



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

**Προσομοιώσεις κεραυνοπληξίας
πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αθανάσιου Αν. Οικονομόπουλου

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



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

195

Προσομοιώσεις κεραυνοπληξίας πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αθανάσιου Αν. Οικονομόπουλου

Καθηγητής: Ιωάννης Αθ. Σταθόπουλος

Επιβλέπουσα: Ελένη Π. Νικολοπούλου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Οκτωβρίου 2015

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

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

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

.....

Αθανάσιος Αν. Οικονομόπουλος

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

Copyright ©Αθανάσιος Αν. Οικονομόπουλος, 2015.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέδραμαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα:

Τον κ. Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, καθηγητή του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τη βοήθεια που πρόθυμα μου παρείχε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Την κα Ελένη Νικολοπούλου, υποψήφια διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την αμέριστη βοήθεια και καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων για τη συνεργασία μας όλους αυτούς τους μήνες.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου προσφέρουν.

Περίληψη

Τα πλοία είναι επιρρεπή σε κεραυνικά πλήγματα τα οποία αποτελούν κίνδυνο ζημιάς του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, των συστημάτων πλοήγησης και επικοινωνίας. Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη και η προσομοίωση τριών ειδών κεραυνικών πληγμάτων για διάφορα σημεία πτώσης. Οι προσομοιώσεις γίνονται με τη χρήση του προγράμματος CST STUDIO. Καταγράφονται το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο, το επιφανειακό ρεύμα, οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής. Δίνουμε έμφαση σε κρίσιμους χώρους, όπως η Γέφυρα του πλοίου και μελετούνται οι επαγόμενες τάσεις και ρεύματα σε διάφορους τύπους καλωδίων λόγω του κεραυνικού φαινομένου.

Λέξεις-Κλειδιά: Αντικεραυνική προστασία σε πλοία, CST STUDIO, επαγόμενες υπερτάσεις σε καλώδια

Abstract

Ships are potentially vulnerable to lightning strikes that constitute risk of damage to electronic equipment, navigation and communication systems. The purpose of this thesis is the study and the simulation of three kinds of lightning strikes for different stress points. The simulations are executed with CST STUDIO. The electric field, magnetic field, surface current, step voltages and touch voltages are recorded. The emphasis is laid on crucial rooms, like navigation room and we study the induced voltages and currents on different kinds of cables due to lightning effect.

Keywords: Method of lightning protection, CST STUDIO, induced overvoltages on cables

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα πλοία αποτελούν πιθανό στόχο ενός κεραυνικού πλήγματος. Η μελέτη και η προσομοίωση αφορά τρεις διαφορετικές κεραυνικές κυματομορφές για τέσσερα διαφορετικά σημεία πλήγματος. Η προσομοίωση θα γίνει μέσω της χρήσης του προγράμματος CST STUDIO. Ειδικότερα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

Κεφάλαιο 1: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι συνιστώσες του κεραυνού. Περιγράφονται οι τιμές των παραμέτρων για τα διάφορα είδη πλήγματος και παρουσιάζονται οι μαθηματικές αναπαραστάσεις που περιγράφουν τη κεραυνική κυματομορφή. Επίσης, αναλύεται το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο λόγω του κεραυνού και οι αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις και τάσεις επαφής.

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι πηγές των υπερτάσεων που επηρεάζουν τα πλοία. Έπειτα, γίνεται αναφορά στις επιπτώσεις των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων στη κατασκευή του πλοίου και τις επιπτώσεις στο σκελετό. Τέλος, παρουσιάζονται οι πιθανές επιπτώσεις των κεραυνών σε υπεράκτιες εξέδρες άντλησης πετρελαίου, καθώς και προτάσεις για την αντικεραυνική τους προστασία.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πρόγραμμα CST STUDIO, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις. Ακόμα, περιγράφονται οι χρονικοί επιλύτες του προγράμματος, ο FIT και ο TLM.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος προσομοίωσης της κατασκευής του πλοίου και του κεραυνού. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο, το επιφανειακό ρεύμα καθώς και οι επαγόμενες υπερτάσεις στα καλώδια. Ακόμα, γίνεται σύγκριση του μαγνητικού πεδίου για χαμηλότερη τιμή αγωγιμότητας του νερού.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις και προτείνονται ζητήματα μελλοντικής διερεύνησης για την πληρέστερη μελέτη των κεραυνικών επιπτώσεων στα πλοία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
ΑΒSTRACT	vii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ix

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Κεραυνός	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	1
1.3 Μηχανισμοί διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών.....	2
1.4 Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων.....	5
1.5 Εκκενώσεις μεταξύ των νεφών ή μέσα στο ίδιο σύννεφο.....	6
1.6 Κεραυνοί μεταξύ νέφους και γης.....	6
1.7 Κατερχόμενοι κεραυνοί.....	7
1.8 Ανερχόμενοι κεραυνοί.....	9
1.9 Παράμετροι κεραυνού.....	10
1.10 Περιγραφή και αναπαράσταση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος	17
1.11 Καθορισμός των επιπέδων αντικεραυνικής προστασίας	21
1.12 Καθορισμός μέγιστων και ελάχιστων κεραυνικών παραμέτρων.....	22
1.13 Μαθηματική αναπαράσταση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος	23
1.14 Απόσταση Έναυσης.....	29
1.15 Παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω κεραυνού	31
1.16 Βηματική Τάση και Τάση Επαφής	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Επιπτώσεις κεραυνού στα πλοία	37
2.1 Είδη υπερτάσεων που επηρεάζουν το ηλεκτρικό σύστημα των πλοίων.....	37
2.1.1 Υπερτάσεις από φυσικές πηγές	37
2.1.2 Υπερτάσεις από τεχνητές πηγές	39
2.2 Επιπτώσεις των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων	41
2.3 Βλάβες στο σκελετό.....	44
2.4 Αντικεραυνική προστασία υπεράκτιων εξέδρων άντλησης πετρελαίου	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πρόγραμμα προσομοίωσης CST STUDIO	52
3.1 Περιγραφή προγράμματος	52
3.2 Περιγραφή του CST MICROWAVE STUDIO.....	52
3.2.1 Διαθέσιμες τεχνικές προσομοίωσης	53
3.2.2 Περιγραφή του γραφικού περιβάλλοντος και της διαδικασίας προσομοίωσης	53

3.3 Μέθοδος επίλυσης προβλήματος.....	61
3.4 Επιλύτης TLM	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προσομοίωση κεραυνού σε πλοίο	66
4.1 Εισαγωγή	66
4.2 Προσομοίωση της κατασκευής του πλοίου	66
4.3 Εισαγωγή υλικών και καθορισμός των ιδιοτήτων τους.....	68
4.4 Προσέγγιση κεραυνικού πλήγματος στο CST STUDIO	68
4.5 Ρυθμίσεις πλέγματος.....	70
4.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	72
4.6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για το Ηλεκτρικό και Μαγνητικό πεδίο	72
4.6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για Τάσεις Επαφής και Βηματικές Τάσεις.....	77
4.6.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις Τάσεις Επαφής λόγω της γείωσης προστασίας.....	81
4.6.4 Ορισμός Καλωδίων στο μοντέλο	84
4.6.4.1 Επίδραση κεραυνικών πληγμάτων στο ομοαξονικό καλώδιο	86
4.6.4.2 Επίδραση κεραυνικών πληγμάτων σε απλό καλώδιο που συνδέει το σύστημα πλοήγησης με εξοπλισμό που βρίσκεται στη Γέφυρα του πλοίου.....	90
4.6.4.3 Επίδραση κεραυνικών πληγμάτων σε απλό καλώδιο και σε καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους, τα οποία βρίσκονται στη Γέφυρα	94
4.6.5 Επίδραση της αγωγιμότητας του νερού στις επιπτώσεις της κεραυνοπληξίας πλοίου	99
4.6.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την τρισδιάστατη απεικόνιση των πεδίων στην επιφάνεια του μοντέλου	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα - Περαιτέρω διερεύνηση	122
5.1 Συμπεράσματα	122
5.2 Περαιτέρω διερεύνηση	124

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	125
---------------------------	------------

Κεφάλαιο 1: Κεραυνός

1.1 Εισαγωγή

Οι ηλεκτρικές εκκενώσεις, που παράγονται από την ατμόσφαιρα της γης λόγω νεφών τύπου σωρειτομελανία (cumulonimbus), εκρήξεων ηφαιστειών και χιονοθυελλών, συχνά αναφέρονται ως κεραυνοί. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θα περιοριστούμε στις ηλεκτρικές εκκενώσεις που προκαλούνται από τα σύννεφα (σωρειτομελανίες). Οι κεραυνοί συνοδεύονται από φωτεινά φαινόμενα, τις αστραπές, και από ηχητικά φαινόμενα, τις βροντές. Δημιουργούνται μεταξύ νέφους και εδάφους ή μεταξύ νεφών ή μέσα στο ίδιο νέφος [11].

Η διαφορά δυναμικού κατά την εκδήλωση ενός κεραυνού είναι πολλά εκατομμύρια Volts και η ένταση του ρεύματος δεκάδες χιλιάδες Αμπέρ. Το μήκος του κεραυνού φθάνει έως αρκετά χιλιόμετρα και έχει τεθλασμένη ή κυματοειδή μορφή, ενώ το πλάτος του σπινθήρα είναι μικρό και φτάνει το πολύ μερικές δεκάδες εκατοστά. Η διάρκεια του κεραυνού είναι μικρότερη από ένα δευτερόλεπτο, αλλά η θερμοκρασία που αναπτύσσεται είναι ~10000 βαθμοί Κελσίου. Δημιουργεί έντονο ιονισμό του αέρα και εκπέμπεται φως κατά τη διάρκεια της εκκένωσης (το φαινόμενο της αστραπής). Η υπερβολική θέρμανση του αέρα και η εκτόνωσή του δημιουργεί το δυνατό κρότο που ονομάζουμε βροντή. Υπολογίζεται πως κάθε μέρα στον πλανήτη συμβαίνουν πάνω από 40000 καταιγίδες. Επίσης, σε όλη τη γη κάθε δευτερόλεπτο συμβαίνουν 100 κεραυνοί [12].

1.2 Ιστορική αναδρομή

Ο κεραυνός αποτέλεσε μυστήριο για τους ανθρώπους για πολλούς αιώνες, στα αρχαία χρόνια αντιμετωπιζόνταν με σεβασμό και φόβο ως μήνυμα των θεών, και μόνο μετά τα πειράματα του Benjamin Franklin στα μέσα του 18ου αιώνα ξεκίνησε η έρευνα για την κατανόηση του φυσικού φαινομένου και κατά συνέπεια των βασικών αρχών προστασίας.

Τα πρώτα σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη φύση του κεραυνού διατυπώθηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν οι φωτογραφικές και φασματοσκοπικές μέθοδοι έγιναν διαθέσιμες για τη μελέτη του φαινομένου. Οι πρώτοι υπολογισμοί του ρεύματος του κεραυνού έγιναν από το Γερμανό επιστήμονα Rockels το 1897 μέσω ανάλυσης του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου. Η έρευνα του φυσικού φαινομένου του κεραυνού στην εποχή μας οριοθετείται από τα πειράματα του C.T.R Wilson, ο οποίος διατύπωσε το 1956 την πρώτη ολοκληρωμένη θεωρία σχετικά με τον ατμοσφαιρικό ηλεκτρισμό. Το αντικείμενο της αντικεραυνικής προστασίας έγινε ιδιαίτερα δημοφιλές στη δεκαετία του 1960 κυρίως λόγω της ανάγκης προστασίας έναντι πληγμάτων κεραυνού των διαστημικών οχημάτων, καθώς και λόγω των βελτιωμένων μέσων μέτρησης και παρατήρησης του φαινομένου που προσέφερε η διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Η τελευταία έχει επιτρέψει στις μέρες μας την τεχνητή πρόκληση κεραυνών για ερευνητικούς σκοπούς και έχει

οδηγήσει σε ολοκληρωμένα συστήματα ανίχνευσης πτώσης κεραυνών, τα οποία έχουν εγκατασταθεί σε πολλές προηγμένες χώρες.

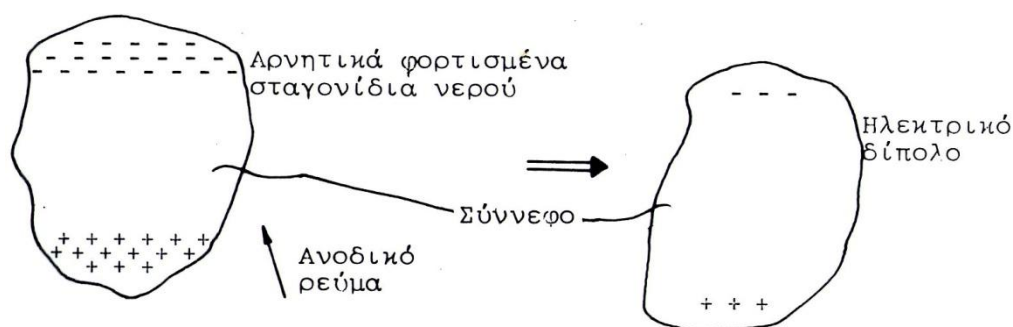
Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν συσκευές ή μέθοδοι επιστημονικά αποδεδειγμένες, ικανές να εμποδίσουν το σχηματισμό κεραυνού ή να εμποδίσουν τον κεραυνό να πλήξει μία κατασκευή. Σκοπός ενός συστήματος αντικεραυνικής προστασίας είναι εάν πληγεί από κεραυνό, άμεσα είτε έμμεσα να διοχετεύσει το ρεύμα εκκένωσης ελεγχόμενα στη γη και να περιορίσει στον ελάχιστο βαθμό τις επιζήμιες επιπτώσεις του [5].

1.3 Μηχανισμοί διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών

Προ πολλού, έχουν γίνει σκέψεις για τη διατύπωση μιας μονοσήμαντης θεωρίας όσον αφορά τους μηχανισμούς διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορέων στο εσωτερικό των νεφών. Το βέβαιο είναι ότι στο εσωτερικό των νεφών εξελίσσονται σύνθετες και πολύπλοκες διαδικασίες και γι' αυτόν το λόγο θα περιγραφούν μόνο τρία φαινόμενα, για τα οποία μπορεί να υποθεθεί ότι παίζουν κάποιο ρόλο κατά των διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων. Τα τρία φαινόμενα είναι το φαινόμενο διασποράς, ισχυράς ψύξεως και διαρρήξεως.

1) Φαινόμενο διασποράς

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

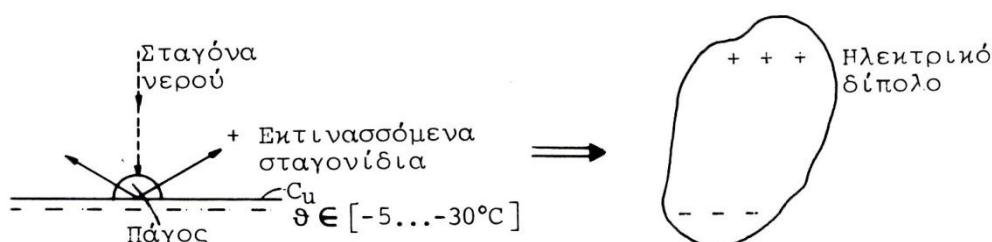


Σχήμα 1.1: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διασποράς [1].

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 90% των κεραυνών που κατευθύνονται στη γη προέρχονται από σύννεφα που είναι αρνητικά φορτισμένα στην κάτω περιοχή τους και ακόμη ότι μια διασπορά σταγονιδίων νερού είναι δυνατή μόνο υπό θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 0 °C, τίθεται σε αμφιβολία κατά πόσο ένας τέτοιος μηχανισμός θα μπορούσε να ερμηνεύσει ικανοποιητικά το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων έστω σε ένα ποσοστό 10% του συνόλου.

2) Φαινόμενο ισχυράς ψύξεως

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



Σχήμα 1.2: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο ισχυράς ψύξεως [1].

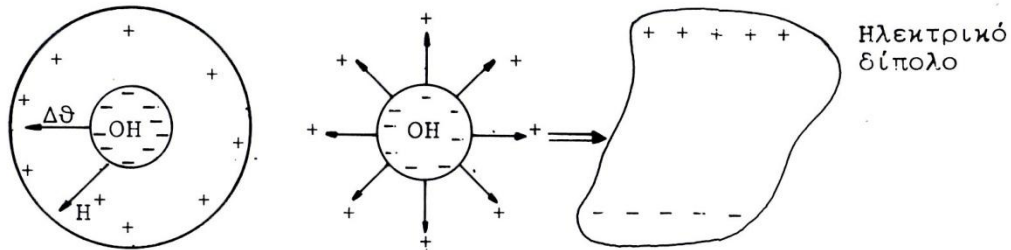
Στην περίπτωση του διαχωρισμού των ηλεκτρικών φορτίων στο εσωτερικό του σύννεφου, δεχόμαστε πως το ρόλο της "ψυχρής" πλάκας αναλαμβάνουν κρύσταλλοι πάγου, οι οποίοι κατευθυνόμενοι λόγω του βάρους τους προς τα κάτω, μεταφέρουν προς την αντίστοιχη περιοχή του νέφους το αρνητικό τους φορτίο, ενώ τα εκτινασσόμενα προς τα πάνω σταγονίδια συμπαρασύρουν το θετικό τους φορτίο. Με αυτό τον τρόπο εξηγείται, ενδεχομένως, η δημιουργία ηλεκτρικού διπόλου (στο σύννεφο), που παρουσιάζει τα αρνητικά φορτία στο κάτω μέρος του. Η παραδοχή του αναφερθέντος μηχανισμού θα μπορούσε να εξηγήσει το διαχωρισμό των ηλεκτρικών φορτίων σε εκείνα τα σύννεφα από τα οποία προέρχεται το 90% των κεραυνοπληξιών που πλήττουν την γη. Ωστόσο, το ασθενές σημείο της παραδοχής του μηχανισμού αυτού, είναι το γεγονός ότι κατά το πείραμα με την πλάκα χαλκού εμφανίζονται μη αμελητέα ηλεκτρικά φορτία πάνω σε αυτήν μόνο όταν οι σταγόνες ύδατος περιλαμβάνουν ίχνη προσμίξεων, όπως NH_4OH .

