένωσης και το ύψος των κατασκευών (η απόσταση πρόσκρουσης έχει υπολογιστεί μόνο με βάση το κεραυνικό ρεύμα).

## 4.3 Ανάλυση θωράκισης

### 4.3.1 Προτεινόμενη διαδικασία

Η ανάλυση θωράκισης είναι η διαδικασία με την οποία καθορίζεται η σωστή θέση ενός αλεξικεραύνου ύψους  $h_m$ , με στόχο τη μείωση των κεραυνικών πληγμάτων που καταλήγουν σε ένα παρακείμενο υπό προστασία αντικείμενο ύψους  $h_p$ . Σύμφωνα με την ανάλυση που ακολουθείται στις εργασίες [95], [97], [98] και [108] στη βάση των γενικευμένων μοντέλων σύλληψης, οι κατερχόμενοι οχετοί που θα βρεθούν μέσα στη ζώνη που καθορίζεται από το διάστημα σφάλματος θωράκισης  $W$  της σχέσης (4.18), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6(α), θα πλήξουν το υπό προστασία αντικείμενο, οδηγώντας έτσι σε σφάλμα θωράκισης. Το ζητούμενο της όλης ανάλυσης είναι η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού ύψους αλεξικεραύνου  $h_m$  και απόστασης  $L$ , ώστε να ελαχιστοποιηθεί το διάστημα σφάλματος θωράκισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6(β).

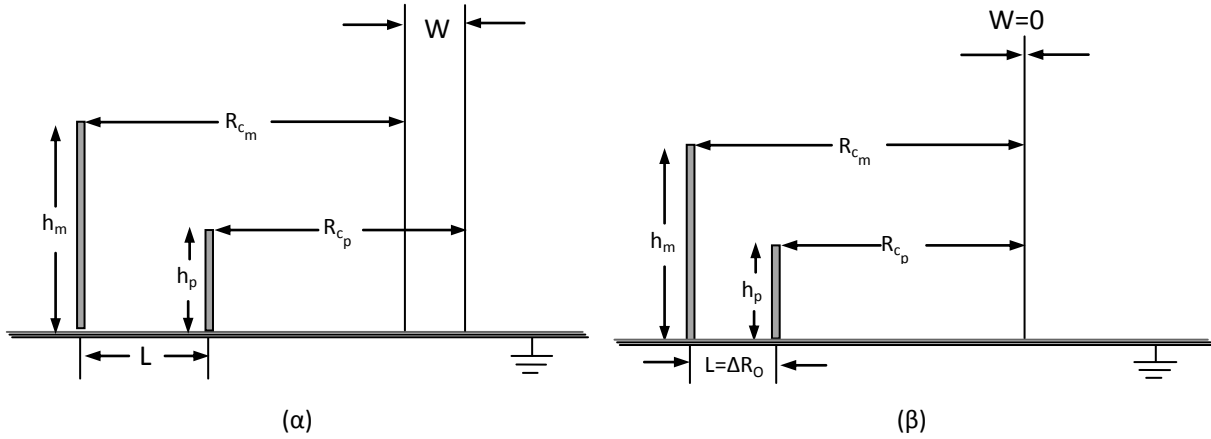
$$W = R_{c_p} - R_{c_m} + L = L - \Delta R_o \quad (4.18)$$

Στην ανάλυση που ακολουθεί θα χρησιμοποιηθεί το στατιστικό μοντέλο της παραγράφου 3.4.3.3 για τον υπολογισμό της ακτίνας σύλληψης ακίδας, η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή για αρνητική πολικότητα εκκένωσης τη λογαριθμική σχέση (4.19) και τυπική απόκλιση της σχέσης (4.10) [95]-[98]:

$$R_{50\%} = D \left[ 0.272 \ln \left( \frac{h}{D} \right) + 1.24 \right] \quad (4.19)$$

Η πλευρική απόσταση μεταξύ των δύο ιστών για συνθήκες κρίσιμες σύλληψης (50% πιθανότητα σύλληψης), για την οποία μηδενίζεται το διάστημα σφάλματος θωράκισης, ονομάζεται κρίσιμη απόσταση θωράκισης  $\Delta R_o$  και υπολογίζεται ως εξής [97]:

$$\Delta R_o = R_{c_m} - R_{c_p} = 0.272D \ln \left( \frac{h_m}{h_p} \right) \quad (4.20)$$



Σχήμα 4.6: Ανάλυση θωράκισης σύμφωνα με τα γενικευμένα και το στατιστικό μοντέλο για περίπτωση δύο γειτονικών ιστών ύψους  $h_m$  και  $h_p$  με ακτίνες σύλληψης  $R_{c_m}$  και  $R_{c_p}$  αντίστοιχα, σε απόσταση  $L$ : (α) διάστημα σφάλματος θωράκισης  $W$  (β) μηδενικό σφάλμα θωράκισης

Ένας επιπρόσθετος παράγοντας που οδηγεί σε μείωση της απαιτούμενης απόστασης θωράκισης  $\Delta R_o^*$  είναι τα φαινόμενα γειννίασης από την παρακείμενη υπό προστασία ράβδο, η παρουσία της οποίας, μειώνει την ακτίνα σύλληψης της ψηλής ράβδου. Ο παράγοντας μείωσης ( $\mu$ ) της εξίσωσης (4.22) εξαρτάται για δεδομένο κεραυνικό ρεύμα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο ράβδων, όπως φαίνεται στην (4.23) [98]:

$$\Delta R_o^* = (1 - \mu)\Delta R_o \quad (4.22)$$

$$\mu = \frac{0.14\left(\frac{h_m}{D}\right)^{1.3}}{\ln\left(\frac{h_m}{h_p}\right)} \quad (4.23)$$

Συνδυάζοντας τις (4.11), (4.18) και (4.22), το διάστημα σφάλματος θωράκισης μπορεί προσεγγιστικά να εκφραστεί ως εξής [95]:

$$W = 2.72I^{0.65} \ln\left(\frac{h_m}{h_p}\right) + 0.01h_m^{1.3} + L \quad (4.24)$$

Η συντηρητική ανάλυση για τη διατύπωση μιας αυστηρότερης απόστασης θωράκισης της εξίσωσης (4.25), στην περίπτωση συνυπολογισμού των φαινομένων γειννίασης, απαιτεί γνώση της 97.5% ακτίνας σύλληψης της ψηλής ράβδου υπό την επίδραση γειννίασης ( $R_{97.5\%m}^*$ ):

$$\Delta R_o^* = R_{97.5\%m}^* - R_{c_p} \quad (4.25)$$

Με δεδομένο ότι και στην περίπτωση φαινομένων γειννίασης η ακτίνα σύλληψης ακολουθεί κανονική κατανομή με την τυπική απόκλιση της (4.26), η  $R_{97.5\%m}^*$  συνδέεται με την 33.3% πιθανότητα σύλληψης μέσω της (4.27):

$$\sigma(\%) = 2.8\left(\frac{h_m}{D}\right)^{-0.36} \quad (4.26)$$

$$R_{97.5\%m}^* = (1 - 1.96\sigma)R_{50\%m}^* = (1 - 1.96\sigma)\frac{R_{33.3\%m}^*}{(1+0.43\sigma)} \quad (4.27)$$

Η κρίσιμη ακτίνα σύλληψης στην περίπτωση ράβδου με φαινόμενα γειννίασης  $R_{33.3\%m}^*$  αντιστοιχεί σε 33.3% πιθανότητα σύλληψης και προκύπτει από την κρίσιμη ακτίνα σύλληψης απομονωμένης ράβδου  $R_{50\%m}$  (50% πιθανότητα σύλληψης) για αρνητική πολικότητα εκκένωσης από την παρακάτω σχέση [98]:

$$R_{33.3\%m}^* = \lambda R_{50\%m} = \left[ 1 - 0.03 \left( \frac{h_m}{D} \right) \right] R_{50\%m} \quad (4.28)$$

Για μια δεδομένη διάταξη ράβδων ( $h_m, h_p, L$ ) το κεραυνικό ρεύμα που αντιστοιχεί σε μηδενικό διάστημα σφάλματος θωράκισης  $W$  (μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης  $I_{msf}$ ) υπολογίζεται με συνδυασμό των (4.11), (4.20) και (4.24) από τις σχέσεις (4.29) και (4.30) χωρίς φαινόμενα γειννίασης και με την επίδραση φαινομένων γειννίασης αντίστοιχα [95]:

$$I_{msf} = \left[ \frac{L}{2.72 \ln \left( \frac{h_m}{h_p} \right)} \right]^{1/0.65} \quad (4.29)$$

$$I_{msf}^* = \left[ \frac{L + 0.01 h_m^{1.3}}{2.72 \ln \left( \frac{h_m}{h_p} \right)} \right]^{1/0.65} \quad (4.30)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλη η παραπάνω ανάλυση ισχύει για  $h/D \leq 1$ . Για περιπτώσεις όπου  $h/D > 1$ , αντί της (4.19) εφαρμόζεται για κεραυνό αρνητικής πολικότητας χωρίς την επίδραση φαινομένων γειννίασης η σχέση [95]:

$$R_{50\%} = 1.24 \cdot D \quad (4.31)$$

Σε περίπτωση που ισχύει  $h_m/D \geq 1$  για την ψηλή ράβδο που αναλαμβάνει το ρόλο του αλεξικεραύνου, η σχέση (4.20) τροποποιείται με χρήση της (4.31) ως εξής:

$$\Delta R_o = R_{c_m} - R_{c_p} = 0.272 D \ln \left( \frac{D}{h_p} \right) \quad (4.32)$$

Συνεπώς το διάστημα σφάλματος θωράκισης είναι σύμφωνα με τις (4.18) και (4.32):

$$W = L + 0.272 D \ln \left( \frac{h_p}{D} \right) \quad (4.33)$$

Εάν ισχύει  $h/D \geq 1$  και για τις δύο ράβδους, τότε η σχέση (4.31) οδηγεί σε μηδενική κρίσιμη απόσταση θωράκισης ( $\Delta R_o = 0$ ). Προτείνεται εναλλακτικά η χρήση της σχέσης (4.34) [95] από την οποία προκύπτουν αντίστοιχα οι (4.35) και (4.36) :

$$R_{50\%} = 1.24 \cdot h \quad (4.34)$$

$$\Delta R_o = 1.24 (h_m - h_p) \quad (4.35)$$

$$W = L - 1.24 (h_m - h_p) \quad (4.36)$$

Η ενσωμάτωση της επίδρασης των φαινομένων γειννίασης για ύψη  $h > D$  δεν έχει μελετηθεί, επομένως προτείνεται σε αυτές τις περιπτώσεις η χρήση ενός τροποποιημένου

επιπέδου αναφοράς σε μεγαλύτερο ύψος, ώστε τα κανονικοποιημένα ύψη να μειωθούν και να έχουν ισχύ οι εξισώσεις (4.19)-(4.30).

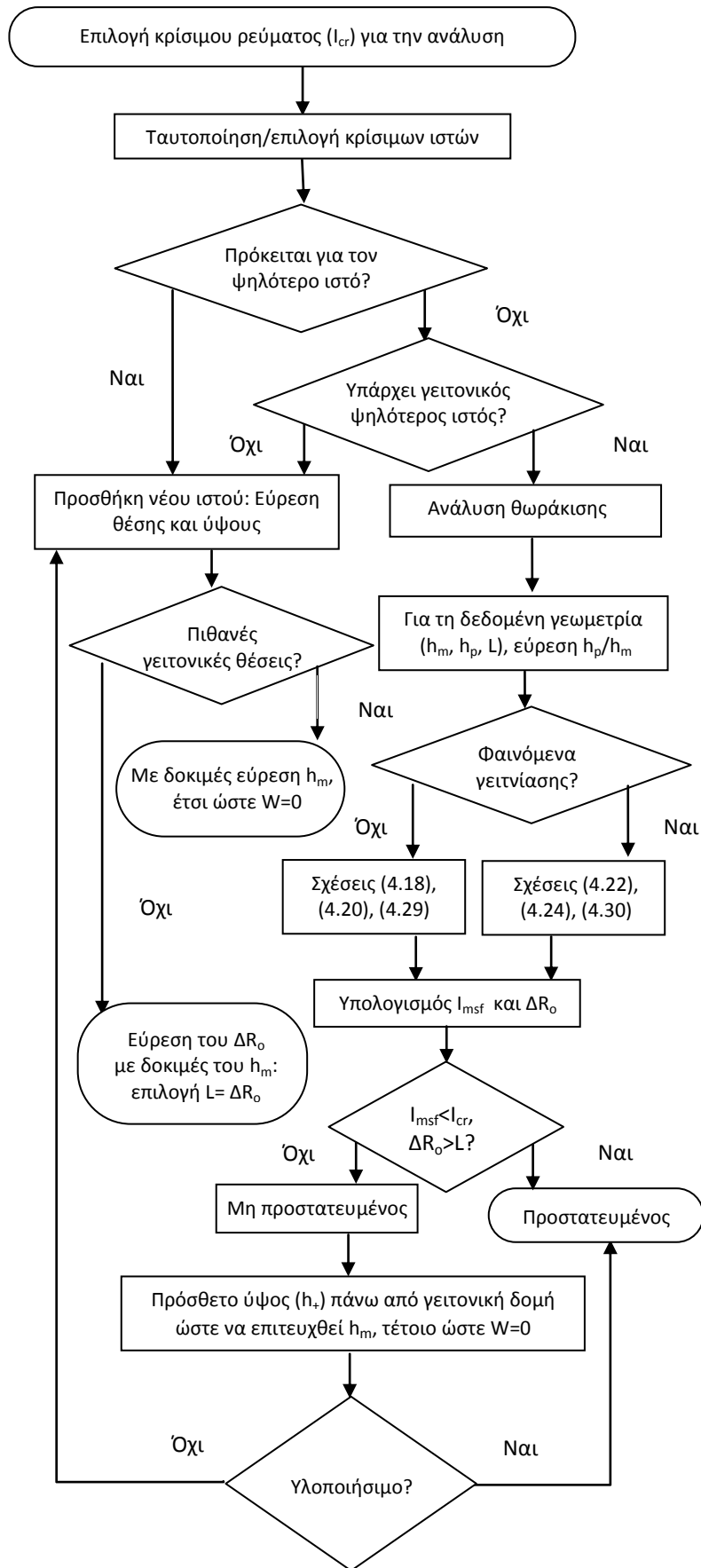
Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος (4.7) προτείνεται μια αναλυτική διαδικασία για την εφαρμογή ανάλυσης θωράκισης στις κατασκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια ενός πλοίου με βάση το στατιστικό μοντέλο και τις εξισώσεις (4.18)-(4.30). Η προτεινόμενη διαδικασία αποτελείται από τα εξής στάδια:

1. Αρχικά επιλέγεται το ελάχιστο ρεύμα  $I_{cr}$  για το οποίο απαιτείται θωράκιση
2. Στη συνέχεια ταυτοποιούνται οι κρίσιμες δομές στην επιφάνεια του πλοίου οι οποίες πρέπει να είναι προστατευμένες και εκτελείται για κάθε μία η παρακάτω διαδικασία (στον άξονα που ενώνει το κέντρο της με αυτό της πλησιέστερης γειτονικής υψηλότερης κατασκευής).
  - Γίνεται επιλογή ενός υλοποιήσιμου ύψους  $h_m$  και εν συνεχεία τίθεται η οριζόντια απόσταση  $L$  στην προκύπτουσα απόσταση θωράκισης  $\Delta R_o$ .
3. Η όλη διαδικασία γίνεται ξεκινώντας κατά προτίμηση από την ψηλότερη κρίσιμη θέση.
4. Εάν ο εξεταζόμενος ψηλότερος κρίσιμος ιστός βρίσκεται ταυτόχρονα και στο ψηλότερο σημείο του πλοίου και δεν υπάρχει άλλος γειτονικός ιστός ο οποίος να μπορεί να λειτουργήσει ως αλεξικέραυνο (να μη διαθέτει επίσης κρίσιμο εξοπλισμό), εξετάζεται η τοποθέτηση μιας νέας ράβδου προστασίας.
  - Εάν το μέγιστο ρεύμα σφάλματος θωράκισης  $I_{msf}$  που αντιστοιχεί στις αρχικές γεωμετρικές συνθήκες είναι μικρότερο από το κρίσιμο  $I_{cr}$  και εάν η απαιτούμενη απόσταση θωράκισης  $\Delta R_o$  είναι μεγαλύτερη από την οριζόντια απόσταση  $L$ , τότε ο εξεταζόμενος ιστός είναι προστατευμένος.
  - Σε αντίθετη περίπτωση η θωράκιση είναι ανεπιτυχής:
    - I. Εξετάζεται ως πρώτη λύση η επέκταση του γειτονικού ψηλότερου ιστού με πρόσθετο ύψος  $h_+$ , προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο συνολικό ύψος  $h_m$ , το οποίο για τη δεδομένη γεωμετρία οδηγεί σε  $W = 0$ .
    - II. Εάν το πρόσθετο ύψος  $h_+$  είναι μη υλοποιήσιμο, εξετάζεται η προσθήκη μιας νέας ράβδου. Εάν υπάρχουν πιθανές γειτονικές θέσεις εγκατάστασης ( $L$ ), προσδιορίζεται με δοκιμές το ύψος  $h_m$  του αλεξικεραύνου. Αλλιώς, γίνεται πρώτα επιλογή ενός υλοποιήσιμου ύψους και εν συνεχεία τίθεται η οριζόντια απόσταση  $L$  στην προκύπτουσα απόσταση θωράκισης  $\Delta R_o$ .
5. Εάν υπάρχουν ψηλότεροι γειτονικοί ιστοί κοντά στον εξεταζόμενο ιστό, εκτελείται ανάλυση θωράκισης σε αυτή την αρχική γεωμετρία, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον αυτός είναι θωρακισμένος:
  - Σε αντίθετη περίπτωση η θωράκιση είναι ανεπιτυχής:
    - I. Εξετάζεται ως πρώτη λύση η επέκταση του γειτονικού ψηλότερου ιστού με πρόσθετο ύψος  $h_+$ , προκειμένου να επιτευχθεί το απαιτούμενο συνολικό ύψος  $h_m$ , το οποίο για τη δεδομένη γεωμετρία οδηγεί σε  $W = 0$ .
    - II. Εάν το πρόσθετο ύψος  $h_+$  είναι μη υλοποιήσιμο, εξετάζεται η προσθήκη μιας νέας ράβδου. Εάν υπάρχουν πιθανές γειτονικές θέσεις εγκατάστασης ( $L$ ), προσδιορίζεται με δοκιμές το ύψος  $h_m$  του αλεξικεραύνου. Αλλιώς, γίνεται πρώτα επιλογή ενός υλοποιήσιμου ύψους και εν συνεχεία τίθεται η οριζόντια απόσταση  $L$  στην προκύπτουσα απόσταση θωράκισης  $\Delta R_o$ .
6. Σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση ιστών, εάν ο λόγος των υψών τους  $h_p/h_m$  υπερβαίνει το 0.6, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα γεινίασης και η ανάλυση γίνεται με τις εξισώσεις (4.22), (4.24) και (4.30). Εναλλακτικά, εάν προτιμηθεί η συντηρητική ανάλυση, θα πρέπει να γίνει εφαρμογή των εξισώσεων (4.25), (4.27) και (4.30).

### 4.3.2 Σενάρια εφαρμογής και αποτελέσματα

Ακολούθως έγινε εφαρμογή της διαδικασίας αυτής στους κρίσιμους ιστούς κάθε πλοίου, οι οποίοι έχουν επισημανθεί στο Σχήμα 4.1. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στις γραμμές μεταφοράς τα σφάλματα θωράκισης προκαλούνται από κεραυνικά ρεύματα μέχρι 20kA και ότι το μέγιστο ρεύμα σφάλματος  $I_{msf}$  που προσδιορίζεται με τη διαδικασία της ανάλυσης θωράκισης, ουσιαστικά αποτελεί το άνω όριο των κεραυνικών ρευμάτων που μπορεί να συλλάβει η υπό προστασία ράβδος, το κρίσιμο ρεύμα  $I_{cr}$  τέθηκε στα 15kA, (θεωρώντας παράλληλα ότι η προστασία από πολύ χαμηλά κεραυνικά ρεύματα μέχρι περίπου τα 10 - 12kA μπορεί να επιτευχθεί με χρήση απαγωγέων υπερτάσεων). Τα αποτελέσματα για την υπάρχουσα γεωμετρία και οι λύσεις προκειμένου να επιτευχθεί θωράκιση παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.17 - 4.24. Οι υπολογισμοί αυτοί έχουν γίνει θεωρώντας την επιφάνεια της θάλασσας (ίσαλος γραμμή) ως επίπεδο αναφοράς. Η ανάλυση θωράκισης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα (4.6), έχει διατυπωθεί στη βιβλιογραφία για την προστασία εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, όπου το ρόλο των ράβδων  $h_m$  και  $h_p$  αναλαμβάνουν το ίχνος του αγωγού προστασίας και του αγωγού φάσης αντίστοιχα και οι υπολογισμοί γίνονται με αναφορά το επίπεδο του εδάφους. Στην περίπτωση μιας σύνθετης δομής, όπως ένα πλοίο, υπάρχει το ενδεχόμενο τμήμα της ζώνης του διαστήματος σφάλματος θωράκισης  $W$  να επικαλύπτεται από στοιχεία της γεωμετρίας, με αποτέλεσμα να μη συμβάλλει στο πλήθος των κατερχόμενων οχρών που πιθανώς θα πλήξουν την υπό προστασία κατασκευή και η ανάλυση θωράκισης να επιτρέπει τη θεώρηση ενός υψηλότερου επιπέδου αναφοράς. Προκειμένου να αναδειχθούν οι διαφορές στις προκύπτουσες λύσεις θωράκισης, η διαδικασία των Πινάκων 4.17 - 4.24 έχει επαναληφθεί με ακριβώς τα ίδια βήματα, θεωρώντας τα τροποποιημένα επίπεδα αναφοράς της 4.2.2.2. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρατίθενται στους Πίνακες 4.25 - 4.32.

Στους παρακάτω Πίνακες εξετάζονται ενδεικτικές λύσεις θωράκισης, οι οποίες δεν είναι μονοσήμαντες, καθώς υπάρχουν πολυάριθμοι συνδυασμοί οριζόντιας απόστασης  $L$  και ύψους αλεξικεράυνου  $h_m$  που μπορούν να εξασφαλίσουν τη θωράκιση. Τα ύψη και οι αποστάσεις που παρατίθενται έχουν επιλεγεί ως τιμές κατά το δυνατόν πλησιέστερες στα στοιχεία της αρχικής γεωμετρίας, με γνώμονα κατασκευαστικούς περιορισμούς, αλλά και το διαθέσιμο χώρο με βάση τη γεωμετρία του πλοίου. Σε όλες τις περιπτώσεις εξετάζεται η επίδραση των φαινομένων γειννίας. Σε αρκετές γεωμετρίες, όπου ο λόγος υψών  $h_p/h_m$  είναι πολύ κοντά στην κρίσιμη τιμή 0.6 εξετάζονται και οι δύο εναλλακτικές επιλογές: να αγνοηθούν τα φαινόμενα γειννίας ή να συνεκτιμηθούν. Αντιστοίχως, παρουσιάζονται ενδεικτικά για ορισμένες ράβδους και τα αποτελέσματα συντηρητικής ανάλυσης θωράκισης. Επίσης, η προσθήκη ύψους πάνω από υπάρχουσα γειτονική κατασκευή σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζεται συνδυαστικά με μετατόπιση της δομής αυτής πλησιέστερα στον εξεταζόμενο ιστό, προκειμένου να αναδειχθεί το γεγονός ότι η ανάλυση θωράκισης μπορεί να συμβάλει στην αποτελεσματικότερη σχεδίαση και χωροθέτηση των δομών στην επιφάνεια του πλοίου. Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των δεδομένων των Πινάκων 4.17-4.32 αναλύεται εκτενώς η περίπτωση του εμπορικού πλοίου μεταφοράς φορτίου που έχει χρησιμοποιηθεί ως βάση για το Κεφάλαιο 3.



**Σχήμα 4.7:** Διάγραμμα ροής για την εφαρμογή της προτεινόμενης διαδικασίας ανάλυσης θωράκισης στους ιστούς ενός πλοίου

Εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου (από ίσαλο γραμμή)					
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία πλώρης F $h_p=26m$			Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=39m$ (υψηλότερος ιστός πλοίου)		
Γειτονικός ιστός E $h_m=31.5m$		Απόσταση $L=26m$		Έστω $L=12.2m$	
Αρχική γεωμετρία			Πιθανές θέσεις πάνω στη δομή J		
$h_p/h_m=0.83$ $\Delta R_o=2.09m$	γειτνίαση: NAI $W=23.9m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=429kA >> I_{cr}$		απαιτούμενο ύψος $h_m=83.5m$ (γειτνίαση OXI)	
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης			Έστω $L=4.9m$		
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (E)		$h_+=100m$ Μη υλοποιήσιμο		απαιτούμενο ύψος $h_m=66m$ $h_p/h_m=0.59$	
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Έστω $h_m=36m$ $h_p/h_m=0.72$		γειτνίαση: NAI $L=\Delta R_o=4m$		γειτνίαση: NAI $\Delta R_o=5.85m > L$ $I_{msf}=12kA < I_{cr}$
	Συντηρητική ανάλυση				
	Με $L=\Delta R_o=4m$ απαιτείται $h_m=42m$ $h_p/h_m=0.62$ γειτνίαση: NAI		Με $h_m=42m$ γειτνίαση: OXI $L=\Delta R_o=7.7m$		γειτνίαση: OXI $\Delta R_o=8.45m > L$ $I_{msf}=6.6kA < I_{cr}$
			Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου		Έστω ύψος $h_m=66m$
					Συντηρητική ανάλυση
					γειτνίαση: NAI $\Delta R_o=1m=L$ Τοποθέτηση πάνω στην περιοχή A της γέφυρας

Πίνακας 4.17: Ανάλυση θωράκισης για το εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου (από ίσαλο γραμμή)

Στο εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου του Σχήματος (4.1) (α) εξετάζονται ως κρίσιμοι ιστοί η κεραία τηλεπικοινωνιών A της γέφυρας και η κεραία ναυσιπλοΐας F στην πλώρη. Στην περίπτωση της κεραίας A πρόκειται για το ψηλότερο σημείο του πλοίου, επομένως εξετάζεται απευθείας η εγκατάσταση αλεξικεραύνου. Με αφετηρία την ενδεικτική επιλογή της θέσης εγκατάστασης πάνω στη γειτονική δομή J εξετάζονται δύο ακραίες οριζόντιες θέσεις τοποθέτησης στην οροφή J και για κάθε μία προσδιορίζεται το απαιτούμενο ύψος αλεξικεραύνου με δοκιμές. Μάλιστα, για την πλησιέστερη θέση εγκατάστασης  $L=4.9m$ , ιστός ύψους 66m εξασφαλίζει θωράκιση είτε αγνοηθούν είτε όχι τα φαινόμενα γειτνίασης. Εάν χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο ύψος ως αφετηρία για την ανάλυση θωράκισης, επισημαίνεται ότι συντηρητική επιλογή με συνεκτίμηση των φαινομένων γειτνίασης θα απαιτούσε πολύ μικρότερη οριζόντια απόσταση που αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του αλεξικεραύνου στην οροφή της γέφυρας. Για την κεραία F εξετάζεται, εάν ο παρακείμενος ψηλότερος ιστός E εξασφαλίζει θωράκιση. Αφού διαπιστωθεί ότι με την αρχική γεωμετρία ο ιστός F είναι αθωράκιστος, εξετάζεται ως πρώτη λύση η προσθήκη ακίδας στον ιστό E, η οποία οδηγεί σε απαιτούμενο πρόσθετο ύψος περίπου 100m και ως εκ τούτου θεωρείται μη υλοποιήσιμη. Στη συνέχεια, εξετάζεται η εγκατάσταση νέου αλεξικεραύνου ερευνώντας ύψη παραπλήσια του ύψους της E και συγκεκριμένα ύψος  $h_m=36m$ , για το οποίο προκύπτει ότι θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα γειτνίασης. Για την προκύπτουσα απαιτούμενη απόσταση των 4m, εάν εφαρμοστεί συντηρητική ανάλυση, θα πρέπει να συνοδεύεται από ακόμα υψηλότερο ιστό ύψους 42m. Εάν οριακά θεωρηθεί ότι μπορούν να αγνοηθούν τα φαινόμενα γειτνίασης, ένας ιστός τέτοιου ύψους μπορεί να εξασφαλίσει θωράκιση με απαιτήσεις συντηρητικής ανάλυσης τοποθετημένος σε μεγαλύτερη απόσταση 7.7m από την κεραία F. Ωστόσο, κατά την επιλογή της λύσης για την επίτευξη θωράκισης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο ιστός E είναι γερανός φορτίου και ο χώρος μεταξύ των E και F κατά ένα μέρος καλύπτεται.



Δεξαμενόπλοιο (από ίσαλο γραμμή)				
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=38.1m$			Εξεταζόμενος ιστός Κεραία πλήρης C $h_p=27.4m$	
Γειτονικός ιστός B $h_m=47.2m$	Απόσταση $L=11.5m$		Έστω ύψος $h_m=30.1m$	
Αρχική γεωμετρία			Τοποθέτηση νέου αλεξικεραίνου	
$h_p/h_m=0.81$ $\Delta R_o=1.77m<L$	γεινίαση: NAI $W=9.6m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=118kA >> I_{cr}$		
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης			Έστω απόσταση $L=1m$	
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (B) και μετατόπιση (B) πλησιέστερα προς τον ιστό (A)	Έστω $h_m=55.2m$ ( $h_x=8m$ ) $h_p/h_m=0.69$		απαιτούμενο ύψος $h_m=31m$ $h_p/h_m=0.88$ γεινίαση NAI ( $\Delta R_o=1m=L$ ) $I_{msf}=14.15kA < I_{cr}$	
	γεινίαση: NAI Επιλογή νέου $L=\Delta R_o=3.9m$			

Πίνακας 4.18: Ανάλυση θωράκισης για το δεξαμενόπλοιο (από ίσαλο γραμμή)

Αντιτορπλικό (από ίσαλο γραμμή)				
Εξεταζόμενος ιστός B $h_p=23.6m$		Εξεταζόμενος ιστός C $h_p=25.7m$		
Γειτονικός ιστός $A_1$ $h_m=33m$	Απόσταση $L=2.58m$	Γειτονικός ιστός $A_2$ $h_m=35m$	Απόσταση $L=7.19m$	
Αρχική γεωμετρία		Αρχική γεωμετρία		
$h_p/h_m=0.71$ γεινίαση: NAI	$\Delta R_o=4.35m>L$ $I_{msf}=7.94kA < I_{cr}$ Προστατευμένος	$h_p/h_m=0.74$ $\Delta R_o=3.8m$	γεινίαση: NAI $W=3.34m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=33.5kA > I_{cr}$
Εξεταζόμενος ιστός $A_2$ $h_p=35m$		Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		
Γειτονικός ιστός $A_1$ $h_m=33m$	Απόσταση $L=2.44m$	Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό ( $A_1$ ) για τη θωράκιση των ( $A_2$ ) και (C) $L(A_1-C)=10.23m$	Έστω $h_m=49m$ ( $h_x=16m$ ) $h_p/h_m=0.52$ γεινίαση: OXI	Απαιτούμενη απόσταση $\Delta R_o=10.36m>L$ $I_{msf}=15kA=I_{cr}$
Αρχική γεωμετρία		Εξεταζόμενος ιστός E $h_p=23.3m$		
$h_p>h_m$	Απροστάτευτος	Γειτονικός ιστός D $h_m=24.7m$	Απόσταση $L=12.19m$	
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		Αρχική γεωμετρία		
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό ( $A_1$ )	Έστω $h_m=49m$ ( $h_x=16m$ ) $h_p/h_m=0.7$ γεινίαση: NAI	$h_p/h_m=0.94$ $\Delta R_o=0.21m$	γεινίαση: NAI $W=11.98m$	Απροστάτευτος $I_{msf}>> (858kA)$
	Απαιτούμενη απόσταση $\Delta R_o=3.66m>L$ $I_{msf}=12kA < I_{cr}$	Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (D)	Έστω $h_m=57m$ ( $h_x=32.3m$ ) $h_p/h_m=0.41$ γεινίαση: OXI	$\Delta R_o=12.22m>L$ $I_{msf}=14.91kA < I_{cr}$
		Μετακίνηση ιστού (D) σε νέα θέση και πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (D)	Έστω $h_m=31m$ ( $h_x=5.3m$ ) $h_p/h_m=0.75$ γεινίαση: NAI	Επιλογή νέου $L=\Delta R_o=3.62m$

Πίνακας 4.19: Ανάλυση θωράκισης για το αντιτορπλικό (από ίσαλο γραμμή)

Φρεγάτα (από ίσαλο γραμμή)		
Εξεταζόμενος ιστός B $h_p=20.7m$		
Γειτονικός ιστός A $h_m=33.6m$	Απόσταση $L=13.1m$	
Αρχική γεωμετρία		
$h_p/h_m=0.62$ $\Delta R_o=7.8m < L$	γεινίαση: ΟΧΙ (οριακά) $W=5.3m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=34.4kA > I_{cr}$
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (B) και μετατόπιση (B) πλησιέστερα προς τον ιστό (A)	Έστω $h_m=35.3m$ ( $h_+=1.7m$ ) $h_p/h_m=0.59$ γεινίαση: ΟΧΙ	
	Απαιτούμενη απόσταση $\Delta R_o=8.54m$ Επιλογή $L=8m$ , $I_{msf}=13.9kA < I_{cr}$	

Πίνακας 4.20: Ανάλυση θωράκισης για τη φρεγάτα (από ίσαλο γραμμή)

Κορβέτα (από ίσαλο γραμμή)		
Εξεταζόμενος ιστός B $h_p=19.8m$		
Γειτονικός ιστός A $h_m=25.3m$	Απόσταση $L=10.06m$	
Αρχική γεωμετρία		
$h_p/h_m=0.78$ $\Delta R_o=3.18m < L$	γεινίαση: ΝΑΙ $W=6.9m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=72.1kA > I_{cr}$
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		
Προσθήκη ύψους πάνω από τον ιστό (A)	Έστω $h_m=37.2m$ ( $h_+=11.9m$ ) $h_p/h_m=0.53$ γεινίαση: ΟΧΙ	Απαιτούμενη απόσταση $\Delta R_o=10.10m > L$
		Συντηρητική ανάλυση
		Απαιτούμενη απόσταση $\Delta R_o=2.1m$

Πίνακας 4.21: Ανάλυση θωράκισης για την κορβέτα (από ίσαλο γραμμή)

Αεροπλανοφόρο (από ίσαλο γραμμή)			
Εξεταζόμενος ιστός A $h_p=63.3m$		Εξεταζόμενος ιστός C $h_p=48.8m$	
Γειτονικός ιστός B $h_m=72.3m$	Απόσταση $L=12.12m$	Γειτονικός ιστός B $h_m=72.3m$ ( $h_m/D > 1$ )	Απόσταση $L=4.57m$
Αρχική γεωμετρία		Αρχική γεωμετρία	
Επίλυση με τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς	$h_p/D > 1$ $h_m/D > 1$ $h_p/h_m = 0.88$ γεινίαση: ΝΑΙ	$h_p/h_m = 0.67$	γεινίαση: ΝΑΙ Επίλυση με τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς
		γεινίαση: ΟΡΙΑΚΑ ΟΧΙ	$\Delta R_o = 3.18m < L$ $W = 1.39m$ Απροστάτευτος
		Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης	
		Μετατόπιση (B) πλησιέστερα προς τον ιστό (C) ώστε $L = \Delta R_o = 3.18m$	

Πίνακας 4.22: Ανάλυση θωράκισης για το αεροπλανοφόρο (από ίσαλο γραμμή)

Πετρελαιοφόρο No.1 (από ίσαλο γραμμή)		
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=57.9m$ (υψηλότερος ιστός πλοίου)		
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Πιθανές θέσεις πάνω στη δομή J	Έστω $L=7m$
		απαιτούμενο ύψος $h_m=90m$ $h_p/h_m=0.64$ (γειτνίαση OXI) (Με ύψος $h_m=90m$ θεωρώντας γειτνίαση: NAI απαιτείται $\Delta R_o=L=3.2m$ )
		Έστω $L=14.6m$
		απαιτούμενο ύψος $h_m>>(144m)$ μη υλοποιήσιμο (γειτνίαση OXI)

Πίνακας 4.23: Ανάλυση θωράκισης για το πετρελαιοφόρο No.1 (από ίσαλο γραμμή)

Πετρελαιοφόρο No.2 (από ίσαλο γραμμή)	
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=28.96m$	
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	$h_m=34m$
	$h_p/h_m=0.85$ (γειτνίαση NAI) Επιλογή $L=\Delta R_o=1.5m$
	$L=3m$
	απαιτούμενο ύψος $h_m=38m$ $h_p/h_m=0.76$ (γειτνίαση NAI) $\Delta R_o=3.1m>L$ , $I_{msf}=14.4kA<I_{cr}$

Πίνακας 4.24: Ανάλυση θωράκισης για το πετρελαιοφόρο No.1 (από ίσαλο γραμμή)

Εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)							
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία πλήρης F $h_p=17m$		Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=15m$ (υψηλότερος ιστός πλοίου)					
Γειτονικός ιστός $E h_m=22.5m$	Απόσταση $L=26m$	Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Πιθανές θέσεις πάνω στη δομή J	Έστω $L=12.2m$			
Αρχική γεωμετρία				απαιτούμενο ύψος $h_m=32m$ $h_p/h_m=0.47$ (γειτνίαση OXI)			
$h_p/h_m=0.76$ $\Delta R_o=3.87m$	γειτνίαση: NAI $W=22.16m$			Απροσπάτευτος $I_{msf}=235kA>>I_{cr}$	Έστω $L=4.9m$		
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης				Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Πιθανές θέσεις πάνω στη δομή J	$h_m=22m$ $h_p/h_m=0.68$ γειτνίαση: NAI $\Delta R_o=5.52m>L$ $I_{msf}=12.8kA<I_{cr}$	
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (E)	$h_s=63.5m$ Μη υλοποιήσιμο						
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Έστω $h_m=25m$ ( $h_s=2.5m$ ) $h_p/h_m=0.68$						γειτνίαση: NAI επιλογή νέου $L=\Delta R_o=5.5m$
	Συντηρητική ανάλυση						
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Έστω $h_m=30m$ ( $h_s=7.5m$ ) $h_p/h_m=0.57$			γειτνίαση: NAI επιλογή νέου $L=\Delta R_o=3m$	Συντηρητική ανάλυση		
		γειτνίαση: OXI επιλογή νέου $L=\Delta R_o=0.8m$	Για $L=4.9m$ : απαιτούμενο ύψος $h_m=33.8m$ $h_p/h_m=0.44$ (γειτνίαση OXI)				

Πίνακας 4.25: Ανάλυση θωράκισης για το εμπορικό πλοίο μεταφοράς φορτίου (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Δεξαμενόπλοιο (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)				
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=19.8m$			Εξεταζόμενος ιστός Κεραία πλήρης C $h_p=9.14m$	
Γειτονικός ιστός B $h_m=29m$		Απόσταση $L=11.5m$		Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου
Αρχική γεωμετρία				
$h_p/h_m=0.68$ $\Delta R_o=5.2m < L$	γεινίαση: NAI $W=2.5m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=25.5kA > I_{cr}$		
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης				
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (B) και μετατόπιση (B) πλησιέστερα προς τον ιστό (A)		Έστω $h_m=32m$ ( $h_x=3m$ ) $h_p/h_m=0.62$		Έστω απόσταση $L=1m$
		γεινίαση: NAI (οριακά) Επιλογή νέου $L=\Delta R_o=7.7m$		
		απαιτούμενο ύψος $h_m=9.9m$ $h_p/h_m=0.92$ (γεινίαση NAI) $\Delta R_o=1.06m > L$ $I_{msf}=13.87kA < I_{cr}$		

Πίνακας 4.26: Ανάλυση θωράκισης για το δεξαμενόπλοιο (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Αντιτορπλικό (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)				
Εξεταζόμενος ιστός B $h_p=10m$			Εξεταζόμενος ιστός C $h_p=12.2m$	
Γειτονικός ιστός $A_1$ $h_m=19.5m$		Απόσταση $L=2.58m$		Απόσταση $L=7.19m$
Αρχική γεωμετρία			Αρχική γεωμετρία	
$h_p/h_m=0.52$ γεινίαση: ΟΧΙ Προστατευμένος	$\Delta R_o=10.63m > L$ $I_{msf}=1.74kA < I_{cr}$	$h_p/h_m=0.74$ $\Delta R_o=4.4m$	γεινίαση: NAI $W=2.8m$	Απροστάτευτος $I_{msf}=30.8kA$
Εξεταζόμενος ιστός $A_2$ $h_p=16.5m$		Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		
Γειτονικός ιστός $A_1$ $h_m=10m$		Απόσταση $L=2.44m$		Απαιτείται $\Delta R_o=10.86m > L$ $I_{msf}=14kA < I_{cr}$
		Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό ( $A_1$ ) για τη θωράκιση των ( $A_2$ ) και (C) $L(A_1-C)=10.23m$		
		Έστω $h_m=24m$ ( $h_x=14m$ ) $h_p/h_m=0.51$ γεινίαση: ΟΧΙ		
Αρχική γεωμετρία		Εξεταζόμενος ιστός E $h_p=9.8m$		
$h_p > h_m$	Απροστάτευτος	Γειτονικός ιστός D $h_m=11.2m$		Απόσταση $L=12.19m$
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		Αρχική γεωμετρία		
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό ( $A_1$ )		Έστω $h_m=20m$ ( $h_x=10m$ ) $h_p/h_m=0.82$ γεινίαση: NAI		Απροστάτευτος $I_{msf} >> (214kA)$
		Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		
		Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (D)		Έστω $h_m=21m$ ( $h_x=9.8m$ ) $h_p/h_m=0.46$ γεινίαση: ΟΧΙ
		Νέα θέση και πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (D)		Έστω $h_m=12m$ ( $h_x=2m$ ) $h_p/h_m=0.81$ γεινίαση: NAI
		Επιλογή νέου $L=\Delta R_o=3.1m$		

Πίνακας 4.27: Ανάλυση θωράκισης για το αντιτορπλικό (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Φρεγάτα (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)		
Εξεταζόμενος ιστός B $h_p=10.1m$		
Γειτονικός ιστός A $h_m=23m$	Απόσταση $L=13.1m$	
Αρχική γεωμετρία		
$h_p/h_m = 0.44$ $\Delta R_o = 13.24m > L$	γεινίαση: ΟΧΙ	Προστατευμένος $I_{msf} = 15kA > I_{cr}$

Πίνακας 4.28 Ανάλυση θωράκισης για τη φρεγάτα (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Κορβέτα (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)		
Εξεταζόμενος ιστός B $h_p=12.2m$		
Γειτονικός ιστός A $h_m=17.7m$	Απόσταση $L=10.06m$	
Αρχική γεωμετρία		
$h_p/h_m = 0.69$ $\Delta R_o = 5.5m < L$	γεινίαση: ΝΑΙ $W=4.6m$	Απροστάτευτος $I_{msf} = 36.5kA > I_{cr}$
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης		
Προσθήκη ύψους πάνω από τον ιστό (Α)	Έστω $h_m=23m$ ( $h_+=5.3m$ ) $h_p/h_m = 0.53$ γεινίαση: ΟΧΙ	Απαιτείται $\Delta R_o = 10.22m > L$
		Συντηρητική ανάλυση
		Απαιτούμενη απόσταση $\Delta R_o = 1.5m$

Πίνακας 4.29: Ανάλυση θωράκισης για την κορβέτα (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Αεροπλανοφόρο (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)			
Εξεταζόμενος ιστός A $h_p=32m$		Εξεταζόμενος ιστός C $h_p=17.4m$	
Γειτονικός ιστός B $h_m=41m$	Απόσταση $L=12.12m$	Γειτονικός ιστός B $h_m=41m$	Απόσταση $L=4.57m$
Αρχική γεωμετρία		Αρχική γεωμετρία	
$h_p/h_m = 0.78$ $\Delta R_o = 2.6m < L$	γεινίαση: ΝΑΙ $W=3.2m$	Απροστάτευτος $I_{msf} = 37.7kA < I_{cr}$	$h_p/h_m = 0.43$ $\Delta R_o = 13.7m > L$
Βελτιώσεις για την επίτευξη θωράκισης			
Πρόσθετο ύψος πάνω από τον ιστό (B) και μετατόπιση (B) πλησιέστερα προς τον ιστό (A)	Έστω $h_m=52m$ ( $h_+=11m$ ) $h_p/h_m = 0.61$		γεινίαση: ΟΧΙ $W < 0$ Προστατευμένος $I_{msf} = 2.83kA < I_{cr}$
	γεινίαση: ΝΑΙ Επιλογή $L = \Delta R_o = 5.9m$		

Πίνακας 4.30: Ανάλυση θωράκισης για το αεροπλανοφόρο (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Πετρελαιοφόρο No.1 (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)		
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=18.9m$ (υψηλότερος ιστός πλοίου)		
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Πιθανές θέσεις πάνω στη δομή J	Έστω $L=7m$
		απαιτούμενο ύψος $h_m=30m$ $h_p/h_m=0.63$ (γεινίαση: NAI)
		Έστω $L=14.6m$
		απαιτούμενο ύψος $h_m=45.5m$ $h_p/h_m=0.42$ (γεινίαση: ΟΧΙ)

Πίνακας 4.31: Ανάλυση θωράκισης για το πετρελαιοφόρο No.1 (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

Πετρελαιοφόρο No.2 (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)	
Εξεταζόμενος ιστός Κεραία γέφυρας A $h_p=3.05m$	
Τοποθέτηση νέου αλεξικεραύνου	Έστω $h_m=3.8m$
	$h_p/h_m=0.8$ (γεινίαση NAI) Επιλογή $L=ΔR_o=3.5m$

Πίνακας 4.32: Ανάλυση θωράκισης για το πετρελαιοφόρο No.2 (τροποποιημένο επίπεδο αναφοράς)

### 4.3.3 Συζήτηση-Συμπεράσματα

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η ανάλυση θωράκισης στην προϋπάρχουσα γεωμετρία ανέδειξε ελλιπή θωράκιση της κοντύτερης κρίσιμης ράβδου και για τις δύο εναλλακτικές θεωρήσεις του επιπέδου αναφοράς αποδεικνύοντας την ανάγκη για εφαρμογή ανάλυσης θωράκισης στη σύνθετη γεωμετρία ενός πλοίου. Εξαιρεση αποτελεί η κεραία Β του αντιτορπιλικού (η οποία και με τα δύο επίπεδα αναφοράς λόγω της πολύ ψηλής γειτονικής κεραίας  $A_1$  προκύπτει θωρακισμένη), η κεραία Β στη φρεγάτα και η κεραία C του αεροπλανοφόρου (οι οποίες για υπολογισμούς από την ίσαλο γραμμή θεωρούνται απροστάτευτες, ενώ με χρήση του τροποποιημένου επιπέδου αναφοράς προκύπτουν θωρακισμένες).