3) Φαινόμενο διαρρήξεως

Για την κατανόηση του μηχανισμού διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων, θεωρούμε ένα κρύσταλλο πάγου του οποίου το εσωτερικό (πυρήνας) διατηρείται ακόμη σε υγρή κατάσταση (Σχήμα 1.3).

Λόγω της πτωτικής μεταβολής της θερμοκρασίας από τον πυρήνα προς το περίβλημα του κρυστάλλου, τα ιόντα H^+ (τα οποία είναι δέκα φορές πιο ευκίνητα από τα ιόντα OH^-) κινούνται προς το περίβλημα, στο οποίο και προσδίδουν θετικό φορτίο. Τα σχετικά δυσκίνητα ιόντα OH^- μένουν στον πυρήνα του κρυστάλλου, στον οποίο και προσδίδουν αρνητικό φορτίο. Με τη βαθμιαία ψύξη του πυρήνα προκαλείται

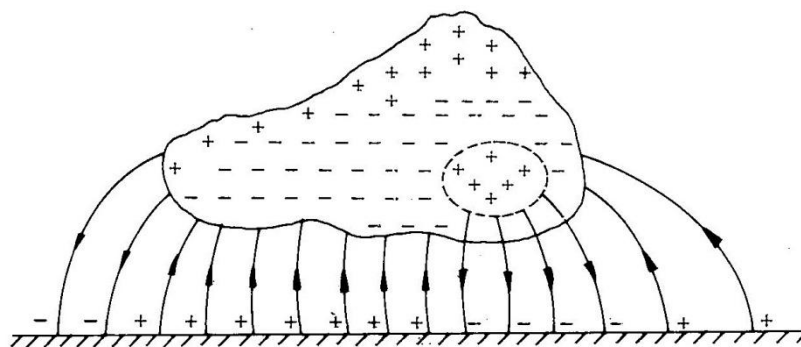
αύξηση του όγκου του, με συνέπεια τη διάρρηξη του εξωτερικού μέρους (περιβλήματος), οπότε οι βαρείς πυρήνες OH^- πέφτουν προς τα κάτω, ενώ τα τεμαχίδια στα οποία διαρρηγνύεται η θετικά φορτισμένη επιφάνεια του κρυστάλλου λόγω των αναταράξεων που επικρατούν στο εσωτερικό του νέφους, μεταφέρονται προς τα ανώτερα στρώματά του. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να εξηγηθεί η δημιουργία ηλεκτρικού διπόλου στο σύννεφο, με τα αρνητικά φορτία στην κάτω περιοχή του.



Σχήμα 1.3: Μηχανισμός διαχωρισμού ηλεκτρικών φορτίων εντός των νεφών που βασίζεται στο φαινόμενο διαρρήξεως [1].

Συνοψίζοντας τα πειραματικά επιβεβαιωμένα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρισμένου νέφους έχουμε τα εξής:

A) Ένα ηλεκτρισμένο σύννεφο περιέχει ηλεκτρικά φορτία και των δύο προσήμων σε ίσες ποσότητες. Φορτία του κάθε προσήμου καταλαμβάνουν διακεκριμένες περιοχές του νέφους. Τα σύννεφα παρουσιάζουν, κατά κανόνα, στο κάτω μέρος τους ένα σημαντικό φορτίο αρνητικής πολικότητας που κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες C και ένα φορτίο θετικής πολικότητας στο πάνω μέρος τους. Έτσι, στο χώρο μεταξύ του σύννεφου και της γης αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο, του οποίου οι δυναμικές γραμμές καταλήγουν στη γη πάνω σε επαγόμενα φορτία, αντίθετης πολικότητας από αυτή που έχουν τα φορτία του σύννεφου. Τα παραπάνω ισχύουν για το 90% των περιπτώσεων κεραυνοπληξίας.



Σχήμα 1.4: Κατανομή φορτίου εντός του νέφους. Ηλεκτρικό πεδίο νέφους-γης [1].

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

Γ) Ο διαχωρισμός των φορτίων στο νέφος συμβαίνει μέσα σε μικρό σχετικά χρονικό διάστημα (μερικά πρώτα λεπτά της ώρας έως μισή ώρα περίπου) [1,2].

1.4 Φάσεις κεραυνικών εκκενώσεων

Οι φάσεις των κεραυνικών εκκενώσεων είναι τρεις:

- A) Προεκκένωση
- B) Εκκένωση αντίθετης φοράς
- Γ) Κύρια εκκένωση

A) Προεκκένωση

Σε περιοχές του νέφους με μεγάλη πυκνότητα φορτίου, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές. Οι υψηλές αυτές εντάσεις, συνδυαζόμενες με τη μικρή πυκνότητα του αέρα και μερικούς άλλους παράγοντες που προκαλούν πρόσθετη τοπική ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου, μπορούν να προκαλέσουν έναρξη ιονισμού των μορίων του αέρα από κρούσεις ηλεκτρονίων. Ο ιονισμός αυτός αποτελεί το πρώτο βήμα για την έναρξη μιας ηλεκτρικής εκκένωσης.

Το επόμενο βήμα είναι ο σχηματισμός ενός οχετού που ακολουθεί τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Ο οχετός ακολουθεί την κατεύθυνση που θα προκαλέσει την ηλεκτρική σύνδεση και αλληλεξουδετέρωση των δύο ετερόσημων φορτίων, η οποία συνοδεύεται από έντονη λάμψη (αστραπή) και δυνατό θόρυβο (βροντή). Αν οι γραμμές μέγιστης πεδιακής έντασης κατευθύνονται προς το έδαφος, ο οχετός (καλούμενος οχετός προεκκένωσης) θα κατευθυνθεί προς αυτό. Η προεκκένωση ξεκινάει από κάποια περιοχή του νέφους όπου το ηλεκτρικό πεδίο απέκτησε πολύ μεγάλες τιμές της τάξης μερικών εκατοντάδων V/m. Δημιουργείται έτσι, ένας αγωγίμος δρόμος (οχετός), ο οποίος τροφοδοτείται συνέχεια με φορείς ηλεκτρικού φορτίου από το σύννεφο. Έχουμε, κατά συνέπεια, τη δημιουργία υψηλού ηλεκτρικού πεδίου που σε μία διαδικασία ανακύκλωσης συμβάλλει στην προώθησή του προς τη γη. Έτσι, η προεκκένωση, αφού ξεκινήσει, αναπτύσσεται από μόνη της στο χώρο του ηλεκτρικού πεδίου, εφ' όσον τροφοδοτείται από την πλευρά του σύννεφου με μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου. Ενδέχεται να έχουμε και διακλαδώσεις του αγωγίμου οχετού, που δεν καταλήγουν όμως σε γεφύρωσή τους προς τη γη, λόγω του ότι δεν υπάρχει διαθεσιμότητα μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων.

B) Εκκένωση αντίθετης φοράς

Η διαμήκης πτώση τάσης κατά μήκος του οχετού προεκκένωσης διαφέρει στις διάφορες θέσεις του, η μέση τιμή της οποίας είναι μικρότερη από 0.1kV/cm. Έτσι, ο οχετός προεκκένωσης εμφανίζεται, περίπου σαν μια μεταλλική προεξοχή που επεκτείνεται από το σύννεφο προς το έδαφος. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από τον οχετό προεκκένωσης και ιδίως στο άκρο του προς το έδαφος, είναι πολύ μεγάλη και υπερβαίνει κατά πολύ την πεδιακή ένταση που απαιτείται για τον ιονισμό του αέρα από κρούσεις (γύρω στις 30kV/cm). Αυτός είναι ο λόγος που ο οχετός περιβάλλεται διαρκώς από ένα μανδύα Corona, που εκτείνεται μερικά μέτρα γύρω

από αυτόν. Το πάχος του μανδύα αυτού είναι μεγαλύτερο στο προς το έδαφος άκρο του οχετού και αυξάνει όσο η κεφαλή του οχετού πλησιάζει στο έδαφος. Όταν ο οχετός πλησιάζει το έδαφος σε απόσταση μερικών εκατοντάδων ή δεκάδων μέτρων, το ηλεκτρικό πεδίο στο έδαφος έχει ενισχυθεί σημαντικά. Έτσι, είναι δυνατό να δημιουργήσει ένα φαινόμενο τύπου Corona, το οποίο καταλήγει σε μια ανερχόμενη εκκένωση, η οποία τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο οχετό, οπότε και έχουμε πλήρη γεφύρωση του διακένου αέρα, με άλλα λόγια, κεραυνικό πλήγμα. Η απόσταση που θα πρέπει να φτάσει η κεφαλή του κατερχόμενου οχετού για να ξεκινήσει από τη γη η εκκένωση αντίθετης φοράς χαρακτηρίζεται σαν απόσταση εναύσεως.

Γ)Κύρια εκκένωση

Στην τελευταία αυτή φάση, η οποία εξελίσσεται με ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα, έχουμε γεφύρωση της αποστάσεως μεταξύ νέφους και γης. Ήδη προϋπάρχει αγωγίμος οχετός προεκκένωσης που παίρνει τη μορφή ενός πλήρους οχετού εκκενώσεως. Τα κυκλοφορούντα ρεύματα διαμέσου του οχετού είναι της τάξης των (10-100) kA, με κλίσεις μετώπου της τάξης (20-100) kA/μs, ενώ η διάρκεια ροής των ρευμάτων αυτών είναι της τάξεως μερικών δεκάδων μs. Το μήκος ενός κεραυνικού οχετού εξαρτάται από το ύψος που βρίσκεται το αντίστοιχο καταγιδόφορο νέφος, ενώ όταν πρόκειται για κεραυνό που λαμβάνει χώρα μεταξύ δύο νεφών εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων νεφών. Σε περίπτωση που έχουμε κεραυνοπληξία προς γη, το μήκος των κεραυνικών οχετών είναι της τάξης λίγων χιλιομέτρων το πολύ. Η διάμετρος ενός οχετού εκκενώσεως είναι της τάξης μερικών εκατοστών [1].

1.5 Εκκενώσεις μεταξύ των νεφών ή μέσα στο ίδιο σύννεφο (cloud discharges)

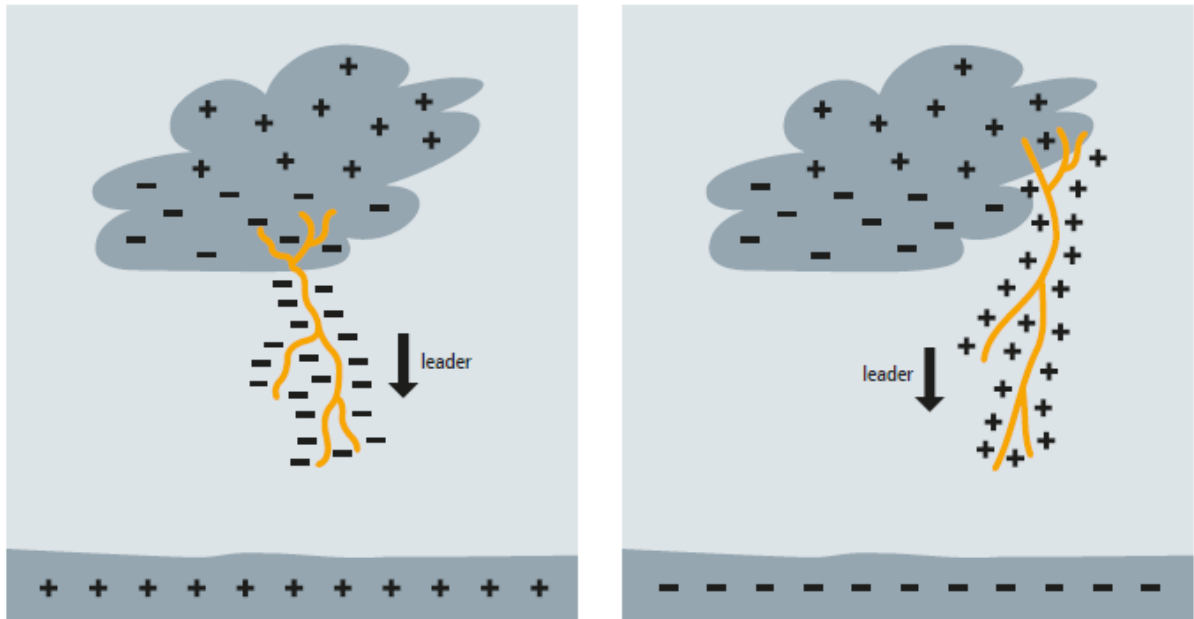
Υπολογίζεται ότι το 75 % των ατμοσφαιρικών εκκενώσεων δε φτάνουν στο έδαφος, αν και αυτό το ποσοστό εξαρτάται από το είδος της καταιγίδας, το στάδιο στο οποίο βρίσκεται η καταιγίδα καθώς και από άλλους παράγοντες. Προτού εκδηλωθεί η πρώτη εκκένωση μεταξύ νέφους και εδάφους, προηγούνται τουλάχιστον 10 εκκενώσεις μεταξύ νεφών.

Οι εκκενώσεις αυτές αποτελούν, κυρίως, αντικείμενο μελέτης για την ασφάλεια των αεροσκαφών. Ωστόσο, δεν έχουν μελετηθεί εκτενώς, όπως οι εκκενώσεις σύννεφου-εδάφους λόγω της δυσκολίας καταγραφής των οχετών που εκδηλώνονται μέσα στα σύννεφα αλλά και της αδυναμίας να μετρηθούν άμεσα τα ρεύματα και τα μεταφερόμενα φορτία. Στην κατηγορία των cloud discharges μπορούν να συμπεριληφθούν και οι εκκενώσεις μεταξύ της κορυφής του νέφους και των ανώτερων αγωγίμων στρωμάτων της ατμόσφαιρας [2].

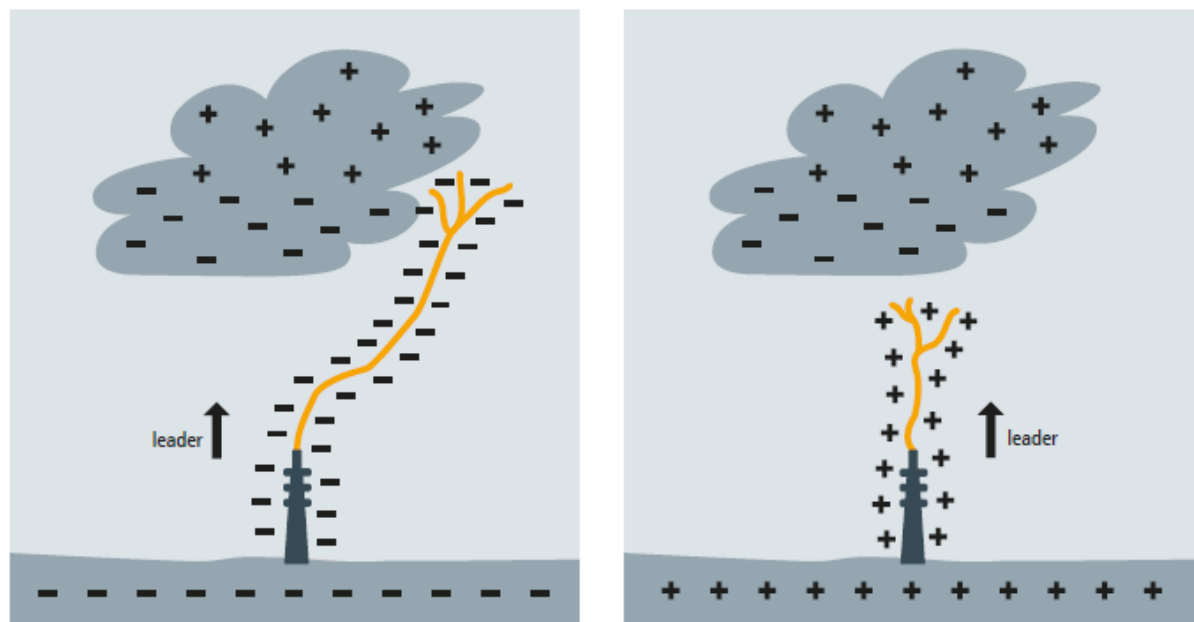
1.6 Κεραυνοί μεταξύ νέφους και γης

Με βάση την παρατηρούμενη πολικότητα εκκένωσης που καταλήγει στο έδαφος και την κατεύθυνση διάδοσης του οχετού προεκκένωσης, έχουν αναγνωριστεί τέσσερα διαφορετικά είδη κεραυνών μεταξύ σύννεφου - εδάφους. (Σχήματα 1.5&1.6)

- α) Κατερχόμενη αρνητική εκκένωση
- β) Κατερχόμενη θετική εκκένωση
- γ) Ανερχόμενη αρνητική εκκένωση
- δ) Ανερχόμενη θετική εκκένωση [2].



Σχήμα 1.5: Το σχήμα παριστάνει το μηχανισμό εκκένωσης του κατερχόμενου αρνητικού κεραυνού (αριστερά) και του κατερχόμενου θετικού κεραυνού (δεξιά) [9].

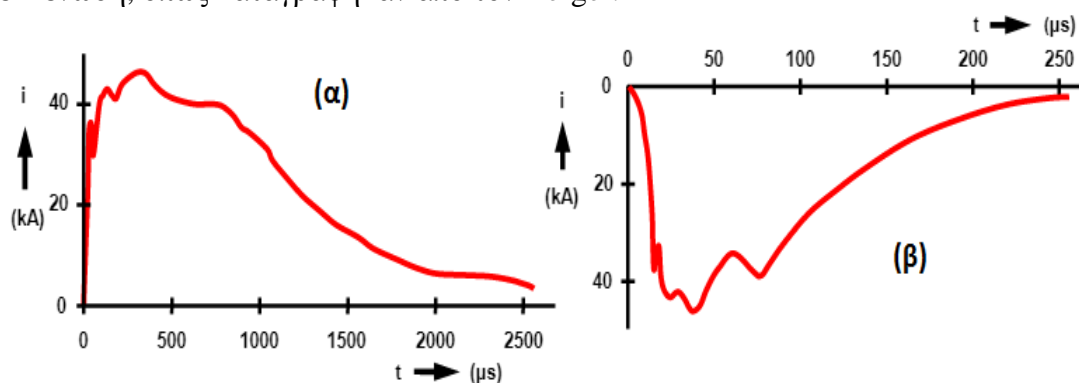


Σχήμα 1.6: Το σχήμα παριστάνει το μηχανισμό εκκένωσης του ανερχόμενου αρνητικού κεραυνού (αριστερά) και του ανερχόμενου θετικού κεραυνού (δεξιά) [9].

1.7 Κατερχόμενοι κεραυνοί (downward lightning)

Μικρά κτήρια με ύψος μέχρι 100m περίπου πλήττονται σχεδόν αποκλειστικά από κατερχόμενους κεραυνούς. Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται το ρεύμα για τα αρχικά

πλήγματα επιστροφής (first return strokes) για θετική και αρνητική κατερχόμενη εκκένωση, όπως καταγράφηκαν από τον Berger.

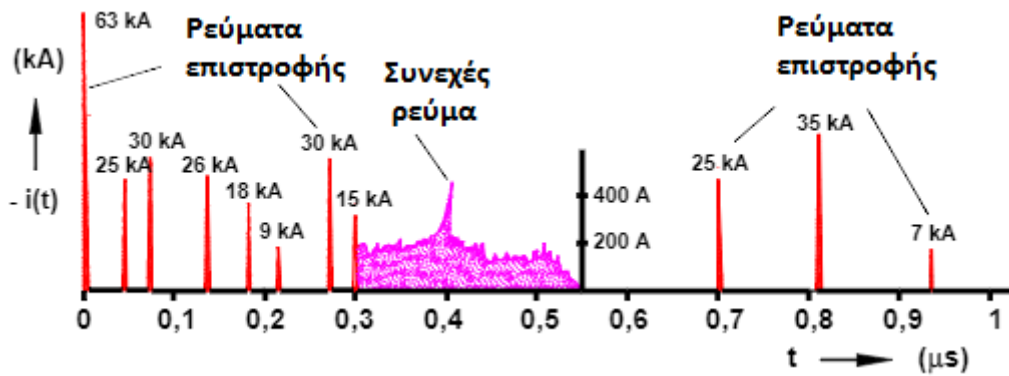


Σχήμα 1.7: Αρχικό πλήγμα επιστροφής για (α) θετική και (β) αρνητική κατερχόμενη εκκένωση [3].

Ο θετικός κατερχόμενος κεραυνός αποτελείται από ένα μόνο πλήγμα, χωρίς επακόλουθα χτυπήματα (subsequent strokes). Το πλήγμα αυτό έχει μικρότερη κλίση μετώπου (di/dt), αλλά μεγαλύτερη διάρκεια (η οποία φτάνει τα 2 ms) από το πρώτο βραχύ πλήγμα των αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών. Ο συνδυασμός της μεγάλης διάρκειας του θετικού κεραυνού και της πολύ μεγάλης τιμής του ρεύματος συντελεί στη μεγαλύτερη μεταφορά φορτίου σε σχέση με τον αρνητικό κεραυνό. Όπως αναφέρθηκε μόλις το 10% των κατερχόμενων κεραυνών έχουν θετική πολικότητα. Ωστόσο, αυτό το ποσοστό είναι διαφορετικό ανά περιοχή, καθώς κατά τη διάρκεια του χειμώνα οι ακτές της Ιαπωνίας και της Κορέας πλήττονται από κεραυνούς, από τους οποίους το 70% έχει θετική πολικότητα. Αξίζει, επίσης να σημειωθεί πως η πλειονότητα των πολυσύχναστων λιμανιών (Singapore, Kochi, Jonor) βρίσκεται σε περιοχές με συχνά και έντονα φαινόμενα κεραυνοπληξίας [4].

Τα αρνητικά κεραυνικά ρεύματα διακρίνονται από ένα ταχέως ανερχόμενο τμήμα (από 100 ns έως 10 μ s), ενώ έπεται ένα τμήμα στο οποίο το ρεύμα μειώνεται με αργό ρυθμό. Τα ρεύματα των αρχικών πληγμάτων επιστροφής των αρνητικών κεραυνών σταματούν τυπικά μετά από μερικές εκατοντάδες μ s. Τα αρχικά πλήγματα ακολουθούνται συνήθως από μερικά επακόλουθα, τα οποία διέρχονται από το κεραυνικό κανάλι το οποίο έχει ήδη δημιουργηθεί. Περίπου το 75% των αρνητικών κατερχόμενων κεραυνών περιέχουν περισσότερα από ένα ρεύματα επιστροφής [κατά μέσο όρο 3 επακόλουθα ρεύματα επιστροφής (subsequent return strokes)].

Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται ένας αρνητικός κατερχόμενος κεραυνός με πολλαπλά πλήγματα. Αποτελείται από 11 ρεύματα επιστροφής και ένα συνεχές ρεύμα (μετά το 8ο πλήγμα). Παρατηρούμε πως το αρχικό πλήγμα επιστροφής έχει μεγαλύτερη μέγιστη τιμή από τα επακόλουθα, τα οποία ωστόσο, έχουν μεγαλύτερες κλίσεις μετώπου. Μεταξύ των συνεχόμενων επακόλουθων πληγμάτων υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία παρατηρείται ρεύμα μικρότερου πλάτους (μερικών εκατοντάδων A) αλλά μεγαλύτερης διάρκειας (από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες ms) [3,4].

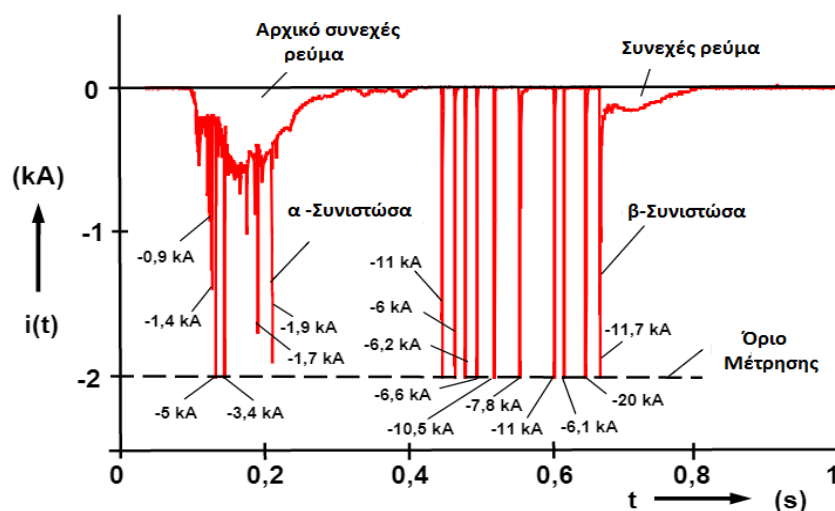


Σχήμα 1.8: Αρνητικός κατερχόμενος κεραυνός με πολλαπλά πλήγματα αποτελούμενο από 11 κρουστικά ρεύματα και ένα συνεχές[3].

1.8 Ανερχόμενοι κεραυνοί (Upward lightning)

Οι ανερχόμενοι οχετοί εμφανίζονται συνήθως σε ψηλά κτήρια (πάνω από 100 m) ή σε μικρότερα κτίρια τα οποία βρίσκονται σε βουνά[2]. Στις περιπτώσεις αυτές, στην κορυφή των κατασκευών, το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετό έντονο ώστε να είναι πιθανή μια ανερχόμενη εκκένωση.

Ο αριθμός των ανερχόμενων εκκενώσεων κατά την καλοκαιρινή περίοδο είναι πολύ μεγαλύτερος από εκείνον των κατερχόμενων. Αυτό συμβαίνει επειδή το καλοκαίρι λόγω του σημαντικού ύψους των νεφών από το έδαφος πολλές εκκενώσεις πραγματοποιούνται εντός ενός νέφους ή μεταξύ των νεφών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια απότομη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια του εδάφους. Εάν υπάρχει κάποια αιχμηρή κατασκευή, το πεδίο κοντά στο έδαφος μπορεί να γίνει τόσο έντονο ώστε να δημιουργήσει μια ανερχόμενη εκκένωση [1] Στο Σχήμα 1.9 φαίνεται ένας ανερχόμενος κεραυνός όπως καταγράφηκε στον πύργο Peissenberg στη Γερμανία. Παρατηρούμε πως στο αρχικό συνεχές ρεύμα εμφανίζονται και κρουστικά ρεύματα. Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται α -συνιστώσες (α -components) και έχουν μικρή διάρκεια και πλάτη μερικών kA. Αφού το αρχικό συνεχές ρεύμα έχει σταματήσει, έπονται οι β -συνιστώσες (β -components) [4].



Σχήμα 1.9: Ανερχόμενος αρνητικός κεραυνός όπως μετρήθηκε στον πύργο Peissenberg [4].

1.9 Παράμετροι κεραυνού

Το κεραυνικό ρεύμα είναι η κύρια αιτία για όλες τις θερμικές και μηχανικές επιπτώσεις που προκαλούνται από τον κεραυνό. Επίσης, δημιουργούνται επαγόμενες υπερτάσεις οι οποίες επηρεάζουν τα ηλεκτρικά συστήματα. Οι παράμετροι του κεραυνικού ρεύματος που σχετίζονται με τις επιδράσεις αυτές είναι:

α) Η μέγιστη τιμή του ρεύματος i_{max} , η οποία είναι ένας σημαντικός παράγοντας για το σχεδιασμό του συστήματος γείωσης.

Στην περίπτωση άμεσου πλήγματος κεραυνού σε κάποια εκτεθειμένη εξωτερική εγκατάσταση της κατασκευής (εξωτερική εγκατάσταση αντικεραυνικής προστασίας) το δυναμικό του σημείου πλήγματος ως προς τη γη ή ως προς άλλη ανεξάρτητη γείωση της κατασκευής σε μία πρώτη προσέγγιση θα δίνεται από τη σχέση:

$$u = i_{max} * R_e + L \frac{di}{dt} \quad (1.9.1)$$

όπου :

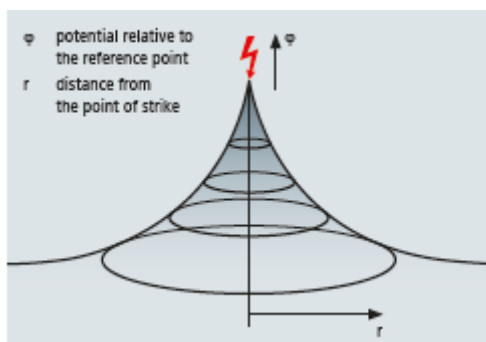
- i_{max} το μέγιστο εύρος του ρεύματος του κεραυνού
- R_e η αντίσταση γείωσης της εγκατάστασης
- L η αυτεπαγωγή που παρουσιάζει η αγωγίμη διαδρομή από το σημείο πλήγματος μέχρι τη γη και,
- $\frac{di}{dt}$ η μέση κλίση του μετώπου του ρεύματος του κεραυνού

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος στη σχέση 1.9.1 περιγράφει την ανύψωση δυναμικού του συστήματος γείωσης ως προς τη γη ως αποτέλεσμα της διάχυσης του ρεύματος του κεραυνού στο έδαφος διαμέσου του. Ωστόσο, ο όρος αυτός δεν αποδίδει ακριβώς την τιμή του μεγέθους διότι θεωρήθηκε ότι η τιμή της αντίστασης γείωσης διαμορφώνεται μόνο από την τιμή της μόνιμης κατάστασής της. Η παραδοχή αυτή δίνει αποτελέσματα στην ασφαλή πλευρά στην περίπτωση συγκεντρωμένης εγκατάστασης γείωσης όπου χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια γείωσης μικρών διαστάσεων. Η ανύψωση του δυναμικού του συστήματος γείωσης είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση βηματικής τάσης στην περιοχή γύρω από την εγκατάσταση γείωσης.

Κατά την εκφόρτιση κρουστικού ρεύματος στη γη, όπως του κεραυνού, διαμέσου εγκατάστασης γείωσης η επαγωγική συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης γείωσης γίνεται σημαντική. Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση της εγκατάστασης γείωσης αναφέρεται ως κρουστική αντίσταση γείωσης και η τιμή της είναι συνάρτηση του χρόνου και εξαρτάται από την κυματομορφή του ρεύματος του κεραυνού.

Ο δεύτερος όρος του αθροίσματος στη σχέση (1.9.1) περιγράφει την υπέρταση που μπορεί να εμφανιστεί σε κάποιο σημείο της διαδρομής του ρεύματος του κεραυνού από το σημείο πλήγματος μέχρι τη γη. Η τιμή της υπέρτασης διαμορφώνεται από τη μέση κλίση μετώπου του ρεύματος του κεραυνού και από την αυτεπαγωγή που παρουσιάζει η αγωγίμη διαδρομή κατά τη διέλευσή του.

Εάν το κεραυνικό ρεύμα πλήξει ένα σημείο ομογενούς αγωγιμής επιφάνειας, τότε η κλίση του δυναμικού της περιοχής αυξάνεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται, επίσης, όταν κεραυνός πλήξει ομοιογενές έδαφος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του εδάφους τόσο πιο επίπεδη είναι η κλίση του δυναμικού της περιοχής. (Σχήμα 1.10) Επομένως, μειώνεται και ο κίνδυνος για την ανάπτυξη επικίνδυνων βηματικών τάσεων.



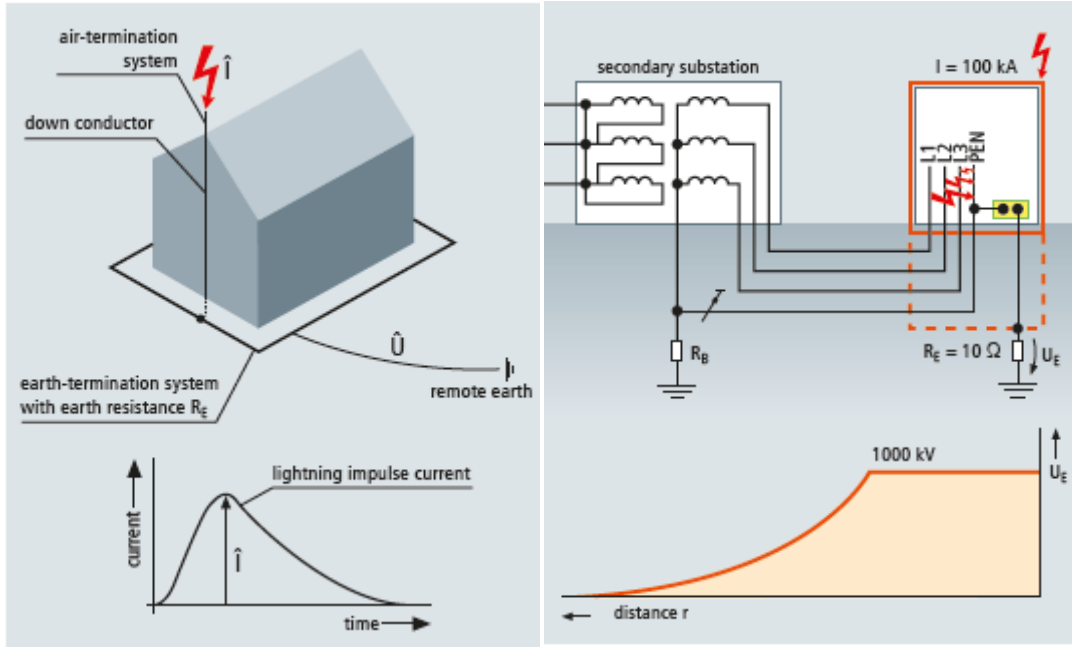
Σχήμα 1.10: Κατανομή δυναμικού στην περίπτωση κεραυνικού πλήγματος σε ομοιογενές έδαφος [9].

Εάν ο κεραυνός πλήξει ένα κτήριο το οποίο διαθέτει σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, το ρεύμα οδεύει προς τη γη προκαλώντας πτώση τάσης λόγω της αντίστασης γείωσης. Εφόσον όλα τα εκτεθειμένα αγωγιμα μέρη του κτηρίου αποκτούν το ίδιο δυναμικό (λόγω των μεταξύ τους συνδέσεων), οι άνθρωποι που βρίσκονται μέσα στο κτήριο δεν κινδυνεύουν. Επομένως, είναι απαραίτητη η ισοδυναμική σύνδεση όλων των μεταλλικών μερών του κτηρίου καθώς και των εξωτερικών αγωγίων τμημάτων που εισέρχονται στο κτήριο. Η αύξηση του δυναμικού του συστήματος γείωσης [earth-termination system] προκαλεί προβλήματα στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση. Στο παράδειγμα του Σχήματος 1.11 φαίνεται ένα κτήριο που πλήττεται από κεραυνό. Το ρεύμα διοχετεύεται μέσω του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας στο έδαφος και δημιουργείται η ανύψωση δυναμικού στην προσκείμενη περιοχή. Το δυναμικό U_E του κτηρίου αυξάνεται ενώ το δυναμικό του συστήματος παροχής χαμηλής τάσης παραμένει αμετάβλητο. Συνεπώς, δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού (στο παράδειγμα είναι 1000 kV), η οποία είναι ικανή να προκαλέσει βλάβες στη μόνωση της ηλεκτρολογικής εγκατάστασης και στον εξοπλισμό.