Όπως συμπεραίνεται από όλους τους παραπάνω Πίνακες, τόσο η συντηρητική ανάλυση (σε σύγκριση με την τυπική ανάλυση που βασίζεται σε 50% πιθανότητα σύλληψης) όσο και η συνεκτίμηση των φαινομένων γεινίασης (σε σύγκριση με την ανάλυση της απομονωμένης ράβδου) έχουν το ίδιο αποτέλεσμα: οδηγούν για δεδομένο ύψος ράβδου προστασίας σε μικρότερες επιτρεπόμενες αποστάσεις θωράκισης ή με δεδομένη τη θέση εγκατάστασης σε μεγαλύτερο αναγκαίο ύψος αλεξικεραύνου.

Η θωράκιση εξοπλισμού που βρίσκεται τοποθετημένος χαμηλότερα, πλησιέστερα προς το κατάστρωμα μπορεί να εξασφαλιστεί από υπάρχουσες ψηλότερες δομές. Ωστόσο η προστασία των ιστών που βρίσκονται στο ψηλότερο σημείο και συχνά φέρουν κρίσιμο εξοπλισμό τηλεπικοινωνιών και ναυσιπλοΐας είναι ένα ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Επίσης, η επιλογή του επιπέδου αναφοράς επηρεάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης θωράκισης. Επίπεδα αναφοράς ψηλότερα από την ίσαλο γραμμή επιτρέπουν μεγαλύτερες οριζόντιες αποστάσεις και μικρότερα ύψη ράβδου προστασίας, καθώς για

δεδομένη γεωμετρία παράγουν μικρότερα διαστήματα σφάλματος θωράκισης  $W$  και μεγαλύτερες αναγκαίες αποστάσεις θωράκισης  $\Delta R_0$ . Η ίσαλος γραμμή ως επίπεδο αναφοράς θα πρέπει να προτιμάται, διότι σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα βρίσκονται από την ασφαλή πλευρά και οι απαιτούμενες λύσεις θωράκισης είναι αυστηρότερες. Ωστόσο, εάν οι προκύπτουσες λύσεις για την επίτευξη θωράκισης είναι κατασκευαστικά μη υλοποιήσιμες, θα πρέπει να υιοθετείται ένα εναλλακτικό επίπεδο αναφοράς.

Με δεδομένη την κρισιμότητα του προστατευόμενου εξοπλισμού και την αυξημένη ανάγκη για αδιάλειπτη παροχή ζωτικών υπηρεσιών πλοήγησης και επικοινωνίας, θα πρέπει να προτιμάται η συντηρητική ανάλυση και βέβαια τα φαινόμενα γειννίασης να συνεκτιμώνται, όπου είναι απαραίτητο. Εάν η ανάλυση θωράκισης πραγματοποιείται στο στάδιο σχεδίασης ενός πλοίου, θα πρέπει όπου αυτό είναι εφικτό, να λαμβάνεται υπόψη κατά τη χωροθέτηση των κατασκευών και ιστών στην επιφάνεια του πλοίου.





# Ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση-επαγόμενες υπερτάσεις

---

## 5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια διερευνήθηκαν πειραματικά η παρεχόμενη ζώνη προστασίας από τις υπερκείμενες δομές ενός πλοίου, αναδείχθηκαν έτσι τα σημεία της δομής ενός πλοίου τα οποία μπορούν να δεχτούν κεραυνικό πλήγμα και έγιναν υπολογισμοί του αναμενόμενου αριθμού κεραυνικών πληγμάτων, καθώς και ανάλυση θωράκισης από την οποία προέκυψε ότι βασικοί ιστοί/δομές το πλοίου είναι συχνά αθωράκιστοι, ακόμα και αν βρίσκονται κοντά σε υψηλότερες κατασκευές. Αναδείχθηκε συνεπώς η αναγκαιότητα της ορθής μελέτης ενός συστήματος εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας, ώστε η σύλληψη του κεραυνού να μη γίνεται από κρίσιμες κατασκευές.

Το επόμενο στάδιο της κεραυνοπληξίας ενός πλοίου είναι η διοχέτευση του κεραυνικού ρεύματος στο νερό μέσω της μεταλλικής γάστρας. Στο πλαίσιο αυτό και με δεδομένη την αυξανόμενη ενσωμάτωση ευαίσθητων ηλεκτρονικών συστημάτων με τον εξηλεκτρισμό του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου, πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις κεραυνοπληξίας ενός μοντέλου πλοίου σε κατάλληλο λογισμικό. Στόχος είναι ο υπολογισμός των υπερτάσεων που επάγονται σε βασικά τμήματα της καλωδίωσης του πλοίου ως αποτέλεσμα του δυσμενούς ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος, προκειμένου να διερευνηθεί η ανάγκη ενός συστήματος εσωτερικής αντικεραυνικής προστασίας.

## 5.2 Παράμετροι προσομοίωσης

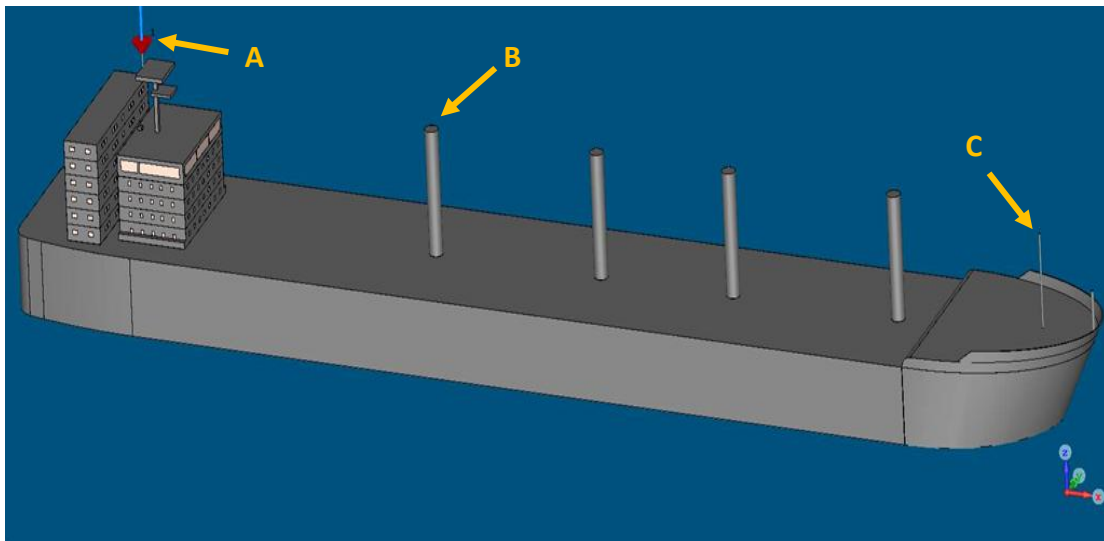
### 5.2.1 Το λογισμικό

Η σχεδίαση του μοντέλου και η εκτέλεση των προσομοιώσεων έγινε με το λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης CST Studio Suite, το οποίο προσφέρει αποτελεσματικές υπολογιστικές μεθόδους σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα διατάξεων που λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (από χαμηλές συχνότητες έως μερικές εκατοντάδες GHz) και συγκεκριμένα με την εξειδικευμένη εφαρμογή CST Cable Studio, η οποία υποστηρίζει την εισαγωγή καλωδίων για τη μελέτη της μετάδοσης σημάτων, της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI) και της ηλεκτρομαγνητικής ευαισθησίας (EMS) σε πολύπλοκες δομές καλωδίων. Η προσομοίωση του χρονομεταβλητού και με υψίσυχο περιεχόμενο εγχόμενου κεραυνικού ρεύματος πραγματοποιήθηκε στο πεδίο του χρόνου (time domain simulation) με το μεταβατικό (transient) επιλύτη TLM. Ο επιλύτης TLM βασίζεται στη 3D μέθοδο των γραμμών μεταφοράς (Transmission Line Method: TLM) στο πεδίο του χρόνου, η οποία προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τη μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC). Ο TLM παρέχει τη δυνατότητα της απευθείας επίλυσης στο χώρο και στο χρόνο των διαφορικών εξισώσεων του Maxwell χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο από γραμμές μεταφοράς ή κόμβους (nodes), οι οποίοι

προσομοιώνουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο τοπικά σε κάθε εξαεδρικό κελί του χώρου. Έτσι, ο χώρος διαμορφώνεται από μια συστοιχία κόμβων στις τρεις διαστάσεις. Το αρχικό εξαεδρικό πλέγμα που εφαρμόζεται, ώστε να συλλάβει τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας της κατασκευής, στη συνέχεια απλοποιείται με μία διαδικασία συγχώνευσης των μικρών κελιών, στις περιοχές όπου δεν παρατηρούνται αλλαγές στη γεωμετρία των αντικειμένων. Συνεπώς, πλεονέκτημα του επιλύτη για μεγάλες δομές, όπως το μοντέλο του πλοίου, αποτελεί το γεγονός ότι ο τελικός αριθμός των κελιών μειώνεται σημαντικά.

## 5.2.2 Ιδιότητες του μοντέλου πλοίου

Στο περιβάλλον του CST Cable Studio σχεδιάστηκε η γεωμετρία του πλήρους κλίμακας εμπορικού πλοίου μεταφοράς φορτίου που χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την κατασκευή του υπό κλίμακα μεταλλικού μοντέλου του Κεφαλαίου 3 και στο οποίο έγιναν υπολογισμοί των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων με το λογισμικό WinIGS στο Κεφάλαιο 4. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το πλήρες μοντέλο με το πλοίο, τη θάλασσα, ενώ διακρίνονται τα παράθυρα της γέφυρας, το κεραυνικό κανάλι, η θύρα με την οποία θα γίνει η έγχυση του κεραυνικού ρεύματος, αλλά και τα εξεταζόμενα σημεία πλήγματος.



**Σχήμα 5.1:** Το πλήρες μοντέλο όπως είναι σχεδιασμένο στο CST Cable Studio. Φαίνονται το πλοίο, τμήμα της θάλασσας, τα παράθυρα της γέφυρας, τμήμα του κεραυνικού καναλιού και η θύρα έγχυσης του ρεύματος.

Στα υλικά που περιλαμβάνει η γεωμετρία αποδόθηκαν οι εξής ιδιότητες:

- Για το σύνολο της γάστρας του πλοίου και όλων των υπερκατασκευών του δημιουργήθηκε ο ναυπηγικός χάλυβας (naval brass) ("*Lossy Metal*") με ηλεκτρική αγωγιμότητα  $15 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ . Το πάχος της λαμαρίνας θεωρήθηκε 2cm.
- Το θαλασσινό νερό προσομοιώθηκε ως μέταλλο με απώλειες (sea water) ("*Lossy Metal*") με ηλεκτρική αγωγιμότητα 5 S/m.
- Για τα παράθυρα της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο διηλεκτρικό γυαλί (glass [Pyrex]) ("*Normal lossy*"), με σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r = 4.82$  και συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών  $\tan\delta = 0.0054$ . Το πάχος του παραθύρου θεωρήθηκε 1cm.

- Ως υλικό του background, (υλικό που γεμίζει τον υπολογιστικό χώρο bounding box και περιβάλλει το μοντέλο), επιλέχθηκε από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη ο αέρας (air) με  $\epsilon_r = 1.00059$ .

Το κεραυνικό πλήγμα υλοποιείται ως σημειακή έγχυση του κεραυνικού ρεύματος μέσω μιας διακριτής θύρας ρεύματος (discrete current port). Η θύρα τοποθετείται στη βάση ενός σύρματος (wire) από PEC (Perfect Electric Conductor) -δηλαδή παρουσιάζει άπειρη αγωγιμότητα και μηδενικές απώλειες- το οποίο προσομοιώνει το κεραυνικό κανάλι. Το μήκος του καναλιού θεωρήθηκε ίσο με την απόσταση πρόσκρουσης  $S$  και καθορίστηκε βάσει του κεραυνικού ρεύματος  $I$  από την (5.1)[28]:

$$S = 10I_{max}^{0.65} \quad (5.1)$$

Στο σήμα διέγερσης της θύρας (port excitation signal) εισάγεται η μαθηματική αναπαράσταση του κεραυνικού ρεύματος, αναλόγως με το είδος του πλήγματος που εξετάζεται. Στην παρούσα ανάλυση υλοποιήθηκαν τρεις μορφές πλήγματος, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της κυματομορφής του κεραυνού στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις: το πρωτεύον θετικό πλήγμα 10/350μs [28], το πρωτεύον αρνητικό πλήγμα κυματομορφής 1/200μs [122] και το επακόλουθο πλήγμα 0.25/100μs [28]. Η συνηθέστερη μαθηματική αναπαράσταση του κεραυνικού ρεύματος γίνεται μέσω της διπλοεκθετικής συνάρτησης:

$$i(t) = \frac{I_{max}}{k} \cdot (\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)) \quad (5.2)$$

$$\mu\epsilon \ k = \exp(-t_{max}/\tau_1) - \exp(-t_{max}/\tau_2) \quad (5.3)$$

$$\kappa\alpha\iota \ t_{max} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \mu\epsilon \ \tau_1 > \tau_2 > 0 \quad (5.4)$$

Όπου  $i_{max}$  το πλάτος της έντασης του ρεύματος,  
 $k$  ο συντελεστής διόρθωσης του πλάτους του ρεύματος,  
 $\tau_1$  σταθερά μετώπου (front time constant)  
 $\tau_2$  σταθερά ουράς (tail time constant)  
 $t_{max}$  η χρονική στιγμή στην οποία παρατηρείται η μέγιστη τιμή του ρεύματος

Με αυτή τη διπλοεκθετική συνάρτηση δεν είναι δυνατό να παραχθούν τα βραχεία επακόλουθα πλήγματα, καθώς δεν πληρούνται οι απαιτήσεις του IEC 62305-1 για τη μέση κλίση του ανερχόμενου τμήματος [28]. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να γίνει χρήση της εξίσωσης Heidler, όπως αυτή ορίζεται στο IEC 62305-1 [28]:

$$i(t) = \frac{I_{max}}{k} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \cdot \exp(-t/\tau_2) \quad (5.5)$$

$$k = \exp\left(-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{\frac{1}{n}}\right) \quad (5.6)$$

Όπου  $i_{max}$  το πλάτος της έντασης του ρεύματος,  
 $k$  ο συντελεστής διόρθωσης του πλάτους του ρεύματος,  $\tau_1, \tau_2$ : οι σταθερές χρόνου  
 $n$  συντελεστής κλίσης του ρεύματος (current steepness factor)

Ο όρος  $n$  λαμβάνει ακέραιες τιμές από 2 έως 10 (συνήθως θεωρείται  $n=10$ ). Η κλίση του ρεύματος εξαρτάται από τις σταθερές  $\tau_1$  και  $k$  και η μέγιστη τιμή της παρατηρείται περίπου όταν το ρεύμα λάβει τιμή ίση με το 45% της μέγιστης τιμής του. Τα δύο μοντέλα (διπλοεκθετικό και Heidler) είναι σχεδόν ισοδύναμα για συχνότητες έως 2MHz, ένα εύρος το οποίο καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των κεραυνικών φαινομένων. Το μοντέλο που βασίζεται στη διπλοεκθετική συνάρτηση αποδεικνύεται πιο συντηρητικό σε υψηλότερες συχνότητες, καθώς υπερεκτιμά την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, οδηγώντας στην εφαρμογή περιττών μεθόδων προστασίας.

Έτσι, στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε η διπλοεκθετική εξίσωση για τα πρωτεύοντα πλήγματα (θετικό 10/350μs και αρνητικό 1/200μs) και η εξίσωση Heidler για το επακόλουθο 0.25/100μs πλήγμα, για την καλύτερη αναπαράσταση του ανερχόμενου τμήματος [124]. Οι παράμετροι των κυματομορφών για στάθμη αντικεραυνικής προστασίας I του IEC 62305-1 [87] δίνονται στον Πίνακα 5.1 [124]:

Αναπαράσταση	Είδος πλήγματος		
	Διπλοεκθετική		Heidler
Παράμετροι κυματομορφής	Πρωτεύον θετικό	Πρωτεύον αρνητικό	Επακόλουθο
$I_{max}$ (kA)	200	100	50
$T_1$ (μs)	10	1	0.25
$T_2$ (μs)	350	200	100
$\tau_1$ (μs)	470.1	284.3	143.1
$\tau_2$ (ns)	4064	373.9	454
$k$	0.951	0.990	0.993

**Πίνακας 5.1:** Παράμετροι εξίσωσης του κεραυνικού ρεύματος με βάση τη διπλοεκθετική εξίσωση (για τα πρωτεύοντα κεραυνικά πλήγματα) και την εξίσωση Heidler (για το επακόλουθο πλήγμα).

Όσον αφορά στη μέγιστη συχνότητα μέχρι την οποία θα γίνει η προσομοίωση, θα πρέπει τουλάχιστον να εκτείνεται μέχρι τη συχνότητα που αντιστοιχεί στο χρόνο μετώπου της κυματομορφής. Για το πλήγμα 10/350μs η προσομοίωση εκτελέστηκε από το 0Hz έως τα 2MHz, για το πλήγμα 1/200μs έως τα 3MHz και για το πλήγμα 0.25/100μs έως τα 4MHz. Οι παραπάνω τιμές αποτελούν ένα καλό συμβιβασμό, ώστε να μελετηθεί ικανοποιητικά το φαινόμενο χωρίς να αυξηθούν σημαντικά οι απαιτήσεις μνήμης και ο χρόνος εκτέλεσης των προσομοιώσεων.

Για κάθε ένα από τα είδη πλήγματος του Πίνακα 5.1 υλοποιήθηκαν τρεις εναλλακτικές θέσεις πλήγματος, οι οποίες επελέγησαν με βάση την κρισιμότητα του εξοπλισμού που φέρουν και την πιθανότητα να δεχθούν ένα πλήγμα λόγω της γεωμετρικής τους θέσης. Οι θέσεις αυτές είναι οι εξής: A: η κεραία στην οροφή της γέφυρας, B: ο ιστός του γερανού φορτίου που βρίσκεται πλησιέστερα στη γέφυρα και C: η κεραία στο σύστημα πλοήγησης στην πλώρη (αντιστοιχούν στις θέσεις (A), (B) και (F) του υπό κλίμακα μοντέλου του Κεφαλαίου 3).

Οι συνολικές διαστάσεις του μοντέλου που περιβάλλει το πλοίο προσδιορίστηκαν με γνώμονα την απαίτηση κάθε σημείο του πλοίου να απέχει από τα όρια του υπολογιστικού χώρου (*boundaries*) απόσταση τουλάχιστον  $\lambda/8$ , ώστε να αποφεύγεται συσσώρευση του πεδίου στα όρια του υπολογιστικού χώρου:

- Οι πλευρικές διαστάσεις της θάλασσας τέθηκαν στα 647.5m πλάτος, ενώ στο μήκος προστέθηκαν τουλάχιστον 300m πέρα από τα άκρα του πλοίου, έτσι ώστε για κάθε

εξεταζόμενο σημείο πλήγματος, το σημείο έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος να ισαπέχει από τα όρια του μοντέλου.

- Το βάθος της θάλασσας δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα αφού σε βάθος λίγων μέτρων, το ρεύμα λαμβάνει μηδενικές τιμές. Έτσι ορίστηκε στα 20m.
- Το άνω όριο της περιοχής του αέρα πάνω από το μοντέλο καθορίστηκε από το μήκος του κεραυνικού καναλιού (wire) της θύρας έγχυσης του ρεύματος. Η απόσταση πρόσκρουσης υπολογισμένη με βάση το μέγιστο πλάτος για LPL I σύμφωνα με την (5.1) προκύπτει για την κυματομορφή 10/350μs: 310m, για την κυματομορφή 1/200 μs: 200m και για την κυματομορφή 0.25/100μs: 127m αντίστοιχα.

Σημαντική παράμετρο για την ορθή πορεία της προσομοίωσης αποτελεί η επιλογή των κατάλληλων ρυθμίσεων για τη διακριτοποίηση του χώρου. Πέρα από το γενικό πλέγμα (global mesh), το CST δίνει τη δυνατότητα καθορισμού τοπικών πλεγμάτων (με συγκεκριμένες τιμές dx, dy, dz για τις διαστάσεις του μέγιστου κελιού) για περιοχές του μοντέλου, οι οποίες χρήζουν ειδικής αντιμετώπισης. Συγκεκριμένα, για την κεραία A, τις υπερκατασκευές γέφυρας και θαλάμων ναυσιπλοΐας/διαμονής προσωπικού, τα παράθυρα και τα στοιχεία (πίνακες διανομής) του ηλεκτρικού δικτύου έχει επιλεγεί ένα αρκετά πυκνό πλέγμα (mesh group 1), ενώ για τον υπόλοιπο όγκο της γάστρας ένα ελαφρώς πιο αραιό πλέγμα (mesh group 2). Οι ρυθμίσεις αυτών των τοπικών πλεγμάτων, καθώς και οι ρυθμίσεις του γενικού πλέγματος δίνονται στον Πίνακα 5.2.

Γενικές ρυθμίσεις πλέγματος			Τοπικές ρυθμίσεις πλέγματος	
Μέγιστο κελί (Maximum Cell)	Κοντά στο μοντέλο	Μακριά από το μοντέλο	Μέγιστο μέγεθος κελιών (m) (βήμα: dx, dy, dz)	
Κελιά ανά μήκος κύματος	12	10	<b>Mesh group 1</b>	<b>Mesh group 2</b>
Κελιά ως προς τη μέγιστη ακμή του υπολογιστικού χώρου (bounding box)	40	10	0.15	0.5
Ελάχιστο κελί (Minimum Cell)			Συντελεστής τοπικής διόρθωσης στα άκρα των αντικειμένων	50
Αναλογία ως προς το μέγιστο κελί		60	Συντελεστής τοπικής διόρθωσης στον όγκο των αντικειμένων	50

**Πίνακας 5.2:** Ρυθμίσεις του γενικού και του τοπικού πλέγματος.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστή με 4πύρηνο επεξεργαστή (i5-4590, 3.3 GHz), και 8GB RAM. Ενδεικτικά, από τη διακριτοποίηση του μοντέλου προέκυπταν περίπου 220 εκατομμύρια κελιά και απαιτούνταν περίπου 14 ώρες για την ολοκλήρωση κάθε προσομοίωσης.

## 5.2.3 Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου

### 5.2.3.1 Φορτία και ισολογισμός ισχύος

Το CST Cable Studio παρέχει μέσω του περιβάλλοντος “Schematic” τη δυνατότητα αμφίδρομης συν-προσομοίωσης της τρισδιάστατης γεωμετρίας με το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του πλοίου. Στο εσωτερικό της τρισδιάστατης δομής του πλοίου του Σχήματος 5.1 προστέθηκαν τα μεταλλικά πλαίσια που αναπαριστούν τους πίνακες διανομής του ηλεκτρικού δικτύου και σχεδιάστηκαν αντιπροσωπευτικές οδεύσεις των καλωδίων που

συνδέουν τα βασικότερα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου και καταλήγουν σε κρίσιμα φορτία.

Το μοντέλο της τρισδιάστατης προσομοίωσης εμφανίζεται στην καρτέλα “Schematic” ως ένα πολύθυρο, όπου η εξωτερική πηγή έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος και κάθε τερματικός κόμβος καλωδίου της 3d διάταξης αποτελεί θύρα. Με την προσθήκη συγκεντρωμένων στοιχείων, όπως αντιστάσεις, πυκνωτές, αυτεπαγωγές κλπ. για την κυκλωματική διασύνδεση των θυρών είναι δυνατή η αναπαράσταση του κυκλώματος που τροφοδοτείται από τα καλώδια που είναι εκτεθειμένα στο ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο κατά τη διάρκεια του κεραυνικού πλήγματος και ο υπολογισμός των υπερτάσεων που επάγονται στο δίκτυο του πλοίου.

Για το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου χρησιμοποιήθηκαν το μονογραμμικό διάγραμμα και ο ισολογισμός ισχύος που παρουσιάζονται στην εργασία [125]. Πρόκειται για ένα δίκτυο το οποίο τροφοδοτείται από 4πολική γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 1200kVA και τάσης 440V. Αρκετοί τριφασικοί πίνακες τροφοδοτούνται απευθείας από τον κύριο ζυγό των 440V, ενώ από το δευτερεύον μετασχηματιστή 440/115 (σε συνδεσμολογία τριγώνου) τροφοδοτούνται με (πολική τάση) 115V κυρίως φορτία φωτισμού, οργάνων, βοηθητικών χώρων κλπ.

Λόγω της πολυπλοκότητας του δικτύου και της έλλειψης στοιχείων για την ακριβή χωρική διάταξη της καλωδίωσης και των φορτίων, η 3d αναπαράσταση του δικτύου φτάνει μέχρι τα σημεία εισόδου του καλωδίου τροφοδοσίας στον εκάστοτε υποπίνακα των 440V ή των 115V, ο οποίος στο κυκλωματικό schematic πεδίο αντικαθίσταται με το ισοδύναμο τριφασικό ή μονοφασικό RLC φορτίο, όπως αυτό προκύπτει από τον ισολογισμό ισχύος του Πίνακα 5.2 Η ομαδοποίηση των φορτίων σε πίνακες (switchboards, sw) είναι η εξής:

- Χώροι ενδιαίτησης (**Accommodation sw: 440V**)
- Βοηθητικά πρόωσης (**Propulsion sw: 440V**)
- Βοηθητικά μηχανοστασίου (**Engine room sw: 440V**)
- Βοηθητικά σκάφους (**Auxiliary equipment sw: 440V**)
- Μαγειρείο (**Cook house sw: 440V**)
- Φωτισμός γέφυρας (**Lighting navigation room sw: 115V**)
- Βοηθητικά χώρων ενδιαίτησης (**Accommodation auxiliary sw: 115V**)
- Φωτισμός χώρων ενδιαίτησης 1 (**Lighting accommodation sw 1: 115V**)
- Φωτισμός χώρων ενδιαίτησης 2 (**Lighting accommodation sw 2: 115V**)
- Φωτισμός καταστρώματος 1 (**Lighting deck sw 1: 115V**)
- Φωτισμός καταστρώματος 2 (**Lighting deck sw 2: 115V**)

Εξαίρεση στην παραπάνω διαδικασία αποτελούν ορισμένα ενδεικτικά φορτία των 115V στη γέφυρα, όπου έγινε πιο λεπτομερής σχεδίαση των οδεύσεων, πέρα από το σημείο του υποπίνακα τροφοδοσίας, λόγω του ότι στο χώρο αυτό βρίσκονται συγκεντρωμένα πολλά κρίσιμα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Για φορτία που τροφοδοτούνται μέσω συνεστραμμένου ζεύγους (τύπου UTP LIFY 1mm<sup>2</sup>) τοποθετήθηκε αντίσταση 100Ω μεταξύ των αγωγών του καλωδίου, ενώ τα απλά καλώδια τερματίστηκαν με αντιστάσεις των 50Ω. Επίσης, σχεδιάσθηκε το ομοαξονικό καλώδιο της κεραίας τηλεπικοινωνιών A (τύπου RG58) να οδεύει από τη βάση της κεραίας στο εσωτερικό της γέφυρας. Μεταξύ εσωτερικού αγωγού και του γειωμένου αγωγού θωράκισης τοποθετήθηκε αντίσταση 50Ω.

ΠΙΝΑΚΕΣ	cosφ	Ρλειτ. (kW)	Άεργος Ισχύς (kVar)	Διατομή καλωδίων (mm <sup>2</sup> )	Μήκος Καλωδίων (m)
<b>ΖΥΓΟΙ 115V</b>					<b>Από Μ/Σ</b>
Βοηθητικά χώρων ενδιαίτησης	0.83	57.2	39	3*(1*185)	26.7
Φωτισμός γέφυρας	1.00	4.5	-	3*(1*25)	35.8
Φωτισμός χώρων ενδιαίτησης 1	1.00	9.0	-	3*(1*16)	16.75
Φωτισμός χώρων ενδιαίτησης 2	1.00	9.0	-	3*(1*16)	27.7
Φωτισμός καταστρώματος 1	1.00	1.0	-	3*(1*16)	16.75
Φωτισμός καταστρώματος 2	1.00	1.0	-	3*(1*10)	21.75
<b>ΖΥΓΟΙ 440 V</b>					<b>Από κύριο ζυγό</b>
Χώροι ενδιαίτησης	0.73	121.5	109.9	1*(3*95)	38.4
Βοηθητικά πρόωσης	0.79	380	283	2*(1*150)	148.7
Βοηθητικά μηχανοστασίου	0.50	14.5	24.5	1*(3*10)	23.6
Βοηθητικά σκάφους	0.58	41.6	57.6	1*(3*70)	24.35
Μαγειρείο	0.90	35.5	7.8	1*(3*16)	44.1

**Πίνακας 5.3:** Ισολογισμός ισχύος των πινάκων που αναπαράσάθηκαν με ισοδύναμα φορτία και στοιχεία των αντίστοιχων διασυνδετικών καλωδίων

Για τις υπόλοιπες συνδέσεις που δεν καταλήγουν σε ομαδοποιημένα φορτία, αλλά συνδέουν τμήματα του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν τα εξής καλώδια:

ΣΥΝΔΕΞΕΙΣ	Διατομή καλωδίων (mm <sup>2</sup> )	Μήκος καλωδίων (m)
Γεννήτρια – Κύριος ζυγός 440V	3*(1*300)	4.75
Κύριος ζυγός 440V – 1 <sup>ov</sup> Μ/Σ	3*(1*120)	18.2
2 <sup>ov</sup> Μ/Σ – Ζυγός Χ.Τ. 115V	3*(1*185)	0.6
2 <sup>ov</sup> Μ/Σ - Εξοπλισμός καταστρώματος	3*(1*50)	39.6

**Πίνακας 5.4:** Στοιχεία διασυνδετικών καλωδίων που δεν καταλήγουν σε ομαδοποιημένα φορτία

### 5.2.3.2 Σχεδίαση καλωδίωσης

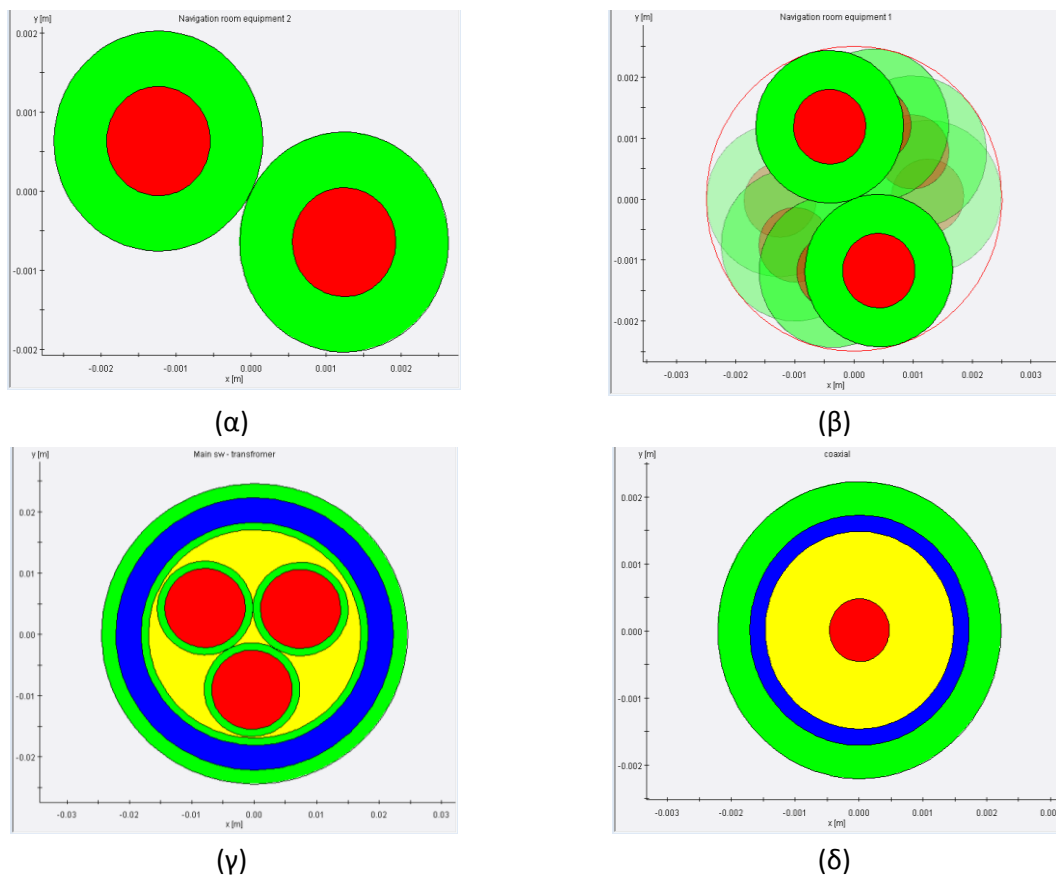
Για τη λεπτομερή σχεδίαση της γεωμετρίας κάθε τύπου καλωδίου (διατομή κεντρικού αγωγού, πάχος μόνωσης και θωράκισης, υλικό μόνωσης κλπ.) δημιουργήθηκαν στις βιβλιοθήκες του CST Cable Studio τα κατάλληλα μοντέλα καλωδίων, τριπολικών και μονοπολικών, όπως παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.5 και 5.6 αντίστοιχα, με βάση τις ιδιότητες εμπορικών καλωδίων που προορίζονται για εγκατάσταση σε πλοίο (ονομαστική τάση 0.6/1kV) [126]:

ΥΛΙΚΟ	HDPE	PVC	Al	PVC	Cu	XLPE
Τύπος καλωδίου	Διάμετρος εσωτερικής μόνωσης (mm)	Πάχος εξωτερικού περιβλήματος (mm)	Κλώνοι θωράκισης [διάμετρος (mm)* πλήθος κλώνων]	Πάχος εξωτερικής θωράκισης (mm)	Διάμετρος εσωτερικού αγωγού (mm)	Πάχος θωράκισης εσωτερικού αγωγού (mm)
1*(3*10)	11	1.0	1.25*35	1.8	3.6	0.7
1*(3*16)	13	1.0	1.25*38	1.8	4.5	0.7
1*(3*70)	26	1.2	2.0*41	2.0	9.7	1.1
1*(3*95)	30	1.2	2.0*47	2.0	11.5	1.1
1*(3*120)	34	1.2	2.0*51	2.3	12.9	1.2

**Πίνακας 5.5:** Χαρακτηριστικά τριπολικών καλωδίων όπως σχεδιάστηκαν στο CST Cable Studio.

ΥΛΙΚΟ	Cu	XLPE
Τύπος καλωδίου	Διάμετρος αγωγού (mm)	Πάχος μόνωσης (mm)
3*(1*10)	3.6	0.7
3*(1*16)	4.5	0.7
3*(1*25)	5.6	0.9
3*(1*50)	8.1	1.0
3*(1*120)	12.9	1.2
3*(1*150)	14.3	1.4
3*(1*185)	15.4	1.6
3*(1*300)	20.0	1.8

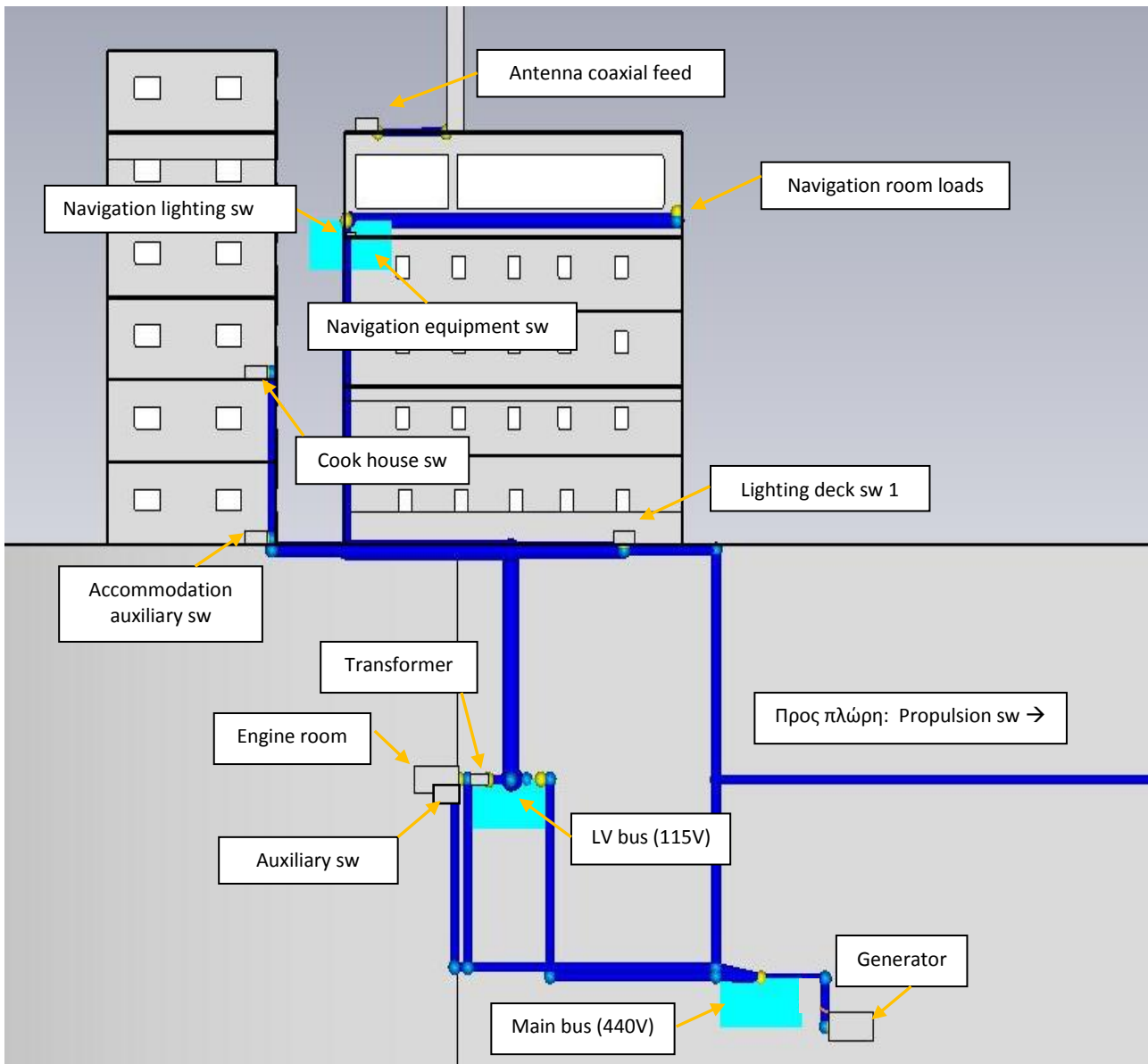
Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά μονοπολικών καλωδίων, όπως σχεδιάστηκαν στο CST Cable Studio.