Επίσης, η μέγιστη τιμή του ρεύματος και η ειδική ενέργειά του είναι υπεύθυνες για τις μηχανικές επιδράσεις. Συχνά παρατηρούνται μηχανικές καταπονήσεις, όπως παραμορφώσεις ή μετακινήσεις των υλικών της κατασκευής ή και αποκόλληση στρωμάτων από στρωματόμορφα υλικά ως αποτέλεσμα των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται κατά τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος καθώς και της απότομης μεταφοράς ενέργειας μεταξύ του κεραυνού και της κατασκευής. Οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις F που αναπτύσσονται λόγω ενός ρεύματος i σε παράλληλους αγωγούς μήκους l (Σχήμα 1.12) με μεταξύ τους απόσταση d , δίνονται από τη σχέση

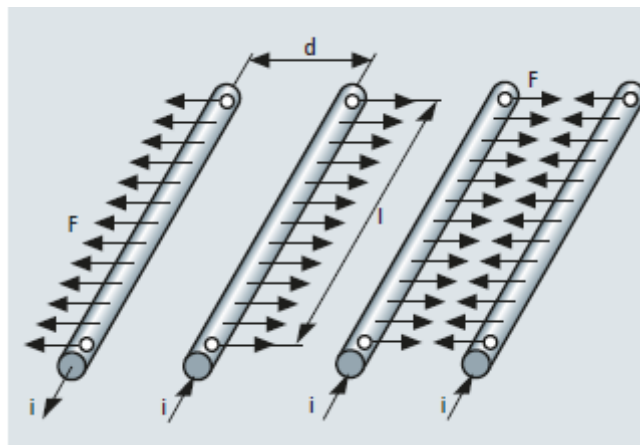
$$F(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot i^2(t) \cdot \frac{l}{d} \quad (1.9.2)$$

όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)



Σχήμα 1.11: Στο παραπάνω σχήμα ένα κτήριο πλήττεται από κεραυνό(αριστερά), ενώ δεξιά μπορούμε να δούμε την ανύψωση δυναμικού συναρτήσει της απόστασης λόγω του κεραυνικού πλήγματος [9].

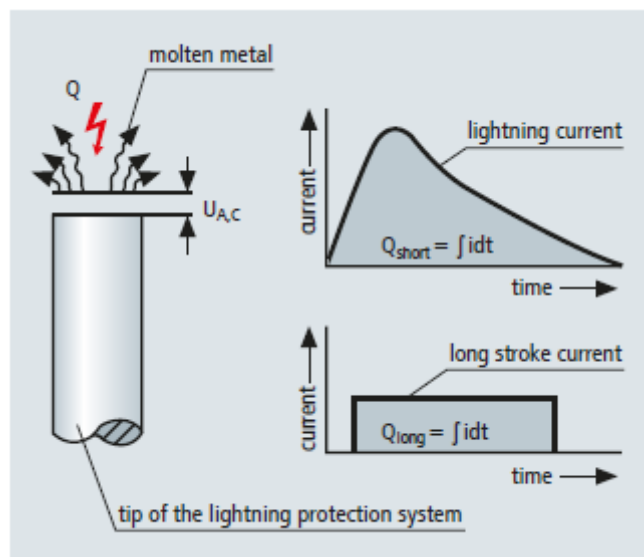
Αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα ίδιας φοράς έλκονται μεταξύ τους, ενώ αγωγοί που διαρρέονται από ρεύματα αντίθετης φοράς απωθούνται. Αγωγίμοι βρόχοι διαστέλλονται και σε πηνία με πολλά τυλίγματα οι δυνάμεις αθροίζονται με συνέπεια η μόνωσή τους να συμπιέζεται. Οι δυνάμεις μεταξύ αγωγών κατά τη διέλευση του ρεύματος του κεραυνού αποκτούν ουσιαστικά ασήμαντη τιμή για αποστάσεις (μεταξύ των αγωγών) μεγαλύτερες από 0.5m.



Σχήμα 1.12: Ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις μεταξύ παράλληλων αγωγών [9].

β) Το μεταφερόμενο φορτίο Q . Το φορτίο Q_{flash} του κεραυνού αποτελείται από το φορτίο Q_{short} των βραχέων πλήγμάτων (πρώτων και επακόλουθων) και του φορτίου Q_{long} του σταθερού ρεύματος διάρκειας. Το συνολικό μεταφερόμενο φορτίο Q , όπου $Q = \int_0^{\infty} i(t) \cdot dt$ είναι κρίσιμο για τη μετατρεπόμενη ενέργεια στο σημείο πρόσπτωσης του κεραυνού αλλά και στα σημεία που εμφανίζονται τόξα κατά μήκος μιας απόστασης μόνωσης. Η θερμότητα που αναπτύσσεται στο σημείο πλήγματος στην επιφάνεια ενός μεταλλικού στοιχείου είναι ανάλογη της τάσης του ηλεκτρικού τόξου $U_{A,C}$ που εμφανίζεται, η οποία παραμένει σταθερή, και του ολοκληρώματος του ρεύματος του κεραυνού στο χρόνο καθ' όλη τη διάρκειά του. Επομένως, η τήξη μεταλλικών επιφανειών είναι συνάρτηση του ολικού φορτίου του κεραυνού. Η μετατρεπόμενη ενέργεια στο σημείο πλήγματος μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $W = Q \cdot U_{A,C}$. Συνεπώς, το φορτίο του κεραυνικού ρεύματος προκαλεί την τήξη των στοιχείων του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας στα οποία προσπίπτει ο κεραυνός και καταπονεί τα προστατευτικά διάκενα (spark gaps) και τους απαγωγείς υπερτάσεων τύπου σπινθηριστή (spark-gap-based surge protective devices).

Μελέτες έχουν δείξει πως τα τόξα διατηρούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα και επομένως η τήξη και εξάχνωση μεγάλων ποσοτήτων υλικού οφείλονται στο φορτίο λόγω του μακρόχρονου πλήγματος διάρκειας Q_{long} .

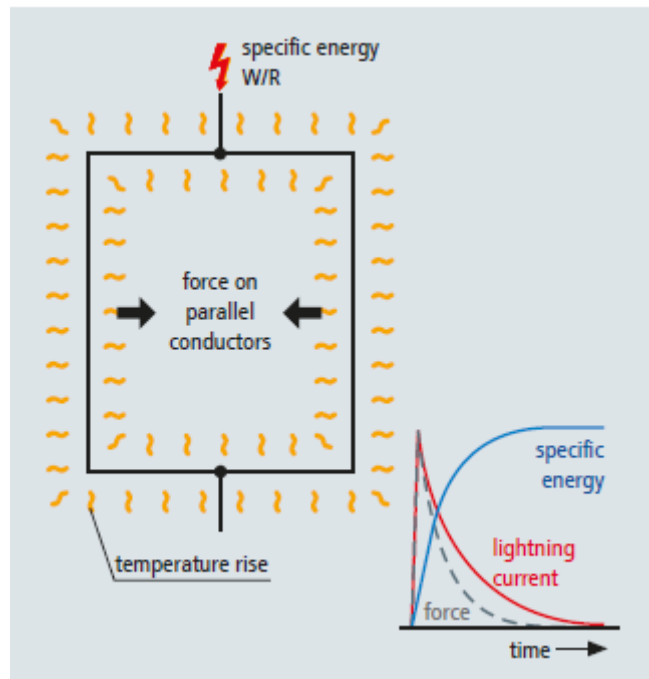


Σχήμα 1.13: Μετατροπή ενέργειας στο σημείο πρόσπτωσης λόγω του φορτίου του κεραυνικού ρεύματος [9].

γ) Η ειδική ενέργεια W/R . Η θερμική ενέργεια κατά τη διέλευση του βραχέως κεραυνικού ρεύματος από ένα αγωγό δίδεται από τη σχέση: $W = R \int_0^{\infty} i^2 dt$ όπου R η ωμική αντίσταση του αγωγού (εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία) και i το ρεύμα του βραχέως πλήγματος. Ωστόσο, το φαινόμενο δεν γίνεται κατά κανόνα αισθητό διότι αφενός ο κεραυνός σπάνια παροχετεύεται προς τη γη μόνο μέσω ενός αγωγού, αφετέρου η ανύψωση της θερμοκρασίας που παρατηρείται στους αγωγούς που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις είναι κατά κανόνα μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία τους. Η ανύψωση της θερμοκρασίας ενός

αγωγού μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της ειδικής ενέργειας του ρεύματος του κεραυνού. Για παράδειγμα για αγωγό διατομής 50mm^2 και ειδική ενέργεια κεραυνού $10\text{ MJ}/\Omega$ η αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού ΔT είναι 211 K , 22 K και 940 K για σίδηρο, χαλκό και ανοξείδωτο χάλυβα αντίστοιχα [9]. Ο υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας πρέπει να γίνεται κατά τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση των συστημάτων αντικεραυνικής προστασίας όταν υπάρχει κίνδυνος για τον άνθρωπο ή είναι υπαρκτός ο κίνδυνος εκδήλωσης φωτιάς ή έκρηξης. Ο υπολογισμός αυτός υποθέτει πως η θερμική ενέργεια παράγεται από την ωμική αντίσταση των στοιχείων του συστήματος αντικεραυνικής προστασίας. Επίσης, θεωρείται πως στη διάρκεια μερικών ms, κατά τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος η ανταλλαγή ενέργειας με το περιβάλλον είναι ασήμαντη και η θερμική ενέργεια έχει ως μοναδικό αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας του αγωγού.

Ωστόσο, κατά τον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης διατομής του αγωγού πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect), αφού το κεραυνικό ρεύμα είναι ταχέως μεταβαλλόμενο και έχει την τάση να συγκεντρώνεται στην επιφάνεια του αγωγού.



Σχήμα 1.14: Η αύξηση της θερμοκρασίας και οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις λόγω της ειδικής ενέργειας [9].

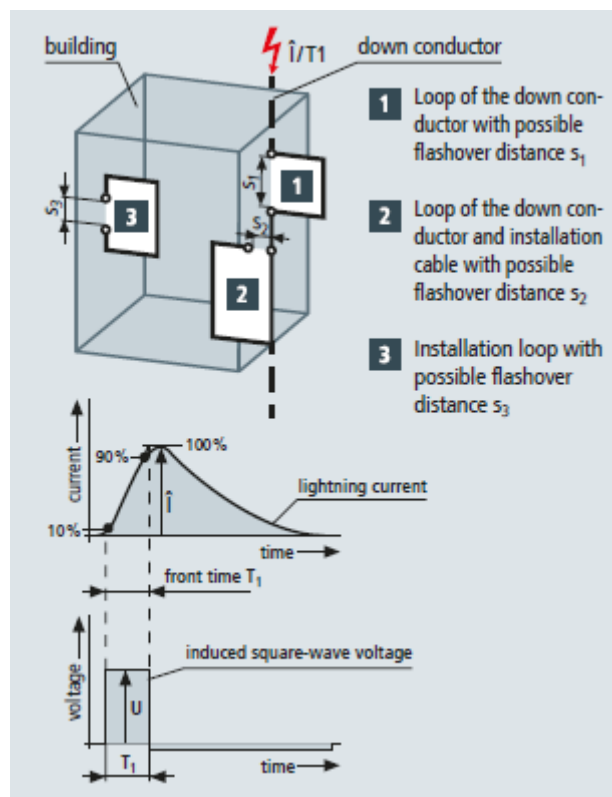
δ) Η μέγιστη κλίση του κεραυνικού ρεύματος $(di/dt)_{max}$, η οποία καθορίζει τις επαγόμενες τάσεις σε ανοιχτούς και κλειστούς αγωγίμους βρόχους οι οποίοι βρίσκονται κοντά σε αγωγούς που διαρρέονται από το κεραυνικό ρεύμα. Το Σχήμα 1.15 δείχνει πιθανούς σχηματισμούς αγωγίμων βρόχων στους οποίους μπορούν να επαχθούν τάσεις από το κεραυνικό ρεύμα. Ακόμα, παρατίθεται ένα παράδειγμα υπολογισμού επαγόμενης τάσης για τετραγωνικό βρόχο μήκους 10 m , απόσταση μόνωσης 3 m και κλίσης $150\text{ kA}/\mu\text{s}$. Η τετραγωνική τάση που αναπτύσσεται σε αγωγίμο βρόχο είναι:

$$U = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1.9.3)$$

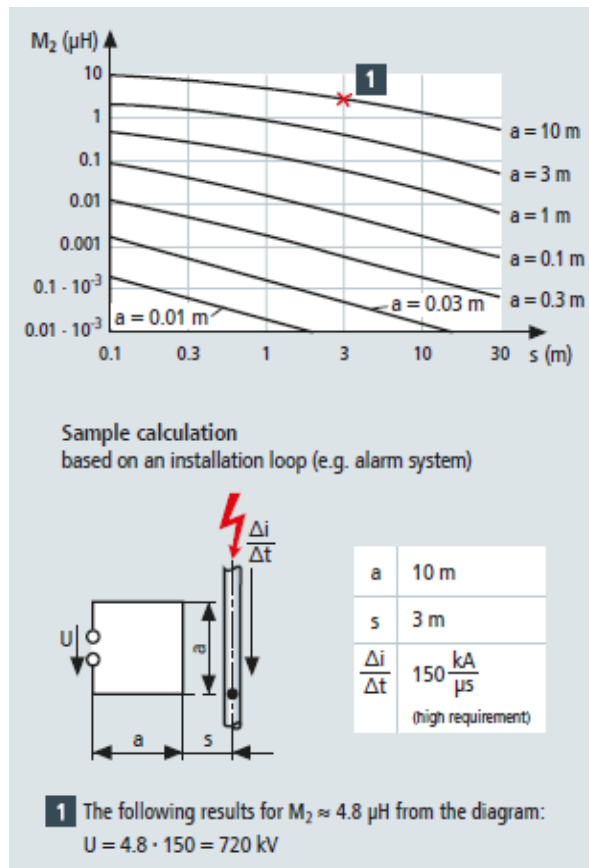
όπου M η αμοιβαία επαγωγή του βρόχου (mutual inductance of the loop)
 $\Delta i/\Delta t$ η μέγιστη κλίση του κεραυνικού ρεύματος

Η κλίση του μετώπου του κεραυνού είναι υπεύθυνη για ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις, που μπορεί να οδηγήσουν στην ηλεκτρική διάσπαση μονώσεων ως προς γη ή μεταξύ κυκλωμάτων διαφορετικής τάσης, δευτερογενείς υπερπηδήσεις, με άμεσο κίνδυνο σημαντικής βλάβης ή απώλειας ανθρώπινης ζωής, πυρκαγιάς ή έκρηξης καθώς και διαταραχής ή διακοπής της κανονικής λειτουργίας ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Ακόμα, τα αναπτυσσόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να επιφέρουν επιζήμιες συνέπειες υπό τη μορφή βλαβών σε ηλεκτρονικές συσκευές και διακοπών λειτουργίας ηλεκτρονικών συστημάτων σε εγκαταστάσεις. Στην ηλεκτρική εγκατάσταση του πλοίου, τα ευαίσθητα φορτία, τα οποία χρήζουν ειδικής προστασίας, βρίσκονται στη γέφυρα (navigation room) του πλοίου. Επικίνδυνες υπερτάσεις λόγω πλήγματος μιας κατασκευής από κεραυνό μπορούν να αναπτυχθούν μέσω αγωγίμης ζεύξης καθώς και μέσω μαγνητικής ή χωρητικής σύζευξης.

Αξίζει να επισημανθεί πως η μέγιστη κλίση του ρεύματος λαμβάνει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές στην περίπτωση των επακόλουθων πληγμάτων σε σχέση με τα αρχικά πλήγματα.



Σχήμα 1.15: Επαγόμενες τετραγωνικές τάσεις σε βρόχους λόγω της μέγιστης κλίσης του κεραυνικού ρεύματος [9].



Σχήμα 1.16: Παράδειγμα υπολογισμού επαγόμενης τετραγωνικής τάσης σε τετράγωνο βρόχο με μήκος $a=10m$, απόσταση μόνωσης $s=3m$, και μέγιστη κλίση μετώπου $150 \frac{kA}{\mu s}$ [9].

Μερικές τιμές παραμέτρων του κερανού φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.1. Η στήλη με το (+) δηλώνει τους θετικούς κεραυνούς, ενώ η στήλη με το (-) δηλώνει τους αρνητικούς κεραυνούς και η στήλη με το (-/+) δηλώνει τους αρνητικούς μαζί με τους θετικούς κεραυνούς [5,9].

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

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικές τιμές κεραυνικών παραμέτρων από μετρήσεις μέχρι το 1989 [1].

1.10 Περιγραφή και αναπαράσταση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος

Για τη μέτρηση του ρεύματος και για την απόκτηση μιας αντίληψης για τη μορφή του έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Οι παλιότερες στηρίζονταν σε μια εκτίμηση του ρεύματος που γινόταν από τα θερμικά ή μηχανικά αποτελέσματα που προκαλεί το πλήγμα του κεραυνού. Έτσι, από την τήξη λεπτών μετάλλων και τα ίχνη πάνω σε λεπτές μεταλλικές επιφάνειες, γινόταν εκτίμηση της συνολικής ενέργειας του κεραυνού. Επίσης, εκτίμηση του εύρους του ρεύματος γινόταν από τη σύσφιξη που προκαλεί η ροή του ρεύματος διαμέσου ενός σωλήνα. Ένας άλλος τρόπος εκτίμησης του κεραυνικού ρεύματος είναι η μέθοδος της μαγνητικής ζεύξης. Η μέθοδος στηρίζεται στο γεγονός πως όταν το ρεύμα του κεραυνού διαρρέει ένα αγωγό, σχηματίζεται γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Αν τοποθετηθεί κοντά στον αγωγό ένα μαγνητικό υλικό, αυτό θα μαγνητιστεί με τη μέγιστη τιμή του πεδίου η οποία εξαρτάται από το μέγιστο ρεύμα που διέρρευσε τον αγωγό. Τέτοια μαγνητιζόμενα υλικά (magnetic links) τοποθετούνται συνήθως σε επαφή με τα σκέλη μεταλλικών πύργων γραμμών μεταφοράς, καθώς και σε στύλους και ψηλά κτήρια. Ωστόσο από αυτή τη μέθοδο μπορεί να εκτιμηθεί μόνο η μέγιστη τιμή του ρεύματος [13]. Αργότερα, ξεκίνησε η χρήση των παλμογράφων για την καταγραφή της ρευματικής κυματομορφής. Η πλειονότητα των μετρήσεων αφορούσαν ψηλούς πύργους τηλεπικοινωνιών εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας εκδήλωσης κεραυνού. Επομένως τα δεδομένα που συλλέγονταν προέρχονταν κυρίως από ανερχόμενους κεραυνούς (ground-to-cloud lightning).