Σχήμα 5.6: Τομή των καλωδίων, όπως σχεδιάστηκαν στο CST Cable Studio (α) 2 μονοί αγωγοί για τροφοδοσία μονοφασικού φορτίου (β) καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους (γ) τριπολικό καλώδιο (δ) ομοαξονικό καλώδιο.

Στο Σχήμα 5.2 διακρίνονται οι εσωτερικοί αγωγοί και η μόνωση σε ενδεικτικές τομές από τις βασικές κατηγορίες καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο. Οι βασικοί άξονες της καλωδίωσης με τους κύριους ζυγούς και υποπίνακες φαίνονται στην κατακόρυφη τομή του Σχήματος 5.3, στο επίπεδο του καταστρώματος στο Σχήμα 5.4 και στο εσωτερικό της γέφυρας στο Σχήμα 5.5.



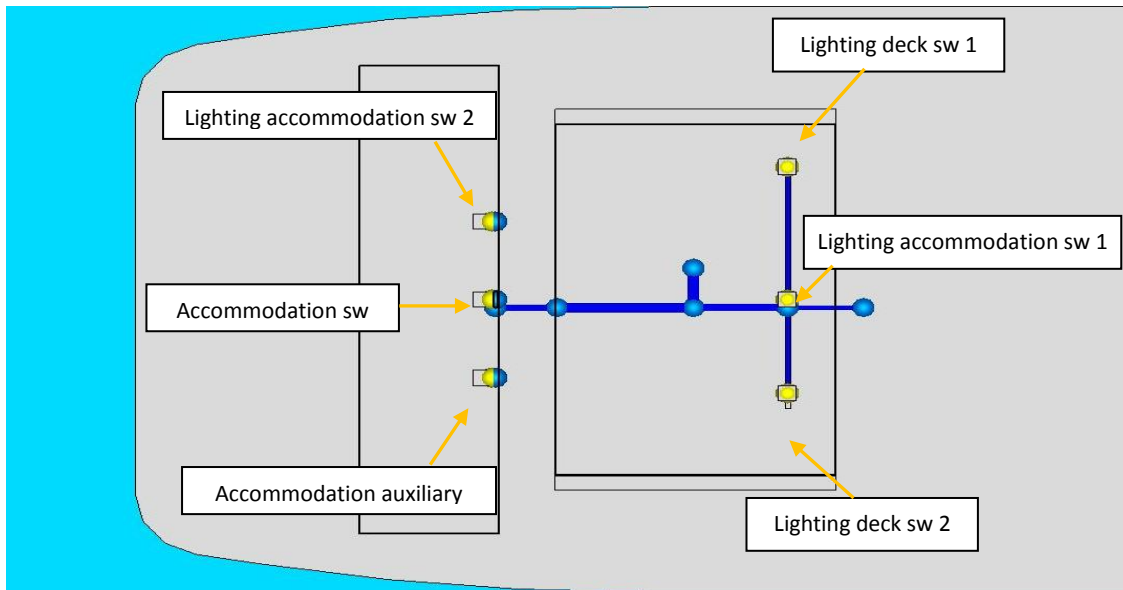


**Σχήμα 5.3:** Κατακόρυφη τομή του πλοίου, όπου διακρίνονται βασικοί ζυγοί και πίνακες.

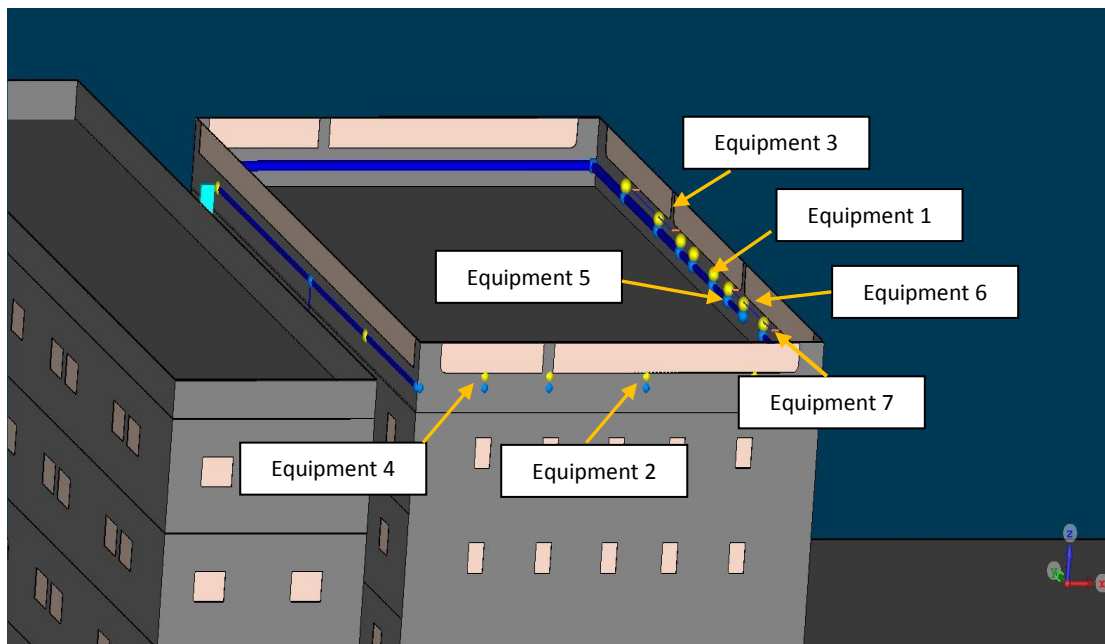
Για την καταγραφή των τάσεων και των ρευμάτων στα καλώδια πραγματοποιείται συν-προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου με την επιλογή «uni-directional irradiation». Η επικοινωνία μεταξύ του κυκλώματος των καλωδίων και του 3d περιβάλλοντος γίνεται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης (time step). Με την ανάλυση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος της όδευσης του καλωδίου που υπολογίζεται στο 3d περιβάλλον επιβάλλεται ως ισοδύναμη πηγή τάσης στο κυκλωματικό πεδίο για τον υπολογισμό των επαγόμενων ρευμάτων που διαρρέουν το κύκλωμα.

Μεταξύ των τερματικών κόμβων του καλωδίου, όπου γίνεται η ανταλλαγή δεδομένων 3d και κυκλωματικού πεδίου, παρεμβάλλεται η κυκλωματική αναπαράσταση της διατομής του καλωδίου μέσω του 2d επιλύτη «TL Modeller». Ο επιλύτης αυτός διακριτοποιεί τη δέσμη της εκάστοτε όδευσης σε βήματα (meshing) και σε κάθε προκύπτον στοιχειώδες τμήμα υπολογίζει το κυκλωματικό ισοδύναμο με παραμέτρους γραμμών μεταφοράς (static 2d transmission line parameters), αναλόγως με τα κατασκευαστικά και

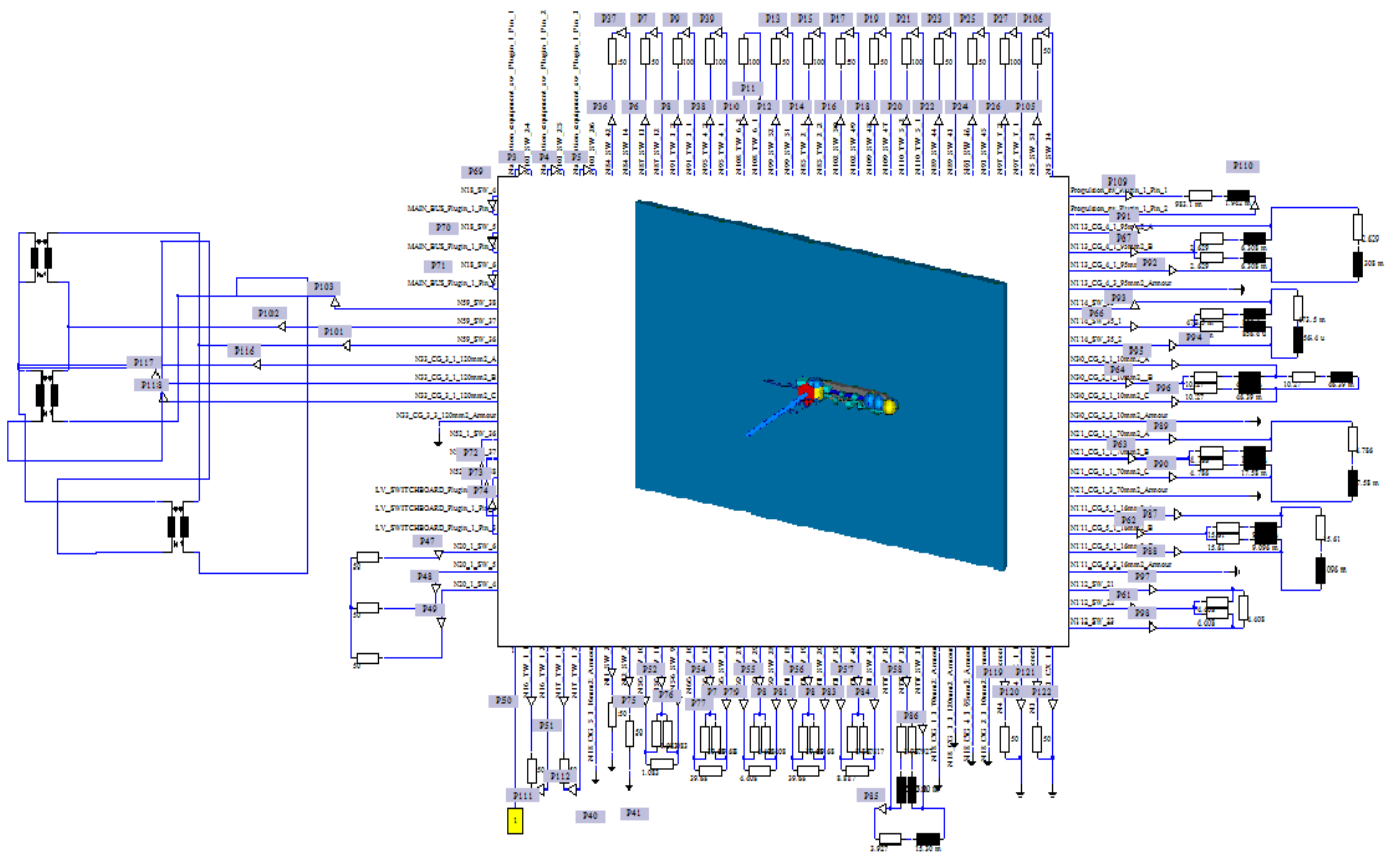
γεωμετρικά στοιχεία της διατομής του καλωδίου. Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται η συνολική κυκλωματική αναπαράσταση του μοντέλου στην καρτέλα «Schematic».



Σχήμα 5.4: Κατακόρυφη τομή του πλοίου όπου διακρίνονται βασικοί ζυγοί και πίνακες.



Σχήμα 5.5: Ενδεικτικές καλωδιώσεις του εξοπλισμού στο χώρο της γέφυρας.

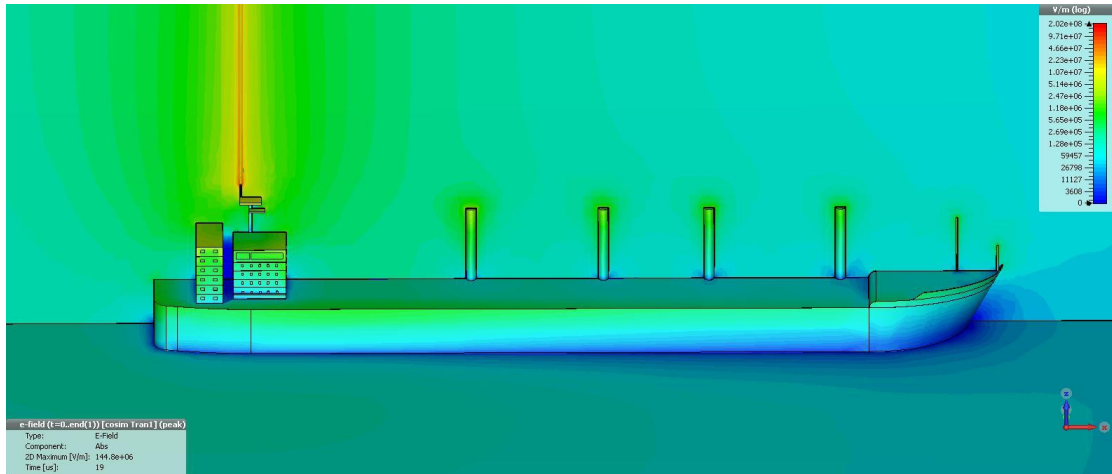


Σχήμα 5.6: Το συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου πλοίου και ηλεκτρικού δικτύου στην καρτέλα «Schematic».

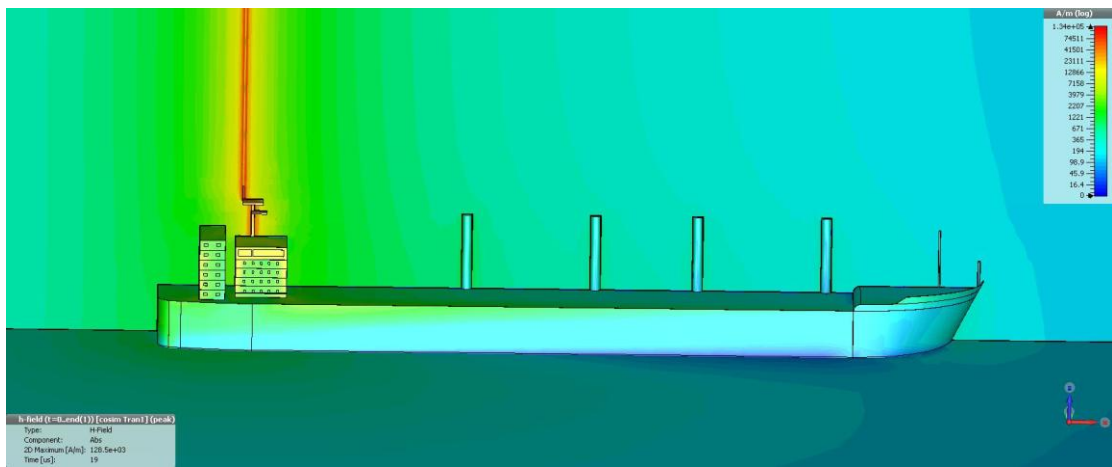
## 5.3 Αποτελέσματα

### 5.3.1 Βασικά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη: πλήγμα στη θέση Α

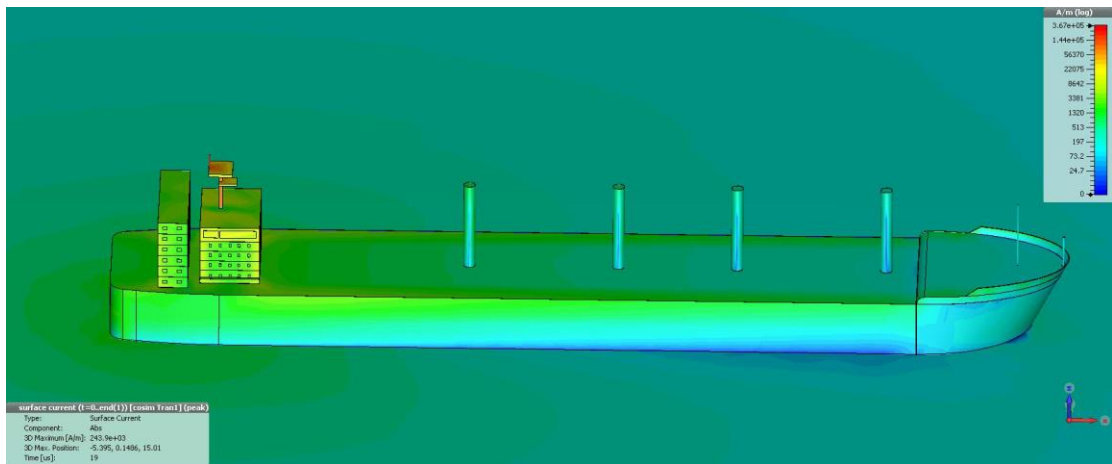
Στα Σχήματα 5.7-5.15 παρουσιάζεται η κατανομή του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού πεδίου, μαγνητικού πεδίου και επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα  $10/350\mu\text{s}$ ,  $1/200\mu\text{s}$  και  $0.25/100\mu\text{s}$  αντίστοιχα, στη θέση Α κατά την εκάστοτε χρονική στιγμή μεγίστου του εγχεόμενου κεραυνικού ρεύματος. Είναι εμφανείς οι υψηλές τιμές των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών, ειδικά στην περιοχή της γέφυρας που βρίσκεται πλησιέστερα στο πλήγμα και στα ανώτερα επίπεδα της δομής J. Στη συνέχεια παρατίθενται στα Σχήματα 5.16 - 5.25 οι επαγόμενες υπερτάσεις σε ορισμένους από τους βασικούς ζυγούς του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου, αλλά και στα πλέον εκτεθειμένα μονοφασικά φορτία της γέφυρας, για τη βασική περίπτωση πλήγματος  $10/350\mu\text{s}$  στη θέση Α. Συγκεκριμένα, στα αποτελέσματα των τριφασικών ζυγών απεικονίζονται και οι τρεις τροφοδοτούμενες φάσεις L1, L2, L3, ώστε να διαπιστωθεί σε τι βαθμό διαφέρουν μεταξύ τους οι υπερτάσεις μεταξύ των φάσεων που τροφοδοτούνται από τον ίδιο ζυγό.



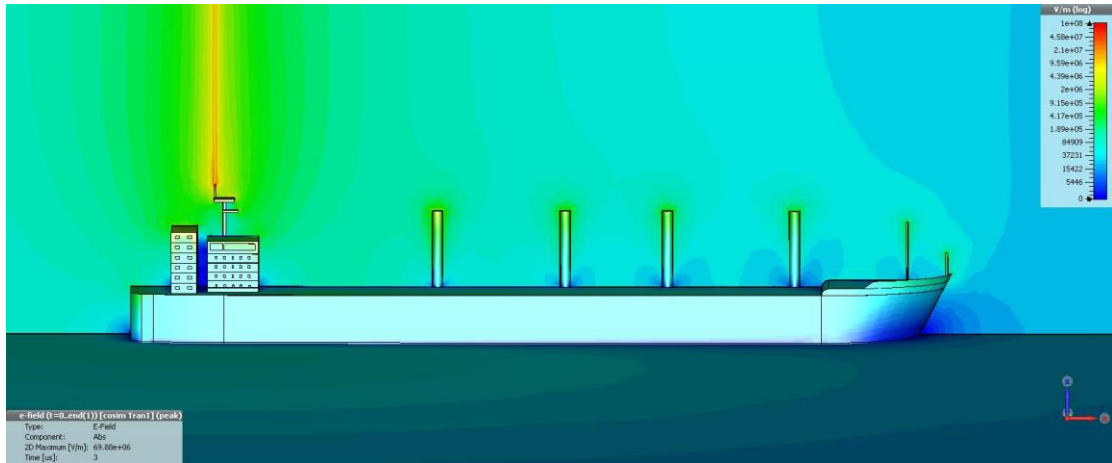
**Σχήμα 5.7:** Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα 10/350μς στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 19μς).



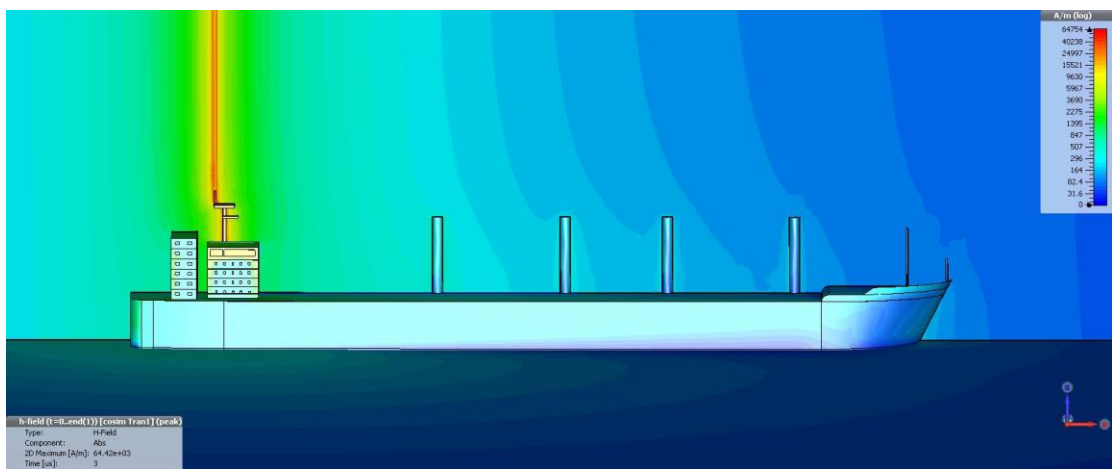
**Σχήμα 5.8:** Κατανομή μαγνητικού πεδίου για πλήγμα 10/350μς στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 19μς).



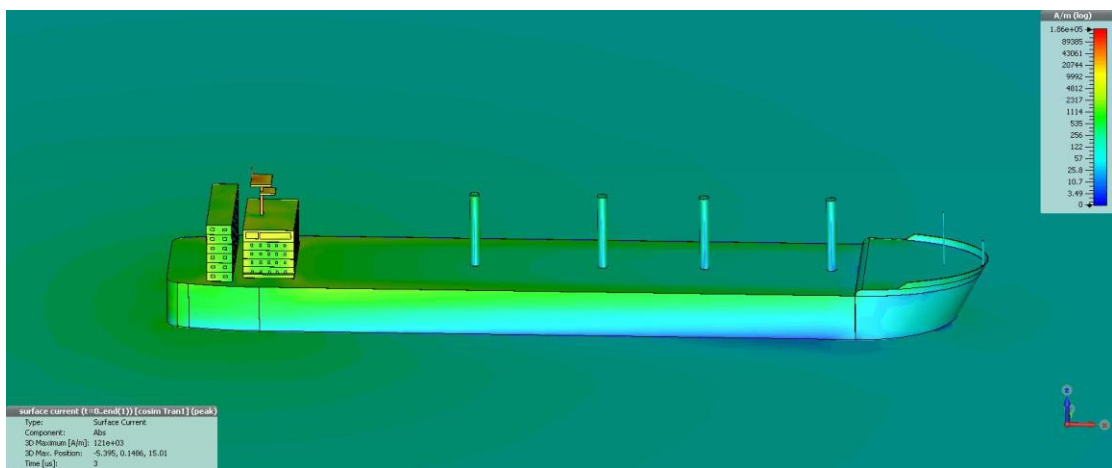
**Σχήμα 5.9:** Κατανομή του εγχεόμενου επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα 10/350μς στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 19μς).



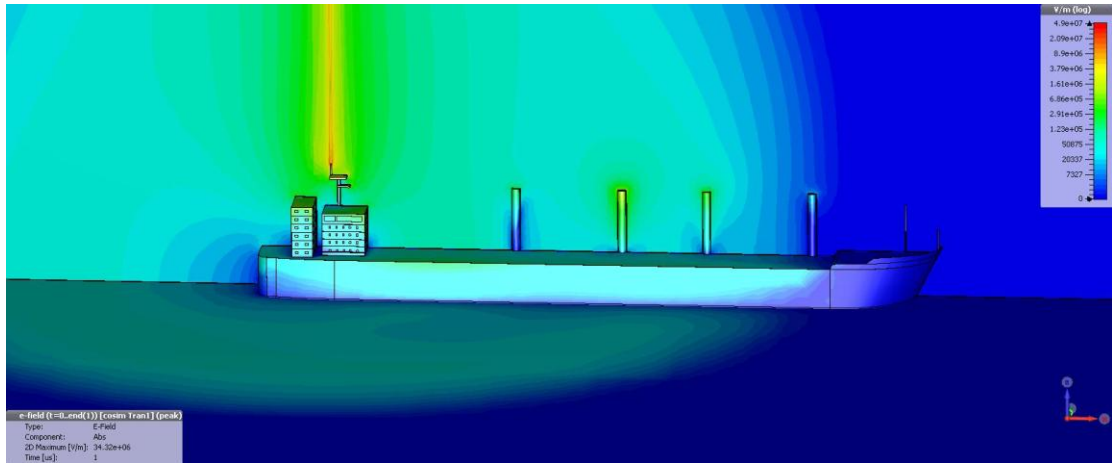
**Σχήμα 5.10:** Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα 1/200μs στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 3μs).



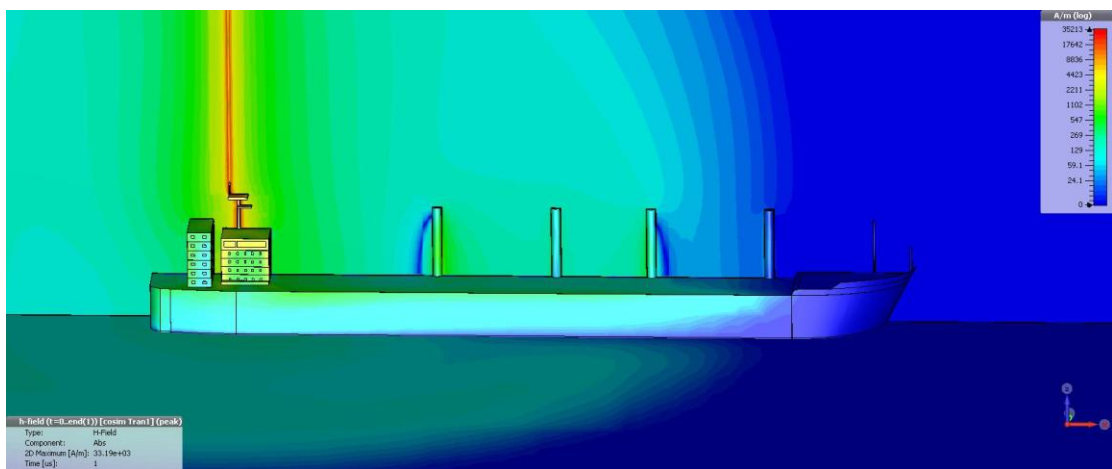
**Σχήμα 5.11:** Κατανομή μαγνητικού πεδίου για πλήγμα 1/200μs στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 3μs).



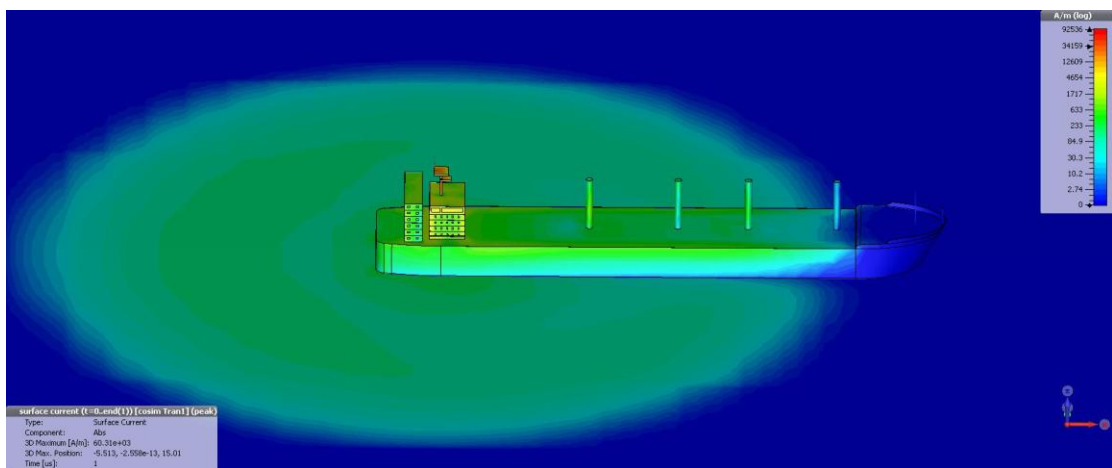
**Σχήμα 5.12:** Κατανομή εγχέομένου επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα 1/200μs στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 3μs).



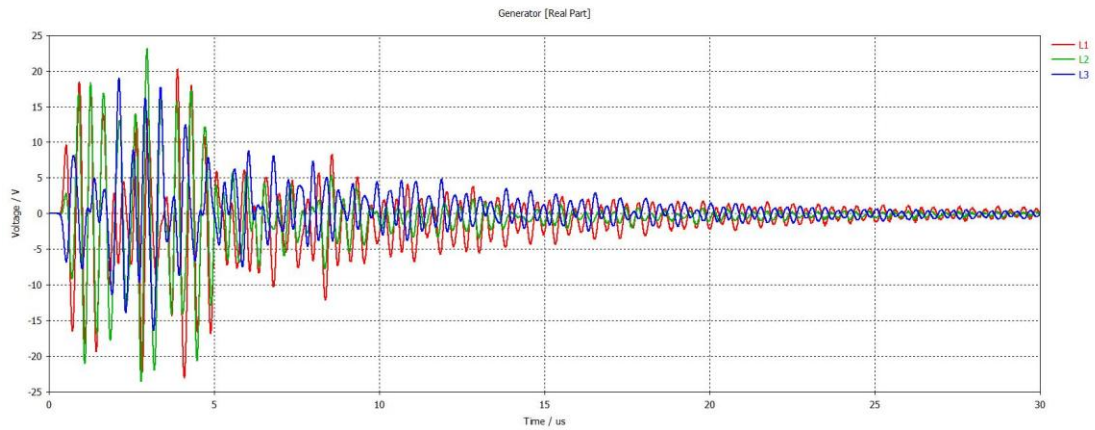
**Σχήμα 5.13:** Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα 0.25/100μs στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 1μs).



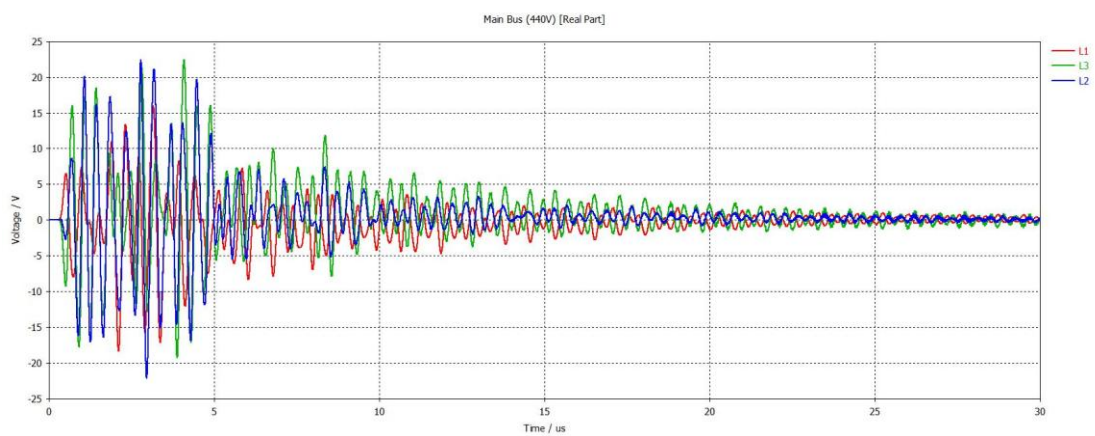
**Σχήμα 5.14:** Κατανομή μαγνητικού πεδίου για πλήγμα 0.25/100μs στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 1μs).



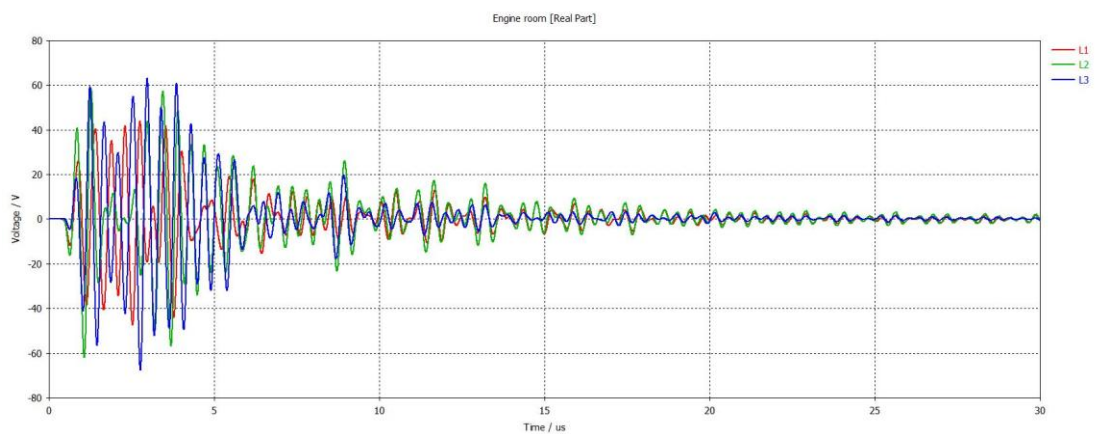
**Σχήμα 5.15:** Κατανομή εγχεόμενου επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα 0.25/100μs στη θέση A (τη χρονική στιγμή μεγίστου 1μs).



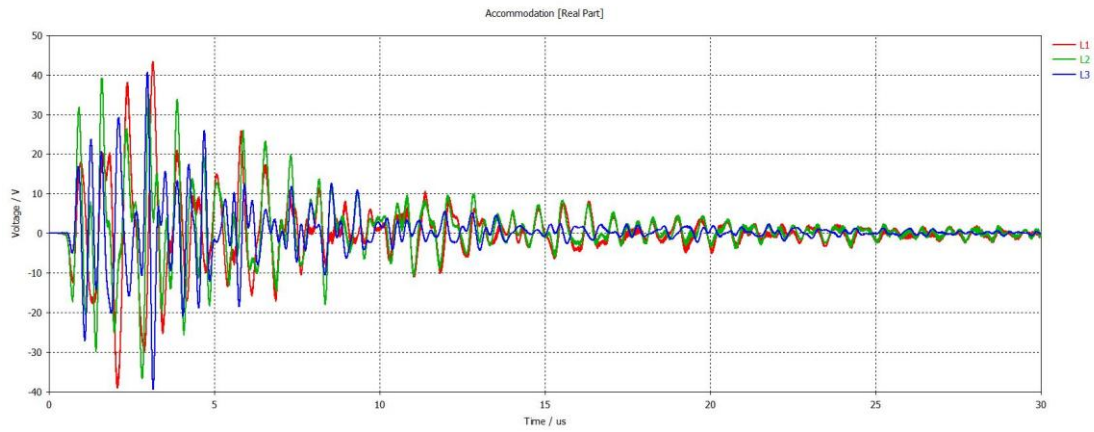
**Σχήμα 5.16:** Επαγόμενες υπερτάσεις στη γεννήτρια (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.



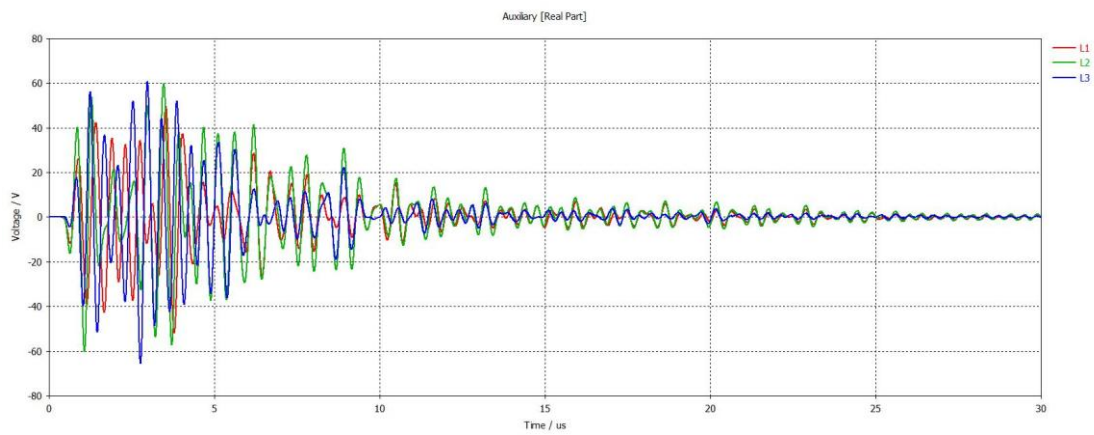
**Σχήμα 5.17:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον κύριο ζυγό των 440V (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.



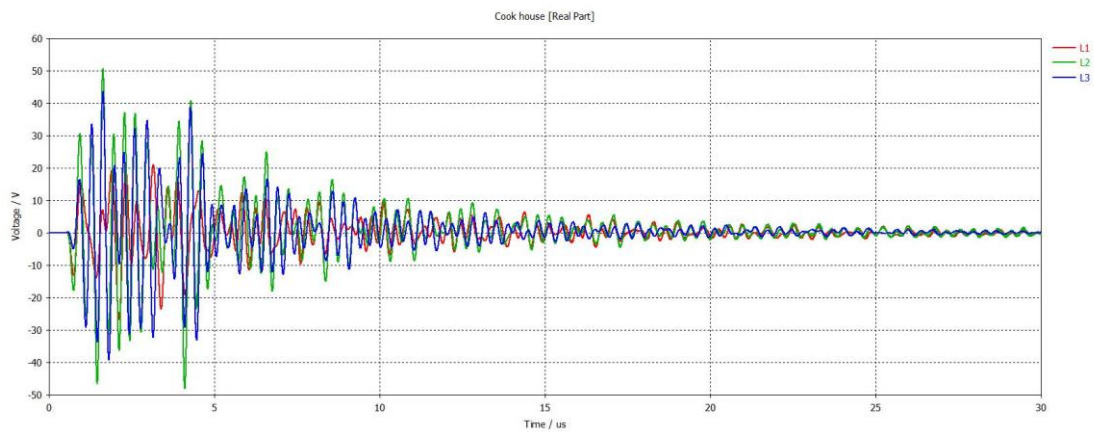
**Σχήμα 5.18:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό του μηχανοστασίου (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.