Οι ανερχόμενοι κεραυνοί, όμως, είναι λιγότερο επικίνδυνοι από τους κατερχόμενους κεραυνούς (cloud-to-ground lightning), όσον αφορά το μεταφερόμενο φορτίο, τη μέγιστη τιμή του ρεύματος και τη μέγιστη κλίση του. Επίσης, τα ταχέως αυξανόμενα τμήματα των ρευμάτων, συχνά, δεν μπορούσαν να καταγραφούν αποτελεσματικά, ενώ οι ανακλάσεις, οι οποίες σχετίζονται με το ύψος των πύργων, επηρέαζαν την αξιοπιστία των καταγραφόμενων δεδομένων. Ακόμα, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας πως για την προστασία των κατασκευών και των ευαίσθητων ηλεκτρονικών συστημάτων πρέπει να μελετήσουμε κυρίως τους κατερχόμενους κεραυνούς (λόγω του μεγαλύτερου ρεύματος). Επίσης, το ανερχόμενο τμήμα του ρεύματος είναι υπεύθυνο για τις επαγόμενες τάσεις που δημιουργούνται στα ηλεκτρικά κυκλώματα και συνεπώς η μελέτη του είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκτίμηση των επιπτώσεων στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις. Για το λόγο αυτό έγιναν προσπάθειες καταγραφής της ρευματικής κυματομορφής του κεραυνού και προσδιορισμού των παραμέτρων της. Τα σημαντικότερα δεδομένα προέρχονται από τα πειράματα που διεξήγαγε ο Berger ο οποίος κατέγραψε κεραυνικά ρεύματα από το 1943 έως το 1971 σε δύο τηλεπικοινωνιακούς πύργους στην Ελβετία. Αυτά τα δεδομένα αποτέλεσαν τη βάση για το πρότυπο αντικεραυνικής προστασίας IEC 62305.

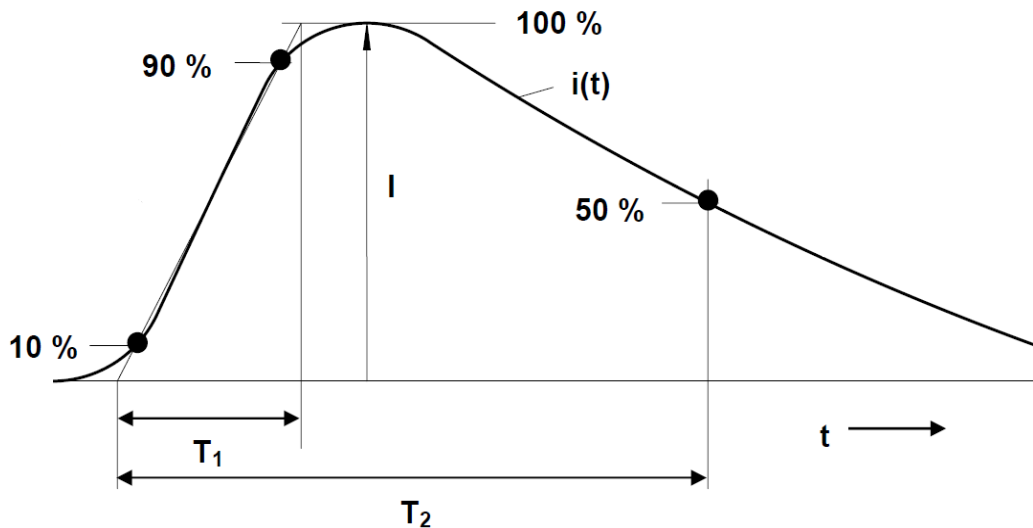
Όπως αναφέρθηκε, οι μετρήσεις έδειξαν πως οι παράμετροι των ανερχόμενων κεραυνών δεν υπερβαίνουν τις αντίστοιχες των κατερχόμενων. Για το λόγο αυτό, οι

παράμετροι του κεραυνικού ρεύματος που περιγράφονται στο πρότυπο IEC 62305-1, βασίζονται στις παραμέτρους των κατερχόμενων κεραυνών. Για την εκτίμηση του κινδύνου από το κεραυνικό ρεύμα, λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω συνιστώσες :

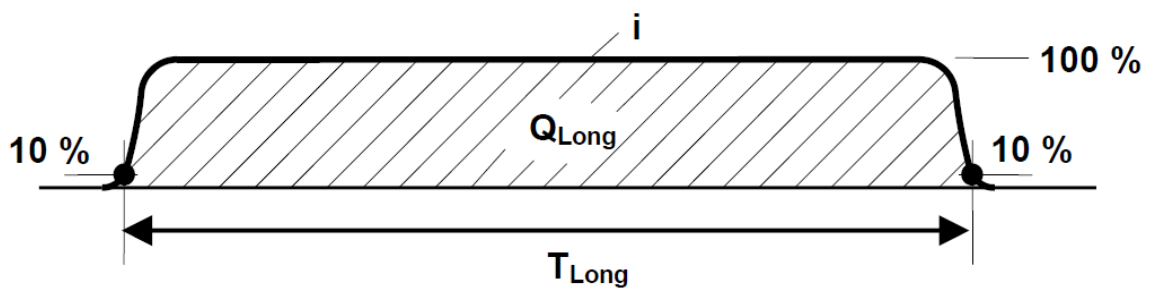
- Το πρώτο βραχύ κρουστικό κεραυνικό ρεύμα
- Το επακόλουθο βραχύ κρουστικό κεραυνικό ρεύμα
- Το μακρό κεραυνικό ρεύμα

Το πρώτο βραχύ κρουστικό ρεύμα λαμβάνει υπόψη το πρώτο ρεύμα επιστροφής του κατερχόμενου κεραυνού. Ο κίνδυνος από τα πρώτα ρεύματα επιστροφής έγκειται στο γεγονός πως στους θετικούς κεραυνούς παρατηρούνται μεγαλύτερες μέγιστες τιμές ρεύματος i_{max} , μεγαλύτερο μεταφερόμενο φορτίο Q και μεγαλύτερες τιμές ειδικής ενέργειας W/R , σε σύγκριση με τον αρνητικό. Οι μετρήσεις του Berger έδειξαν σχετικά ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των τριών παραμέτρων. Για να εκτιμηθούν οι θερμικοί και μηχανικοί κίνδυνοι από τα πρώτα ρεύματα επιστροφής, η μέγιστη τιμή του ρεύματος, το μεταφερόμενο φορτίο και η ειδική ενέργεια πρέπει να προσομοιωθούν ταυτόχρονα με ένα κρουστικό ρεύμα.

Οι μετρήσεις του Berger έδειξαν, επίσης, πως υπάρχει μια ασθενής συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης κλίσης του κεραυνικού ρεύματος και των άλλων παραμέτρων. Επομένως, ο κίνδυνος από τη μέγιστη κλίση μπορεί να εκτιμηθεί ξεχωριστά μέσω του επακόλουθου βραχέως κρουστικού ρεύματος. Όπως αναφέρθηκε, το πρώτο βραχύ ρεύμα έχει συνήθως μεγάλο πλάτος ρεύματος, αλλά μικρή μέγιστη κλίση στο ανερχόμενο τμήμα του. Μπορεί να υπάρχουν διαστήματα μερικών δεκάδων ms μεταξύ των βραχέων επακόλουθων παλμών. Το ρεύμα κάθε πλήγματος αποτελείται από ένα τουλάχιστον κρουστικό ρεύμα διάρκειας μερικών δεκάδων ms, το οποίο ακολουθείται από ένα μικρότερο σταθερό ρεύμα διάρκειας μερικών δεκάδων ή εκατοντάδων ms . Το σταθερό αυτό ρεύμα ονομάζεται μακρό ρεύμα. Το πλάτος του ρεύματος είναι κατά μέσο όρο 30 kA για τον πρώτο βραχύ παλμό και 15 kA για τους επακόλουθους παλμούς των αρνητικών κεραυνών. Ο θετικός κεραυνός σχετίζεται συνήθως με ένα κρουστικό ρεύμα με μεγαλύτερο πλάτος ρεύματος, μικρότερη μέγιστη κλίση του ανερχόμενου τμήματος και μεγαλύτερη συνολική διάρκεια (σε σχέση με τον αρνητικό) [6]. Η πλειονότητα των ρευμάτων επιστροφής των θετικών πληγμάτων φέρουν μεγάλη ποσότητα φορτίου στο μακρό και σταθερό ρεύμα. Το Σχήμα 1.17 παριστάνει τη μορφή των βραχέων κρουστικών ρευμάτων όπως προσδιορίστηκε από το IEC 62305 (2006) και διάφορα πρότυπα IEEE/ANSI. Η κυματομορφή 8/20 μs είναι γνωστή ως κρουστικός παλμός δοκιμής (test impulse). Το IEC 62305 ορίζει μια ακόμα κυματομορφή, γνωστή ως παλμός 10/350 μs για τον έλεγχο των απαγωγέων κρουστικών υπερτάσεων (Surge Protective Devices: SPD), οι οποίοι είναι άμεσα εκτεθειμένοι σε κεραυνικά ρεύματα. Για δεδομένο πλάτος ρεύματος, η κυματομορφή 10/350 μs περιέχει περισσότερη ενέργεια και φορτίο σε σύγκριση με τη 8/20 μs. Ωστόσο, και οι δύο κυματομορφές αποτυγχάνουν να αναπαραστήσουν ικανοποιητικά το ταχέως ανερχόμενο τμήμα του παλμού στην περίπτωση των επακόλουθων πληγμάτων των αρνητικών κεραυνών. Επομένως, υπάρχουν περιορισμοί στην προσδοκώμενη απόδοση των SPD τα οποία εξετάζονται με βάση τις παραπάνω κυματομορφές [4].

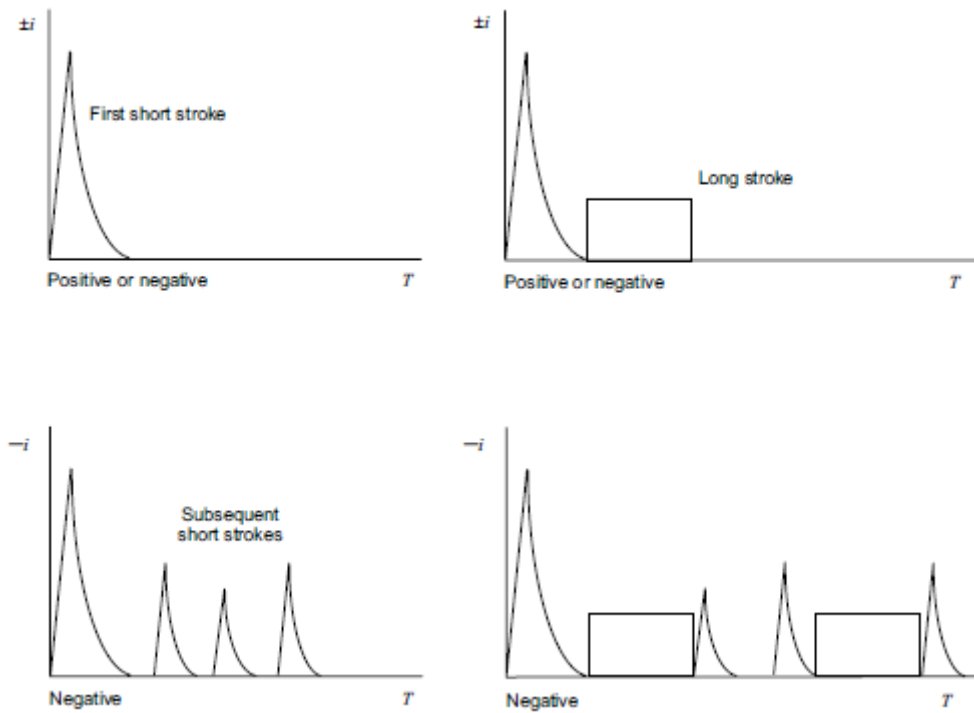


Σχήμα 1.17: Σχηματική παράσταση βραχέως κρουστικού ρεύματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-1. Τα T_1 , T_2 είναι ο χρόνος μετώπου και ο χρόνος ημίσεως εύρους αντίστοιχα (συνήθως $T_2 < 2\text{ms}$) [6].



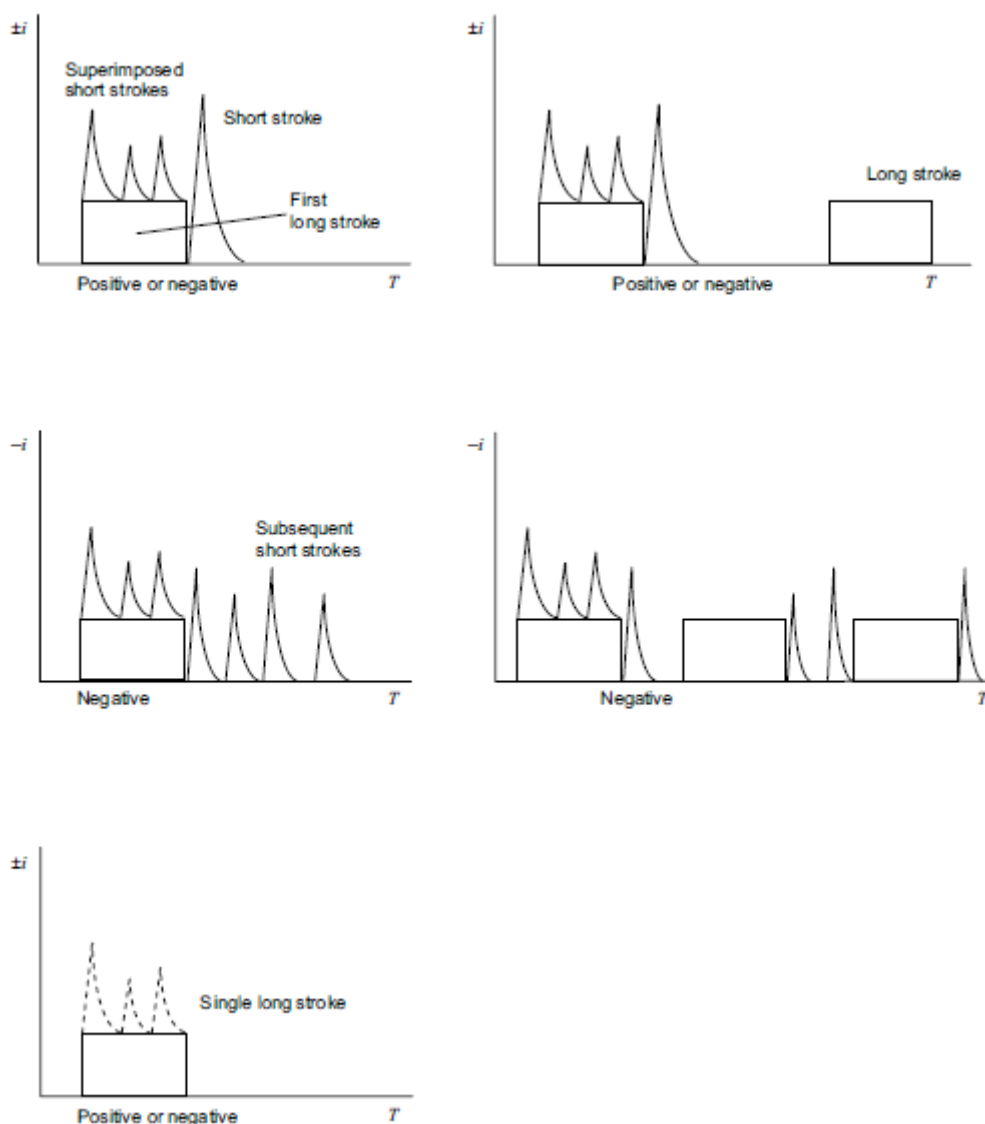
Σχήμα 1.18: Σχηματική παράσταση μακρού κεραυνικού πλήγματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61305-1, όπου φαίνονται η χρονική διάρκεια του μακρού χτυπήματος και το μεταφερόμενο φορτίο (συνήθως $2\text{ms} < T_{\text{long}} < 1\text{s}$) [6].

Στα Σχήματα 1.17 και 1.18 παραπάνω φαίνονται οι βασικές συνιστώσες των κεραυνικών πλήγμάτων. Περαιτέρω διαφοροποίηση προέρχεται από την πολικότητά τους (θετικοί ή αρνητικοί) και από τη θέση τους κατά την διάρκεια του κεραυνού - πρώτο, επακόλουθο, υπερτιθέμενο (first, subsequent, superimposed) .



Σχήμα 1.19: Πιθανές θέσεις των ρευματικών συνιστωσών σε ένα κατερχόμενο κεραυνό [6].

Στα Σχήματα 1.19 και 1.20 καταγράφονται οι πιθανές θέσεις των ρευματικών συνιστωσών σε ένα κατερχόμενο και ανερχόμενο κεραυνό αντίστοιχα. Η επιπρόσθετη περίπτωση στους ανερχόμενους κεραυνούς είναι το μακρό πλήγμα με ή χωρίς υπερτιθέμενα (superimposed) πλήγματα, των οποίων ο αριθμός μπορεί να φτάνει και τα δέκα. Όλες οι παράμετροι των βραχέων πλήγμάτων των ανερχόμενων κεραυνών είναι μικρότερες από αυτές των κατερχόμενων, όμως, δεν έχει επιβεβαιωθεί ακόμα ένα υψηλότερο φορτίο μακρού πλήγματος στους ανερχόμενους κεραυνούς [3,6].



Σχήμα 1.20: Πιθανές θέσεις ρευματικών συνιστωσών ενός ανερχόμενου κεραυνού [6].

1.11 Καθορισμός των επιπέδων αντικεραυνικής προστασίας

Το πρότυπο IEC 61305-1 ορίζει τέσσερις στάθμες αντικεραυνικής προστασίας (LPL - Lightning Protection Level) προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικές απαιτήσεις ασφαλείας για τις διάφορες κατασκευές. Για την αξιόπιστη προστασία έναντι των θερμικών και μηχανικών επιπτώσεων του κεραυνού, καθώς και των επαγόμενων υπερτάσεων ελήφθησαν υπόψη οι μέγιστες τιμές των κεραυνικών παραμέτρων όπως προκύπτουν από τα στατιστικά δεδομένα. Έτσι, καθορίστηκε πως για την αντικεραυνική προστασία στάθμης I (LPL I), λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι, τις οποίες δε θα υπερβαίνει το 99% των κεραυνών που συμβαίνουν στη φύση. Δηλαδή μόνο το 1% των κεραυνών θα υπερβαίνει τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη στη στάθμη I. Για προστασία LPL II οι παράμετροι μειώνονται στο 75% των παραμέτρων της LPL I. Αντίστοιχα, οι παράμετροι των LPL III και LPL IV διαμορφώνονται στο 50% των παραμέτρων της LPL I. Η μείωση ακολουθεί

γραμμική σχέση για το μέγιστο ρεύμα, το μεταφερόμενο φορτίο και τη μέγιστη κλίση, ενώ ακολουθεί τετραγωνική σχέση για την ειδική ενέργεια [3].

1.12 Καθορισμός μέγιστων και ελάχιστων κεραυνικών παραμέτρων

Με βάση τις μετρήσεις του Berger, τα επιθυμητά επίπεδα προστασίας και τις στατιστικές κατανομές καθορίστηκαν οι παρακάτω τιμές κεραυνικών παραμέτρων ανάλογα με το επίπεδο προστασίας. (Πίνακας 1.2)

Πρώτο βραχύ ρεύμα		LPL			
Ρευματικές Παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδες	I	II	III/ IV
Μέγιστο ρεύμα	i_{max}	kA	200	150	100
Φορτίο	Q_{short}	C	100	75	50
Ειδική Ενέργεια	W/R	MJ/Ω	10	5.6	2.5
Μορφή κύματος	T_1/T_2	μs/μs	10/350		
Επακόλουθο βραχύ ρεύμα		LPL			
Ρευματικές Παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδες	I	II	III/ IV
Μέγιστο ρεύμα	i_{max}	kA	50	37.5	25
Μέση κλίση μετώπου	di/dt	kA/μs	200	150	100
Μορφή κύματος	T_1/T_2	μs/μs	0.25/100		
Μακρό ρεύμα		LPL			
Ρευματικές Παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδες	I	II	III/ IV
Φορτίο	Q_{long}	C	200	150	100
Διάρκεια	T_{long}	s	0.5		
Κεραυνός		LPL			
Ρευματικές Παράμετροι	Σύμβολο	Μονάδες	I	II	III/ IV
Συνολικό φορτίο	Q_{flash}	C	300	225	150

Πίνακας 1.2: Μέγιστες παράμετροι για τις διάφορες στάθμες αντικεραυνικής προστασίας σύμφωνα με το IEC 62305-1 [6].

Η κυματομορφή του επακόλουθου ρεύματος χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώσει το ανερχόμενο τμήμα του ρεύματος, και συνεπώς η εξασθένιση του ρεύματος δεν αποτελεί σημαντική παράμετρο στο συγκεκριμένο πλήγμα. Για το λόγο αυτό στο IEC 62305-1 η τιμή του χρόνου ημίσεως εύρους ορίζεται στα $T_2=100 \mu s$ [4].

Επίσης, λόγω της χαμηλής συσχέτισης του χρόνου μετώπου με τις άλλες κεραυνικές παραμέτρους, για το πρώτο βραχύ πλήγμα δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά το χρόνο T_1 (συνήθως θεωρούμε πως $T_1=10 \mu s$) [3].

Η μέση κλίση του ρεύματος μεταξύ του 30% και του 90% του βραχέως επακόλουθου πλήγματος είναι 200 kA/μs [3]. Ορισμένες μελέτες σημειώνουν πως η μέγιστη κλίση παρατηρείται όταν το ρεύμα λαμβάνει το 90% της μέγιστης τιμής του κατά το ανερχόμενο τμήμα. Ωστόσο, για τα επακόλουθα χτυπήματα δεν υπάρχει αργά αυξανόμενο τμήμα (όπως συμβαίνει με τα αρχικά πλήγματα), αλλά το ρεύμα εμφανίζει αμέσως το ταχέως αυξανόμενο τμήμα [14]

Στάθμη αντικεραυνικής προστασίας	Μέγιστες τιμές (dimensional criteria)	
	Θεωρούμενο μέγιστο πλάτος του κεραυνικού ρεύματος	Πιθανότητα το πραγματικό κεραυνικό ρεύμα να έχει πλάτος μικρότερο από τη θεωρούμενη μέγιστη τιμή του
I	200 kA	99%
II	150 kA	98%
III	100 kA	95%
IV	100 kA	95%

Πίνακας 1.3: Πιθανότητα μη υπέρβασης των μέγιστων τιμών του ρεύματος ανάλογα με το LPL σύμφωνα με το IEC 62305-1 [9]

Στάθμη αντικεραυνικής προστασίας	Ελάχιστες τιμές (dimensional criteria)	
	Θεωρούμενο ελάχιστο πλάτος του κεραυνικού ρεύματος	Πιθανότητα το πραγματικό κεραυνικό ρεύμα να έχει πλάτος μεγαλύτερο από τη θεωρούμενη ελάχιστη τιμή του
I	3 kA	99%
II	5 kA	97%
III	10 kA	91%
IV	16 kA	84%

Πίνακας 1.4: Πιθανότητα υπέρβασης των χαμηλότερων τιμών του ρεύματος ανάλογα με το LPL σύμφωνα με το IEC 62305-1 [9]

1.13 Μαθηματική αναπαράσταση της κυματομορφής του κεραυνικού ρεύματος

Για τη μελέτη των μηχανικών και θερμικών επιπτώσεων των κεραυνικών ρευμάτων και τον προσδιορισμό των παραγόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, είναι απαραίτητη η αναπαράσταση των ρευματικών κυματομορφών χρησιμοποιώντας αναλυτικές εκφράσεις. Για τη μελέτη της μεταβολής του ηλεκτρικού πεδίου, απαιτείται η δεύτερη χρονική παράγωγος d^2i/dt^2 . Επομένως, η συνάρτηση του κεραυνικού ρεύματος πρέπει να είναι διπλά παραγωγίσιμη χωρίς ασυνέχειες. Η πρώτη χρονική παράγωγος δεν επιτρέπεται να παρουσιάζει ασυνέχεια για τη χρονική στιγμή $t = 0$, δηλαδή πρέπει $(di/dt)_{t=0} = 0$.

- Η παραπάνω συνθήκη δεν ικανοποιείται από τη συνηθέστερη μαθηματική αναπαράσταση του ρεύματος μέσω της χρήσης της διπλοεκθετικής συνάρτησης:

$$i(t) = \frac{i_{max}}{k} \cdot (\exp(-t/\tau_1) - \exp(-t/\tau_2)) \quad (1.13.1)$$

$$\mu\epsilon \quad k = \exp(-t_{max}/\tau_1) - \exp(-t_{max}/\tau_2)$$

$$\text{και } t_{max} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \ln\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \text{ με } \tau_1 > \tau_2 > 0$$

όπου i_{max} : το πλάτος της έντασης του ρεύματος, k : ο συντελεστής διόρθωσης του πλάτους του ρεύματος, τ_1, τ_2 : χρονικές σταθερές και t_{max} η χρονική στιγμή στην οποία παρατηρείται η μέγιστη τιμή του ρεύματος [14]

Για την προσομοίωση των πληγμάτων με βάση την παραπάνω συνάρτηση, χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του Πίνακα 1.5.

Προσομοιωμένο πλήγμα	Πρώτο Θετικό κεραυνικό πλήγμα	Πρώτο Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα	Επακόλουθο Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα
i_{max} (kA)	200	100	50
T_1 (μ s)	10	1	0.25
T_2 (μ s)	350	200	100
τ_1 (μ s)	470.1	284.3	143.1
τ_2 (μ s)	4.064	0.3739	0.0924
k	0.951	0.990	0.995

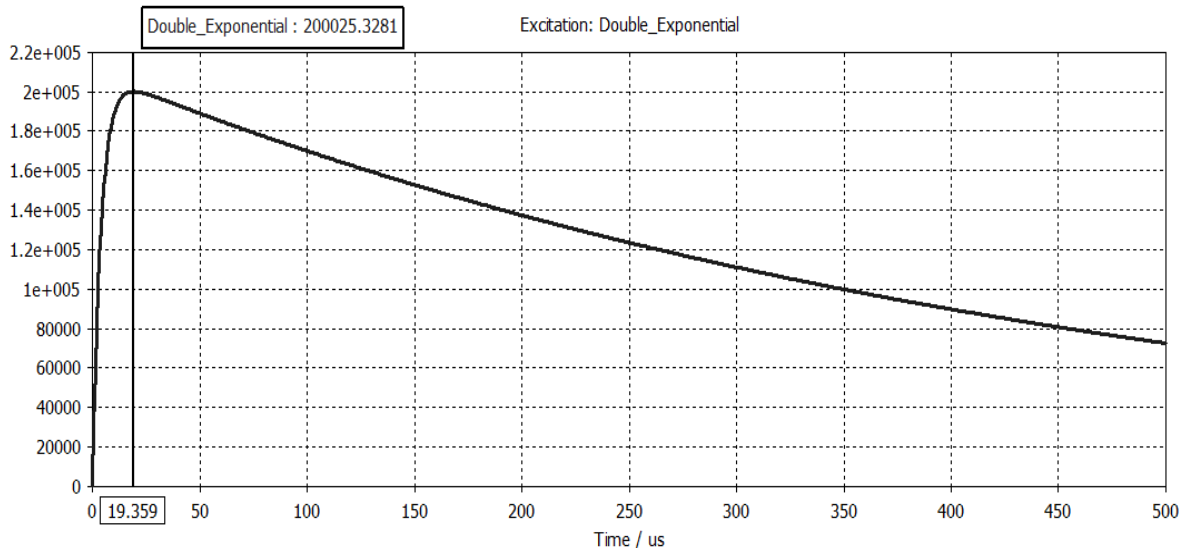
Πίνακας 1.5: Παράμετροι για την προσομοίωση των κεραυνικών συνιστωσών με βάση τη σχέση (1.13.1) [15]

Το λογισμικό προσομοίωσης CST παρέχει ένα πλήθος μαθηματικών συναρτήσεων για την προσομοίωση των σημάτων διέγερσης. Για το κεραυνικό πλήγμα χρησιμοποιείται η διπλοεκθετική συνάρτηση:

$$f(t) = A \cdot (\exp(-t/B) - \exp(-t/C)) \quad (1.13.2)$$

όπου A : Amplitude
 B : Tfall
 C : Trise

Για τη σωστή παραμετροποίηση του ρεύματος δεν πρέπει να υπάρχει σύγχυση μεταξύ των συντελεστών της διπλοεκθετικής $Trise$, $Tfall$ και των χρόνων μετώπου και ημίσεως εύρους T_1 , T_2 [17].



Σχήμα 1.21: Η κυματομορφή 10/350 μs όπως ορίζεται από το CST STUDIO για $A = 200 * 10^3 / 0.951$, $B = 470.1 * 10^{-6}$, $C = 4.064 * 10^{-6}$ για συνολικό χρόνο $T_{\text{total}} = 500 * 10^{-6}$ (εφόσον οι μονάδες είναι στο SI). Επίσης, σημειώνεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος, καθώς και η χρονική στιγμή t_{max} .

Με αυτή τη διπλοεκθετική συνάρτηση (σχέση 1.13.1) δεν είναι δυνατό να παραχθούν τα βραχεία πλήγματα σύμφωνα με τις απαιτήσεις για την κλίση του ανερχόμενου τμήματος όπως καταγράφονται στον Πίνακα 1.2.

Επίσης, από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει πως το ρεύμα ξεκινά με τη μέγιστη κλίση του. Ωστόσο, αυτό δεν είναι αληθές αφού το πρώτο βραχύ ρεύμα εμφανίζει αρχικά ένα αργά αυξανόμενο τμήμα το οποίο ακολουθείται από το ταχέως αυξανόμενο τμήμα του ρεύματος. Αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να αποφευχθούν με τη χρήση της εξίσωσης Heidler.

- Στο πρότυπο αντικεραυνικής προστασίας της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission : IEC), η εξίσωση του Heidler χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει την κυματομορφή του ρεύματος επιστροφής. Με βάση τα παραπάνω, η ρευματική κυματομορφή μπορεί να αναπαρασταθεί από:

$$i(t) = \frac{i_{\text{max}}}{k} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \cdot \exp(-t/\tau_2) \quad (1.13.3)$$

Η κλίση του ρεύματος εξαρτάται από τις σταθερές τ_1 και k . Ο όρος n ονομάζεται συντελεστής κλίσης του ρεύματος (current steepness factor) και λαμβάνει ακέραιες τιμές από 2 έως 10 (συνήθως θεωρούμε πως $n=10$). Οι τ_1, τ_2 είναι ο σταθερές μετώπου (front time constant) και ουράς (tail time constant) αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής διόρθωσης του ρεύματος k υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$k = \exp(-\tau_1/\tau_2(n\tau_2/\tau_1)^{\frac{1}{n}}) \quad (1.13.4)$$

Για την αναπαράσταση των κυματομορφών των πρώτων και των επακόλουθων βραχέων πληγμάτων μέσω της εξίσωσης Heidler εφαρμόζονται οι παράμετροι που δίνονται στον Πίνακα 1.6.

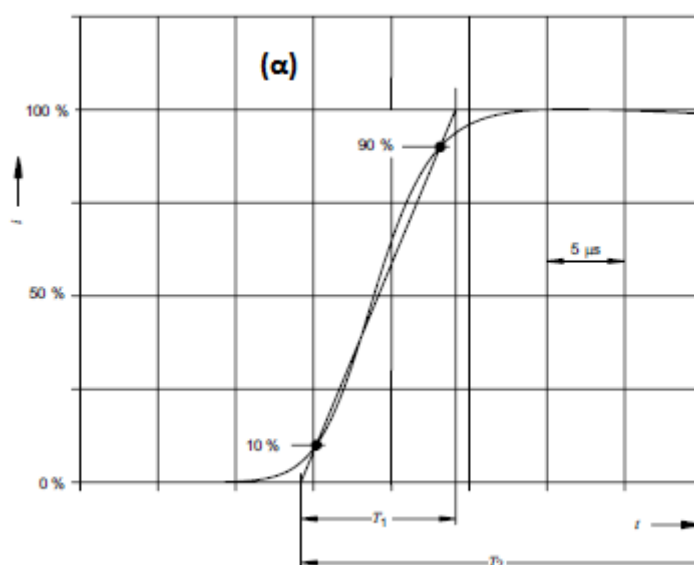
Παράμετροι	Πρώτο κεραυνικό πλήγμα			Επακόλουθο κεραυνικό πλήγμα		
	LPL			LPL		
	I	II	III/IV	I	II	III/IV
$i_{max} (kA)$	200	150	100	50	37.5	25
k	0.93	0.93	0.93	0.993	0.993	0.993
$\tau_1 (\mu s)$	19	19	19	0.454	0.454	0.454
$\tau_2 (\mu s)$	485	485	485	143	143	143

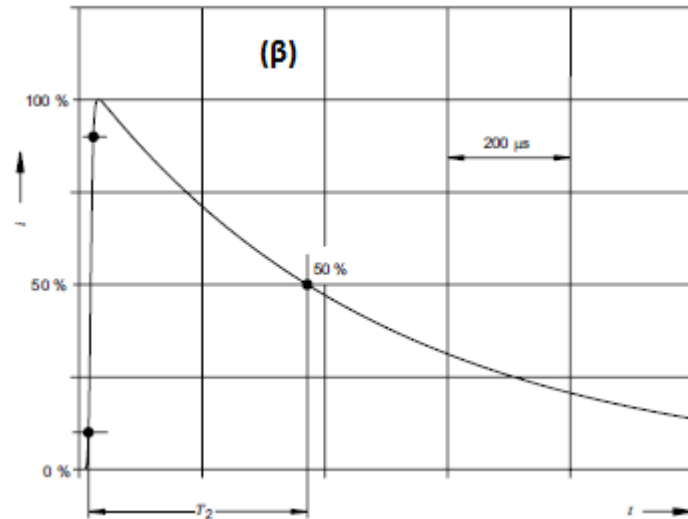
Πίνακας 1.6: Οι παράμετροι των εξισώσεων Heidler ανάλογα με τη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας [6].