**Σχήμα 5.19:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό των χώρων ενδιαίτησης (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.

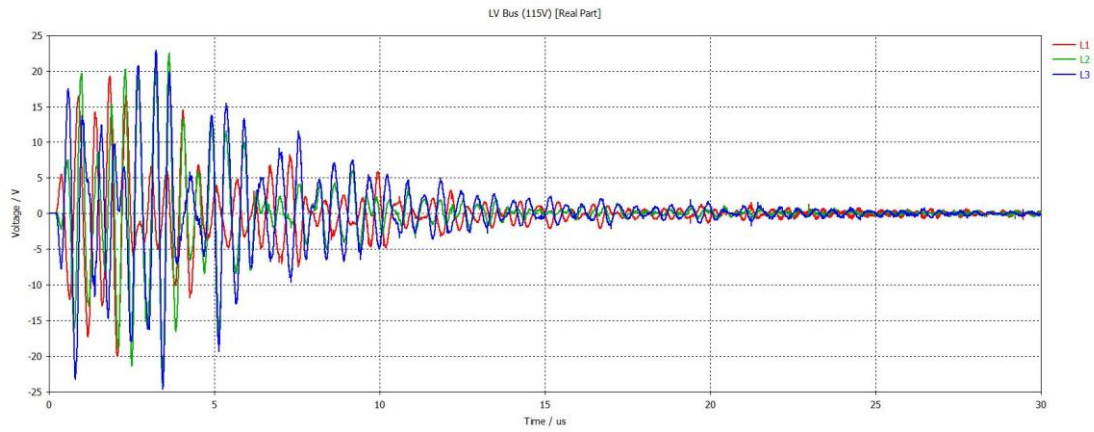


**Σχήμα 5.20:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό των βοηθητικών του σκάφους (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.

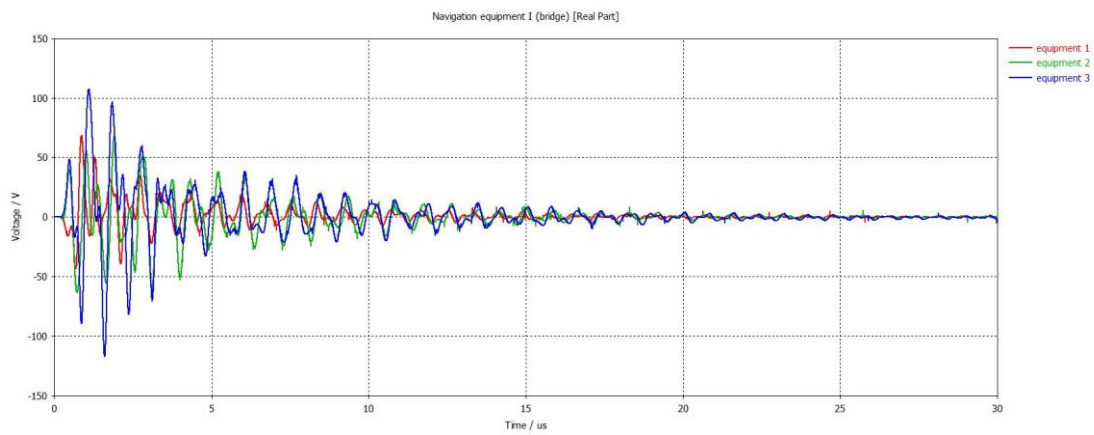


**Σχήμα 5.21:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό του μαγειρείου (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.

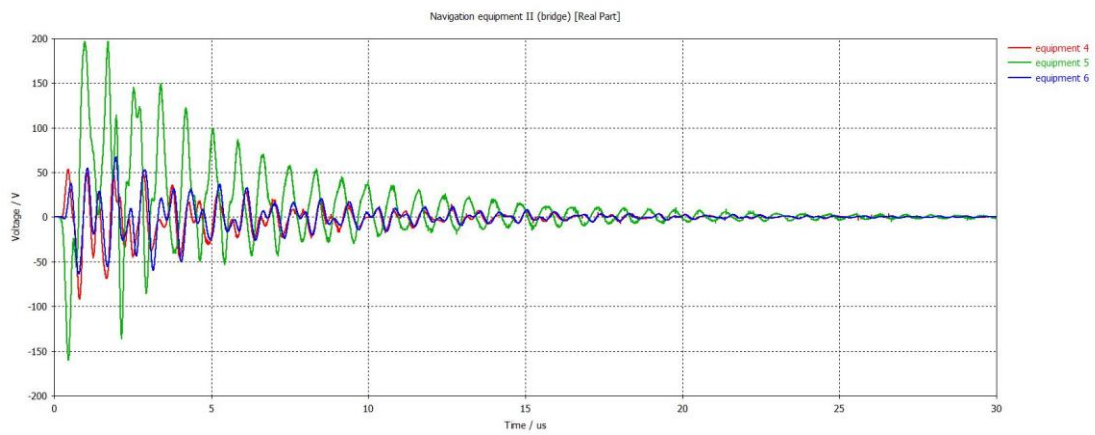




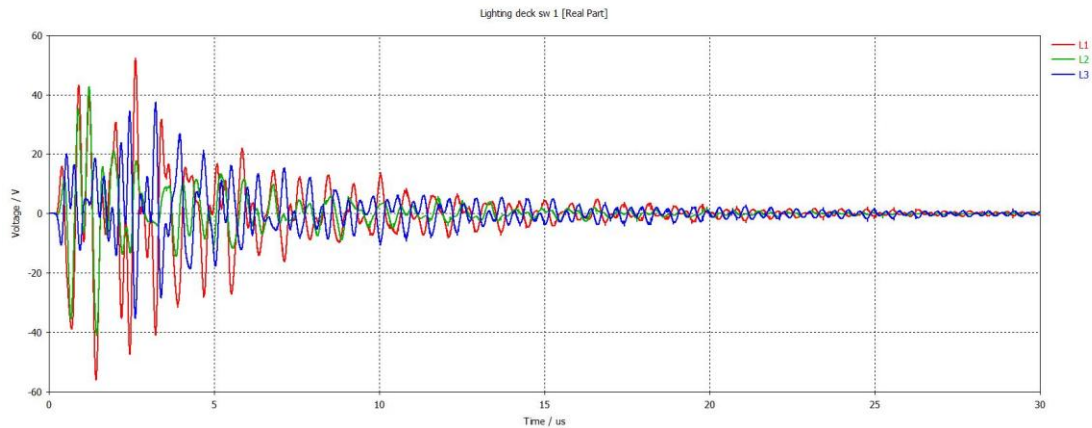
**Σχήμα 5.22:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό των 115V (φάσεις L1, L2, L3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.



**Σχήμα 5.23:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 1, 2, 3) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.



**Σχήμα 5.24:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 4, 5, 6) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.

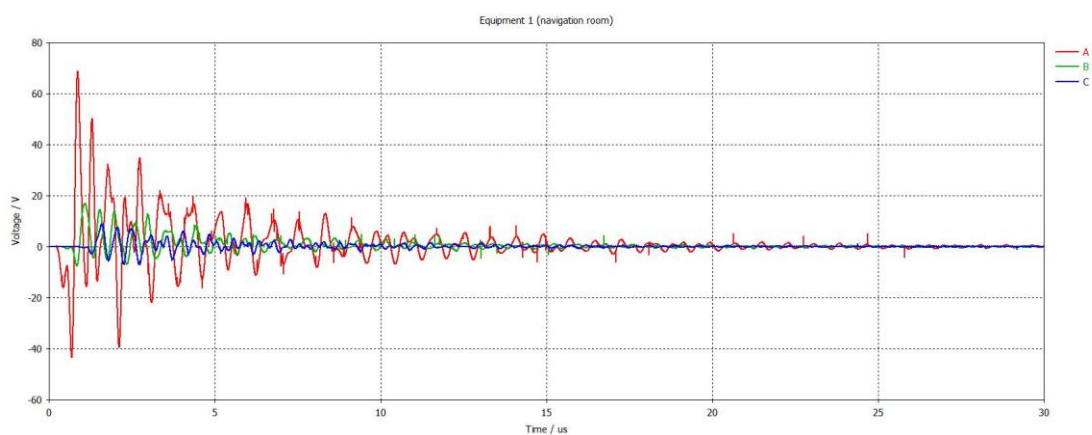


**Σχήμα 5.25:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 4, 5, 6) για πλήγμα 10/350μs στη θέση Α.

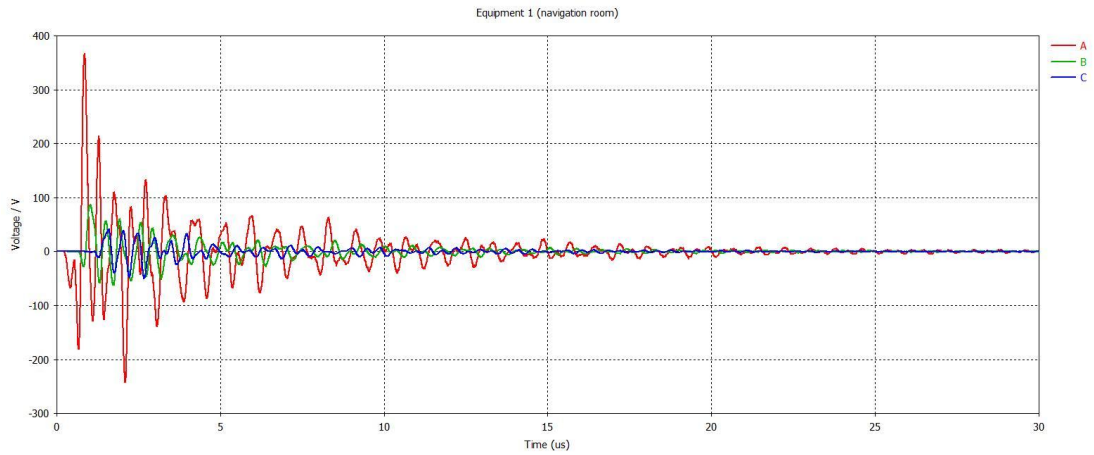
Λόγω της ομοιότητας των υπερτάσεων (με διαφορές κυρίως στην εμφανιζόμενη αιχμή) μεταξύ των τριών φάσεων, στα συγκριτικά διαγράμματα της επόμενης παραγράφου θα χρησιμοποιηθεί η φάση με την εκάστοτε μεγαλύτερη εμφανιζόμενη αιχμή, όπως προκύπτει από τα Σχήματα 5.16-5.25.

### 5.3.2 Επαγόμενες υπερτάσεις

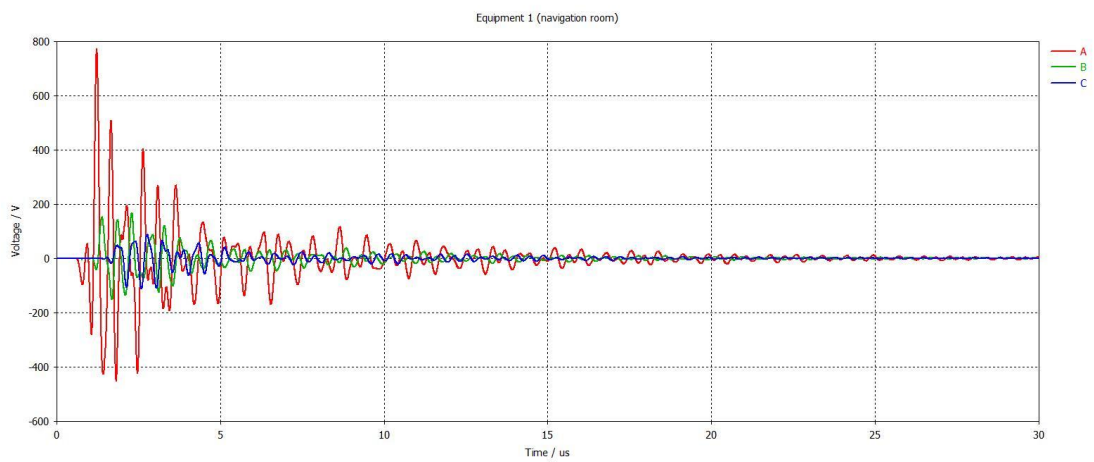
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της θέσης και του είδους του κεραυνικού πλήγματος στις επαγόμενες υπερτάσεις, παρουσιάζονται στα παρακάτω Σχήματα 5.26-5.48 συγκριτικά οι υπερτάσεις ανά θέση (Α, Β, C) και κυματομορφή (10/350μs, 1/200μs, 0.25/100μs) πλήγματος για την εκάστοτε φάση με τη χειρότερη αιχμή, όπως επιλέχθηκε βάσει του 10/350 πλήγματος στη θέση Α της προηγούμενης παραγράφου 5.3.1.



(α)

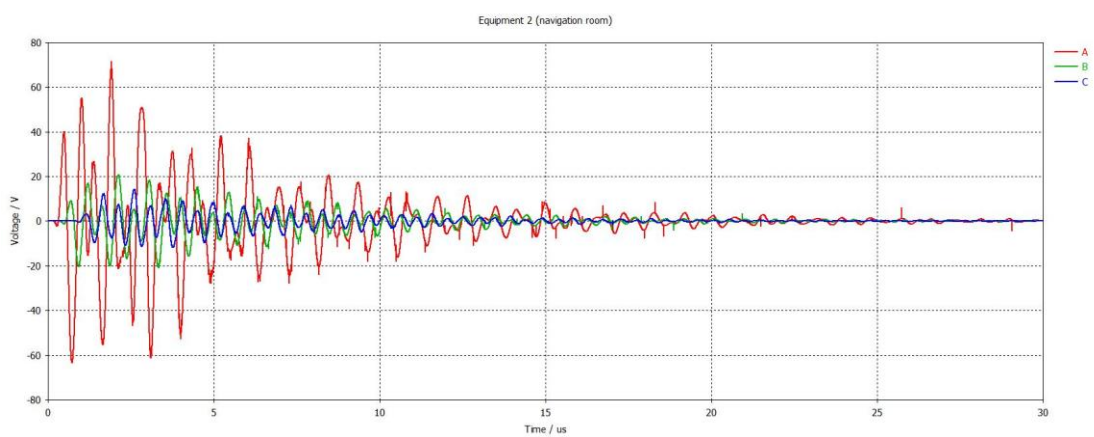


(β)

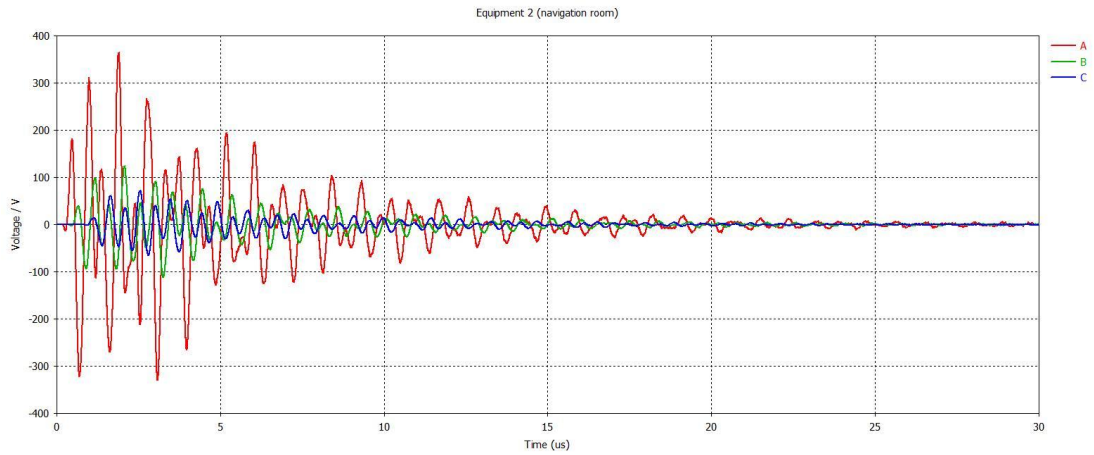


(γ)

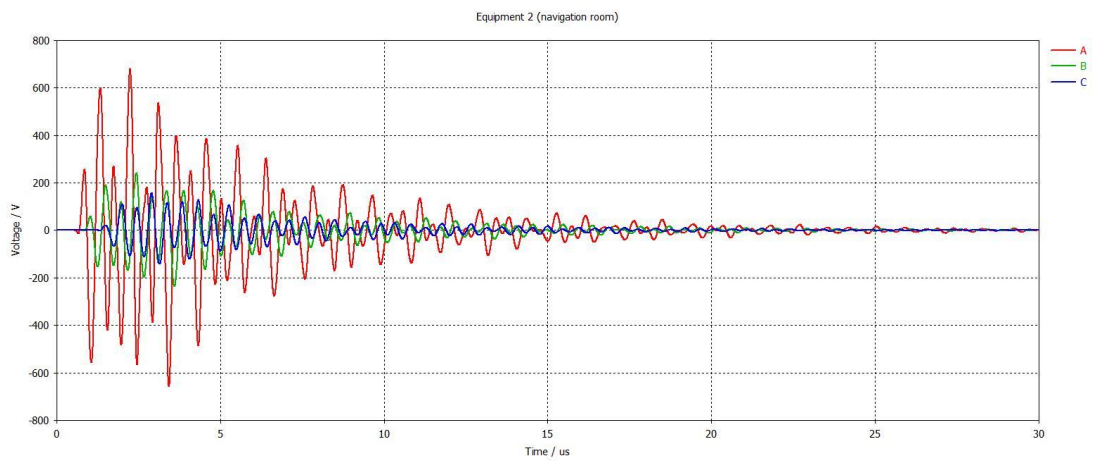
**Σχήμα 5.26:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 1) (α) για πλήγμα 10/350μs, (β) για πλήγμα 1/200μs και (γ) για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)

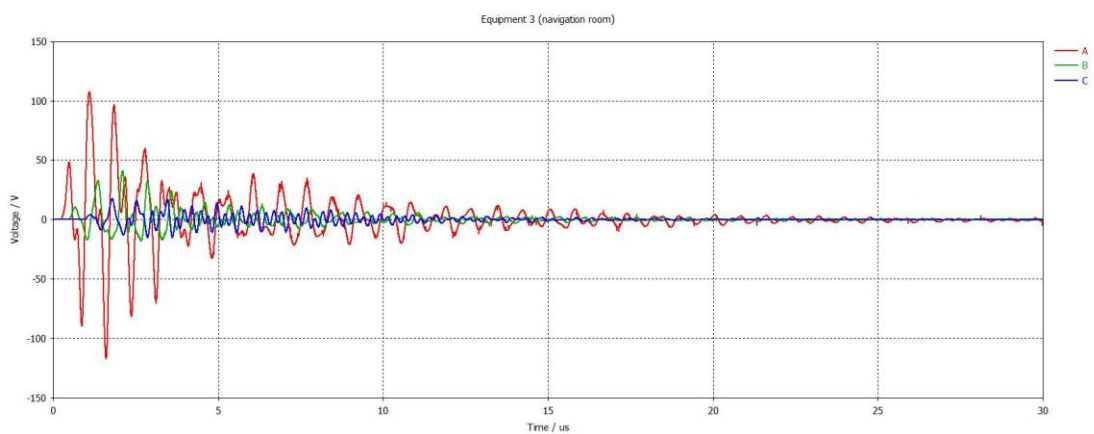


(β)

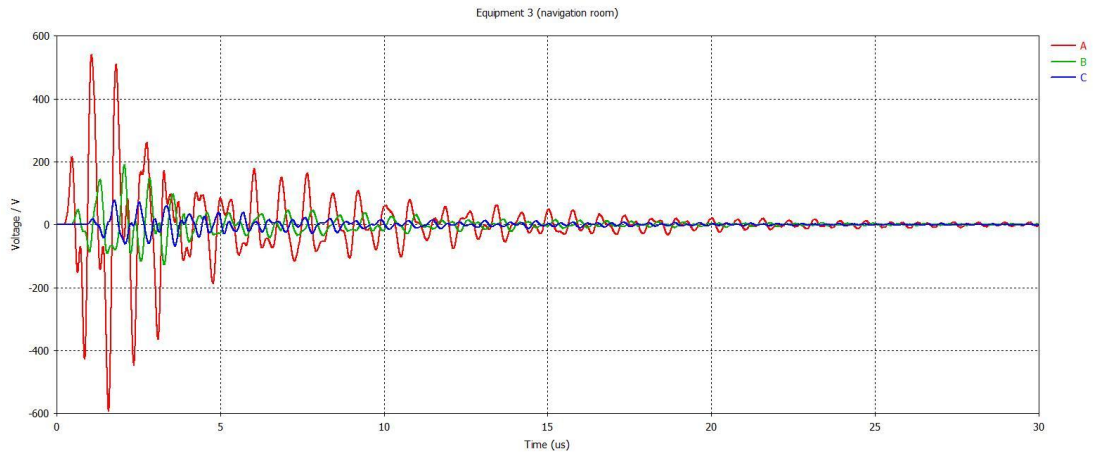


(γ)

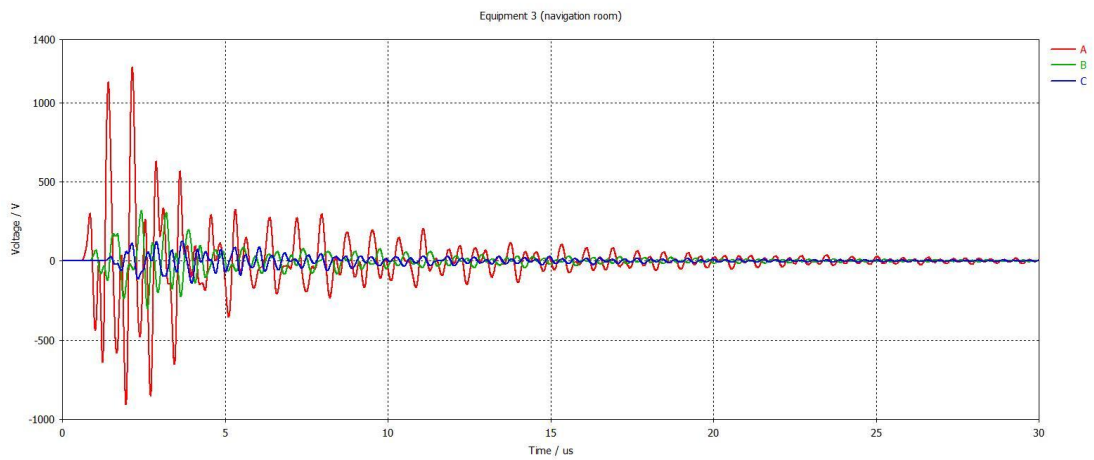
**Σχήμα 5.27:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 2) **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)

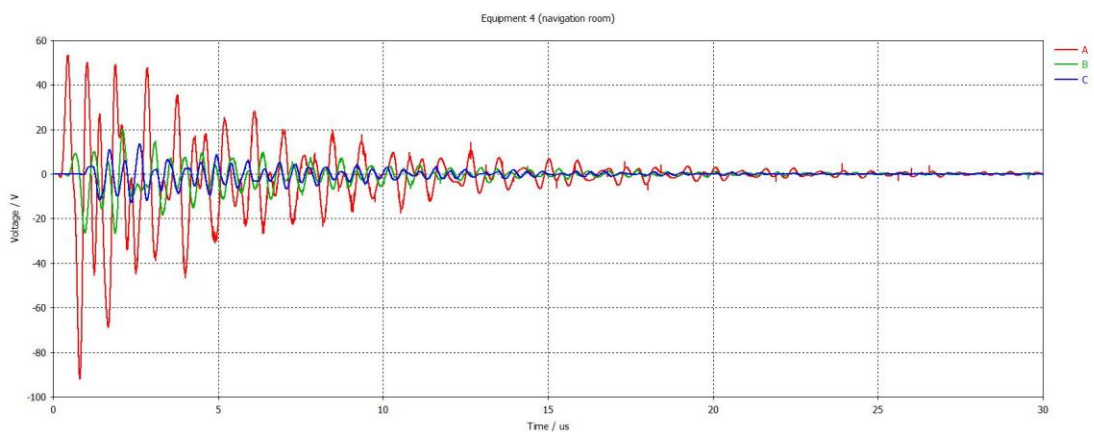


(β)

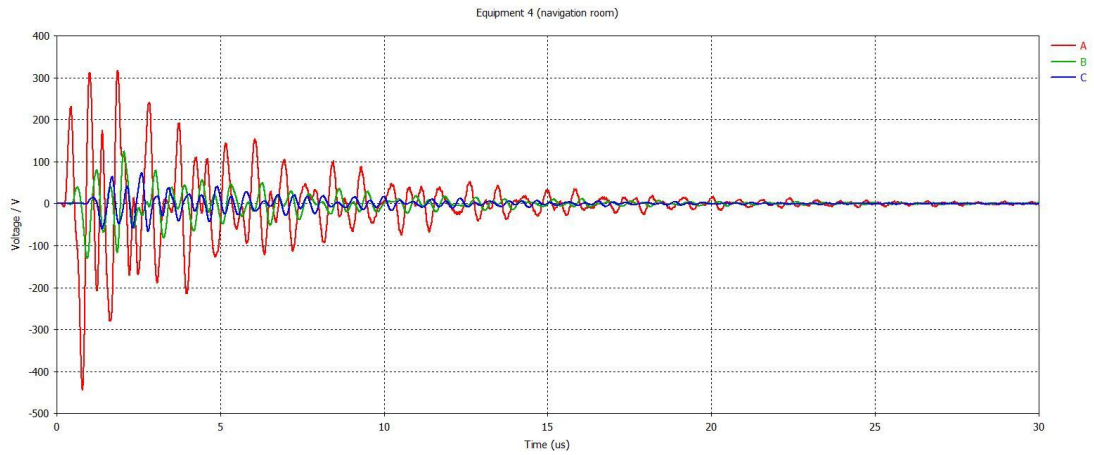


(γ)

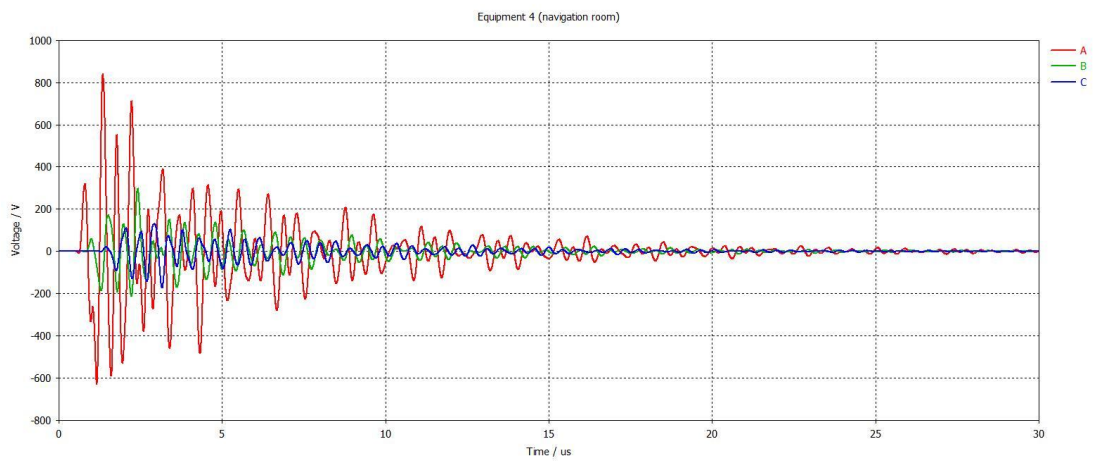
**Σχήμα 5.28:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 3) **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)

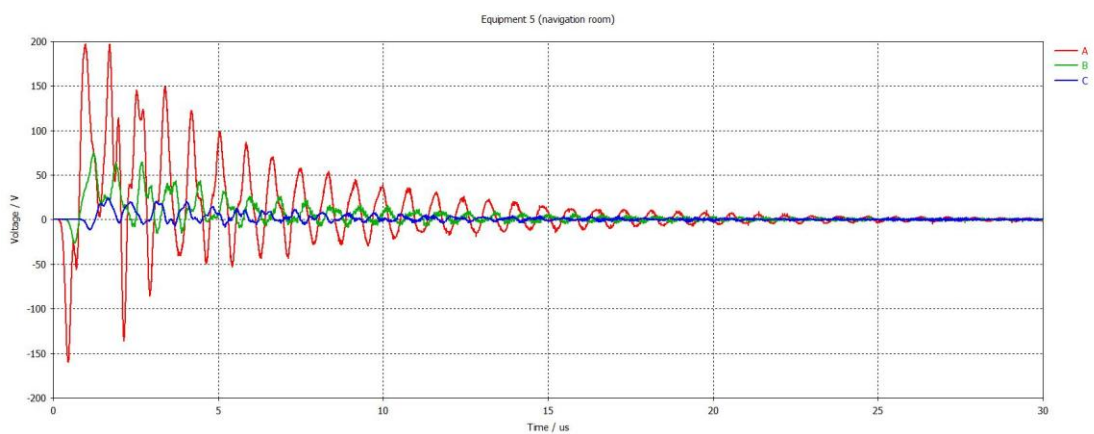


(β)

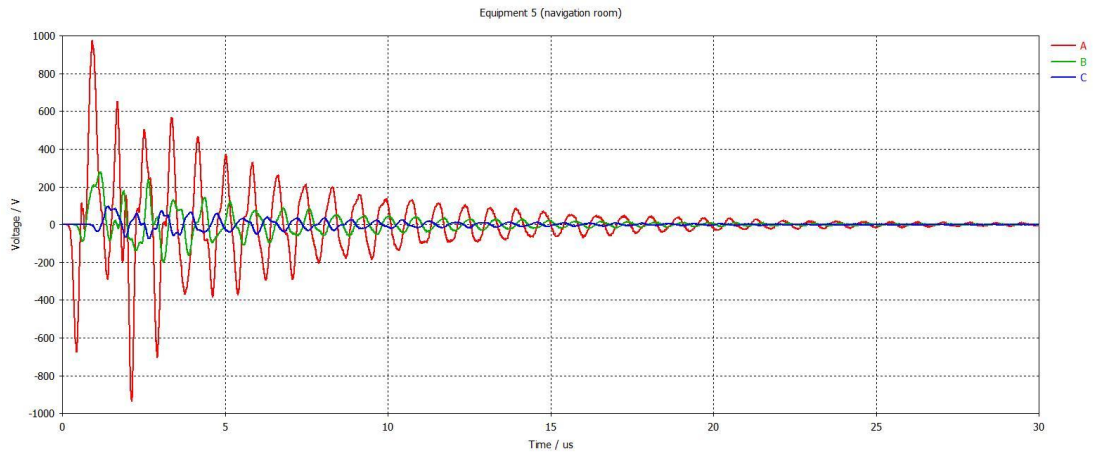


(γ)

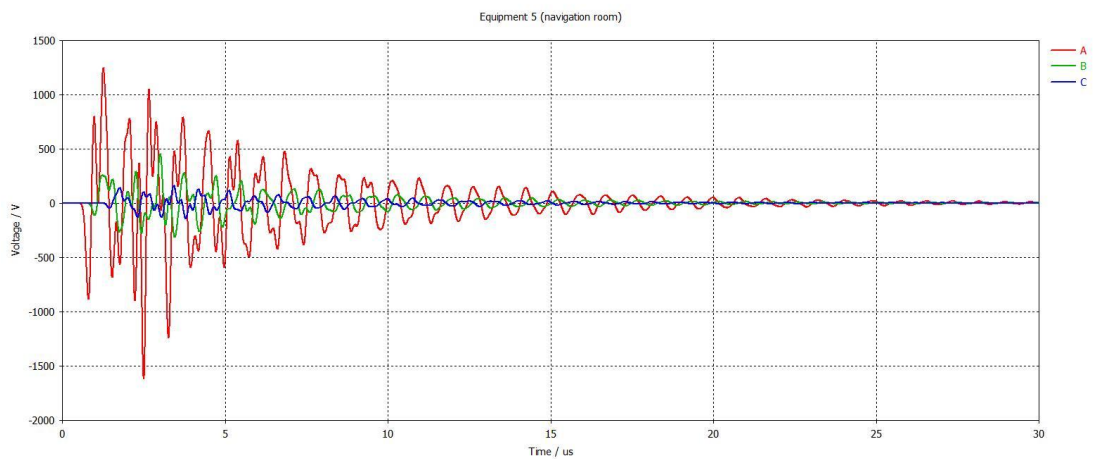
**Σχήμα 5.29:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 4) **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)

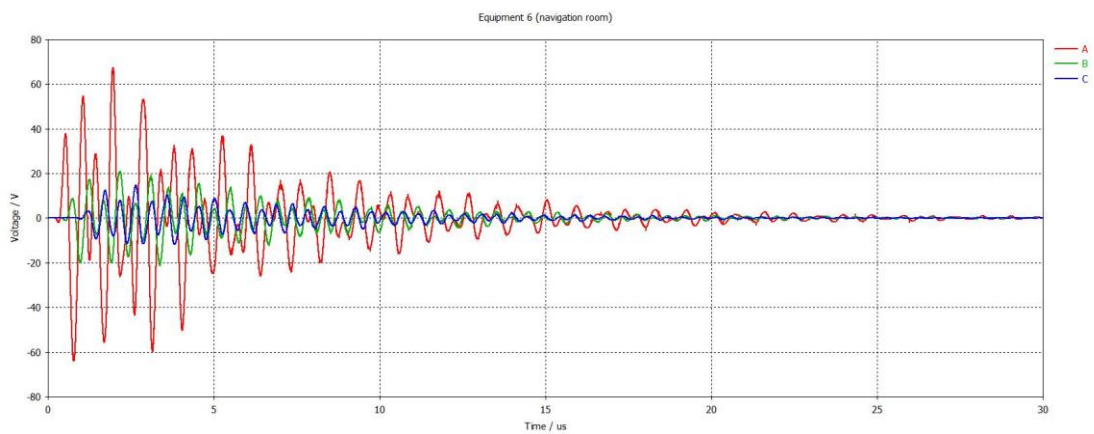


(β)

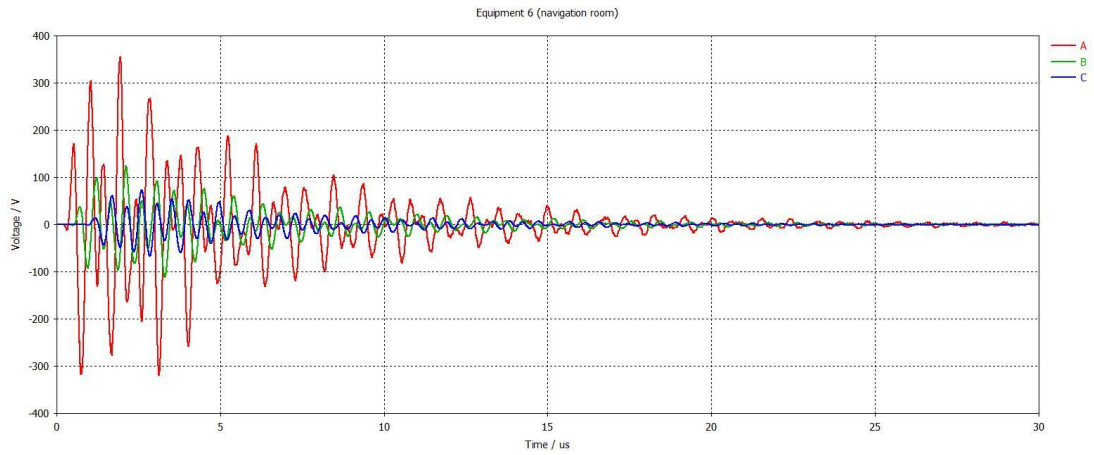


(γ)

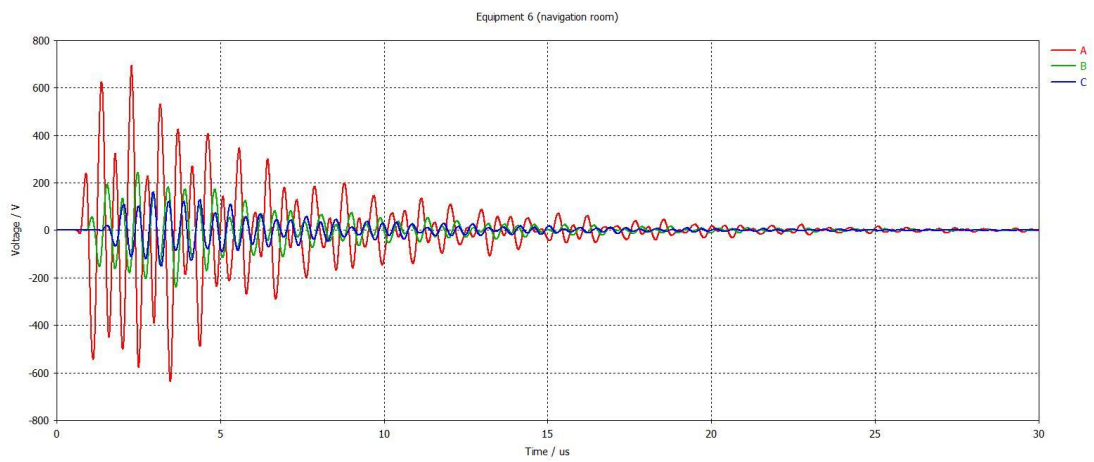
**Σχήμα 5.30:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 5) (α) για πλήγμα 10/350 $\mu$ s, (β) για πλήγμα 1/200 $\mu$ s και (γ) για πλήγμα 0.25/100 $\mu$ s.



(α)

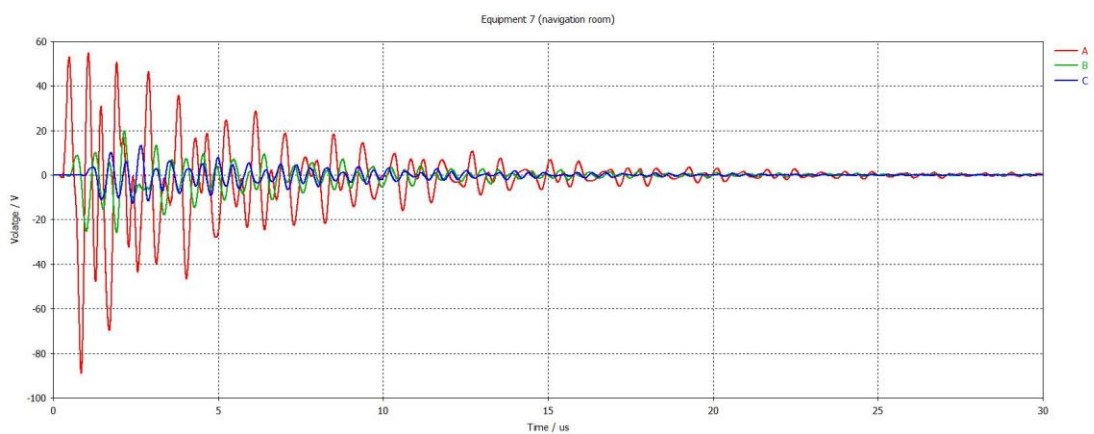


(β)



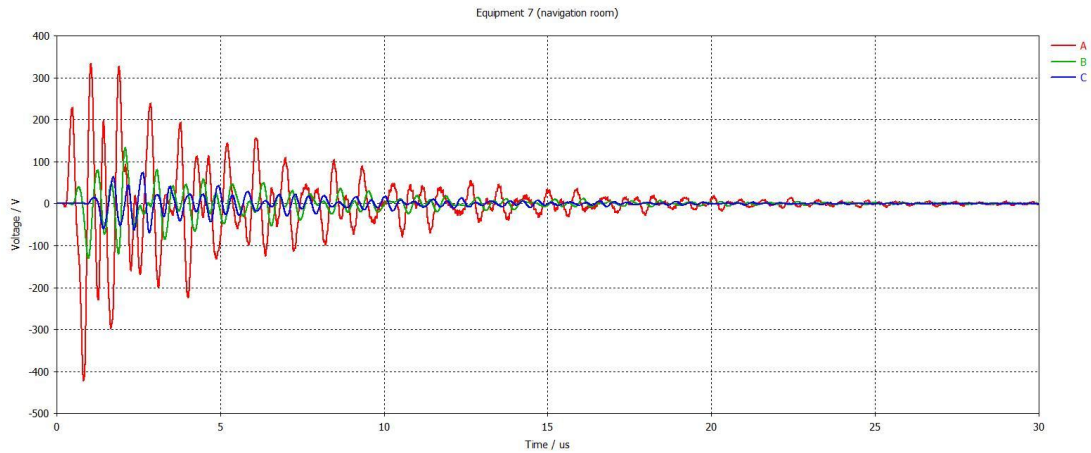
(γ)

**Σχήμα 5.31:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 6) **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

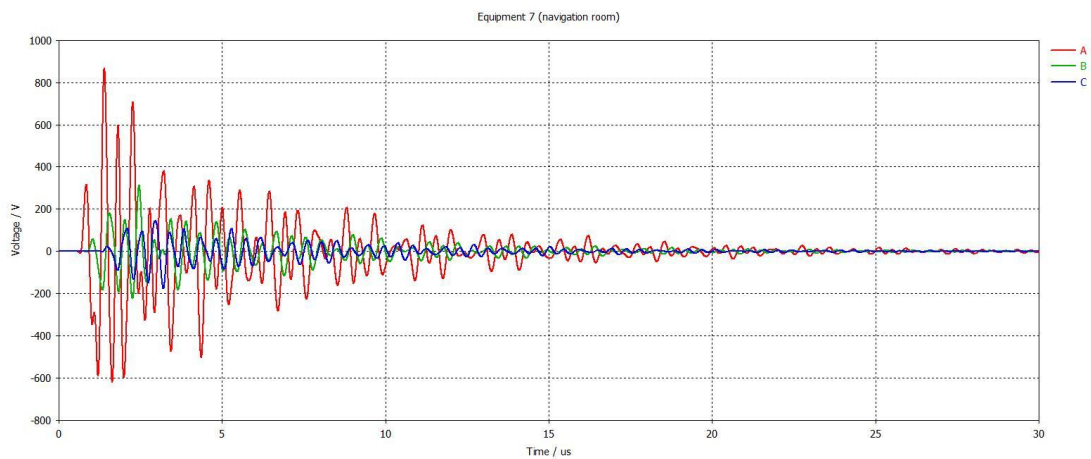


(α)





(β)



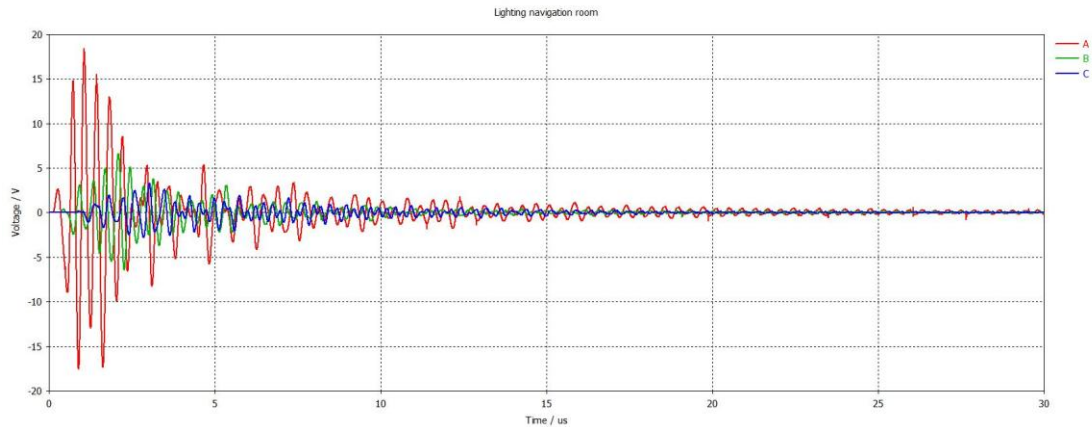
(γ)

**Σχήμα 5.32:** Επαγόμενες υπερτάσεις στα επιμέρους φορτία της γέφυρας (equipment 7) **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

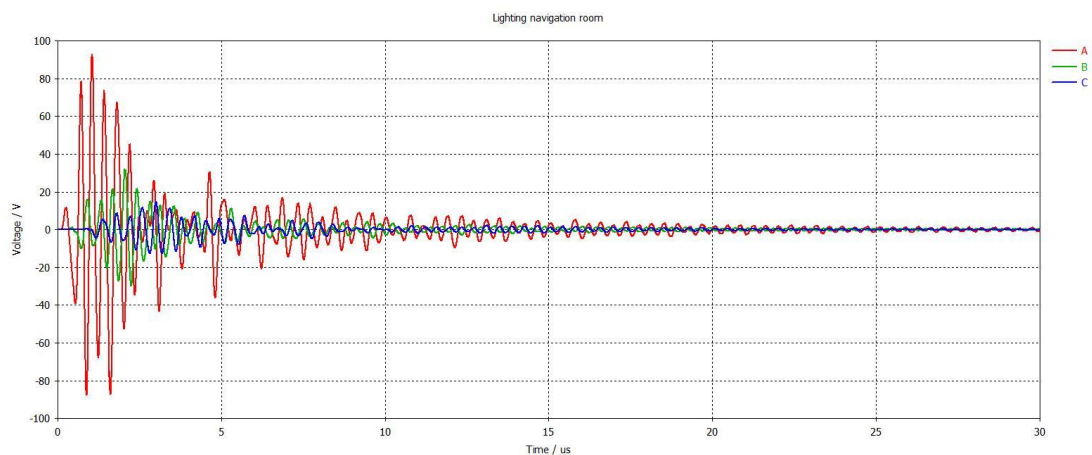
Ξεκινώντας από την αξιολόγηση του εξοπλισμού στο μπροστινό μέρος της γέφυρας, ο οποίος είναι ο πλέον εκτεθειμένος στο κεραυνικό πλήγμα, προκύπτει ότι οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις είναι οι μέγιστες σε όλη την έκταση του μοντέλου και με ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες λαμβάνοντας υπόψη την κρισιμότητα του τηλεπικοινωνιακού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού που καταπονούν. Συγκεκριμένα, για τον εξοπλισμό 1, 2, 4, 6 και 7 (Σχήματα 5.26, 5.27, 5.29, 5.31 και 5.32 αντίστοιχα) το πλήγμα 10/350μs προκαλεί μέγιστες υπερτάσεις της τάξης των 60V. Αντιθέτως το πλήγμα 1/200μs έχει δυσμενείς επιπτώσεις με υπερτάσεις των 350V, μόνο για τη θέση πλήγματος A, ενώ το επακόλουθο πλήγμα 0.25/100μs επάγει 700V-900V για τη θέση πλήγματος A και 200V-300V για πλήγματα στις θέσεις B και C.

Η θέση των εξοπλισμών 3 και 5 τους προσδίδει το μέγιστο βαθμό έκθεσης για όλα τα εξεταζόμενα σημεία πλήγματος, με αποτέλεσμα η κυματομορφή 0.25/100μs να επάγει τάσεις μέχρι και 1.2kV και η 1/200μs τάσεις μέχρι 1kV (Σχήματα 5.28 και 5.30). Παρά τη συμμετρική τους θέση ως προς το κέντρο του παραθύρου, ο εξοπλισμός 5 υφίσταται ελαφρώς αυξημένες υπερτάσεις, με υπέρβαση της ονομαστικής τάσης ακόμα και για το πρωτεύον 10/350μs πλήγμα (200V, για θέση πλήγματος A). Αυτό οφείλεται στο ότι μόνο για

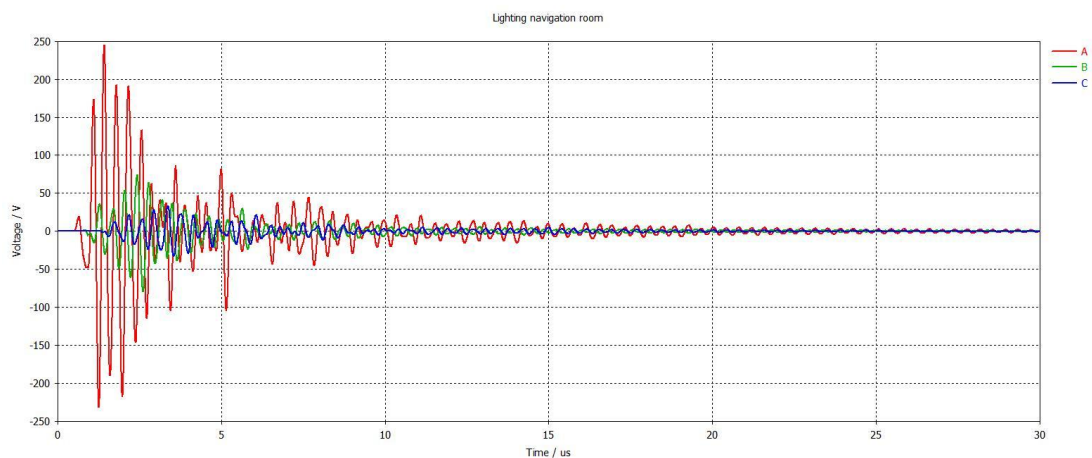
τον εξοπλισμό 5 έχουν χρησιμοποιηθεί δύο μονοί αγωγοί, ενώ για όλους τους υπόλοιπους, συμπεριλαμβανομένου και του εξοπλισμού 3, έχουν χρησιμοποιηθεί συνεστραμμένα ζεύγη καλωδίων. Αποδεικνύεται έτσι η βελτιωμένη επίδοσή τους ως προς τη θωράκιση από πεδία σε σύγκριση με ζεύγη μονών αγωγών, εξαιτίας της οποίας προτείνεται η χρήση τους, ειδικά για εξοπλισμό ελέγχου κλπ. από το IEC 60533, χωρίς όμως να καταφέρνουν να περιορίσουν τις υπερτάσεις σε ανεκτά επίπεδα.



(α)



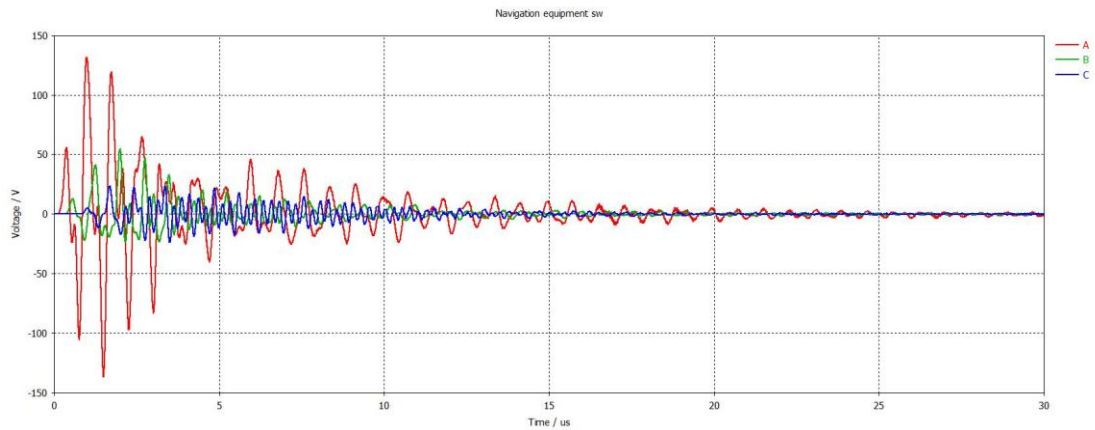
(β)



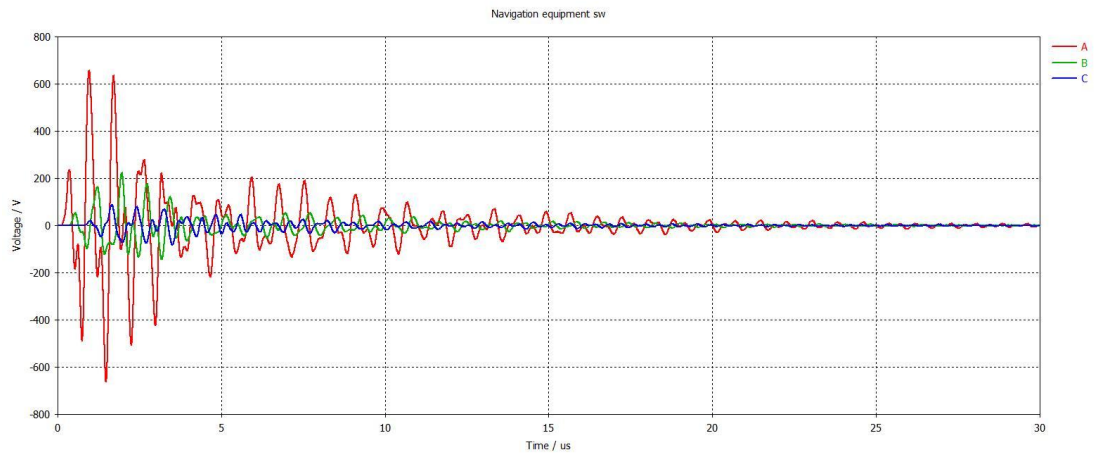
(γ)

**Σχήμα 5.33:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό του πίνακα φωτισμού της γέφυρας (α) για πλήγμα 10/350 $\mu$ s, (β) για πλήγμα 1/200 $\mu$ s και (γ) για πλήγμα 0.25/100 $\mu$ s.

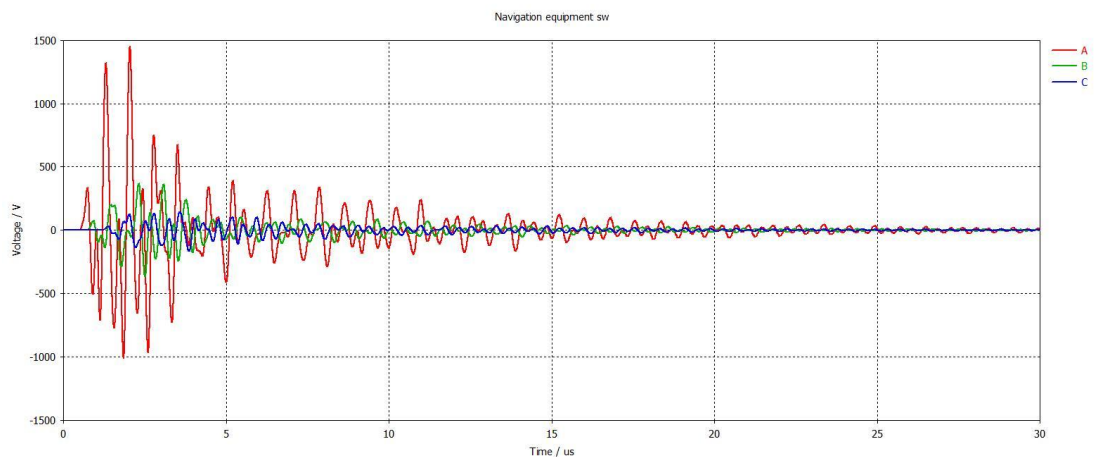
Σε αντίθεση με τις παραπάνω γραμμές εξοπλισμού, ο πίνακας φωτισμού της γέφυρας -οι επιμέρους οδεύσεις των γραμμών φωτισμού δεν έχουν σχεδιασθεί- καταπονείται με επικίνδυνη υπέρταση μόνο για πλήγμα 0.25/100μs στη θέση A (Σχήμα 5.33), λόγω της θέσης του στο πίσω μέρος της γέφυρας.



(α)



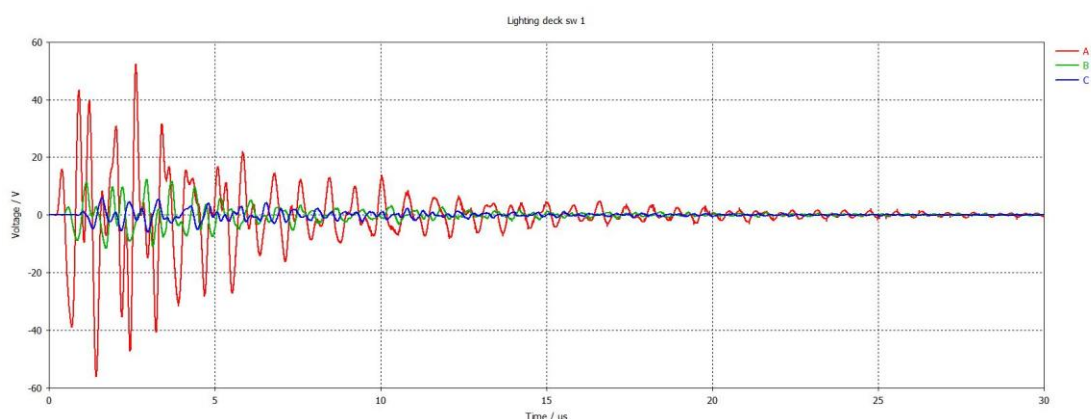
(β)



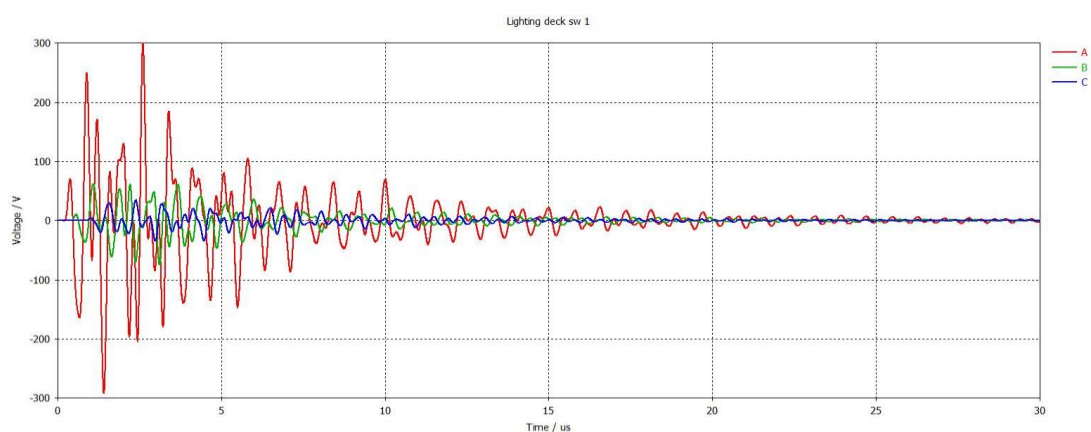
(γ)

**Σχήμα 5.34:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα τροφοδοσίας των φορτίων της γέφυρας (α) για πλήγμα 10/350μs, (β) για πλήγμα 1/200μs και (γ) για πλήγμα 0.25/100μs.

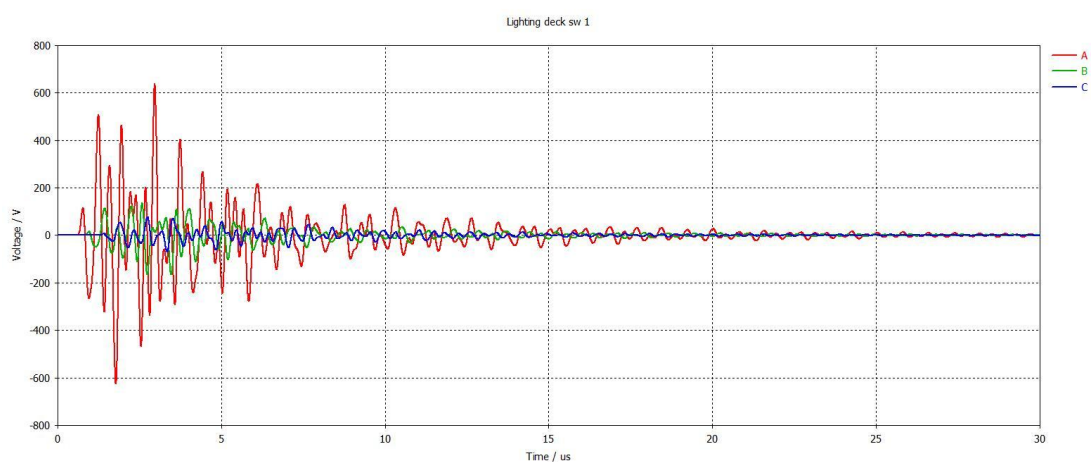
Σε παρόμοια θέση βρίσκεται εγκατεστημένος και ο πίνακας που τροφοδοτεί το σύνολο του εξοπλισμού της γέφυρας. Ωστόσο, η συμβολή όλων των παραπάνω συνδεδεμένων γραμμών εξοπλισμού δημιουργεί μεγαλύτερη συνολική υπέρταση στο ζυγό, προερχόμενη από τα πλήγματα 1/200μs και 0.25/100μs όχι μόνο στη θέση Α (600V και 1.5kV αντίστοιχα), αλλά και στην πιο απομακρυσμένη θέση Β (περίπου 200V και 350V αντίστοιχα), όπως φαίνεται στα διαγράμματα του Σχήματος 5.34. Η γνώση των κυκλωματικών στοιχείων του εξοπλισμού, τα οποία έχουν θεωρηθεί ωμικά φορτία 50Ω και 100Ω, θα οδηγούσε σε ακόμα πιο ακριβή αποτελέσματα.



(α)

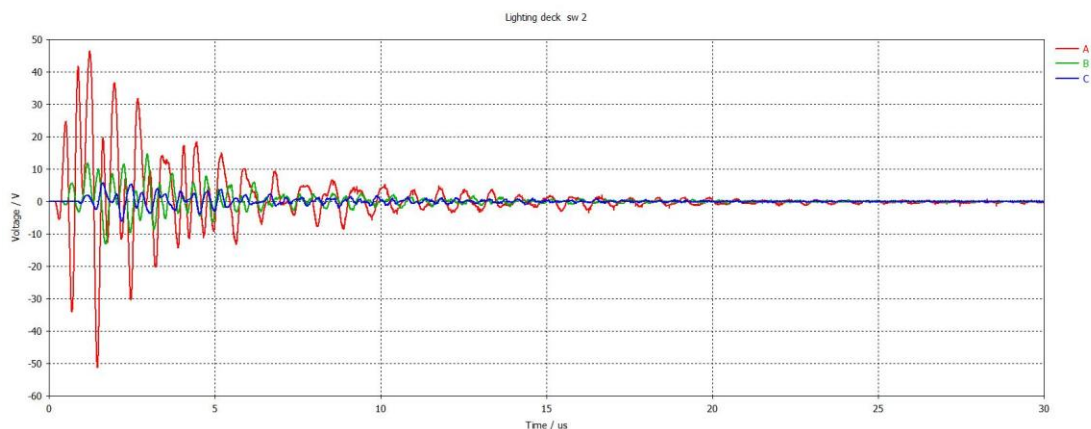


(β)

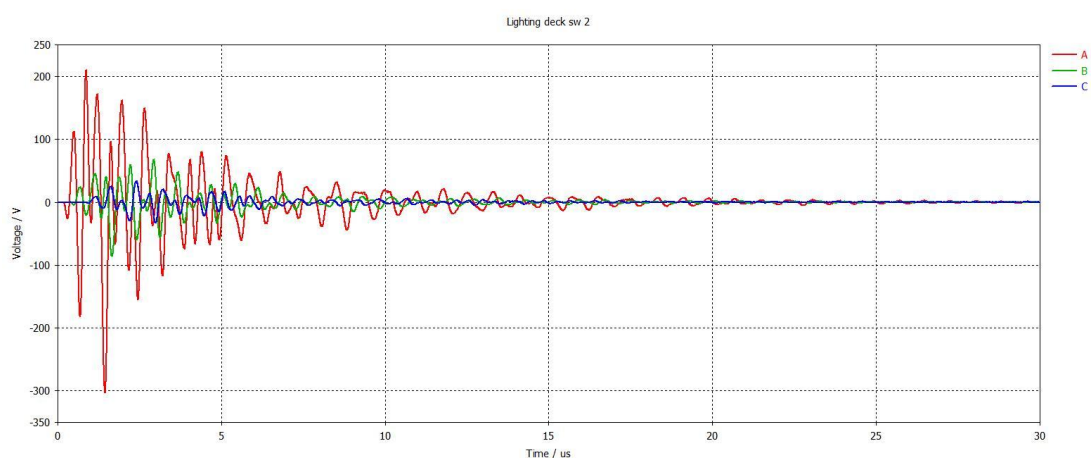


(γ)

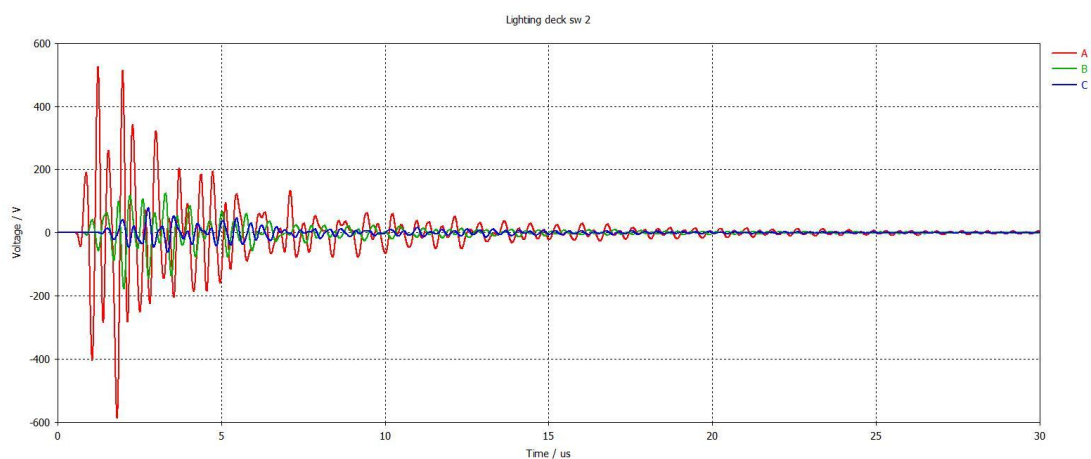
**Σχήμα 5.35:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα φωτισμού του καταστρώματος 1 **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)



(β)

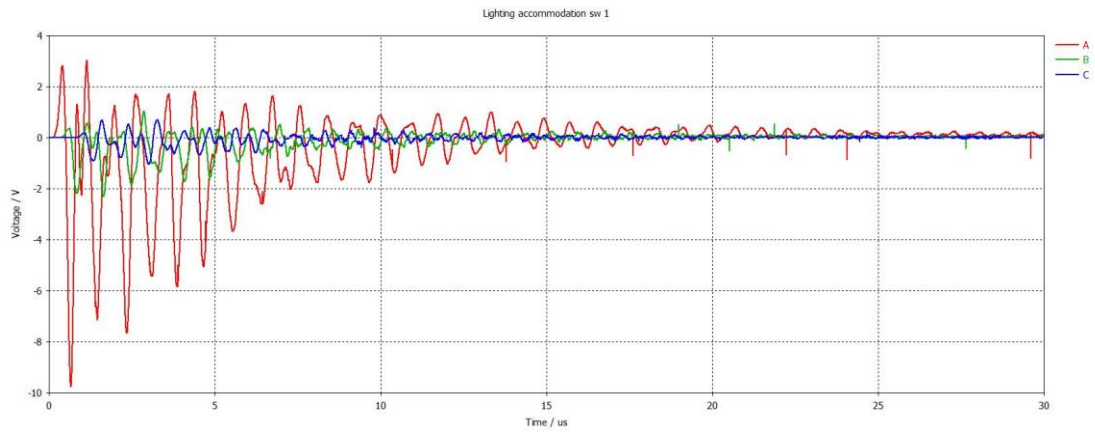


(γ)

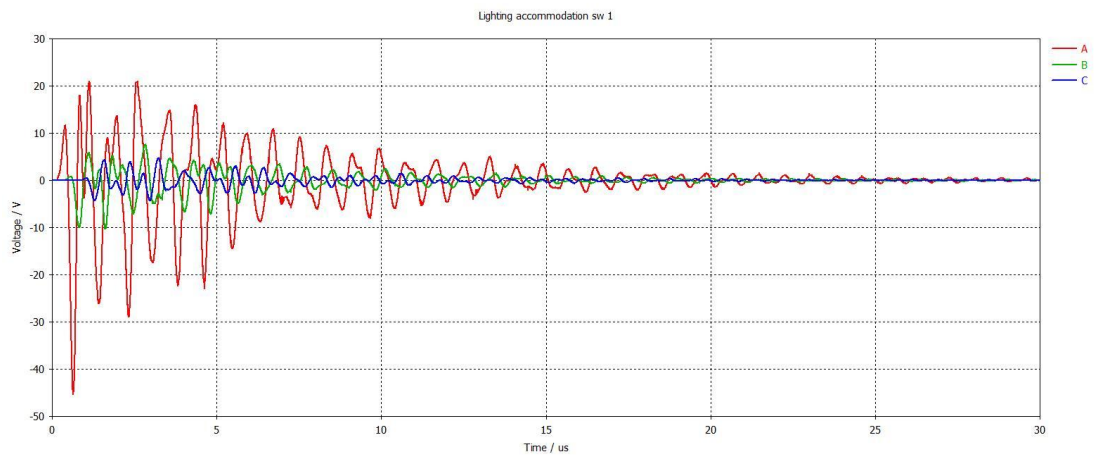
**Σχήμα 5.36:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα φωτισμού του καταστρώματος 2 **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

Προχωρώντας στα πιο κάτω επίπεδα των υπερδομών του πλοίου, οι πίνακες φωτισμού του καταστρώματος 1 (Σχήμα 5.35) και 2 (Σχήμα 5.36) που βρίσκονται στη βάση της δομής A στο επίπεδο του καταστρώματος δέχονται περίπου 300V ο καθένας για πλήγμα 1/200μs και 600V για την περίπτωση πλήγματος 0.25/100μs (θέση πλήγματος A). Οι παραπλήσιες τιμές δικαιολογούνται από τη συμμετρική θέση τους ως προς το πλήγμα και ως προς το ζυγό χαμηλής τάσης (115V). Η παρατήρηση αυτή ισχύει και για τους πίνακες

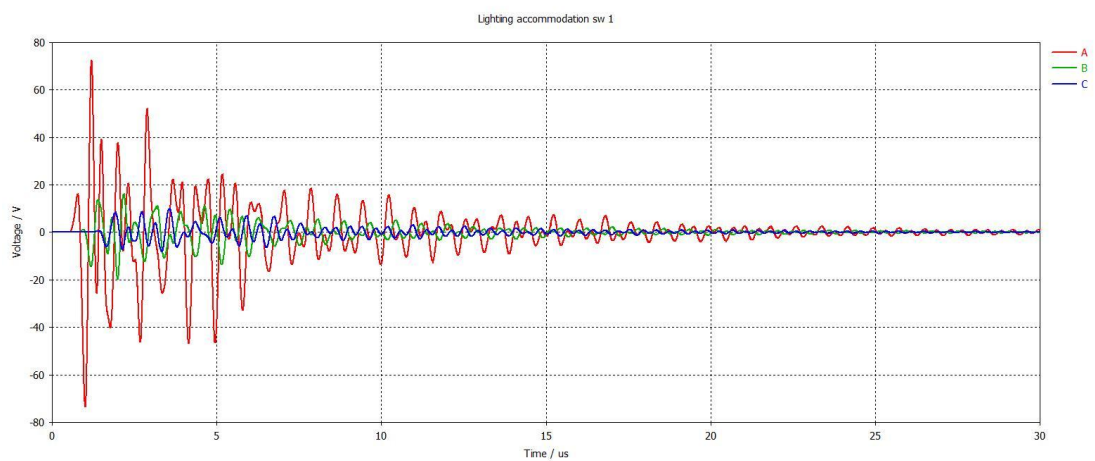
φωτισμού χώρων ενδιαίτησης 1 (Σχήμα 5.42) και 2 (Σχήμα 5.43), οι οποίοι λόγω της θέσης τους στη βάση της δομής J είναι θωρακισμένοι από όλες τις κυματομορφές και τις θέσεις πλήγματος.



(α)

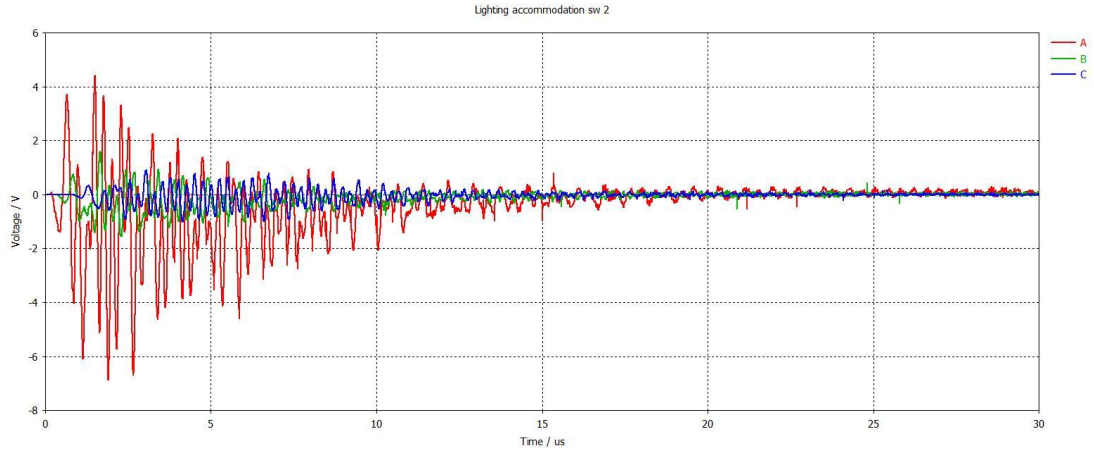


(β)

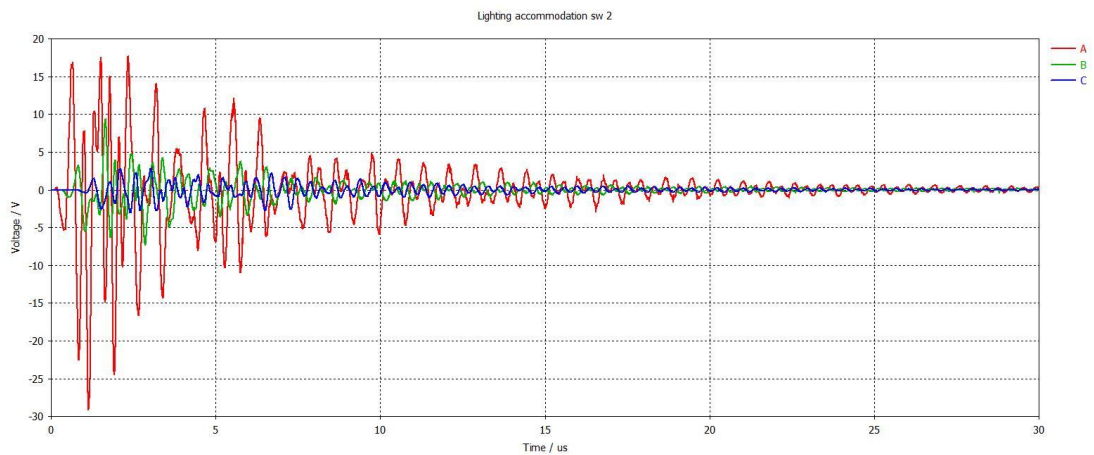


(γ)

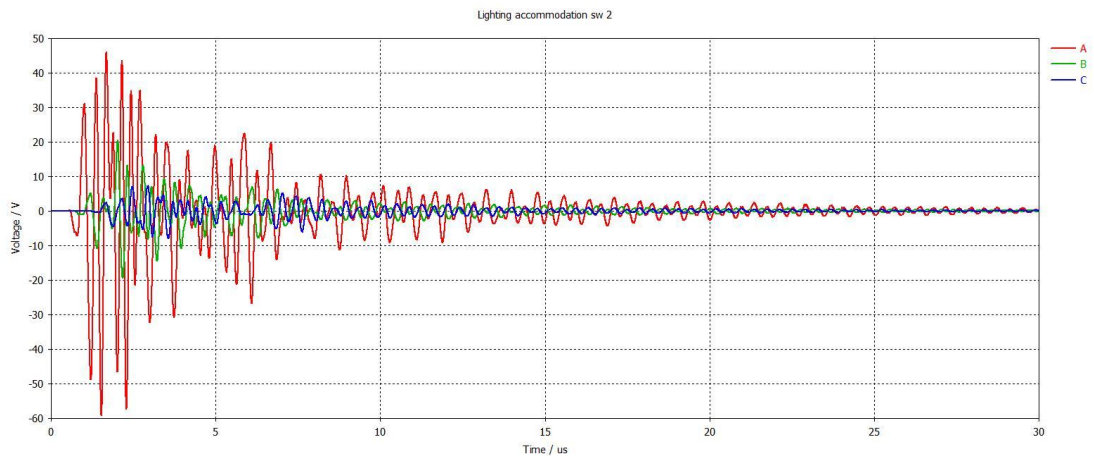
**Σχήμα 5.37:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα φωτισμού των χώρων ενδιαίτησης 1 **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)



(β)

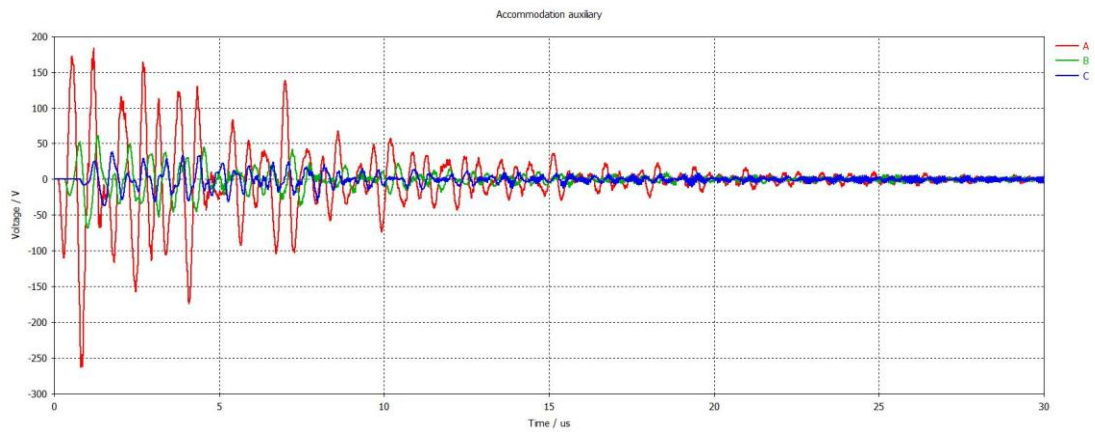


(γ)

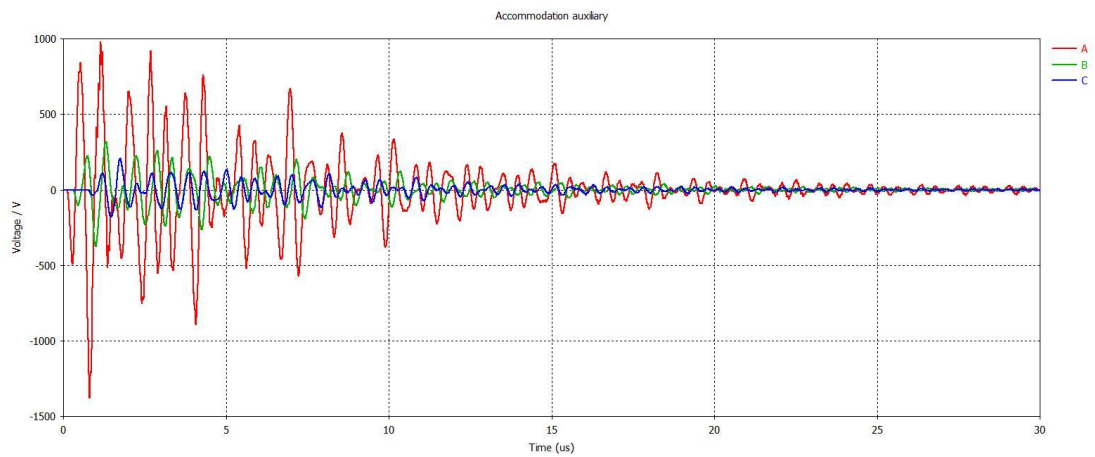
**Σχήμα 5.38:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα φωτισμού των χώρων ενδιαίτησης 2 **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

Στο ίδιο επίπεδο βρίσκεται και ο πίνακας βοηθητικών των χώρων ενδιαίτησης, ο οποίος παρά τη μειωμένη έκθεσή του στο ακτινοβολούμενο πεδίο δέχεται αυξημένες υπερτάσεις σύμφωνα με το Σχήμα 5.39: από όλες τις θέσεις πλήγματος για τις κυματομορφές 1/200μs και 0.25/100μs (μέγιστες τιμές 1kV και 1.8kV αντίστοιχα), ενώ και

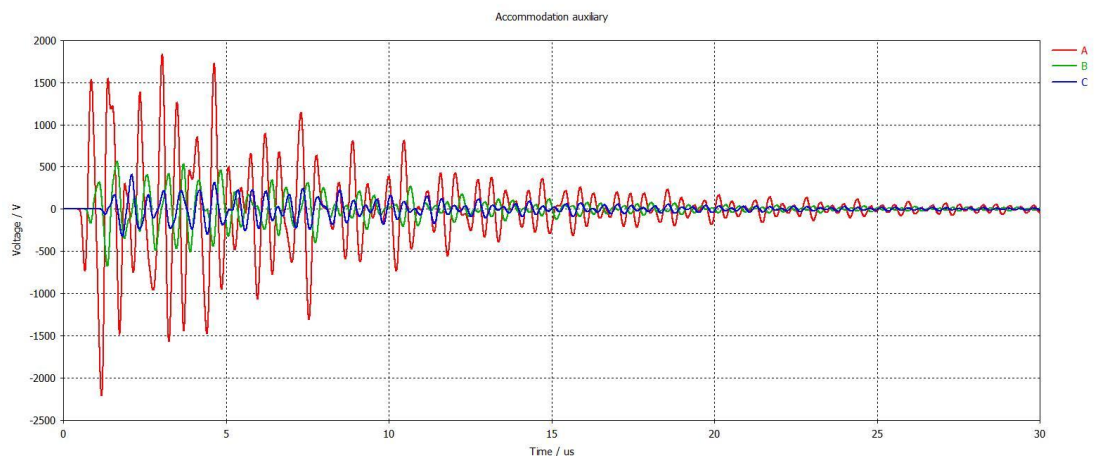
για το πλήγμα 10/350μs στη θέση A προκύπτει επαγόμενη τάση 200V. Αιτία για αυτό πιθανώς είναι ο επαγωγικός συντελεστής ισχύος του φορτίου.