Από την εξίσωση Heidler προκύπτει πως η μέγιστη κλίση παρατηρείται περίπου όταν το ρεύμα λάβει τιμή ίση με το 45% της μέγιστης τιμής του [14]. Η μέγιστη κλίση μπορεί να υπολογιστεί από τη παρακάτω σχέση :

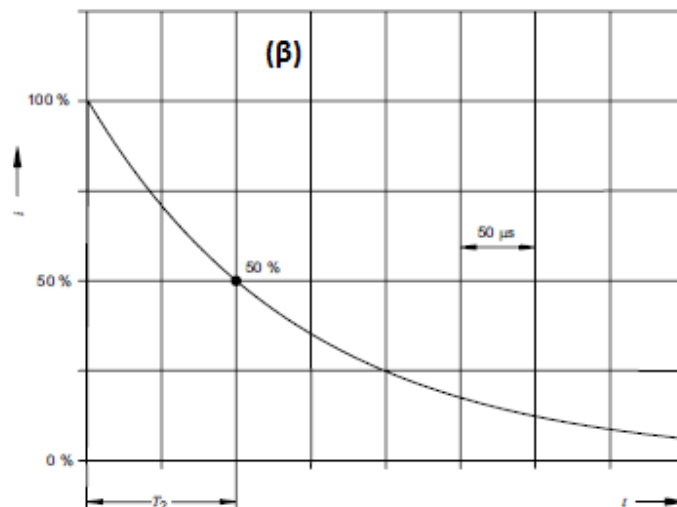
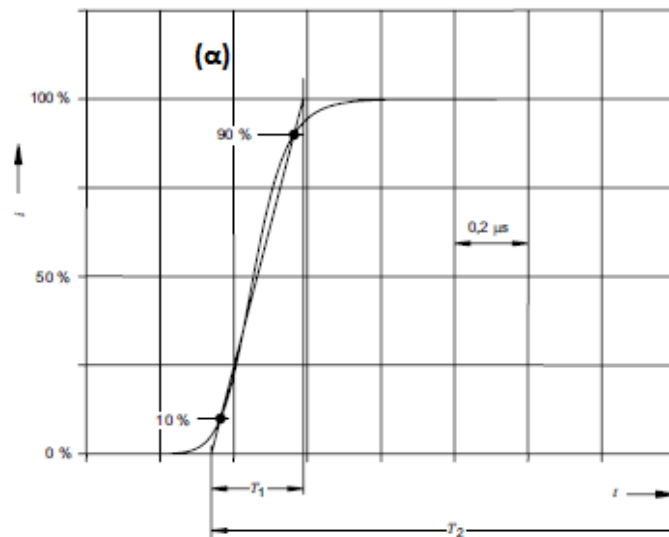
$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{max} \approx \sqrt{2} \frac{i_{max}}{T_1} \quad (1.13.5)$$

Όπως παρατηρούμε από τον Πίνακα 1.5 για το πρώτο κεραυνικό πλήγμα και για LPL I λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι του θετικού κεραυνού. Αυτό συμβαίνει επειδή για το συγκεκριμένο επίπεδο προστασίας (99%) πρέπει να καλυφθούν όλοι οι αρνητικοί κεραυνοί (που αποτελούν το 90% των συνολικών κεραυνών) και το μεγαλύτερο μέρος των θετικών κεραυνών (οι οποίοι αποτελούν το 10% των συνολικών κεραυνών) [3].



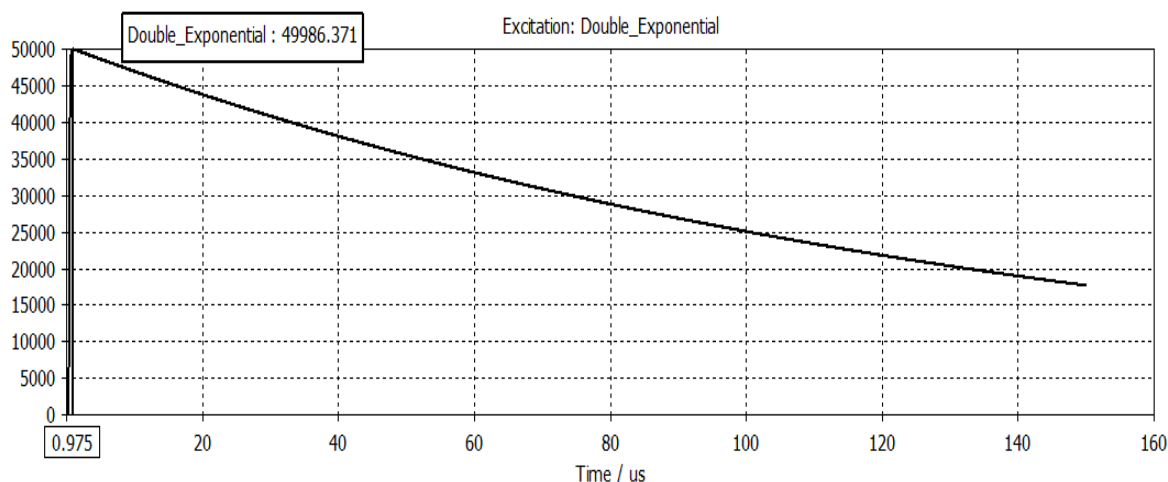


Σχήμα 1.22: Κυματομορφή του πρώτου βραχέως πλήγματος (α) κατά την αύξηση του ρεύματος (current rise) και (β) κατά την μείωση του ρεύματος (current decay) [6].



Σχήμα 1.23: Κυματομορφή του επακόλουθου βραχέως πλήγματος (α) κατά την αύξηση του ρεύματος (current rise) και (β) κατά την μείωση του ρεύματος (current decay.) [6].

Το CST STUDIO επιτρέπει την εισαγωγή του σήματος διέγερσης (excitation signal) είτε μέσω προκαθορισμένων εξισώσεων (κατανομή Gauss, διπλοεκθετική κ.ά.) είτε μέσω της εισαγωγής της εξίσωσης με τη χρήση VBA (Visual Basic For Applications). Στην περίπτωση του επακόλουθου χτυπήματος ορίσαμε το ρεύμα διέγερσης με την εισαγωγή αρχείου ASCII [17].

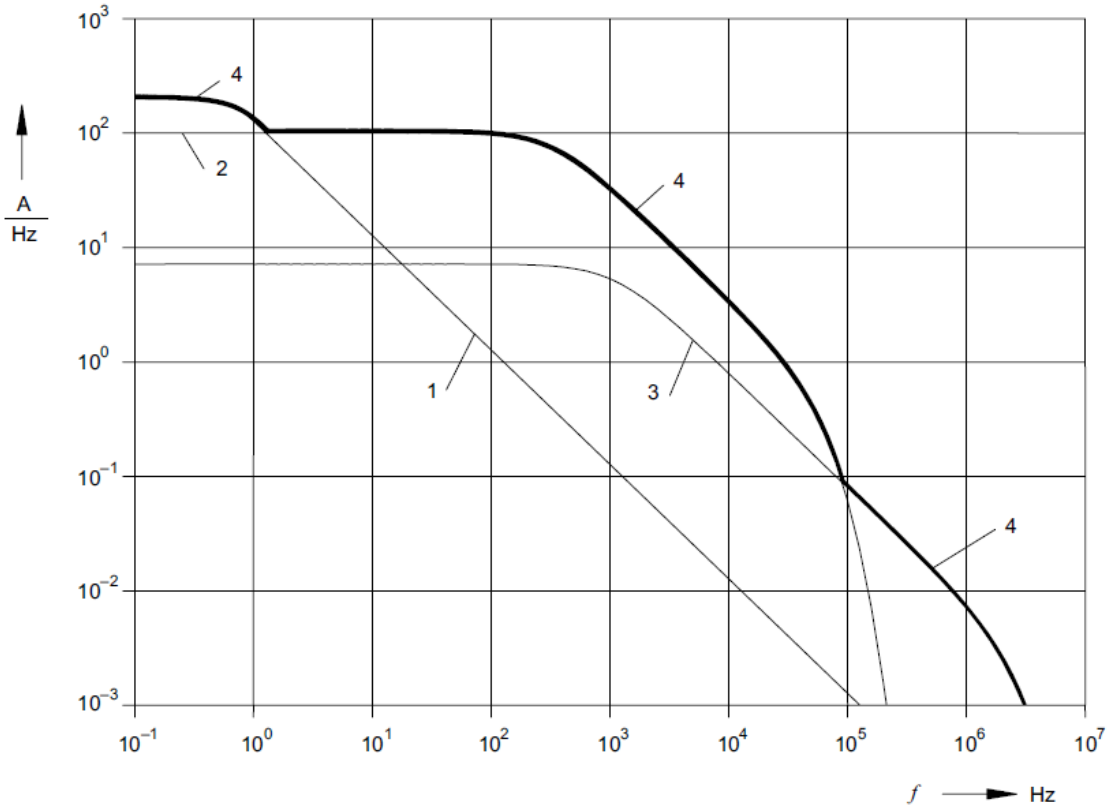


Σχήμα 1.24: Η κυματομορφή 0.25/100 μs όπως ορίζεται από το CST STUDIO με την εισαγωγή ASCII αρχείου. Χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Heidler και οι τιμές των παραμέτρων, όπως φαίνονται στον Πίνακα 1.6. Επίσης, σημειώνεται η μέγιστη τιμή του ρεύματος, καθώς και η χρονική στιγμή στην οποία παρατηρείται [6].

Το μακρό πλήγμα μπορεί να περιγραφεί από μια σχεδόν ορθογώνια κυματομορφή (όπως φαίνεται στο ΣΧΗΜΑ 1.18) με μέσο ρεύμα I περίπου 400 A και διάρκεια T_{long} 0.5 s. Η πυκνότητα πλάτους του κεραυνικού ρεύματος μπορεί να εξαχθεί από τις αναλυτικές καμπύλες του Σχήματος 1.25.

Για τις προσομοιώσεις που έγιναν στα πλαίσια της διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε η διπλοεκθετική εξίσωση για τα πρώτα βραχεία πλήγματα, και η εξίσωση Heidler για τα επακόλουθα, για την καλύτερη αναπαράσταση του ανερχόμενου τμήματος.

Τα δύο μοντέλα είναι σχεδόν ισοδύναμα για συχνότητες έως 2 MHz, ένα εύρος το οποίο καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος των κεραυνικών φαινομένων. Το μοντέλο που χρησιμοποιεί τη διπλοεκθετική συνάρτηση αποδεικνύεται πιο συντηρητικό σε υψηλότερες συχνότητες, δηλαδή υπερεκτιμά την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, οδηγώντας στην εφαρμογή περιττών μεθόδων προστασίας [16].



Σχήμα 1.25: Πυκνότητα πλάτους κεραυνικού ρεύματος για LPL I: (1) Μακρό πλήγμα ($I=400\text{A}$, $T_{\text{long}}=0.5\text{ s}$), (2) Πρώτο βραχύ πλήγμα (Κυματομορφή 10/350 μs), (3) Επακόλουθο βραχύ πλήγμα (0.25/100 μs), και (4) η Περιβάλλουσα Καμπύλη [6].

1.14 Απόσταση Έναυσης (Striking Distance)

Η απόσταση έναυσης (Striking Distance) ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της άκρης του κατερχόμενου οχετού και του εδάφους τη στιγμή που ο ανερχόμενος οχετός τείνει να συναντήσει τον κατερχόμενο και να επιτευχθεί μια πλήρης γεφύρωση του διακένου του αέρα.

Όσο μεγαλύτερο είναι το φορτίο του νέφους, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόσταση έναυσης. Επίσης, το πλάτος του ρεύματος είναι ανάλογο του φορτίου του κατερχόμενου οχετού. Σύμφωνα με το IEC 62305-1, η απόσταση έναυσης υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$r_s = 10 \cdot I_0^{0.65} \quad (1.14.1)$$

όπου r_s είναι η απόσταση έναυσης (m)

I_0 είναι το πλάτος του ρεύματος (kA)

Η απόσταση έναυσης που είναι συνδεδεμένη με το ελάχιστο επίπεδο ρεύματος για συγκεκριμένη στάθμη αντικεραυνικής προστασίας (Πίνακας 1.4) είναι ίση με την ακτίνα της κυλιόμενης σφαίρας, η οποία αποτελεί μια από τις μεθόδους σχεδιασμού των συλλεκτρίων συστημάτων των Συστημάτων Αντικεραυνικής Προστασίας.

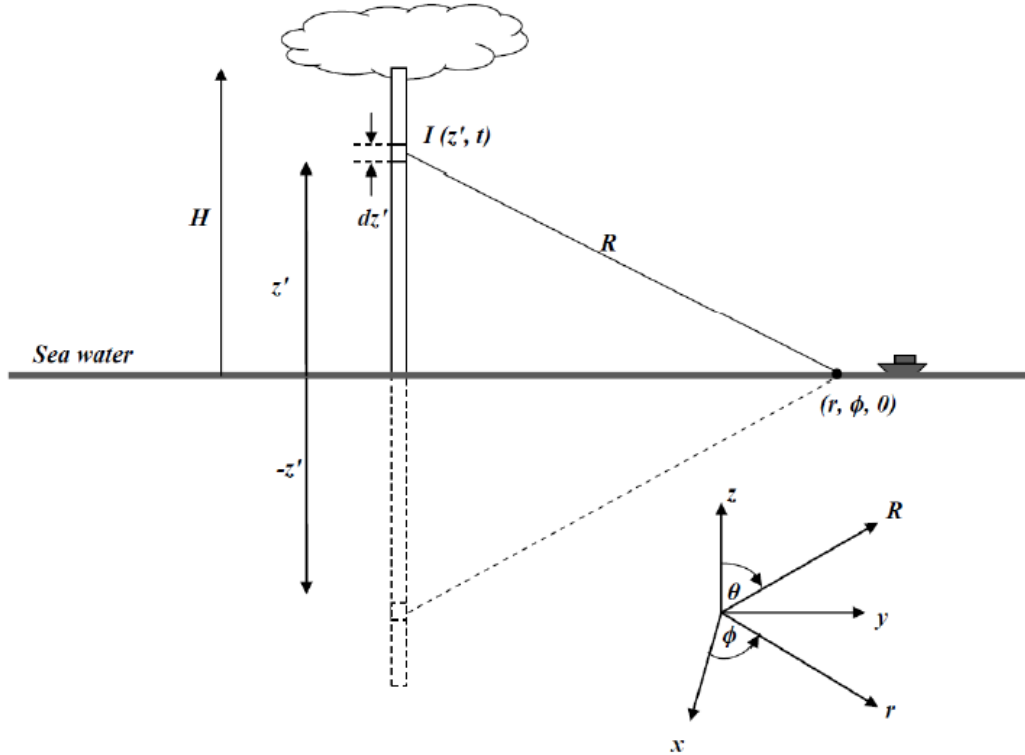
Στον Πίνακα 1.7 καταγράφεται η απόσταση έναυσης με βάση το μέγιστο πλάτος του ρεύματος (όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.3). Η παραπάνω τιμή θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του μήκους του κεραυνικού καναλιού στο CST [9].

Προσομοιωμένο πλήγμα	Πρώτο Θετικό κεραυνικό πλήγμα	Πρώτο Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα	Επακόλουθο Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα
Απόσταση έναυσης r_s (m)	310	200	127

Πίνακας 1.7: Η απόσταση έναυσης υπολογισμένη με βάση το μέγιστο πλάτος για LPL I για τα διάφορα πλήγματα.

1.15 Παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω κεραυνού

Οι εξισώσεις που ακολουθούν, σε κυλινδρικές συντεταγμένες, μπορούν να εφαρμοστούν για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στο επίπεδο του εδάφους που αναπτύσσονται λόγω ενός κατακόρυφου κεραυνικού καναλιού ύψους H . Οι γεωμετρικές παράμετροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις φαίνονται στο Σχήμα 1.26. Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν εφόσον η επιφάνεια του εδάφους μεταξύ του σημείου πρόσπτωσης του κεραυνού και του σημείου παρατήρησης είναι τέλεια αγωγίμη (άπειρη αγωγιμότητα) και επίπεδη.



Σχήμα 1.26: Γεωμετρικές παράμετροι που αντιστοιχούν στις εξισώσεις για τον υπολογισμό του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο επίπεδο του εδάφους επί τέλει αγωγίμης επιφάνειας (κατά προσέγγιση όπως το θαλασσίνο νερό) [4].

$$E(r, \varphi, 0, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\int_h^H \frac{2z'^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau dz' + \int_h^H \frac{2z'^2 - r^2}{cR^4} i(z', -R/c) dz' - \int_h^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] a_z \quad (1.15.1)$$

$$B(r, \varphi, 0, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\int_h^H \frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) dz' - \int_h^H \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} dz' \right] a_\varphi \quad (1.15.2)$$

Ο πρώτος όρος της σχέσης (1.15.1) ονομάζεται στατικός όρος (εξαρτάται από τη μεταβολή του φορτίου κατά μήκος του καναλιού) και μειώνεται γρήγορα με την απόσταση από τη βάση του καναλιού. Ο δεύτερος όρος ονομάζεται επαγωγικός (εξαρτάται από το ρεύμα κατά μήκος του καναλιού) και μειώνεται σχετικά αργά. Ο

τρίτος όρος ονομάζεται συνιστώσα ακτινοβολίας, μειώνεται ανάλογα με την απόσταση αλλά σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τους άλλους όρους. Εξαρτάται από τη χρονική παράγωγο του ρεύματος του καναλιού σε κάθε ύψος. Η σχέση (1.15.2) του μαγνητικού πεδίου περιέχει μόνο τον επαγωγικό όρο και την συνιστώσα ακτινοβολίας.

Στην περίπτωση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής σε αγωγίμα αντικείμενα που βρίσκονται στην κατεύθυνση διάδοσης των πεδίων, οι χρονικές παράγωγοι του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (dE/dt) και (dB/dt) παίζουν έναν εξίσου σημαντικό ρόλο.

Όπως αναφέρθηκε, οι σχέσεις (1.15.1) και (1.15.2) ισχύουν μόνο όταν επιφάνεια του εδάφους έχει άπειρη αγωγιμότητα και καμία τοπογραφική ανωμαλία (λεία, οριζόντια, επίπεδη επιφάνεια). Έρευνες έχουν δείξει ότι οι κυματομορφές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου υφίστανται σημαντική παραμόρφωση και απόσβεση εξαρτώμενη από τη συχνότητα, καθώς τα πεδία διαδίδονται σε μία επιφάνεια με πεπερασμένη αγωγιμότητα. Η απόσβεση στις υψηλές συχνότητες επηρεάζει σημαντικά τα πλάτη των χρονικών παραγώγων των πεδίων. Αυτές οι επιπτώσεις είναι κοινές για τα πεδία που δημιουργούνται λόγω κεραυνών μεταξύ νέφους και εδάφους είτε μεταξύ γειτονικών σύννεφων.

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

$$E_{\sigma} = \left(0.24 \left\{ \exp \left[\frac{-D/\sigma}{10^7} \right] + \exp \left[\frac{-D/\sigma}{50 \times 10^7} \right] \right\} + 0.52 \right) E_{\infty} \quad (1.15.3)$$

όπου ο λόγος D/σ μετριέται σε m^2/S . Τα μεγέθη E_{σ} και E_{∞} αντιπροσωπεύουν το ηλεκτρικό πεδίο σε ίδια απόσταση, αλλά για πεπερασμένη και άπειρη αγωγιμότητα αντίστοιχα.