(α)



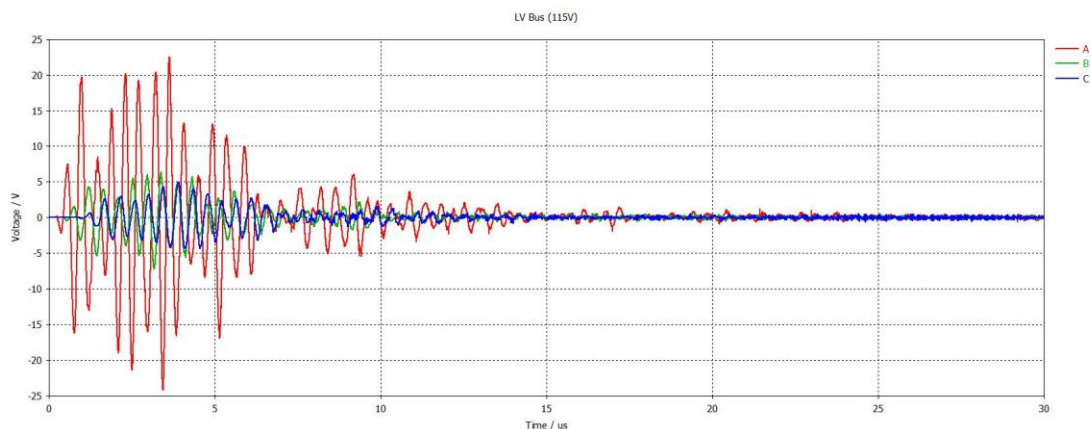
(β)



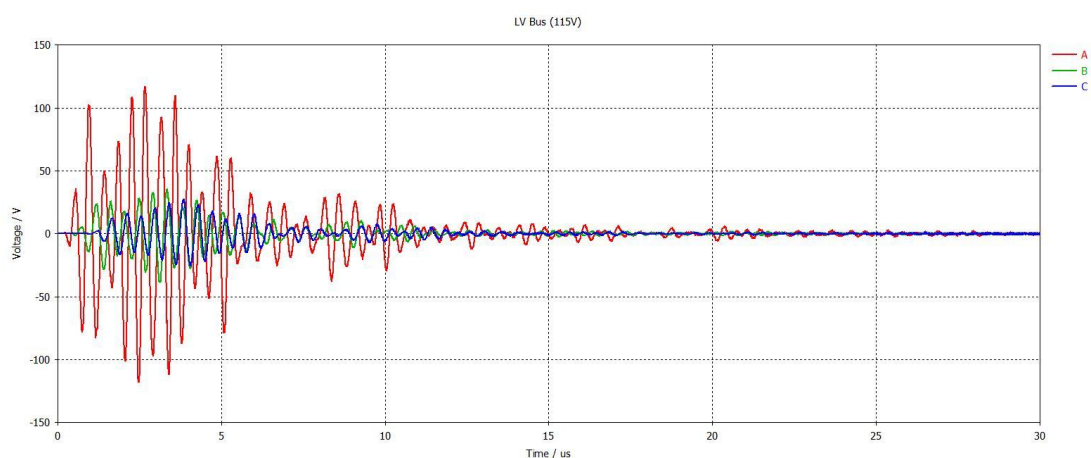
(γ)

**Σχήμα 5.39:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα βοηθητικών ενδίαιτησης **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

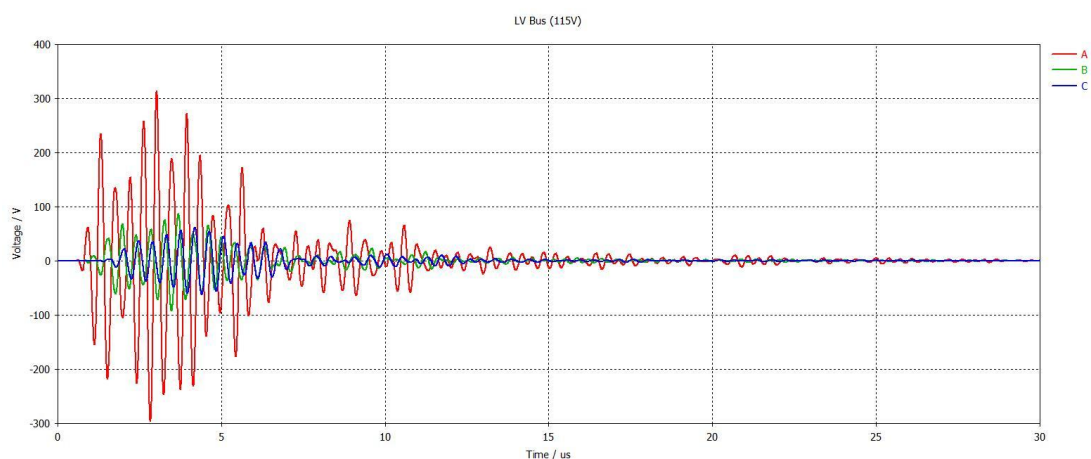




(α)



(β)

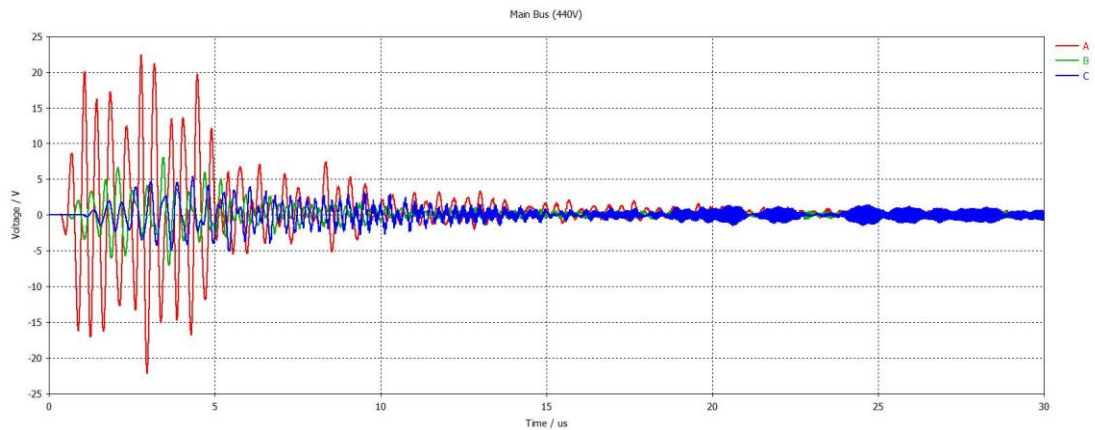


(γ)

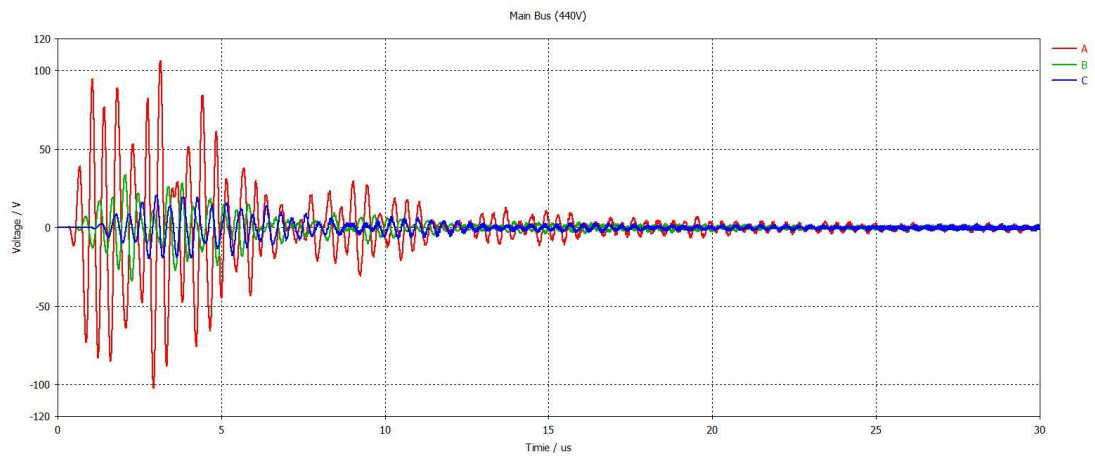
**Σχήμα 5.40:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ζυγό χαμηλής τάσης 115V **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

Από όλα τα παραπάνω φορτία των 115V, καταλήγουν στο ζυγό χαμηλής τάσης στο εσωτερικό της γάστρας, υπερτάσεις οι οποίες υπερβαίνουν την ονομαστική τάση μόνο για το πλήγμα 0.25/100μs (300V) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.40 και στη συνέχεια φτάνουν στο δευτερεύον του Μ/Σ. Η τάση του κύριου ζυγού (μέγιστη τιμή τα 250V μόνο για το

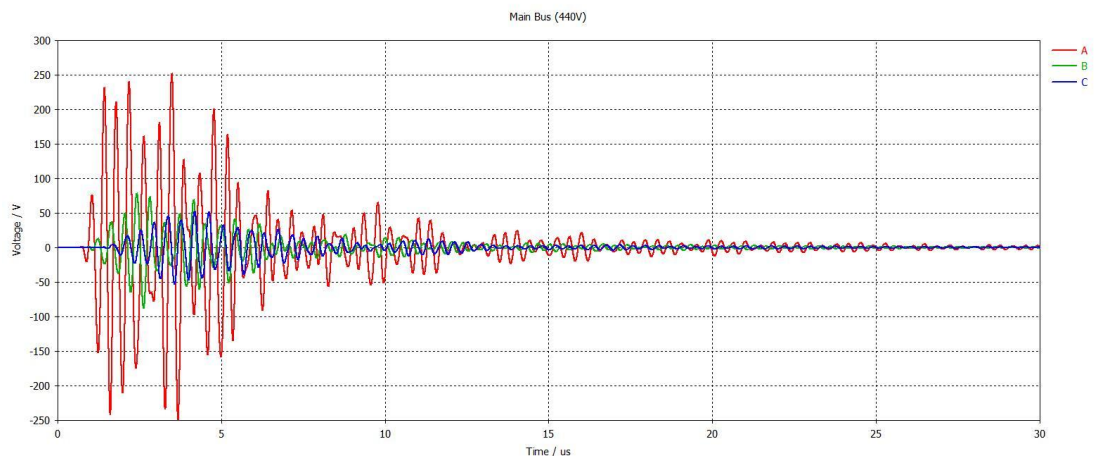
0.25/100μs πλήγμα της θέσης A, Σχήμα 5.41) επηρεάζει αντίστοιχα και την υπέρταση στα άκρα της γεννήτριας (Σχήμα 5.42).



(α)

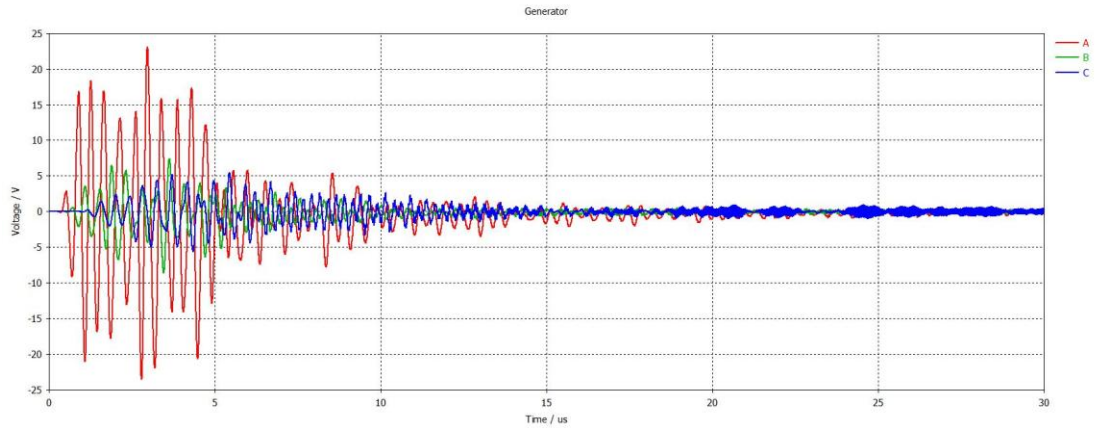


(β)

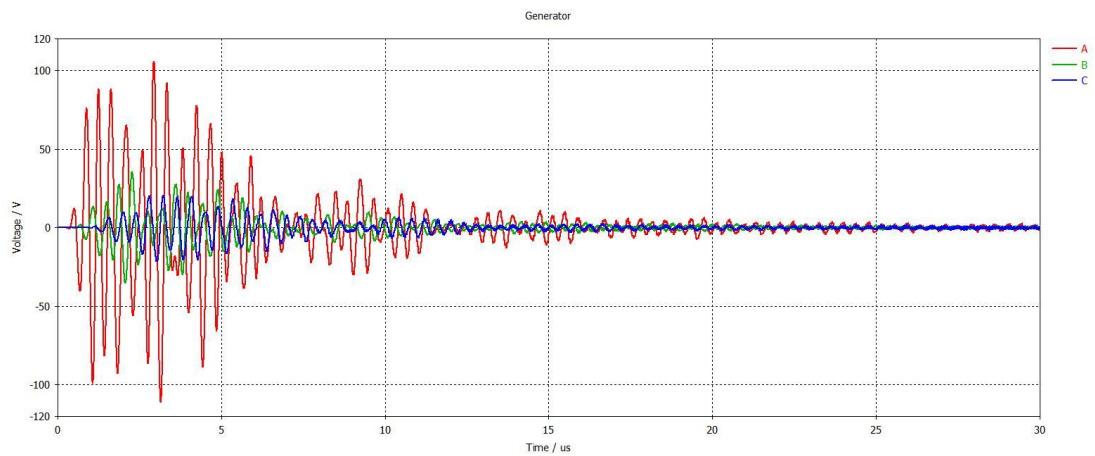


(γ)

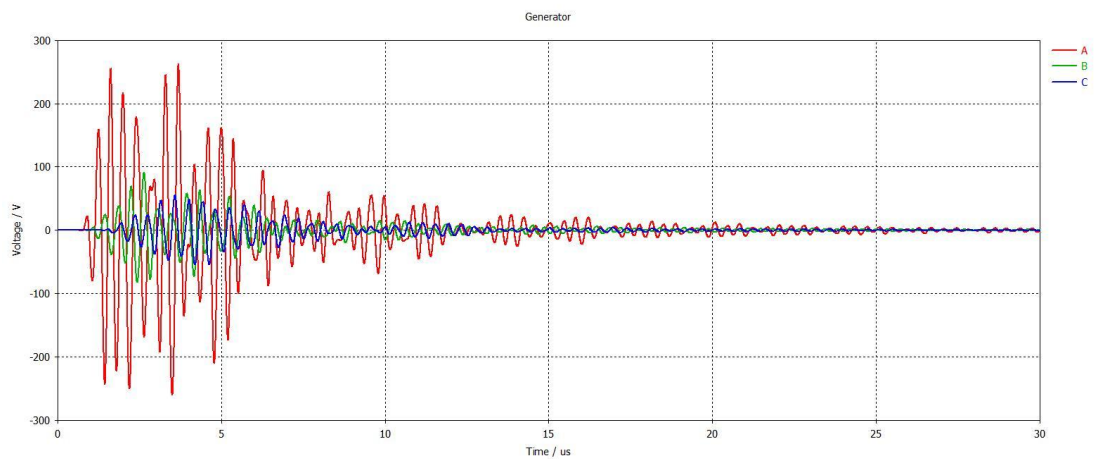
**Σχήμα 5.41:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον κύριο ζυγό των 440V (α) για πλήγμα 10/350μs, (β) για πλήγμα 1/200μs και (γ) για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)



(β)

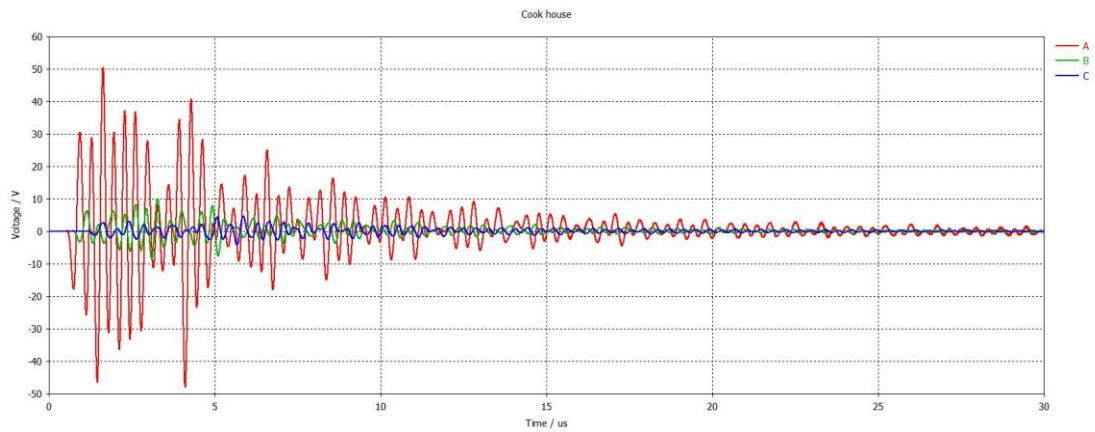


(γ)

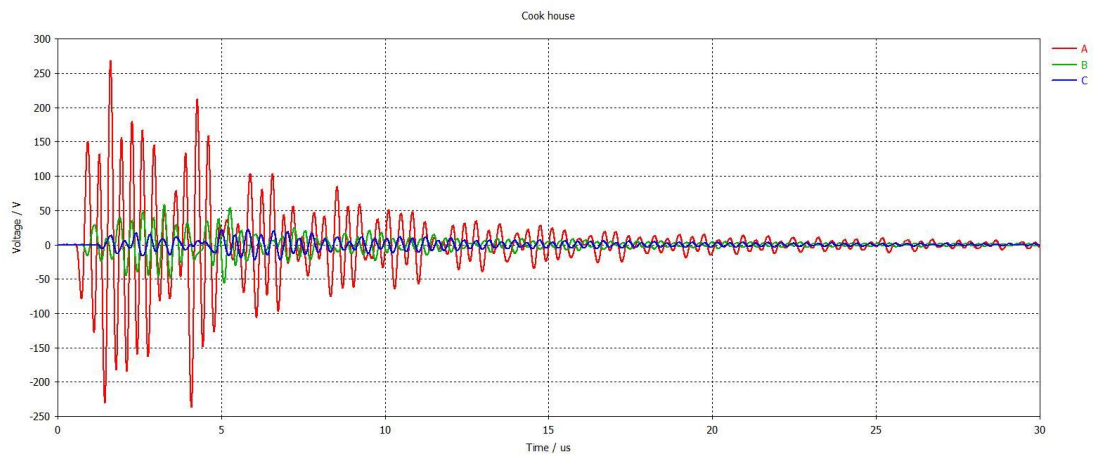
**Σχήμα 5.42:** Επαγόμενες υπερτάσεις στη γεννήτρια **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

Η τάση του κύριου ζυγού διαμορφώνεται από τις υπερτάσεις που προέρχονται από το 1<sup>ο</sup>ν του Μ/Σ, αλλά σε μεγάλο βαθμό και από τις υπερτάσεις που φτάνουν από φορτία των 440V, τα οποία βρίσκονται πάνω από το κατάστρωμα σε σημείο, όπου δέχονται την επίδραση του ακτινοβολούμενου ηλεκτρικού πεδίου. Συγκεκριμένα, το μαγειρείο που βρίσκεται δύο επίπεδα πάνω από το κατάστρωμα, είναι πιο εκτεθειμένο σε ανοίγματα και συνεπώς για το πλέον δυσμενές πλήγμα 0.25/100μs στη θέση A, υφίσταται υπέρταση 700V

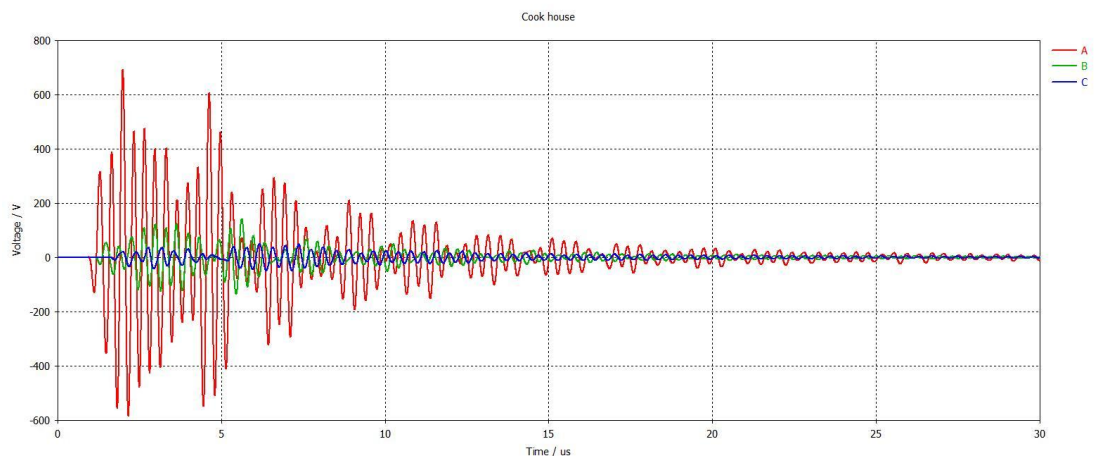
(Σχήμα 5.43), ενώ αντίστοιχα και ο πίνακας χώρων ενδιαίτησης, που βρίσκεται ένα επίπεδο πιο κάτω, δέχεται περίπου 450V (Σχήμα 5.44).



(α)

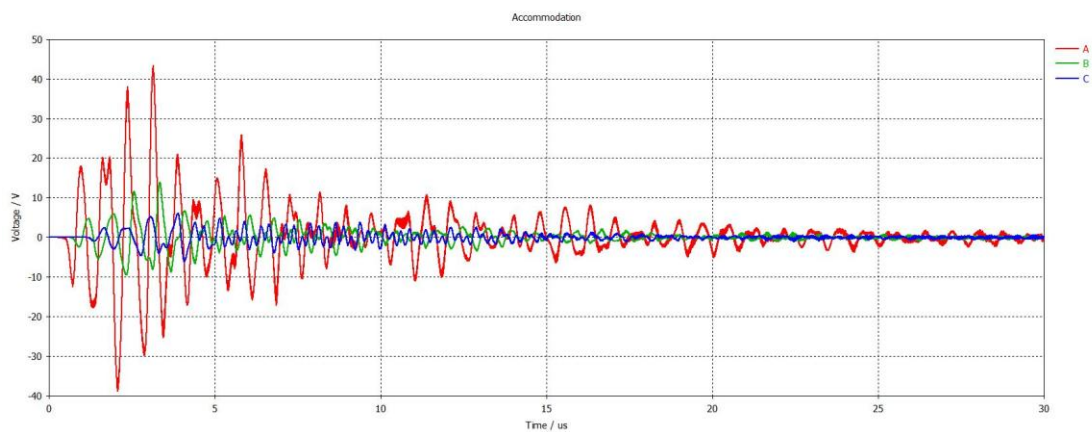


(β)

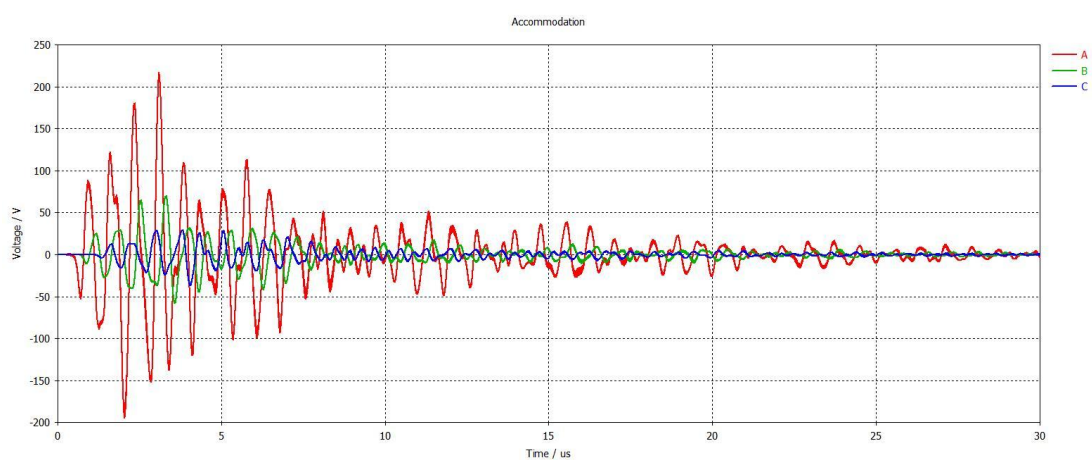


(γ)

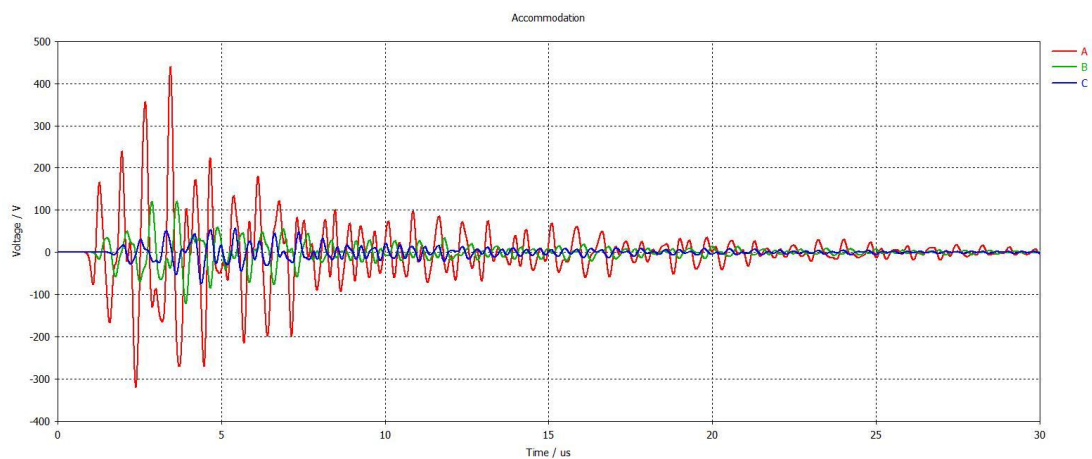
**Σχήμα 5.43:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα του μαγειρείου (α) για πλήγμα 10/350μs, (β) για πλήγμα 1/200μs και (γ) για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)



(β)

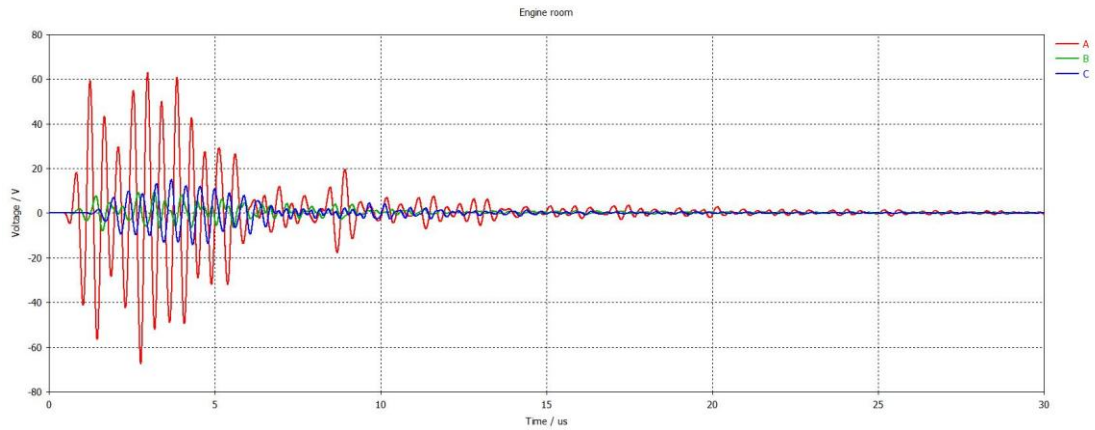


(γ)

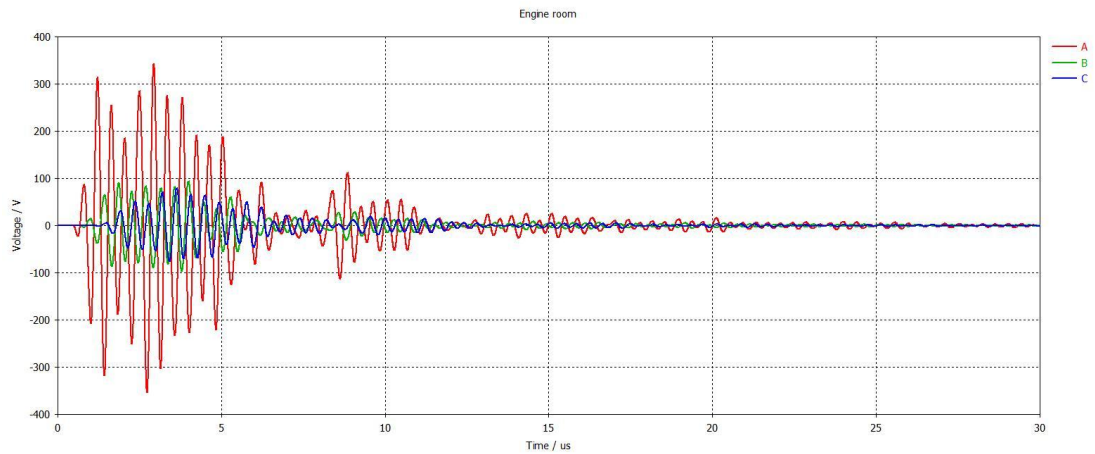
**Σχήμα 5.44:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα των χώρων ενδίαιτησης **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

Φορτία των 440V που βρίσκονται εντός της γάστρας και τροφοδοτούνται από τον κύριο ζυγό αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω αγόμενης επιδεκτικότητας στις υπερτάσεις που προέρχονται από αυτόν. Στην περίπτωση πλήγματος 0.25/100μs στη θέση A, οι υπερτάσεις που καταπονούν τους πίνακες βοηθητικών μηχανοστασίου (Σχήμα 5.45) και

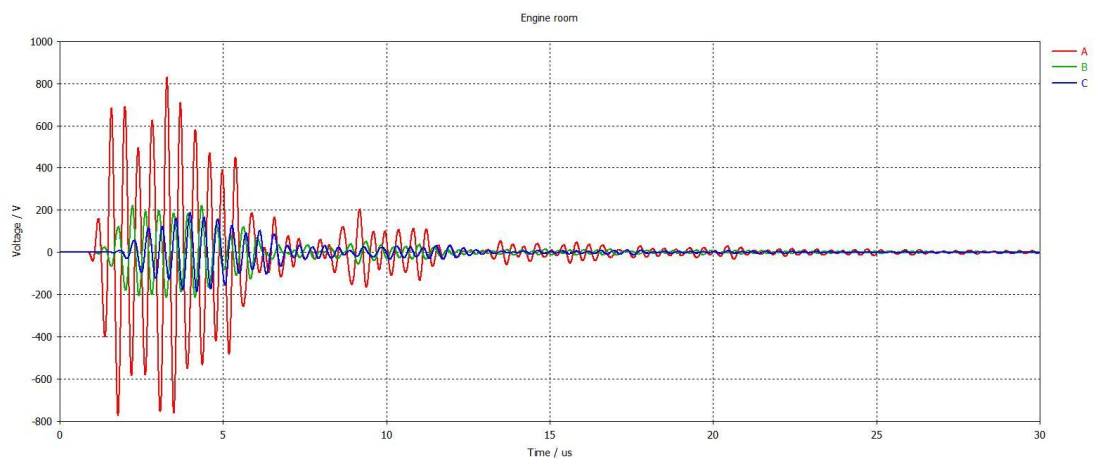
βοηθητικών του σκάφους (Σχήμα 5.46) φτάνουν στα 800V, πιθανώς λόγω του έντονα επαγωγικού συντελεστή ισχύος, της τάξης του 0.5-06.



(α)

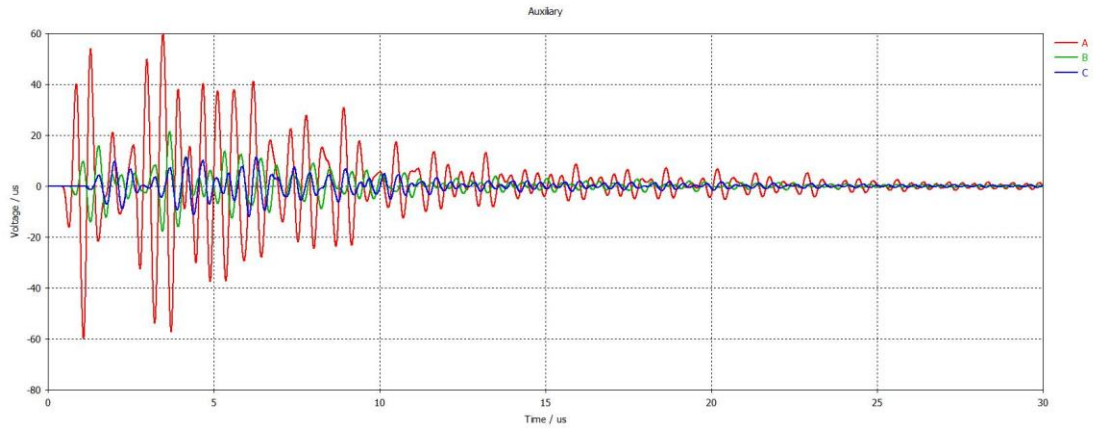


(β)

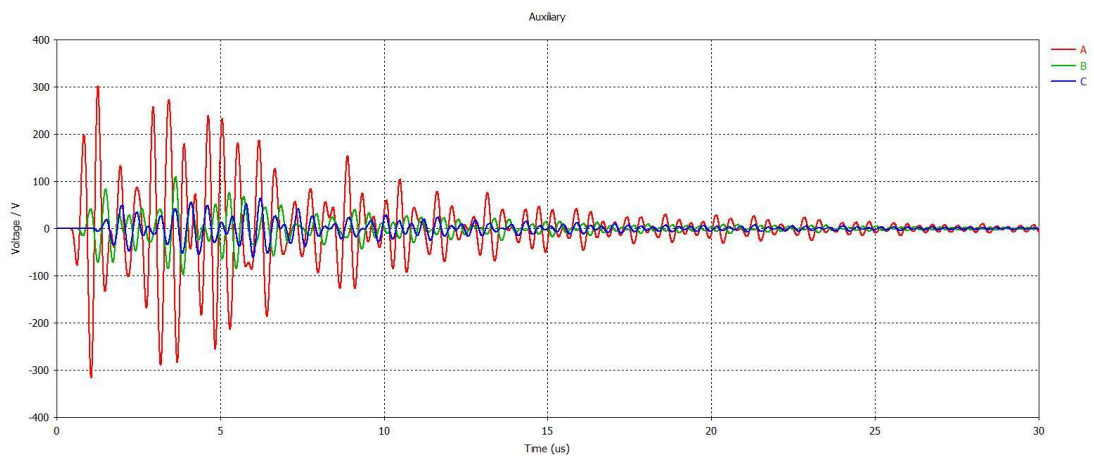


(γ)

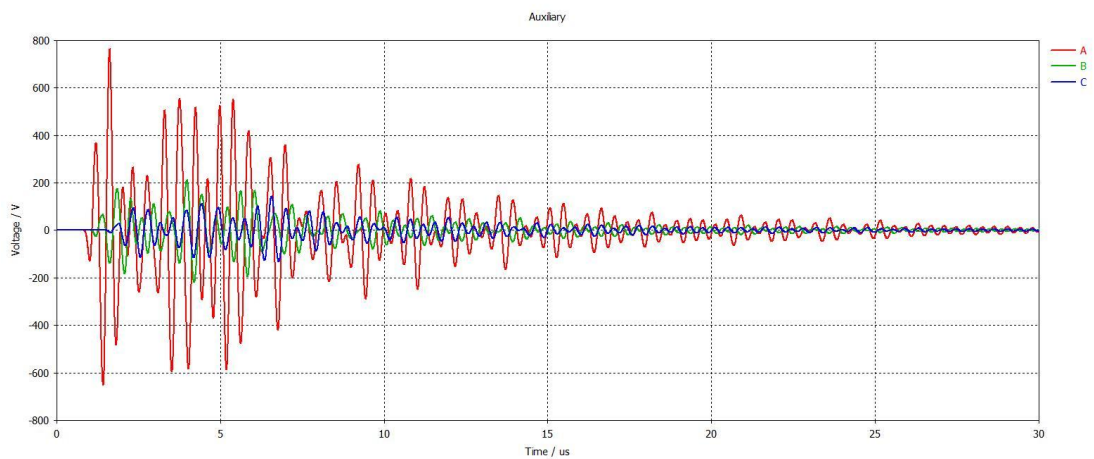
**Σχήμα 5.45:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα του μηχανοστασίου **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.



(α)



(β)

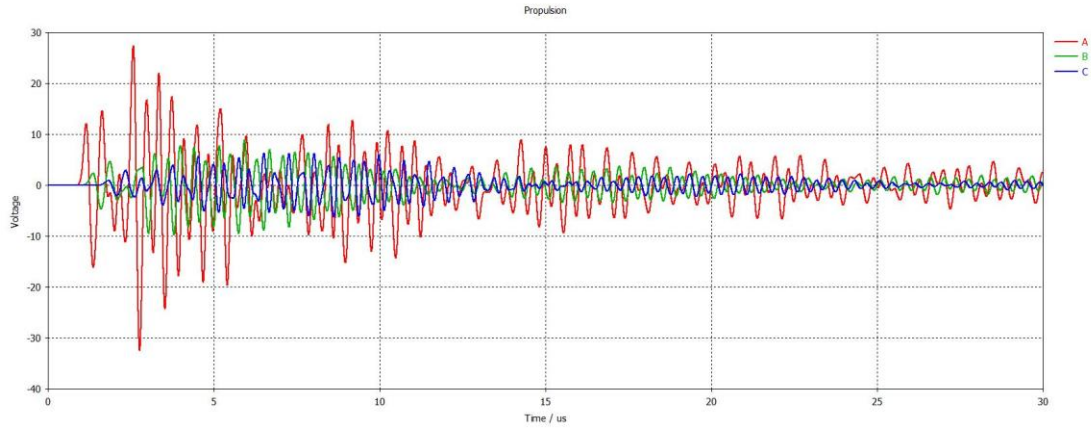


(γ)

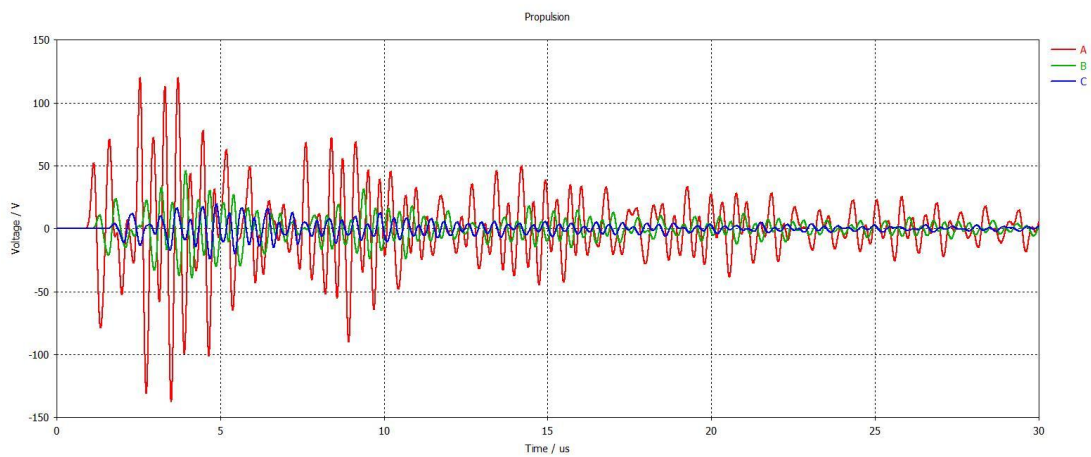
**Σχήμα 5.46:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα βοηθητικών του σκάφους **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

Αξιοσημείωτη περίπτωση αποτελεί ο πίνακας των βοηθητικών πρόωσης του Σχήματος 5.47, ο οποίος τροφοδοτεί ένα μεγάλης ισχύος επαγωγικό φορτίο στην πλώρη του πλοίου και παρά το μεγάλο μήκος καλωδίου (περίπου 150m) δέχεται μία αξιόλογη υπέρταση 300V για πλήγμα 0.25/100μs στη θέση A. Τέλος, ως μοναδικό καλώδιο εκτός γάστρας, το ομοαξονικό καλώδιο που τροφοδοτεί την κεραία A δέχεται τις υψηλότερες

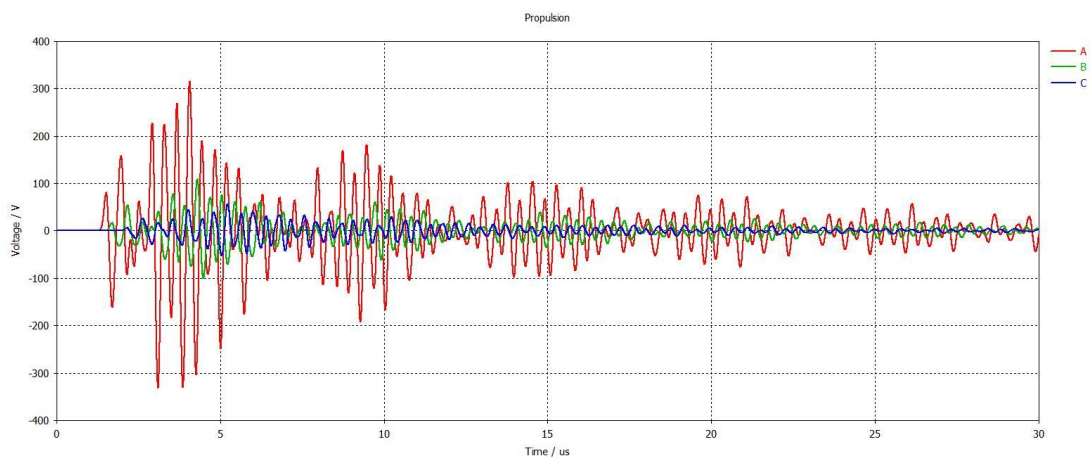
καταγεγραμμένες υπερτάσεις: 660V για πλήγμα 10/350μs στη θέση A με την οποία είναι συνδεδεμένο και αντιστοίχως περίπου 3kV για το πλήγμα 1/200μs και 4.5kV για το πλήγμα 0.25/100μs (Σχήμα 5.48). Υψηλές είναι οι υπερτάσεις και για τις υπόλοιπες θέσεις πλήγματος, ενώ πρόσθετο χαρακτηριστικό της μεταβατικής απόκρισης αυτού του καλωδίου είναι ότι οι υπερτάσεις φθίνουν πολύ γρήγορα, μέχρι περίπου τα 4μs.



(α)



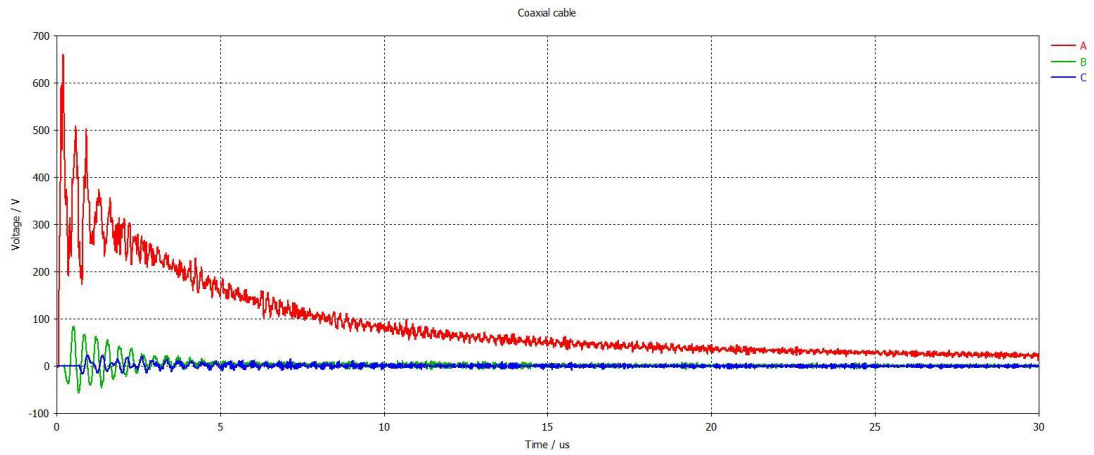
(β)



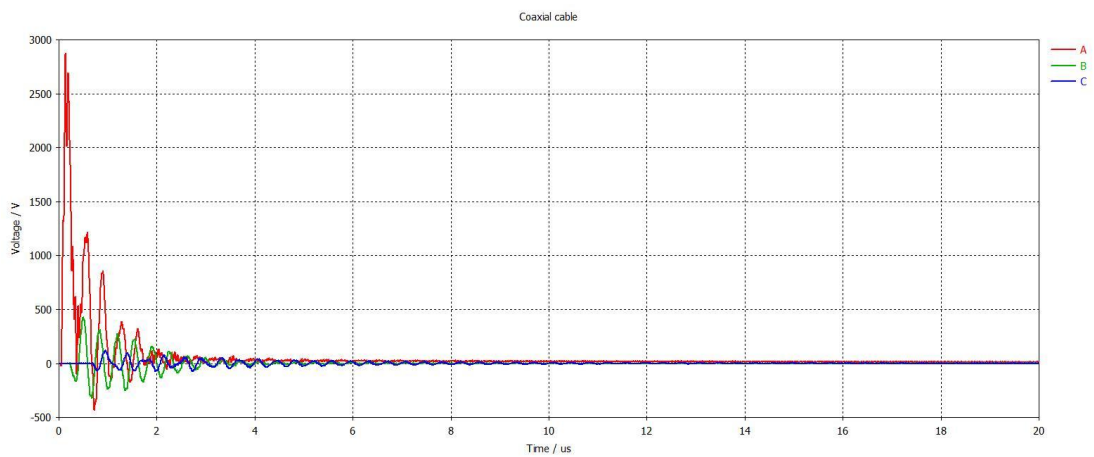
(γ)

**Σχήμα 5.47:** Επαγόμενες υπερτάσεις στον πίνακα βοηθητικών πρόωσης (α) για πλήγμα 10/350μs, (β) για πλήγμα 1/200μs και (γ) για πλήγμα 0.25/100μs.

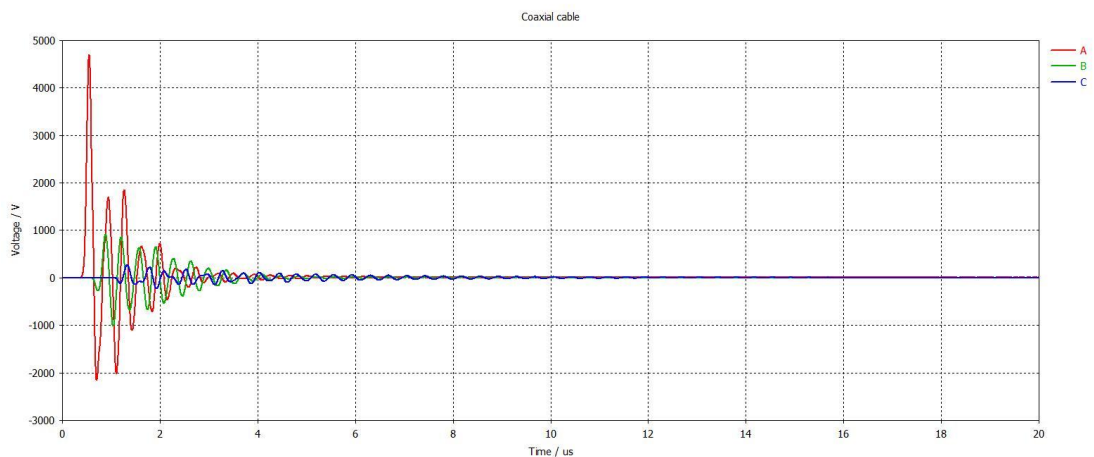




(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 5.48:** Επαγόμενες υπερτάσεις στο ομοαξονικό καλώδιο της κεραίας **(α)** για πλήγμα 10/350μs, **(β)** για πλήγμα 1/200μs και **(γ)** για πλήγμα 0.25/100μs.

### 5.3.3 Συμπεράσματα

Οι επαγόμενες υπερτάσεις που προέκυψαν από τα παραπάνω σενάρια προσομοιώσεων είναι σε αρκετές περιπτώσεις μεγαλύτερες από τα επίπεδα ονομαστικής τάσης λειτουργίας που ισχύουν στα διάφορα σημεία του εν λόγω ηλεκτρικού δικτύου, με

αποτέλεσμα να θέτουν σε κίνδυνο τη λειτουργία του τροφοδοτούμενου εξοπλισμού. Στο σύνολό τους, οι καταγραφόμενες υπερτάσεις είναι υψίσυχνες ταλαντώσεις με φθίνουσα περιβάλλουσα, που φτάνει στο 20%-25% της μέγιστης τιμής της περίπου στα 10μs και οι οποίες φθίνουν σχεδόν εξολοκλήρου μέχρι τα 30μs. Αναλόγως με τη χρονική στιγμή του πλήγματος και την ταχύτητα διάδοσής του οι τάσεις αυτές θα υπερτεθούν στο ημίτονο της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας των 50Hz (ή συνηθέστερα στα πλοία 60Hz). Η αξιολόγηση των υπερτάσεων (ως προς τη μέγιστη αιχμή που παρουσιάζουν) γίνεται στους εξής άξονες:

- 1) Κατά πόσον υπερβαίνουν την ονομαστική τάση λειτουργίας του εκάστοτε εξοπλισμού (για rms 440V: σύγκριση με 622V peak και για rms 115V: σύγκριση με 162V peak). Με δεδομένο ότι η υπέρθεση μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε γωνία του ημιτόνου της εναλλασσόμενης τάσης, η περίπτωση της υπέρθεσης στις 90° ή 270° -αναλόγως με την πολικότητα της μέγιστης επαγόμενης αιχμής- είναι πιο δυσμενής. Στην παρούσα ανάλυση γίνονται πιο συντηρητικές εκτιμήσεις, εξετάζοντας τις γωνίες 0° και ισοδύναμα 180°.
- 2) Κατά πόσον υπερβαίνουν το απαιτούμενο επίπεδο ελέγχου ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας του εξοπλισμού. Το δίκτυο του πλοίου είναι αγείωτο, τριών αγωγών με μονωμένο ουδέτερο. Εφόσον δεν υπάρχει αγωγός γείωσης, σύμφωνα με το IEC 60945 και το IEC 60533, απαιτείται αντοχή σε υπερτάσεις κυματομορφής 1.2/50μs πλάτους ±0.5kV, εφαρμοζόμενες line to line (δοκιμή surge) στη θύρα τροφοδοσίας του εξοπλισμού που εγκαθίσταται στο συγκεκριμένο πλοίο. .

Η ονομαστική τάση με την οποία γίνεται η αξιολόγηση του επιπέδου των υπερτάσεων δεν υπεισέρχεται στις προσομοιώσεις. Επομένως στο κομμάτι του εξοπλισμού της γέφυρας, όπου οι υπερτάσεις καθορίζονται κυρίως από την εγγύτητα με το σημείο πλήγματος, οι προκύπτουσες υπερτάσεις θα ήταν ακόμα πιο καταστροφικές σε καλώδια σήματος και ελέγχου που λειτουργούν σε πιο χαμηλή τάση ή με τη χρήση χαμηλότερου dc επιπέδου τροφοδοσίας.

Από τη συνολική επισκόπηση των αποτελεσμάτων επαληθεύθηκε η ανάπτυξη υψηλών τιμών επαγόμενων τάσεων κατά τη διάρκεια ενός κεραυνικού πλήγματος σε πλοίο, οι οποίες, κατά περίπτωση μπορεί κοντά σε ανοίγματα στο εσωτερικό του, όπως π.χ. η γέφυρα, να φθάνουν τα 2kV, αναλόγως με την εγγύτητα στη θέση πλήγματος, ενώ σε αγωγούς εκτεθειμένους στο εξωτερικό του να πλησιάζουν τα 5kV. Επομένως, θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω το ενδεχόμενο αναθεώρησης του επιπέδου δοκιμής που απαιτούν τα Πρότυπα IEC 60945 και IEC 60533, ώστε να διασφαλίζεται η ατρωσία του σχετικού εξοπλισμού, από 0.5kV L-N (ή 1kV L-PE), τουλάχιστον στο αμέσως επόμενο διακριτό επίπεδο ελέγχου, όπως αυτό ορίζεται στο Πρότυπο αναφοράς IEC 61000-4-5 [31], δηλαδή σε 1kV L-N (ή 2kV L-PE). Επιπλέον, η δοκιμή δε θα πρέπει να περιορίζεται σε θύρες τροφοδοσίας (AC και DC), αλλά να επεκταθεί η εφαρμογή της και σε θύρες σήματος.

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα, ενδεχομένως θα πρέπει να γίνει διαφοροποίηση του επιπέδου ελέγχου, αναλόγως με το σημείο εγκατάστασης του εξοπλισμού, κάτι που δεν προβλέπεται μέχρι στιγμής από τα Πρότυπα IEC 60945 και IEC 60533. Συγκεκριμένα, για ευαίσθητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό της γέφυρας θα μπορούσε να εξετασθεί η ατρωσία σε επίπεδο 2kV, ενώ για εξοπλισμό εκτεθειμένο στο κατάστρωμα, όπως π.χ. κεραιές, σε επίπεδο 4kV.

Ο χρόνος ανόδου της κυματομορφής επηρεάζει τις υπερτάσεις πολύ περισσότερο σε σχέση με την τιμή κορυφής του κεραυνικού ρεύματος, καθώς το πλήγμα 10/350μs, αν και με τετραπλάσια και διπλάσια τιμή ρεύματος (200kA έναντι 50kA και 100kA) επάγει υπερτάσεις έως και περίπου 10 φορές και 6 φορές χαμηλότερες σε σύγκριση με το πλήγμα 0.25/100μs και 1/200μs αντίστοιχα, οι οποίες μάλιστα υπερβαίνουν τα τεθέντα όρια σε αισθητά λιγότερες περιπτώσεις και προέρχονται κυρίως από τη θέση πλήγματος Α. Αντιθέτως, για τις υπερτάσεις λόγω του πλήγματος 1/200μs και πολύ περισσότερο λόγω του 0.25/100μs, αυτό συμβαίνει σε πολυάριθμα σημεία του δικτύου, όχι μόνο για τη θέση πλήγματος Α, αλλά και για τις θέσεις Β και C.

Η επίδραση της θέσης του πλήγματος κινείται στην ίδια τάξη μεγέθους για κάθε εξεταζόμενο ζυγό και για τα τρία είδη κυματομορφής κεραυνικού ρεύματος. Για τη συγκεκριμένη γεωμετρία πλοίου και χωροθέτηση ηλεκτρικού δικτύου, πλήγμα στη θέση Α δημιουργεί υπερτάσεις 3-4 φορές μεγαλύτερες από αυτές που οφείλονται σε πλήγμα στη θέση Β. Η διαφορά μεταξύ των θέσεων Β και C είναι της τάξης του 2 προς 1 και μειώνεται για τους πιο εσωτερικούς ζυγούς. Επίσης, διακρίνεται και για τα τρία είδη πλήγματος η χρονική υστέρηση της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος και της έναρξης της εμφανιζόμενης υπέρτασης για τις πιο απομακρυσμένες θέσεις Β και C.

Περνώντας στο εσωτερικό του πλοίου οι υπερτάσεις μειώνονται σε σύγκριση με τα ανοίγματα της γέφυρας και των υπόλοιπων χώρων, διότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι πρακτικά μηδενικό. Οφείλονται, συνεπώς, κατά κύριο λόγο στην αγωγή μέσα από την καλωδίωση και εξαρτώνται από το κυκλωματικό ισοδύναμο. Αύξηση της απόστασης μεταξύ ζυγού και φορτίου δεν είναι δεδομένο ότι θα προκαλέσει απόσβεση της υπέρτασης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το επαγωγικό φορτίο του πίνακα βοηθητικών πρόωσης. Η μετάδοση υπερτάσεων από τα πιο εκτεθειμένα φορτία της γέφυρας στον κύριο ζυγό εντός της γάστρας και η ανατροφοδότηση αυτών σε λιγότερο εκτεθειμένα φορτία των 440V οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, αν σχεδιαστεί εξολοκλήρου το ηλεκτρικό δίκτυο με την προσθήκη φορτίων τόσο των 115V, αλλά και των 440V στα υπόλοιπα επίπεδα και κυρίως ψηλότερα στη δομή J, θα ενισχυθούν οι υπολογιζόμενες υπερτάσεις.

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν συμπεράσματα σχετικά με τις απαιτήσεις και τα προτεινόμενα μέτρα επίτευξης θωράκισης του Προτύπου IEC 60533. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το κυρίαρχο συμπέρασμα είναι η ανάγκη για επανεξέταση και πιθανή αύξηση του επιπέδου της δοκιμής ατρωσίας σε υπερτάσεις κατά το Πρότυπο IEC 61000-4-5 από 0.5kV L-N τουλάχιστον σε 1kV L-N. Αξίζει, βέβαια, να επισημανθεί ότι η μορφή των υπερτάσεων με τις έντονες εναλλαγές πολικότητας απέχει από την κυματομορφή 1.2/50μs, η οποία -στον τομέα των δοκιμών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας- προσομοιώνει αργά μεταβατικά φαινόμενα υψηλού ενεργειακού περιεχομένου. Ωστόσο, η εμφάνιση της μέγιστης αιχμής σε χρόνο 1-2μs, η μορφή της περιβάλλουσας και το γεγονός ότι η συνολική ενέργεια του παλμού προσεγγίζει τη μεταφερόμενη ενέργεια από έναν διπλοεκθετικό παλμό, καθιστούν την εφαρμογή της κυματομορφής 1.2/50μs μια ικανοποιητική προσέγγιση.

Είναι γνωστό ότι σε εσωτερικά ηλεκτρικά δίκτυα οι επαγόμενες κεραυνικές υπερτάσεις έχουν τη μορφή της αποσβεννύμενης ταλάντωσης που παρατηρήθηκε και στις παραπάνω προσομοιώσεις, καθώς ενεργοποιούνται οι φυσικές ιδιοσυχνότητες συντονισμού των συστημάτων, προκαλώντας ταλαντώσεις με συχνότητες που ποικίλουν από 1-500kHz, με διαφορετικό πλάτος και μορφή κατά μήκος του συστήματος. Το φαινόμενο αυτό

αναπαράγεται από την κυματομορφή ελέγχου "ring wave" που ορίζεται στο Πρότυπο IEC 61000-4-12 [127]. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη δοκιμή δεν έχει τύχει ευρείας αποδοχής και δε συμπεριλαμβάνεται στα περισσότερα πρότυπα προϊόντος, μεταξύ των οποίων τα IEC 60945 και IEC 60533.

Για την πιο εμπειριστατωμένη αξιολόγηση των εμφανιζόμενων υπερτάσεων και τη σύγκρισή τους με τα επίπεδα ελέγχου της πρότυπης 1.2/50μs κυματομορφής, μπορεί να εφαρμοστεί η διαδικασία που προτείνεται στο IEC 60060-1 [88] για τον υπολογισμό των παραμέτρων μιας «πλήρους» πειραματικής κρουστικής τάσης (full lightning impulse voltage). Με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία μια κρουστική τάση με υπέρθεση αιχμής ή ταλάντωσης μετασχηματίζεται σε μια ισοδύναμη «καθαρή» διπλοεκθετική κυματομορφή, στην οποία έχει συνυπολογιστεί η συχνότητα και το πλάτος της αιχμής/ταλάντωσης. Ο αλγόριθμος αυτός σχετίζεται κυρίως με την αξιολόγηση εργαστηριακά παραγόμενων κρουστικών τάσεων που χρησιμοποιούνται για δοκιμές διηλεκτρικής αντοχής μονώσεων, ωστόσο μπορεί να βρει εφαρμογή, ειδικά σε περιπτώσεις, όπως οι υπερτάσεις του ομοαξονικού καλωδίου του Σχήματος 5.48 που προσεγγίζουν την εικόνα διπλοεκθετικής με υπέρθεση αποσβεννύμενης ταλάντωσης.

Όσον αφορά σε καλώδια εκτεθειμένα στο εξωτερικό περιβάλλον του καταστρώματος, επιβεβαιώθηκε η ανάγκη για χρήση θωράκισης, αφού οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις είναι υψηλές, ακόμα και για το θωρακισμένο ομοαξονικό καλώδιο της κεραίας. Ειδικά για τέτοια καλώδια κατηγορίας 3 (Πίνακας 1.11) θεωρείται ότι διπλή θωράκιση ή εγκατάσταση σε ειδικό σωλήνα προσφέρει προστασία. Ωστόσο, εάν το εν λόγω καλώδιο είναι συνδεδεμένο με το σώμα της κεραίας, που λειτουργεί ως θέση πλήγματος και διαρρέεται από το κεραυνικό ρεύμα, η θωράκιση δεν είναι ικανή να αποτρέψει τις αγόμενες υπερτάσεις στο εσωτερικό του καλωδίου και θα πρέπει με την εγκατάσταση κατάλληλου αλεξικεραύνου να αποτραπεί το κεραυνικό πλήγμα στην κεραία. Λαμβάνοντας υπόψη τα πολύ χαμηλά επίπεδα σήματος που φέρουν τα καλώδια κατηγορίας 1, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.11 (0.1mV-500mV), γίνεται αντιληπτό ότι οι επαγόμενες υπερτάσεις ακόμα και για τις πιο απομακρυσμένες θέσεις πλήγματος αποτελούν μη ανεκτή διαταραχή.

Για τα καλώδια της κατηγορίας 2, όπως μπορούν να θεωρηθούν ορισμένα καλώδια στο χώρο της γέφυρας, προτείνεται η χρήση θωρακισμένων μονών αγωγών και θωρακισμένων συνεστραμμένων ζευγών. Πράγματι, με τη χρήση μονών αγωγών και συνεστραμμένων ζευγών χωρίς θωράκιση προέκυψαν ιδιαίτερα υψηλές υπερτάσεις. Επιπλέον, τα καλώδια ισχύος και φωτισμού της κατηγορίας 3 που βρίσκονται πάνω από το κατάστρωμα θα πρέπει να είναι θωρακισμένα και συνεστραμμένα, ωστόσο σε περιπτώσεις πινάκων των 440V όπως το μαγειρείο και οι χώροι ενδιαίτησης όπου χρησιμοποιήθηκαν θωρακισμένα πολυπολικά καλώδια, προέκυψαν και πάλι υψηλές υπερτάσεις λόγω της εγγύτητας με ανοίγματα. Αντίστοιχα, σε καλώδια κατηγορίας 3 κάτω από το κατάστρωμα τα οποία επιτρέπεται να είναι μη θωρακισμένα (Πίνακας 1.11), ακόμα και η χρήση θωράκισης δεν επαρκεί για να αποτρέψει την αγόμενη διάδοση υπερτάσεων. Άλλωστε το ίδιο το IEC 60533 αναγνωρίζει ότι εντός των καλωδίων δεν αναμένεται ιδιαίτερη εξασθένιση των υπερτάσεων, γεγονός που αναδείχθηκε και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στο IEC 60533 γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό της κατηγορίας D, ο οποίος παράγει ταλαντώσεις και συντονισμούς λόγω αυτεπαγωγών και προτείνεται η εγκατάσταση απαγωγέων υπερτάσεων κοντά στο εκάστοτε επαγωγικό φορτίο. Πράγματι, ο έντονος

επαγωγικός χαρακτήρας φορτίων αποδείχθηκε ικανός να ενισχύσει τις υπερτάσεις ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις εντός της γάστρας.

Η εγκατάσταση ενός συστήματος εσωτερικής αντικεραυνικής προστασίας με την τοποθέτηση προστατευτικών διατάξεων έναντι υπερτάσεων (SPDs) σε κρίσιμα φορτία και στους βασικούς ζυγούς και υποπίνακες αναδεικνύεται ως απαραίτητη λύση έναντι υπερτάσεων που επάγονται από τα ανοίγματα πάνω από το κατάστρωμα και μέσω της καλωδίωσης φτάνουν μέχρι εσωτερικά σημεία του ηλεκτρικού δικτύου.

Στην περίπτωση συμπαγώς γειωμένου δικτύου θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι υπερτάσεις που διαδίδονται αγόμενα εντός του ηλεκτρικού δικτύου λόγω ανύψωσης του δυναμικού της γάστρας, μελέτη η οποία δεν καλύπτεται με την παρούσα ηλεκτρομαγνητική προσέγγιση. Η μοντελοποίηση της απόκρισης του Μ/Σ σε γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα, είναι ανάλυση ιδιαίτερα πολύπλοκη [128] που ξεφεύγει από τους σκοπούς της εργασίας. Σε επόμενο στάδιο θα πρέπει να συνδυασθεί με λεπτομερέστερη αναπαράσταση της γεννήτριας με ένα πιο σύνθετο μοντέλο που θα περιλαμβάνει π.χ. την υπομεταβατική της αντίδραση. Αυτή η ανάλυση σε συνδυασμό με την πλήρη σχεδίαση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου θα δώσει πιο αξιόπιστη απάντηση κατά πόσον είναι σωστή η εξαίρεση των μετασχηματιστών και κυρίως των γεννητριών (ανήκουν στον εξοπλισμό κατηγορίας D) από τις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας σύμφωνα με το IEC 60533 (Πίνακας 1.9).



# Συμβολή, πρωτοτυπία και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

## 6.1 Σύνοψη και συμβολή της διατριβής

Στο πλαίσιο της διατριβής πραγματοποιήθηκε αρχικά μια καταγραφή της υπάρχουσας ερευνητικής δραστηριότητας στον τομέα της αντικεραυνικής προστασίας πλοίων, η οποία χαρακτηρίζεται περιορισμένη, κυρίως όσον αφορά σε πειραματικό επίπεδο. Διαπιστώθηκε ότι η αλληλεπίδραση του κεραυνικού πλήγματος με την κατασκευή ενός πλοίου είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο ζήτημα, η μελέτη του οποίου έχει κατά κύριο λόγο περιοριστεί σε διατύπωση πρακτικών μέτρων για την επίτευξη αντικεραυνικής προστασίας, με έμφαση σε πλοία μη μεταλλικού σκελετού.

Επίσης, έγινε μια επισκόπηση των Προτύπων για τις δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ατρωσίας, στις οποίες θα πρέπει να υποβάλλεται εξοπλισμός που εγκαθίσταται σε πλοία, αλλά και των βασικών απαιτήσεων ορισμένων Κανονισμών και διεθνών Προτύπων για την εγκατάσταση ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία, από την οποία αναδείχθηκαν αρκετές επιμέρους ασυμφωνίες. Ένα γενικό συμπέρασμα στο οποίο συγκλίνουν οι περισσότεροι Κανονισμοί, στην περίπτωση πλοίων μεταλλικού σκελετού, είναι η δυνατότητα αντιμετώπισης του πλοίου ως μίας αυτοπροστατευόμενης κατασκευής, χωρίς την ανάγκη πρόσθετων μέτρων αντικεραυνικής προστασίας, σε περίπτωση που εξασφαλίζεται η ηλεκτρική συνέχεια και υπάρχουν υπερκείμενες δομές επαρκούς ύψους, χωρίς ωστόσο να διευκρινίζεται η θεωρητική μέθοδος προσδιορισμού αυτής της ζώνης προστασίας.

Για την πειραματική διερεύνηση της κατανομής του κεραυνικού ρεύματος στη δομή ενός πλοίου είναι απαραίτητη η σχεδίαση ενός πειράματος κλίμακας. Μετά από μια εισαγωγή στη Θεωρία της Ομοιότητας και τη Διαστατική Ανάλυση μελετήθηκαν σε προκαταρκτικό στάδιο οι απαιτήσεις μιας τέτοιας πειραματικής διαδικασίας με μετρήσεις της μεταβατικής αντίστασης ταινιών γείωσης διαφόρων μεγεθών εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής με έγχυση κρουστικού ρεύματος για διάφορα επίπεδα αγωγιμότητας νερού. Από τη σύγκριση των πειραματικών λόγων κλίμακας των διαφόρων σεναρίων μέτρησης με αυτούς που προβλέπει η Θεωρία της Ομοιότητας διαπιστώθηκε η ανάγκη για υποβιβασμό της κλίμακας του χρόνου. Λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο χώρο του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων που επιβάλλει γεωμετρικούς λόγους κλίμακας της τάξης του 1:100-1:200, απαιτείται αναπαράσταση των κυματομορφών 8/20μs και 10/350μs με κυματομορφές που έχουν χρόνο ανόδου της τάξης των ns. Το εν λόγω πείραμα δεν υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής, ωστόσο η ανάλυση μπορεί να αποτελέσει τη θεωρητική βάση για τη μελλοντική του εκτέλεση.

Το επόμενο σκέλος της πειραματικής διερεύνησης αφορά το στάδιο της σύλληψης του κεραυνού από τη δομή ενός πλοίου. Με δεδομένη την προαναφερθείσα χαλαρή πρόβλεψη των κανονισμών, η οποία επιτρέπει κατά περίπτωση στις δομές του πλοίου να λειτουργήσουν απευθείας ως αλεξικέραυνο, διενεργήθηκαν επιβολές κρουστικής τάσης σε ένα υπό κλίμακα μεταλλικό μοντέλο πλοίου, προκειμένου να μελετηθούν οι υπάρχουσες

κατασκευές του πλοίου ως προς τη σύλληψη του κεραυνού. Οι πειραματικές τιμές της μέσης ακτίνας σύλληψης και της μέσης απόστασης πρόσκρουσης που προέκυψαν από τις κατανομές πιθανότητας σύλληψης κάθε εξεταζόμενης ράβδου συγκρίθηκαν στη συνέχεια με τις θεωρητικά αναμενόμενες τιμές βάσει εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης της ζώνης προστασίας που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

Για την υπάρχουσα αρχική γεωμετρία χωρίς την προσθήκη αλεξικεραύνων διαπιστώθηκε ότι οι χαμηλότερες κατασκευές βρίσκονται τοποθετημένες σε οριζόντιες αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες από τις πειραματικές ακτίνες σύλληψης που αντιστοιχούν σε 50% ή ακόμα και σε 97.5% πιθανότητα σύλληψης της εκκένωσης από την αμέσως ψηλότερη γειτονική ράβδο. Αποδείχθηκε έτσι και πειραματικά ότι η δομή ενός πλοίου δε θα πρέπει να θεωρείται εκ των προτέρων προστατευμένη και θα πρέπει να εφαρμόζεται ανάλυση για την τοποθέτηση αλεξικεραύνων που θα εξασφαλίζουν την απαιτούμενη περιοχή προστασίας.

Όσον αφορά στη θεωρητική μέθοδο προσδιορισμού αυτής της ζώνης, τα εμπειρικά μοντέλα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων υπερεκτιμούν, τόσο την ακτίνα σύλληψης όσο και την απόσταση πρόσκρουσης, με την απόκλιση αυτή να είναι ιδιαίτερα αισθητή για την ακτίνα σύλληψης σε περιοχές μεταξύ ισουψών ράβδων. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σε ορισμένες περιπτώσεις την ανεπάρκεια της, προτεινόμενης από τα Πρότυπα, μεθόδου της κυλιόμενης σφαίρας, αλλά και τη γενικευμένη ικανοποιητική επίδοση των στατιστικών μοντέλων, σε συνδυασμό με την έντονα στατιστική φύση του φαινομένου της σύλληψης του κεραυνού και την επίδραση των φαινομένων γειννίαςης.

Υπολογισμοί της κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της κρίσιμης απόστασης πρόσκρουσης μέσω προσομοιώσεων έδειξαν την έντονη ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου υπό συνθήκες γειννίαςης. Επιβεβαιώθηκε, επίσης, η έντονη μείωση της ακτίνας σύλληψης λόγω φαινομένων γειννίαςης στην αρνητική πολικότητα και σε γειτονικές δομές, όπου ο λόγος του ύψους της προστατευόμενης ακίδας ( $h_p$ ) προς το ύψος του αλεξικεραύνου ( $h_m$ ) υπερβαίνει το 0.6. ενώ διερευνήθηκε και η εξάρτηση των φαινομένων γειννίαςης από γεωμετρικούς παράγοντες. Λαμβάνοντας υπόψη την απαίτηση για αδιάλειπτη παροχή ισχύος και την κρισιμότητα του υπό προστασία εξοπλισμού (κεραίες τηλεπικοινωνιών, εξοπλισμός ναυσιπλοΐας, πρόωσης κλπ.) προτείνεται η χρήση του στατιστικού μοντέλου που ενσωματώνει την πιθανότητα σύλληψης. Για γεωμετρικές συνθήκες, όπου μπορούν να αγνοηθούν τα φαινόμενα γειννίαςης ( $h_p/h_m \leq 0.6$ ) ενδείκνυται η χρήση του απλού στατιστικού μοντέλου, με γνώμονα την ακτίνα σύλληψης που αντιστοιχεί σε 50% πιθανότητα σύλληψης. Στην αντίθετη περίπτωση, προτείνεται και πάλι η χρήση του απλού στατιστικού μοντέλου, αυτή τη φορά στη βάση ακτίνας σύλληψης που αντιστοιχεί σε 97.5% πιθανότητα σύλληψης, καθώς δεν έχει διατυπωθεί μια εκδοχή του στατιστικού μοντέλου με φαινόμενα γειννίαςης για όλες τις δυνατές περιπτώσεις απόστασης διαχωρισμού και λόγου υψών μεταξύ των εξεταζόμενων κατασκευών.

Στη συνέχεια, με αφορμή τα ελλiptή στατιστικά στοιχεία σχετικά με περιστατικά κεραυνικών πληγμάτων σε πλοία, σχεδιάστηκαν οκτώ ενδεικτικά μοντέλα πλήρους κλίμακας πλοίων διαφόρων κατηγοριών (στρατιωτικά, πετρελαιοφόρα, μεταφοράς φορτίου κλπ.) στο περιβάλλον του λογισμικού WinIGS και πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί του αναμενόμενου αριθμού των κεραυνικών πληγμάτων σε ετήσια βάση στη δομή του κάθε πλοίου με πολυάριθμους συνδυασμούς μοντέλου σύλληψης και στατιστικής κατανομής του κεραυνικού ρεύματος για ένα συντηρητικό επίπεδο κεραυνικής στάθμης 30. Συνολικά, οι



διάφοροι συνδυασμοί παράγουν ένα εύρος εκτιμώμενων πληγμάτων, με το λόγο της μέγιστης προς την ελάχιστη εκτίμηση να κυμαίνεται από 1.7 έως 2.2, αναλόγως με την εξεταζόμενη περίπτωση πλοίου, ενώ παράλληλα είναι εμφανές ότι το μοντέλο σύλληψης έχει πολύ πιο έντονη επίδραση σε σύγκριση με την κατανομή ρεύματος. Με αναγωγή των αποτελεσμάτων σε πολλαπλάσια κεραυνική στάθμη 90, που αντιστοιχεί σε ακτογραμμές με έντονη κεραυνική δραστηριότητα, η συχνότητα εμφάνισης πληγμάτων ποικίλει, από 1 κάθε 3 χρόνια έως 1.5 κάθε 2 χρόνια, πάντα εξαρτώμενη από την εξεταζόμενη γεωμετρία πλοίου. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένδειξη ότι ένα πλοίο είναι πιθανό να υποστεί κεραυνοπληξία σε ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα της τάξης των 2-3 ετών.

Η κατανομή των παραπάνω υπολογισμών ανά περιοχές της επιφάνειας του πλοίου κατηγοριοποιημένες αναλόγως με τη γεωμετρική τους θέση και τη λειτουργία τους μελετήθηκε αναλυτικότερα. Με τα γενικευμένα μοντέλα σύλληψης, που λαμβάνουν υπόψη τους το ύψος της δομής, το μεγαλύτερο ποσοστό των πληγμάτων (μέχρι και 99%) καταλήγει στο επίπεδο των ιστών που βρίσκονται στα ψηλότερα σημεία του πλοίου, ενώ ακολουθούν σε ποσοστά οι χώροι-υπερκατασκευές και ο κρίσιμος εξοπλισμός, ο οποίος θεωρήθηκε ότι δε βρίσκεται εγκατεστημένος μόνο στους ψηλότερους ιστούς, αλλά και σε χαμηλότερα σημεία. Αντιθέτως, τα ηλεκτρογεωμετρικά μοντέλα σύλληψης μειώνουν αυτά τα ποσοστά, αποδίδοντας κεραυνικά πλήγματα ακόμα και στο επίπεδο του καταστρώματος και στο περιμετρικό του κιγκλίδωμα. Με οπτικοποιημένη αποτύπωση της Κυλιόμενης Σφαιράς στην επιφάνεια των πλοίων εντοπίστηκαν τα σημεία που είναι εκτεθειμένα σε κεραυνικό πλήγμα 3kA και 30kA. Οι κεραίες, οι ψηλότεροι ιστοί, αλλά και οι οροφές των παρακείμενων χώρων διαμονής και ναυσιπλοΐας αναδείχθηκαν ως εκτεθειμένα σημεία, όχι μόνο για το πλήγμα των 30kA, αλλά και για το πλήγμα των 3kA, το οποίο οδηγεί στη μέγιστη δυνατή εκτεθειμένη επιφάνεια, περιλαμβάνοντας ακόμα και περιοχές του καταστρώματος.

Τα κεραυνικά πλήγματα που καταλήγουν σε επιλεγμένες κρίσιμες κεραίες κάθε μοντέλου υπολογιζόμενα με τα ηλεκτρογεωμετρικά και γενικευμένα μοντέλα των παραπάνω προσομοιώσεων βρίσκονται εντός του εύρους τιμών που προκύπτει με εφαρμογή του στατιστικού μοντέλου για 2.5%, 50% και 97.5% πιθανότητα σύλληψης, με την εγγύτητα των αποτελεσμάτων να εξαρτάται και από το επιλεγμένο επίπεδο αναφοράς. Συγκεκριμένα, για δομές και κεραίες που βρίσκονται κοντά σε ακραία σημεία, όπως η πλώρη και η πρύμνη θα πρέπει να χρησιμοποιείται η ίσαλος γραμμή, ενώ για πιο κεντρικές δομές είναι κατάλληλη η χρήση του καταστρώματος ως αναφορά.

Στη βάση της ικανοποιητικής ακρίβειας που επέδειξε το στατιστικό μοντέλο και για τον υπολογισμό των κεραυνικών πληγμάτων, διαμορφώθηκε μία διαδικασία ανάλυσης θωράκισης προσαρμοσμένη στους ιστούς ενός πλοίου, με δυνατότητα επιλογής ως προς το συνυπολογισμό των φαινομένων γειννίας και ως προς την πιθανότητα σύλληψης του αλεξικεραύνου (τυπική ανάλυση: 50% ή συντηρητική ανάλυση: 97.5%). Η διαδικασία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των πληγμάτων που καταλήγουν σε έναν κρίσιμο ιστό είτε λόγω έλλειψης αλεξικεραύνου, είτε λόγω σφάλματος θωράκισης από έναν ήδη υπάρχοντα ψηλότερο ιστό, υπολογίζοντας τον κατάλληλο συνδυασμό οριζόντιας θέσης και ύψους για το νέο ιστό ή το πρόσθετο ύψος πάνω από τον υπάρχοντα ιστό, αντίστοιχα. Με εφαρμογή της διαδικασίας σε βασικές κεραίες των εξεταζόμενων μοντέλων πλοίων προσδιορίστηκε το απαιτούμενο αλεξικέραυνο για τον ψηλότερο ιστό, ενώ από τον έλεγχο της ήδη υπάρχουσας γεωμετρίας χαμηλότερων ιστών προέκυψαν, κατά κύριο λόγο, περιπτώσεις

ελλιπούς θωράκισης για τις οποίες υπολογίστηκε το απαιτούμενο πρόσθετο ύψος και ορισμένες μεμονωμένες περιπτώσεις επιτυχούς θωράκισης.

Περνώντας από τη μελέτη του φαινομένου της σύλληψης του κεραυνού και του συστήματος εξωτερικής αντικεραυνικής προστασίας στις επιπτώσεις του πλήγματος στο ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, το πλήρους κλίμακας πλοίο που έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του μεταλλικού υπό κλίμακα μοντέλου σχεδιάσθηκε στο περιβάλλον του προγράμματος ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης CST Studio Suite και υλοποιήθηκαν διάφορα σενάρια κεραυνοπληξίας μεταβάλλοντας τη θέση και την κυματομορφή του πλήγματος. Επίσης, τοποθετήθηκαν στην τρισδιάστατη δομή του πλοίου βασικά τμήματα της καλωδίωσης και αξιοποιώντας τη δυνατότητα για κυκλωματική συν-προσομοίωση υπολογίστηκαν οι επαγόμενες υπερτάσεις σε κρίσιμα σημεία του δικτύου, όπως τριφασικές παροχές πινάκων, αλλά και μονοφασικά φορτία της γέφυρας. Το αναπτυσσόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι ιδιαίτερα ισχυρό δικαιολογώντας τις επαγόμενες υπερτάσεις, οι οποίες, πέρα από τα εκτεθειμένα στο ακτινοβολούμενο πεδίο σημεία της γέφυρας και τα παράθυρα, διαδίδονται μέσω της καλωδίωσης στο εσωτερικό της γάστρας, ακόμα και σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Οι μέγιστες τιμές των υπερτάσεων που καταγράφονται είναι για το πλήγμα στην κεραία τηλεπικοινωνιών στην οροφή της γέφυρας και κατά περίπτωση μπορεί κοντά στα ανοίγματα της γέφυρας, να φθάνουν τα 2kV, ενώ σε αγωγούς εκτεθειμένους στο εξωτερικό του πλοίου να πλησιάζουν τα 5kV. Χρήζει, επομένως, εκτενέστερης μελέτης το ενδεχόμενο να αυξηθεί το επίπεδο δοκιμής των 0.5kV L-N (ή 1kV L-PE), που απαιτούν τα πρότυπα IEC 60945 και IEC 60533, τουλάχιστον σε 1kV L-N (ή 2kV L-PE), ώστε να διασφαλίζεται η ατρωσία του εξοπλισμού.

Ο χρόνος ανόδου της κυματομορφής φάνηκε να επηρεάζει περισσότερο το μέγεθος των υπερτάσεων σε σύγκριση με το κεραυνικό ρεύμα, καθώς για το πρωτεύον 10/350μs πλήγμα των 200kA προέκυψαν υπερτάσεις, οι οποίες υπερέβαιναν την ονομαστική τάση του δικτύου μόνο σε περιπτώσεις πλήγματος στην κεραία της γέφυρας, ενώ για το δευτερεύον πλήγμα 0.25/100μs των 50kA προέκυψαν, όχι μόνο στη γέφυρα, αλλά και στο εσωτερικό της γάστρας, πολύ μεγαλύτερες υπερτάσεις για όλες τις θέσεις πλήγματος. Ένας βασικός παράγοντας είναι επίσης η κυκλωματική συμπεριφορά των φορτίων, καθώς φορτία έντονα επαγωγικού χαρακτήρα υφίστανται υψηλότερες υπερτάσεις. Τέλος, επιβεβαιώθηκε ότι είναι απαραίτητη η χρήση θωρακισμένων καλωδίων, ειδικά σε εκτεθειμένες περιοχές, όπως η γέφυρα ή σε καλώδια που φέρουν πολύ ασθενή σήματα, ωστόσο αποδείχθηκε ότι δεν είναι αρκετή για την καταστολή αγόμενων υπερτάσεων. Κάτι τέτοιο απαιτεί τη σωστή επιλογή και την εκτεταμένη εγκατάσταση σε κατάλληλα σημεία προστατευτικών διατάξεων έναντι υπερτάσεων.

## 6.2 Πρωτοτυπία διατριβής

Η πρωτοτυπία της παρούσας πρότασης διδακτορικής διατριβής μπορεί εν συντομία να συνοψιστεί στα ακόλουθα:

- Συγκριτική αντιπαραβολή των προβλεπόμενων από τους ισχύοντες Κανονισμούς απαιτήσεων αντικεραυνικής προστασίας σε πλοία και επισήμανση ασυμφωνιών και ελλείψεων. Ειδικότερα, όσον αφορά στα πλοία μεταλλικού σκελετού υπογραμμίστηκε η έλλειψη σαφούς απαίτησης για εγκατάσταση αλεξικεραύνων σε όλες τις περιπτώσεις γεωμετρίας, αλλά και η έλλειψη προτεινόμενης μεθόδου για τον καθορισμό της ζώνης προστασίας του αλεξικεραύνου.
- Διατύπωση βασικών αναγκών σε εργαστηριακό εξοπλισμό και χώρο για την εκτέλεση ενός πειράματος έγχυσης κρουστικού ρεύματος σε υπό κλίμακα μοντέλο πλοίου εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής. Στην παρούσα φάση, το εν λόγω πείραμα δεν πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής για λόγους τεχνικών δυσκολιών και κόστους. Ωστόσο, η προκαταρκτική διερεύνηση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, μπορεί να αποτελέσει το υπόβαθρο για τη μελλοντική του εκτέλεση.
- Διεξαγωγή πειραμάτων κλίμακας με κρουστική τάση σε μεταλλικό μοντέλο πλοίου για τη διερεύνηση της σύλληψης του κεραυνού. Διαπιστώθηκε έντονη υπερεκτίμηση της ζώνης προστασίας που σχηματίζουν οι υπάρχουσες σύνθετες δομές ενός πλοίου από εμπειρικά μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας, αλλά και η ανάγκη για εγκατάσταση αλεξικεραύνων, καθώς οι πειραματικές τιμές της μέσης ακτίνας σύλληψης προέκυψαν, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, μικρότερες από τις οριζόντιες αποστάσεις μεταξύ των υπερδομών του μοντέλου.
- Με την ικανοποιητική επίδοση ενός στατιστικού μοντέλου που ενσωματώνει την πιθανότητα σύλληψης και τα φαινόμενα γειννίας αναδείχθηκε η ανάγκη για τη συνεκτίμηση αυτών των παραγόντων, ώστε να επιτευχθεί πιο ακριβής υπολογισμός της ζώνης προστασίας στις δομές ενός πλοίου, όπου διαπιστώθηκε ότι κυριαρχούν τα φαινόμενα γειννίας.
- Υπολογισμός των αναμενόμενων κεραυνικών πληγμάτων στη δομή οκτώ πλοίων διαφορετικών κατηγοριών. Οι εκτιμήσεις για περιοχές έντονης κεραυνικής δραστηριότητας κυμαίνονται από 1 πλήγμα κάθε τρία χρόνια έως 1.5 πλήγμα κάθε 2 χρόνια. Η διερεύνηση της επίδρασης του μοντέλου σύλληψης και της στατιστικής κατανομής του κεραυνικού ρεύματος ανέδειξε ότι ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη εκτίμηση κυμαίνεται από 1.7 έως 2.2. Διαπιστώθηκε ότι η απόκλιση αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί υιοθετώντας το εύρος τιμών που παράγεται από το στατιστικό μοντέλο για διαφορετικές πιθανότητες σύλληψης.
- Με διερεύνηση της κατανομής των πληγμάτων στις περιοχές του πλοίου αναδείχθηκαν όχι μόνο κρίσιμοι ιστοί/κεραίες ως ευάλωτες περιοχές πλήγματος, αλλά κατά περίπτωση και το κατάστρωμα και οι οροφές των χώρων ναυσιπλοΐας.
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την εφαρμογή ανάλυσης θωράκισης στους ιστούς ενός πλοίου, με σκοπό τη στοχευμένη προστασία κρίσιμων δομών/ιστών που φέρουν εξοπλισμό. Παρέχεται αναλυτικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας με εναλλακτικές επιλογές όσον αφορά στα φαινόμενα γειννίας και στην αυστηρότητα των αποτελεσμάτων. Με παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου στα μοντέλα πλοίων εντοπίστηκαν συγκεκριμένες περιπτώσεις αστοχίας της θωράκισης από την

υπάρχουσα γεωμετρία και προτάθηκε αλεξικέραυνο ενδεδειγμένου ύψους και θέσης εγκατάστασης.

- Δημιουργία τρισδιάστατων πεδιακών μοντέλων προσομοίωσης της μεταλλικής γάστρας ενός πλοίου κατά τη διάρκεια κεραυνοπληξίας και μελέτη των αναπτυσσόμενων ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών και κυρίως των επαγόμενων υπερτάσεων στην καλωδίωση του πλοίου, με τη βοήθεια κατάλληλου πακέτου προσομοίωσης.
- Με υλοποίηση διαφόρων σεναρίων θέσης και κυματομορφής του πλήγματος διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ πιο έντονη η επίδραση του χρόνου ανόδου της κυματομορφής και ότι πλήγμα στην κεραία της γέφυρας επιφέρει τις μέγιστες υπερτάσεις.
- Ανάδειξη της έντονης σύζευξης και διάδοσης των υπερτάσεων σε μη εκτεθειμένες περιοχές στο εσωτερικό της γάστρας λόγω αγωγής μέσω της καλωδίωσης ακόμα και με χρήση θωρακισμένων καλωδίων.
- Ανάδειξη της αναγκαιότητας για χρήση διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων (SPDs), προκειμένου να κατασταλούν οι αναπτυσσόμενες υπερτάσεις, οι οποίες, κατά περίπτωση, μπορεί να φτάνουν τα 2kV για εσωτερικούς αγωγούς και τα 5kV για εξωτερικούς αγωγούς του πλοίου.
- Πρόταση για επανεξέταση με ενδεχόμενη αύξηση του επιπέδου ελέγχου της ατρωσίας σε υπερτάσεις (surges IEC 61000-4-5) εξοπλισμού που εγκαθίσταται στα πλοία, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των IEC 60945 και IEC 60533, από 0.5kV L-N (ή 1kV L-PE) τουλάχιστον σε 1kV L-N (ή 2kV L-PE) ή ακόμα και σε 2kV L-N (ή 4kV L-PE), για κάθε τύπο καλωδίων και τροφοδοσίας (AC και DC καλώδια τροφοδοσίας και καλώδια σημάτων).

### 6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής μπορεί να επεκταθεί μελλοντικά με την περαιτέρω διερεύνηση των παρακάτω ζητημάτων:

- Διεξαγωγή πειραμάτων κρουστικής τάσης σε περισσότερα διάκενα και σε διαφορετικά υπό κλίμακα μοντέλα, ώστε να μελετηθούν τα κανονικοποιημένα ύψη και οι κανονικοποιημένες τιμές της ακτίνας σύλληψης και της απόστασης πρόσκρουσης σε μεγαλύτερο εύρος τιμών και εν γένει να διερευνηθούν περισσότερες περιπτώσεις επίδρασης των φαινομένων της γειννίαςης.
- Υιοθετώντας υποβιβασμό της κλίμακας του χρόνου σύμφωνα με το γεωμετρικό λόγο κλίμακας, διεξαγωγή πειράματος έγχυσης κρουστικού ρεύματος κατάλληλης κυματομορφής σε υπό κλίμακα δοκίμιο πλοίου εντός ηλεκτρολυτικής δεξαμενής με τις απαιτούμενες διαστάσεις.
- Αναλυτικότερη σχεδίαση και επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου του πλοίου στο τρισδιάστατο μοντέλο πεδιακής προσομοίωσης, ώστε να καλύπτει όλη την έκταση της γάστρας και τα επίπεδα των υπερκατασκευών πάνω από το κατάστρωμα και να είναι πλήρης η αλληλεπίδραση και η συμβολή στις αναπτυσσόμενες υπερτάσεις όλων των σημείων που λειτουργούν ως δέκτες του ακτινοβολούμενου πεδίου κατά τη διάρκεια του πλήγματος.

- Λεπτομερής κυκλωματική αναπαράσταση των επιμέρους φορτίων, αλλά και της μεταβατικής απόκρισης του μετασχηματιστή και της γεννήτριας ώστε να διεξαχθούν υπολογισμοί των επαγόμενων ρευμάτων και να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με πιθανή υπέρβαση των ονομαστικών ρευμάτων των γραμμών τροφοδοσίας και σχετικά με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά στοιχείων προστασίας από υπερφόρτιση.
- Μελέτη των σημείων εγκατάστασης και διαστασιολόγηση των χαρακτηριστικών των διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων, με εφαρμογή της διαδικασίας του IEC 62305-2 για διαχωρισμό του πλοίου σε ζώνες απευθείας εκτεθειμένες και εκτεθειμένες έμμεσα σε ακτινοβολούμενες και αγόμενες επιδράσεις.
- Προσθήκη του κυκλωματικού ισοδύναμου των διατάξεων προστασίας έναντι υπερτάσεων στο μοντέλο και εκτέλεση προσομοιώσεων, προκειμένου να υπολογιστεί η απόκρισή τους.
- Μελέτη του φασματικού περιεχομένου των επαγόμενων υπερτάσεων και ρευμάτων ώστε να διερευνηθεί η ανάγκη αναθεώρησης των επιπέδων ελέγχου του εξοπλισμού σε ατρωσία σε αγόμενες υψίσυχνες διαταραχές (IEC 61000-4-6).
- Σχεδίαση του πλοίου και της καλωδίωσης σε κατάλληλο λογισμικό, προκειμένου να υπολογιστεί η ανύψωση δυναμικού της γάστρας και οι υπερτάσεις που ακολούθως διοχετεύονται από το εσωτερικό του δικτύου (ουδέτερος κόμβος γεννήτριας, αγωγοί γείωσης περιβλημάτων συσκευών και μανδύες καλωδίων) προς τα φορτία. Υπολογισμός τάσεων επαφής και βηματικών τάσεων και διερεύνηση της επίδρασης της επίστρωσης βαφής και της αγωγιμότητας του νερού.



# Βιβλιογραφία

---

- [1] Ewen M.Thomson, "A critical assessment of the U.S. Code for lightning protection of ships", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.33, No. 2, May, 1991, pp. 132-138.
- [2] St. Elmo's fire, διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: [https://en.wikipedia.org/wiki/St.\\_Elmo%27s\\_fire](https://en.wikipedia.org/wiki/St._Elmo%27s_fire), ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης: 10/10/2016.
- [3] St. Elmo's Fire on Mt. Hoher Sonnblick, διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: <https://atoptics.wordpress.com/2012/12/11/st-elmo%C2%B4s-fire-on-mt-hoher-sonnblick>, ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης: 10/10/2016.
- [4] The Basis of Conventional Lightning Protection Technology, A review of the scientific development of conventional lightning protection technologies and standards, Report of the Federal Interagency Lightning Protection User Group, June 2001.
- [5] Michael Shollar, "How Often Do Ships Get Struck by Lightning?", διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο: [http://www.slate.com/articles/news\\_and\\_politics/recycled/2010/06/how\\_often\\_do\\_ships\\_get\\_struck\\_by\\_lightning.html](http://www.slate.com/articles/news_and_politics/recycled/2010/06/how_often_do_ships_get_struck_by_lightning.html), ημερομηνία τελευταίας προσπέλασης: 10/10/2016.
- [6] Appendix 2\_foreign accidents, Request No.: ed\_10930, ARIA database, French ministry of ecology, energy, sustainable development and town planning, pollution and risk prevention department sei / barpi.
- [7] William J.Becker, "Boating-Lightning Protection", SGEB, Volume 7, October, 1992.
- [8] Vincent Daniello, John Clemans, "Lightning-proof your boat", Boatkeeper by motorboating.com, May, 2009, pp.61-64.
- [9] Ewen M.Thomson, "Lightning and sailboats", SGEB, Vol. 1, July, 1992, pp.1-23.
- [10] Spathis, D., Nikolopoulou, E., Dallas, S., Prousalidis, J., Kladas, A., Tatakis, E., Pallis, I., Beniakar M., Kanellos, F., Sarigiannidis, A., Gonos, I., Kontargyri, V., Tsekouras, G., Kourmpelis, T., Korn, M.: "Analysis of various Power Quality Phenomena in a Highly Electrified Vessel" IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), June 21-24, 2015, pp. 420-426.
- [11] J.Prousalidis, "Investigating the influence of zero sequence impedance in ship ungrounded electric networks", Journal of Marine Engineering and Technology, No. A18 2010, pp. 17-30.
- [12] John P.Nelson, David Burns, Robert Seitz, Andrew Leoni, "The grounding of marine power systems: Problems and Solutions", Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 51st Annual Conference 2004, pp. 151-161.
- [13] Ronald W.Hotchkiss, Andrea Haa, "Electric ship surge environment", Electric Ship Technologies Symposium, 2007, pp. 301-308.
- [14] Aircraft Lightning Protection Handbook, US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, September 1989.
- [15] Arturo Galvan, "A technical basis for guidance of lightning protection for offshore oil installations", Journal of Lightning Research, Vol.3, 2007, pp.1-9.
- [16] Lightning Protection Guide, DEHN, 3<sup>rd</sup> updated edition, December 2014.
- [17] Giorgio Sulligoi, Daniele Bosich, Aldo da Rin and Fabio Tosato, "An Examination of Mutual Influences Between High-Voltage Shore-Connected Ships and Port Earthing Systems During Phase-to-Ground Faults", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 48, No. 5, September/October 2012, pp. 1731-1738.
- [18] Ewen M.Thomson, "A new concept for lightning protection of boats: Protect a boat like a building", Exchange, October, 2007, pp.1-7.

- [19] ISO/IEC/IEEE 80005-1:2012, Utility Connections in Port-Part 1: High Voltage Shore Connection (HVSC) Systems-General requirements
- [20] Ελευθερία Πυργιώτη, Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, “Σχεδιασμός Προστασίας Κατασκευών από Κεραυνούς”.
- [21] Vladimir A. Rakov and Martin A. Uman, “Lightning Physics and Effects”, Cambridge University Press, 2003.
- [22] C. Gomez, M. Z. A. Ab Kadir, “Protection of naval systems against electromagnetic effects due to lightning”, Progress in Electromagnetics Research, Vol.113, 2011, pp.333-349.
- [23] R. D. Hill, “Investigation of lightning strikes to water surfaces”, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 78, No. 6, December, 1985, pp. 2096-2099.
- [24] C.B. Moore, G. D. Aulich, William Rison, “An examination of lightning-strike-grounding physics”, National Lightning Safety Institute [http:// www. lightningsafety. Com](http://www.lightningsafety.com)
- [25] Π. Σαλωμίδης, Ι. Τσιμινάκης, “Διερεύνηση της συμπεριφοράς διακένων αέρα με υγρά ηλεκτρόδια υπό θετικές εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις”, Διπλωματική εργασία, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2012.
- [26] E.M. Thomson, “Grounding concepts for a marine lightning protection system”, Marine Lightning Protection Inc., 2005.
- [27] IEC 62305-3: 2010, “Protection against lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard”
- [28] IEC 62305-1: 2010, “Protection against lightning - Part 1: General principles”
- [29] IEC 62305-2: 2010, “Protection against lightning - Part 2: Risk management”
- [30] IEC 62305-4: 2010, “Protection against lightning - Part 4: Electrical and electronic systems within structures”
- [31] IEC 61000-4-5: 2014, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test”
- [32] IEC 61643-12: 2008, “Low-voltage surge protective devices - Part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - Selection and application principles”
- [33] IEC 60364-5-53: 2001, “Electrical installations of buildings - Part 5-53: Selection and erection of electrical equipment - Isolation, switching and control”
- [34] IEC 61643-22: 2015, “Low-voltage surge protective devices - Part 22: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks - Selection and application principles”
- [35] IEC 61643-21: 2000, “Low voltage surge protective devices - Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signalling networks - Performance requirements and testing methods”
- [36] IEC 61643-1: 2011, “Low-voltage surge protective devices - Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems - Requirements and test methods”
- [37] Bureau Veritas Rule Note NR 566 DT R00 E: Hull Arrangement, Stability and Systems for Ships less than 500 GT, July 2011.
- [38] Ministry of Defense, Defense Standard 02-516, (DEF STAN 02-51) July 2003.
- [39] American Boat and Yacht Council (ABYC) TE-4 07/06: Lightning protection.
- [40] IEC 60092-507:2014, Electrical installations in ships - Part 507: Small vessels.
- [41] ISO 10134: 2003 Small craft - Electrical devices - Lightning Protection Systems.
- [42] NFPA 780-2014: Standard for the Installation of Lightning Protection Systems.
- [43] Offshore standard, DNVGL-OS-D201 – Edition July 2015: Electrical installations.
- [44] Rules for classification: Ships, DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch8. Edition October 2015: Electrical installations.



- [45] DET NORSE VERITAS AS, Rules for classification of Ships / High Speed, Light Craft and Naval Surface Craft, Part 4 Chapter 8: Newbuildings, Machinery and Systems – Main Class, Electrical Installations, July 2015.
- [46] IEC 60092-502: 1999: Electrical installations in ships - Part 507: Tankers – Special features.
- [47] IEC 60945: 2002 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – General requirements – Methods of testing and required test results
- [48] E.P. Nicolopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, E. Karabetsos, “Two Interlaboratory comparison Programs on EMF Measurements Performed in Greece”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 1, Quarter 2, 2012, pp. 50-59.
- [49] E.P. Nicolopoulou, I.N. Ztoupis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, E. Karabetsos, “An Interlaboratory comparison Programme on Radio Frequency Electromagnetic Field Measurements: The Second Round of the Scheme”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 164, Issue 3, pp. 316-325, April 2015.
- [50] I.N. Ztoupis, E.P. Nicolopoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, E. Karabetsos, “An interlaboratory comparison program on ELF electric and magnetic fields measurements performed in Greece: Second round of the scheme”, Bioelectromagnetics, Vol. 36, Issue 7, pp. 544-550, October 2015.
- [51] IEC 61000-4-6: 2014, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and measurement techniques - Immunity to conducted disturbances, induced by radio-frequency fields”
- [52] IEC 61000-4-3: 2006, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3: Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test”
- [53] IEC 61000-4-4: 2012, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test”
- [54] IEC 61000-4-11: 2004, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity test”
- [55] IEC 61000-4-2: 2009, “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-2: Testing and measurement techniques – Electrostatic discharge immunity test”
- [56] IEC 60533: 2015, “Electrical and electronic installations in ships – Electromagnetic compatibility – Ships with a metallic hull”.
- [57] Γ.Κ. Πολίτης, Γ.Ν. Λαμπρινίδης, “Η υδροδυναμική της πρόωσης του πλοίου”, Εκδόσεις ΑΣΤΕΡΟΣ, Αθήνα, 1993.
- [58] George Sinclair, “Theory of Models of Electromagnetic Systems”, Proceedings of the IRE, November 1948, pp. 1364-1370.
- [59] Alexandre Piantini, Jorge M. Janiszewski, Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci and Mario Paolone, “A Scale model for the study of the LEMP Response of Complex power distribution Networks”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No.1, January, 2007, pp.710-720.
- [60] R. Frenzel, “Use of Similarity Relations in the Analysis of Lightning-Induced Transient Phenomena, ETEP, 7, 2, May-June, 1997.
- [61] A.A. Sonin, “The Physical Basis of Dimensional Analysis”, Department of Mechanical Engineering MIT, 2nd edition, 2001.
- [62] A.V. Korsuncev, “Application on the Theory of Similarity to Calculation of Impulse Characteristics of Concentrated Electrodes”, Elektrichestvo, No. 5, 1958, pp. 31-35.
- [63] E.E. Oettle, “A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, 4, October, 1988, pp. 2020-2029.

- [64] W.A. Chisholm, W. Janischewskyj, "Lightning Surge Response of Ground Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No.2, pp. 1329-1337 April, 1989.
- [65] R. Rudenberg, "Grounding Principles and Practices I - Fundamental Considerations on Ground Currents", Electrical Engineering, No. 64, pp. 1-13, January, 1945.
- [66] P. Chowdhuri, "Impulse Impedance tests on laboratory model ground electrodes", IEE Proceedings on Generation, Transmission, Distribution, Vol.150, No.4, pp. 427-433, July, 2003.
- [67] Jinliang He, Rong Zeng, Youping Tu, Jun Zou, Shuiming Che, and Zhicheng Guan Laboratory, "Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Tower Grounding Devices", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No.3, July, 2003, pp. 994-1001.
- [68] R. Caldecott, D.G. Kasten, "Scale Model Studies of Station Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, No. 3, pp. 558-566, March, 1983.
- [69] I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, F.V. Topalis, "Modelling of a Grounding Grid using an Electrolytic Tank", Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering, Bangalore, India, August 19-24, 2001.
- [70] A. El-Morshedy, A.G. Zeitoun και M.M. Ghourab, "Modelling of Substation Grounding Grids", IEE Proceedings, Vol.133, Pt.C, (5) pp. 287-292, July, 1986.
- [71] H.R. Armstrong, L.J. Simpkin, "Grounding Electrode Potential Gradients from Model Tests", AIEE Fall General Meeting, Chicago, October, 1960.
- [72] Ibrahim A. Metwally, Fridolin H. Heidler and Wolfgang J. Zischank, "Magnetic Fields and Loop Voltages inside Reduced and Full-scale Structures Produced By Direct Lightning Strikes", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 48, No.2, May, 2006, pp. 414-426.
- [73] A. Kern, F. Heidler, M. Seevers and W. Zischank, "Magnetic Fields and Induced Voltages in case of a Direct Strike – Comparison of Results obtained from Measurements at a Scaled Building to those of IEC 62305-4, 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, September, 2004.
- [74] W. Zischank, F. Heidler, J. Wiesinger, K. Stimper, A. Kern, M. Seevers, "Magnetic Fields and Induced Voltages inside LPZ 1 Measured at a 1:6 Scale Model Building", 27th International Conference on Lightning Protection, Avignon, September, 2004.
- [75] L. Grcev, "Modeling Grounding Electrodes under Lightning Currents", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 51, No. 3, August 2009, pp. 559-571.
- [76] L. Grcev, "Time- and Frequency-Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 2186-2196, October, , 2009.
- [77] Nicolopoulou E.P., Asimakopoulou F.E., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "Comparison of equivalent circuit models for the simulation of soil ionization", Electric Power Systems Research, Volume 113, pp. 180-187, August, 2014.
- [78] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 1, November, 2007, pp. 381-386.
- [79] N. Mohamad Nor, "Ionization Gradient of Low Resistivity Soils and Liquids", 17th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich, 2006.
- [80] Jose Luis Cerqueira Lima, Silverio Visacro, "Experimental developments on soil ionization: New findings", International conference on grounding and earthing & 3rd International conference on Lightning physics and effects, Florianopolis, Brazil, November, 2008, Session 5 - P30, pp.174-179.

- [81] I.F. Gonos, "Experimental study of transient behavior of grounding grids using scale models", Institute of Physics Publishing, Measurement, Science and Technology, Vol. 17, No. 7, pp. 2022-2226, July 2006.
- [82] Nicolopoulou E.P., Kontargyri V.T., Gonos I.F., Tsekouras G.J., Pyrgioti E.C., Stathopoulos I.A., "Experimental application of the similarity theory on scaled strip electrode configurations for the calculation of the grounding impedance", Proceedings of the 18th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, South Korea, August 25-30, 2013, paper PB-16, pp. 434-439.
- [83] Δημήτριος Κ. Αναγνωστόπουλος, «Πειραματική μελέτη μεταβατικής αντίστασης γείωσης με χρήση υπό κλίμακα μοντέλων», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2013.
- [84] Σωτήριος Ν. Βασιλόπουλος, «Πειραματική μελέτη μεταβατικής αντίστασης γείωσης με χρήση υπό κλίμακα μοντέλων», Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιανουάριος 2014.
- [85] Π. Ν. Νικολόπουλος, Υψηλές Τάσεις Τόμος Α – Μέρος 2<sup>ο</sup>, Αθήνα, 1994.
- [86] Ι. Αθ. Σταθόπουλος Υψηλές Τάσεις Ι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1988.
- [87] Henry W. Ott, "Electromagnetic Compatibility Engineering", John Wiley & Sons, 20 September 2011
- [88] IEC 60060-1: 2010, "High-Voltage Test Techniques - Part 1: General Definitions and Test Requirements".
- [89] MIL-STD-188/125-1: High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Protection For Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions (Part 1 - Fixed Facilities) (07 APR 2005).
- [90] Grzybowski, S., "Experimental Evaluation of Lightning Protection Zone used on Ship", IEEE Electric Ship Technologies Symposium ESTS '07, 2007, pp. 215 – 220.
- [91] Grzybowski, S. and Gao, G., "Laboratory study of Franklin rod height impact on striking distance", Proceedings of the 25th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2000), Rhodes, Greece, 2000, pp. 334–339.
- [92] Grzybowski, S. and Gao, G., "Protection zone of Franklin rod," Proceedings of the 12th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2001), Bangalore, India, 2001, pp. 87–91.
- [93] Grzybowski, S., Song, Y., "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, pp. 372-377.
- [94] Song, Y., "Study of the lightning protection zone of Franklin rod," M.Sc. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Mississippi State Univ., Mississippi State, 2004.
- [95] Θωμάς Ε. Τσοβίλης, "Μοντέλο σύλληψης κεραυνού και εφαρμογές του σε συστήματα αντικεραυνικής προστασίας", Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 2010.
- [96] Mikropoulos, P.N. and Tsovilis, T.E., "Striking Distance and Interception Probability", IEEE Transactions on Power Delivery, July 2008, Vol.23, No.3, p.1571-1580.
- [97] Mikropoulos, P.N. and Tsovilis, T.E., "Interception Probability and Shielding against Lightning, IEEE Transactions on Power Delivery, April 2009, Vol.24, No.2, p.863-87.
- [98] Mikropoulos, P.N. and Tsovilis, T.E., "Interception Probability and Proximity Effects: Implications in Shielding Design Against Lightning", IEEE Transactions on Power Delivery, July 2010, Vol.25, No. 3, pp. 1940 – 1951.
- [99] E. P. Nicolopoulou, V.T. Kontargyri, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Experimental Evaluation Of Lightning Protection Zone Through Impulse Voltage Tests On A Scaled Down Ship Model", Proceedings of the 19th International Symposium on High-

- Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Czech Republic, August 23-28, 2015, paper PB-422.
- [100] Eleni P. Nicolopoulou, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, "Experimental investigation of the external lightning protection of ships through impulse voltage tests on a scaled-down ship model", IET Science, Measurement & Technology, doi: 10.1049/iet-smt.2016.0113 (υπό έκδοση)
- [101] Machidon, D., Istrate, M., Gusa, M. et al., "Lightning protection zones estimation for a power station using the elliptic model", Proceedings of the International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 2012, Iasi, Romania, 25-27 October 2012, pp. 225 – 230.
- [102] CST EM Studio ® Online available at <https://www.cst.com>
- [103] Suzuki, T., Miyake, K. and Shindo, T., "Discharge path model in model test of lightning strokes to tall mast," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, July 1981, vol. PAS-100, no. 7, pp. 3553–3562.
- [104] Allibone, T. E. and Dring, D., "Lightning and the long spark: the significance of leader-stroke velocity", Proceedings of the Royal Society of London, 1977, vol. A 357, pp. 15–35.
- [105] D.P. Agoris, V.P. Charalambakos, E. Pyrgioti, S. Grzybowski, "A computational approach on the study of Franklin rod height impact on striking distance using a stochastic model", Journal of Electrostatics, 2004, vol.60, pp. 175-181.
- [106] E. Pyrgioti, C. Menemenlis, "Factors affecting the discharge parameters of small positive rod-plane gaps in atmospheric air", ETEP Vol.2, No.3, May/June 1992, pp. 179-185.
- [107] EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above, Third Edition, EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1011974.
- [108] F. A. M. Rizk, "Modeling of lightning incidence to tall structures", IEEE Trans. Power Del., vol. 9, no. 1, pp. 162-193, Jan. 1994.
- [109] F. A. M. Rizk, "Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes", IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 4, pp. 1983-1997, Oct. 1990.
- [110] IEEE Working Group, "Estimating lightning performance of transmission lines II – Updates to analytical models", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.3, pp.1254-1267, Jul. 1993.
- [111] WinIGS User Manual, Software Version WinIGS-6.1, October 2015.
- [112] E. P. Nicolopoulou, A. C. Alexandrou, M. F. Georgopoulos, D. E. Vatisas, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Investigation of lightning incidence on ships", 33<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016), Estoril, Portugal, September 25-30, 2016, paper 133.
- [113] W. Brown and E. R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission line shielding-II", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 88, pp. 617-626, May 1969.
- [114] IEEE Working Group, "A Simplified method for estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 4, pp. 919-932, Apr. 1985.
- [115] L. D. Darveniza, F. Popolansky, and E. R. Whitehead, "Lightning protection of UHV lines", Electra, no. 41, pp. 39-69, 1975.
- [116] E. R. Love, "Improvements in lightning stroke modeling and applications to design of EHV and UHV transmission lines", M.Sc. dissertation, Univ. Colorado, Denver, CO, 1973.
- [117] T. Suzuki, K. Miyake, and T. Shindo, "Discharge path model in model test of lightning strokes to tall mast", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, no. 7, pp. 3553-3562, Jul. 1981.

- [118] A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis", IEEE Trans. Power Del., vol. PWRD-2, no. 3, pp. 871-886, Jul. 1987.
- [119] J. G. Anderson, Transmission Line Reference Book—345 kV and above, 2nd Ed. Palo Alto, CA: Elect. Power Res. Inst., 1982, ch. 12.
- [120] IEEE Guide for improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std. 1243-1997, Dec. 1997.
- [121] A. M. Mousa and K. D. Srivastava, "The Implications of the electrogeometric model regarding the effect of height of structure on the median amplitude of collected lightning strokes", IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no. 2, pp. 1450-1460, Apr. 1989.
- [122] IEEE Guide for Direct stroke shielding of Substations, IEEE Std. 998, 1996.
- [123] KTA 2206:2000-06, "Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen", Sicherheitstechnische Regel des KTA.
- [124] E. P. Nicolopoulou, A. A. Oikonomopoulos, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Electromagnetic simulation of a lightning strike on a ship", Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2016), Chengdu, China, September 18-22, 2016, paper B-5-3.
- [125] Άντζελα Γ. Θίμο, "Πλήρης ηλεκτρολογική μελέτη ενός πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην, ενός δεξαμενόπλοιου και ενός γενικευμένου τύπου πλοίου" Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, 2013.
- [126] Universal Cable, Offshore, marine and shipboard cables Catalogue, available at <http://www.ucable.com.my/images/products/UC%20Offshore%20Catalogue.pdf>
- [127] IEC 61000-4-12:2006, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-12: Testing and measurement techniques - Ring wave immunity test".
- [128] IEEE Power & Energy Society, "Special Publication: Transient Analysis of Power Systems. Solution Techniques, Tools and Applications", IEEE Power & Energy General Meeting, July 2010, Minneapolis.



Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες δημοσιεύσεις:

## A. Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά

1. **Nicolopoulou E.P.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Karabetsos E., “Two Interlaboratory comparison Programs on EMF Measurements Performed in Greece”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 1, Quarter 2, pp. 50-59, 2012.
2. **Nicolopoulou E.P.**, Asimakopoulou F.E., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Comparison of equivalent circuit models for the simulation of soil ionization”, Electric Power Systems Research, Volume 113, pp. 180-187, August, 2014.
3. **E.P. Nicolopoulou**, I.N. Ztoupis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, E. Karabetsos, “An Interlaboratory comparison Programme on Radio Frequency Electromagnetic Field Measurements: The Second Round of the Scheme”, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 164, Issue 3, pp. 316-325, April 2015.
4. I.N. Ztoupis, **E.P. Nicolopoulou**, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, E. Karabetsos, “An interlaboratory comparison program on ELF electric and magnetic fields measurements performed in Greece: Second round of the scheme”, Bioelectromagnetics, Vol. 36, Issue 7, pp. 544-550, October 2015.
5. **Eleni P. Nicolopoulou**, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, “Experimental investigation of the external lightning protection of ships through impulse voltage tests on a scaled-down ship model”, IET Science, Measurement & Technology, Vol. 10, Issue 8, pp. 855-865, November 2016.
6. **Eleni P. Nicolopoulou**, Ioannis F. Gonos, Ioannis A. Stathopoulos, “Lightning shielding analysis on ships”, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016 (υπό κρίση).

## B. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων με κρίση στο πλήρες κείμενο

1. **Nicolopoulou E.P.**, Asimakopoulou F.E., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “Comparison of Circuit Models for the Simulation of Soil Ionization”, Proceedings of the 31st International Conference of Lightning Protection (ICLP '12), Vienna, Austria, September 2-7, 2012, paper 262.
2. **Nicolopoulou E.P.**, Kontargyri V.T., Gonos I.F., Tsekouras G.J., Pyrgioti E.C., Stathopoulos I.A., “Experimental application of the similarity theory on scaled strip electrode configurations for the calculation of the grounding impedance”, Proceedings of the 18th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, South Korea, August 25-30, 2013, paper PB-16, pp. 434-439.
3. Spathis, D., **Nikolopoulou, E.**, Dallas, S., Prousalidis, J., Kladas, A., Tatakis, E., Pallis, I., Beniakar M., Kanellos, F., Sarigiannidis, A., Gonos, I., Kontargyri, V., Tsekouras, G.,

Kourmpelis, T., Korn, M., "Analysis of various Power Quality Phenomena in a Highly Electrified Vessel" IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), June 21-24, 2015, pp. 420-426.

4. **E. P. Nicolopoulos**, V.T. Kontargyri, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos, "Experimental Evaluation Of Lightning Protection Zone Through Impulse Voltage Tests On A Scaled Down Ship Model", Proceedings of the 19th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2015), Pilsen, Czech Republic, August 23-28, 2015, paper PB-422.
5. **E. P. Nicolopoulos**, A. A. Oikonomopoulos, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Electromagnetic simulation of a lightning strike on a ship", Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2016), Chengdu, China, September 18-22, 2016, paper B-5-3.
6. **E. P. Nicolopoulos**, A. C. Alexandrou, M. F. Georgopoulos, D. E. Vatistas, I. F. Gonos, I. A. Stathopoulos, "Investigation of lightning incidence on ships", 33<sup>rd</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP 2016), Estoril, Portugal, September 25-30, 2016, paper 133.

## **Γ. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων με κρίση στην περίληψη**

1. **Nicolopoulos E.P.**, Gonos I.F., Stathopoulos I.A., Karabetsos E., "An Interlaboratory Comparison Programme on ELF Measurements Performed in Greece", 6<sup>th</sup> International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Bodrum Turkey, October 10-14 2010.
2. **Νικολοπούλου Ε.Π.**, Καραμπέτσος Ε., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α., «Αξιολόγηση αποτελεσμάτων διεργαστηριακών μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου υψηλών συχνοτήτων», 4<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα 3-4 Φεβρουαρίου 2012, Ενότητα Β: Φυσικές Μετρήσεις VIII.
3. **Nicolopoulos E.P.**, Kontargyri V.T., Gonos I.F., Tsekouras G.J., Pyrgioti E.C., Stathopoulos I.A., Prousalidis J.M., "Investigating the protection of ship electric grids against lightning strikes – The DEFKALION-THALIS project", 3rd – 4th MARINELIVE workshop on "All-Electric Ship", Athens, Greece, November 21-23, 2012.
4. Peppas, A. Telonis, **E. Nicolopoulos**, I. Gonos, E. Pyrgioti, I. Stathopoulos, "Simulation of lightning effects on metallic ships" 6<sup>th</sup> MARINELIVE workshop, Workshop on ship electric grids, June 3-5, 2013.
5. Ztoupis I.N., **Nicolopoulos E.P.**, Karabetsos E., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "Second Interlaboratory Comparison Programme on ELF EMF Measurements Performed in Greece", Joint Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM2013), Thessaloniki Greece, June 10-14, 2013, PB-28.
6. **Nicolopoulos E.P.**, Ztoupis I.N., Karabetsos E., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., "An interlaboratory comparison programme on high frequency electromagnetic field measurements in a controllable environment performed in Greece", 16th International Congress of Metrology, Paris France, October 7-10 2013, PB-28, doi: 10.1051/metrology/201311010.



7. Ζτούπης Ι.Ν, **Νικολοπούλου Ε.Π.**, Καραμπέτσος Ε., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α., «Διεργαστηριακές μετρήσεις σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία», Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 12-13 Δεκεμβρίου 2013, Ενότητα ΣΤ: Ανάλυση Μετρήσεων: ΣΤ4.
8. **E. P. Nicolopoulos**, V. T. Kontargyri, I. F. Gonos, G. J. Tsekouras, E. C. Pyrgioti, I. A. Stathopoulos, “Lightning strikes on ships: an initial application of the similarity theory through scaled experiments, 2<sup>nd</sup> MARINELIVE conference on All Electric Ship”, 12-13 February 2014.
9. **Νικολοπούλου Ε.Π.**, Ζτούπης Ι.Ν., Καραμπέτσος Ε., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α., «Αξιολόγηση αποτελεσμάτων διεργαστηριακών μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου υψηλών συχνοτήτων», 5<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα 9-10 Μαΐου 2014, Ενότητα: Ηλεκτρικές Μετρήσεις.
10. **Νικολοπούλου Ε.Π.**, Καραμπέτσος Ε., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α., «Διεργαστηριακές συγκριτικές μετρήσεις χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων: ο τρίτος κύκλος του σχήματος», 6<sup>ο</sup> Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Αθήνα 13-14 Μαΐου 2016, Ενότητα: Ηλεκτρικές Μετρήσεις.