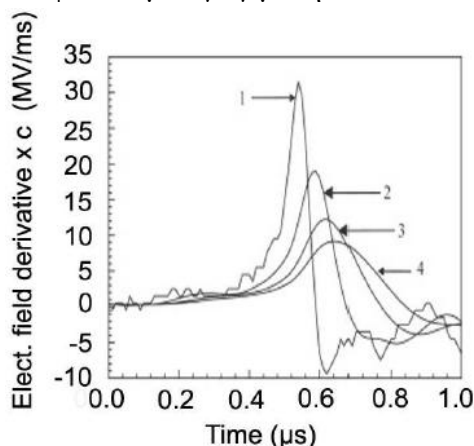
Η εξίσωση (1.15.3) περιορίζεται για τιμές του D από 5km έως 300km, όπου για τιμές κάτω από το χαμηλότερο όριο ο στατικός και επαγωγικός όρος αμελούνται (μόνο η συνιστώσα ακτινοβολίας λαμβάνεται υπόψη), και το πάνω όριο τίθεται ώστε να αμελείται η καμπυλότητα της γης.

Εάν θεωρήσουμε ένα οριζόντιο επίπεδο όπου η αγωγιμότητα του εδάφους είναι της τάξης του 0.0001S/m (κοινή τιμή για ξηρό έδαφος άνυδρης περιοχής) και η αγωγιμότητα του θαλασσινού νερού είναι 4.8 S/m. Σε απόσταση 5km από το σημείο πρόσπτωσης του κεραυνού, ο λόγος του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από τη στεριά (E_L) με το αντίστοιχο πάνω από τη θάλασσα (E_S) είναι περίπου 0.75 με βάση τη σχέση (1.15.3).

Η μέγιστη τιμή της παραγώγου του ηλεκτρικού πεδίου λόγω του πρώτου ρεύματος επιστροφής αρνητικού κεραυνού, πάνω από μια επιφάνεια με πεπερασμένη αγωγιμότητα $(dE/dt)_{\sigma}$ σχετίζεται με την αντίστοιχη για τέλεια αγωγή επιφάνεια $(dE/dt)_{\infty}$ -για ίδια απόσταση D - από την παρακάτω εξίσωση:

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{\sigma} = 22.7 \left(\frac{D}{\sigma} \right)^{-0.31} \left(\frac{dE}{dt} \right)_{\infty} \quad (1.15.4)$$

Η εξίσωση (1.15.4) δείχνει ότι σε απόσταση 5km από το σημείο χτυπήματος, η παράγωγος $(dE/dt)_\sigma$ είναι μικρότερη του 10% της $(dE/dt)_\infty$ για διάδοση πάνω από επιφάνεια με αγωγιμότητα εδάφους 0.0001 S/m. Ακόμα και για αγωγιμότητα 0.001 S/m, η $(dE/dt)_\sigma$ παραμένει μικρότερη από το 20% της $(dE/dt)_\infty$ σε απόσταση 5km. Το Σχήμα 1.27 δείχνει πώς διαφέρει η παράγωγος του ηλεκτρικού πεδίου του αρχικού ρεύματος επιστροφής αρνητικού κεραυνού ανάλογα με την απόσταση πάνω από μια επιφάνεια με αγωγιμότητα 0.001 S/m.

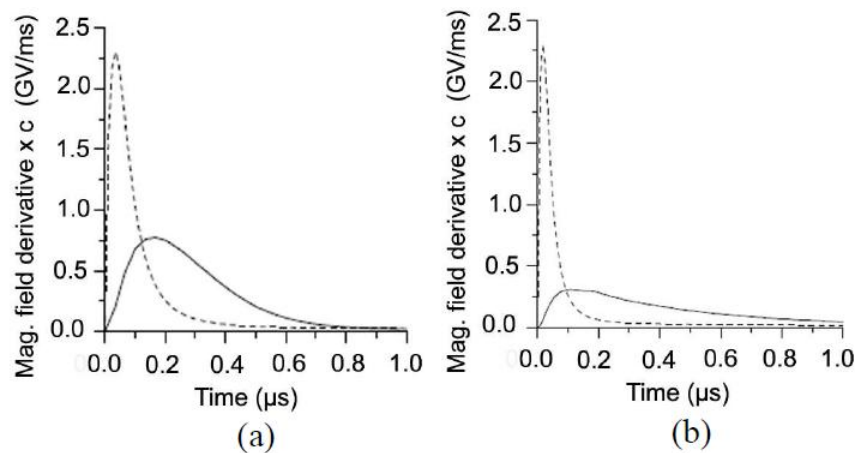


Σχήμα 1.27: Μεταβολή της παραγωγού του ηλεκτρικού πεδίου ενός αρχικού ρεύματος επιστροφής καθώς αυτό διαδίδεται πάνω από έδαφος αγωγιμότητας 0.001 S/m: (1) για επιφάνεια "άπειρης αγωγιμότητας", (2) αγωγιμότητας 0.001 S/m μετά από 1km διάδοσης, (3) μετά από 4km διάδοσης και (4) μετά από 8km διάδοσης [4].

Το Σχήμα 1.28 παριστάνει την παράγωγο του μαγνητικού πεδίου (πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα του φωτός) στο επίπεδο του εδάφους σε απόσταση 1km από το κεραυνικό κανάλι, συγκρίνοντας το μεταδιδόμενο πεδίο πάνω από τέλεια αγώγιμη επιφάνεια και πάνω από επιφάνεια με πεπερασμένη αγωγιμότητα (0.001S/m και 0.0001S/m). Το σχήμα δείχνει ότι το πλάτος της παραγωγού του μαγνητικού πεδίου μειώνεται σε μία τιμή μικρότερη από το 35% όταν η αγωγιμότητα της επιφάνειας αλλάζει από άπειρη σε 0.001S/m και μειώνεται σε μία τιμή μικρότερη από 15%, όταν η αγωγιμότητα αλλάζει από άπειρη σε 0.0001S/m.

Για δεδομένο κεραυνικό πλήγμα, τα αγώγιμα μέρη μιας εγκατάστασης πάνω σε έδαφος πεπερασμένης αγωγιμότητας θα υποβάλλονται σε εξασθενημένες και χρονικά αλλοιωμένες τάσεις σε σύγκριση με το ίδιο σύστημα σε τέλεια αγώγιμο έδαφος. Αυτή η εξασθένηση είναι επιπρόσθετη στα παρόμοια φαινόμενα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων καθώς διαδίδονται από το κεραυνικό κανάλι στο πεδίο αλληλεπίδρασης μέσω αγωγών πάνω σε πεπερασμένα αγώγιμα έδαφος.

Επίσης υπάρχουν επιπλέον εξασθενήσεις λόγω ανωμαλιών στην τοπογραφία του εδάφους (βουνά, ανομοιόμορφες επιφάνειες, κτήρια, δέντρα, γραμμές μεταφοράς και αγώγιμα αντικείμενα κτλ.).



Σχήμα 1.28: Παράγωγος μαγνητικού πεδίου (πολλαπλασιασμένη με τη ταχύτητα του φωτός) στο επίπεδο του εδάφους σε απόσταση 1km από το κεραυνικό κανάλι. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το πεδίο πάνω από τέλεια αγωγίμο έδαφος και αντίστοιχα η άλλη γραμμή δείχνει το πεδίο πάνω από έδαφος με πεπερασμένη αγωγιμότητα: (a) $s=0.001$ S/m και (b) $s=0.0001$ S/m. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά του εδάφους έχει ληφθεί υπόψη με την τιμή 5 [4].

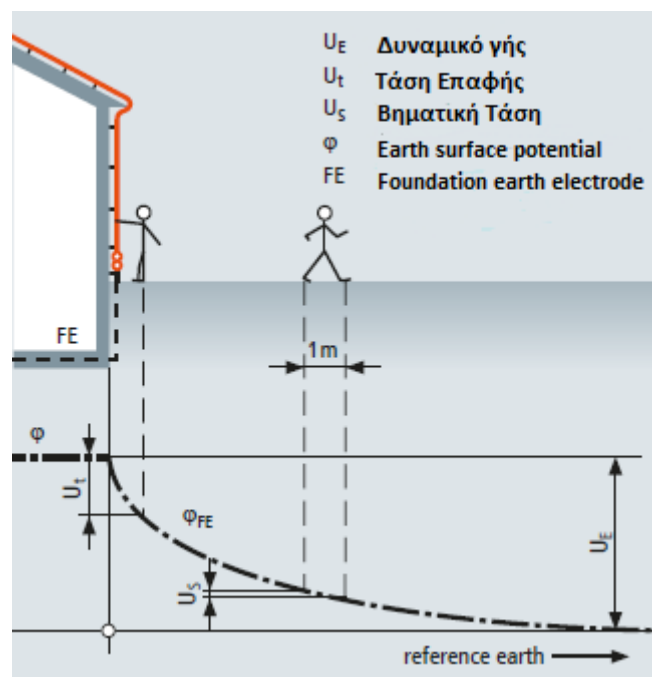
Οι παραπάνω υπολογισμοί καταδεικνύουν πως ένα πλοίο που πλέει σε ήρεμη θάλασσα υποβάλλεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον, λόγω ενός κεραυνού πολύ πιο σημαντικό, από ένα σύστημα που βρίσκεται σε χερσαίο περιβάλλον. Τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα που είναι κατασκευασμένα από μη μεταλλικά υλικά ή υλικά με μικρή αγωγιμότητα είναι πιο επιρρεπή σε βλάβες προκαλούμενες από κεραυνό, λόγω του μειωμένου βαθμού θωράκισης. Τα ραντάρ μεγάλων πλοίων, τα πλαίσια των οποίων είναι κατασκευασμένα εξ' ολοκλήρου από μέταλλο, είναι εκτεθειμένα σε υψηλά ηλεκτρομαγνητικά πεδία ανεξάρτητα από τη θωράκιση που παρέχεται σε άλλα μέρη των συστημάτων αυτών [4].

1.16 Βηματική Τάση και Τάση Επαφής

Το ανθρώπινο σώμα υπόκειται σε υψηλή τάση λόγω της εμφάνισης διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα πόδια του, η οποία οφείλεται στην ακτινική διάχυση του ρεύματος στο έδαφος. Το δυναμικό του εδάφους στην περιοχή πτώσης του κεραυνού φθίνει με την απόσταση από το σημείο πλήγματος. Βηματική τάση (step voltage) ονομάζεται η διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται μεταξύ των ποδιών ενός ατόμου, το οποίο κάνει βήμα ανοίγματος 1m, και δεν έρχεται σε επαφή με άλλο γειωμένο αντικείμενο. Στην περίπτωση του πλοίου η επιφάνεια στην οποία στέκεται ο άνθρωπος είναι στις περισσότερες περιπτώσεις χάλυβας (συνήθως τύπου Steel-1008 με αγωγιμότητα τάξης μεγέθους $7.69 \cdot 10^6$ S/m).

Τάση επαφής (Touch Voltage) είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην ανύψωση δυναμικού γης (GPR) και στο δυναμικό επιφανείας στο σημείο όπου ένα άτομο στέκεται, ενώ συγχρόνως έχει ένα χέρι σε επαφή με γειωμένη μεταλλική δομή. Το υψηλότερο δυναμικό προκύπτει όταν υπάρχει μια μεταλλική δομή στην άκρη της περιοχής υψηλού δυναμικού και το άτομο στέκεται σε απόσταση 0.5m, ακουμπώντας σε αυτή τη δομή. Ο κίνδυνος από αυτόν τον τύπο επαφής είναι μεγαλύτερος από τον κίνδυνο που σχετίζεται με τη βηματική τάση, διότι η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος του σώματος και μπορεί να επηρεάσει τους μύες της καρδιάς. Στην περίπτωση της κεραυνοπληξίας πλοίου η τάση επαφής εφαρμόζεται μεταξύ του χεριού και του ποδιού του ανθρώπου, ο οποίος στέκεται σε απόσταση 0.5m από ένα γερανό ή ιστό και ακουμπάει τη μεταλλική κατασκευή σε ένα ύψος 1.5m [9].

Το υπολογιστικό πρόγραμμα CST δίνει τη δυνατότητα καταγραφής των βηματικών τάσεων και των τάσεων επαφής. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται μέσω των καταγραφέων τάσης *Voltage monitors*, τα οποία ορίζει ο χρήστης μέσω καμπυλών στις οποίες θα γίνει ολοκλήρωση του ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 1.29: Αναπαράσταση της βηματικής τάσης U_s και της τάσης επαφής U_t [9].

Το δίκτυο γείωσης του πλοίου είναι κατά κανόνα αγείοτο (IT)[18]. Ωστόσο, παρέχεται γείωση προστασίας, δηλαδή αγωγήμη σύνδεση των μεταλλικών τμημάτων των συσκευών (που δεν ανήκουν στο κύκλωμα λειτουργίας), με τη μεταλλική επιφάνεια του πλοίου. Με τη γείωση προστασίας επιτυγχάνεται η προστασία των ανθρώπων από πιθανή διαρροή ρεύματος στα μεταλλικά μέρη των συσκευών [9].

Κεφάλαιο 2: Επιπτώσεις κεραυνού στα πλοία

2.1 Είδη υπερτάσεων που επηρεάζουν το ηλεκτρικό σύστημα των πλοίων

Το ηλεκτρικό σύστημα των πλοίων έχει πολλές ομοιότητες με τα ηπειρωτικά ηλεκτρικά συστήματα. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες ιδιαιτερότητες στο δίκτυο των πλοίων που τα καθιστούν πιο επιρρεπή στις υπερτάσεις και τις υπερεντάσεις. Καταρχάς, τα πλοία περιέχουν συγκεντρωμένα δίκτυα με διακεκριμένα συστήματα παραγωγής και καταναλωτών τα οποία είναι συγκεντρωμένα σε πολύ μικρό χώρο ανά μονάδα ισχύος (σε σύγχρονες ναυπηγήσεις με ηλεκτρική πρόωση η εγκαταστημένη ισχύς φτάνει τα 40-80 MW σε έκταση μερικών εκατοντάδων μέτρων). Το όλο σύστημα είναι εξαιρετικά 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 σύστημα πρέπει να είναι εξαιρετικά αξιόπιστο [18]. Επίσης, λόγω των χαμηλών επαγωγικών αντιδράσεων στα ηλεκτρικά συστήματα των πλοίων, παρατηρούνται υπερεντάσεις με μεγαλύτερες τιμές ρευμάτων σε σχέση με τα ηπειρωτικά ηλεκτρικά συστήματα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή απαγωγέα υπερτάσεων (Surge Protective Devices: SPD).

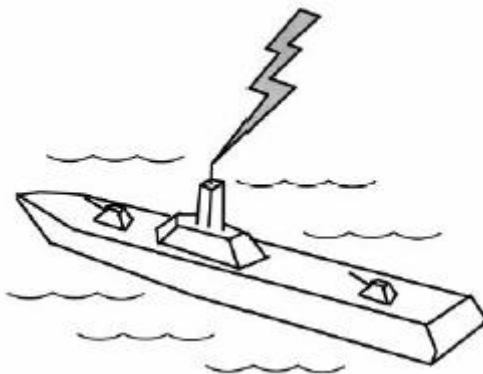
Τα αίτια δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων είναι είτε φυσικά, είτε τεχνητά. Φυσικές πηγές είναι κυρίως οι κεραυνοί (Lightning Electromagnetic Pulses: LEMP), ενώ οι τεχνητές αιτίες αφορούν χειρισμούς διακοπών. Άλλες μορφές υπερτάσεων που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά το δίκτυο του πλοίου είναι ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (ESD) και ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί που μπορούν να προκληθούν από θερμοπυρηνική έκρηξη (Nuclear Electromagnetic Pulse: NEMP) [7].

2.1.1 Υπερτάσεις από φυσικές πηγές (εξωτερικές υπερτάσεις)

Ο κεραυνός είναι ένα αναγνωρίσιμο φυσικό φαινόμενο στο οποίο οφείλονται συχνά ηλεκτρικές υπερτάσεις σε ηλεκτρικά συστήματα πλοίων. Παρόλο που η συχνότητα εμφάνισης υπερτάσεων που οφείλονται σε κεραυνούς είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις διακοπτικές υπερτάσεις, οι συνέπειες αυτών χαρακτηρίζονται καταστροφικές για τα ηλεκτρικά συστήματα. Τα κεραυνικά πλήγματα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου διακρίνονται σε: άμεσα κεραυνικά πλήγματα, κεραυνικά χτυπήματα κοντά στην επιφάνεια που περιβάλλει το ηλεκτρικό σύστημα και σε μακρινά κεραυνικά πλήγματα, τα οποία μπορούν να δημιουργήσουν επαγόμενες υπερτάσεις.

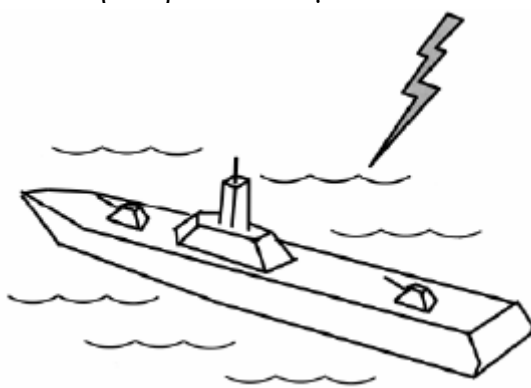
Στη περίπτωση ενός άμεσου κεραυνικού χτυπήματος (Σχήμα 2.1), οι υπερτάσεις που ακολουθούν είναι οι πιο ισχυρές (σε σχέση με τα άλλα πλήγματα) και προκαλούν υψηλή καταπόνηση των προστατευτικών διατάξεων (SPD). Το επίπεδο της καταπόνησης μπορεί να είναι αρκετά ισχυρό ώστε να καταστρέψει αμέσως απροστάτευτους ηλεκτρικούς και ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς. Επιπρόσθετα, είναι πιθανή η μηχανική καταπόνηση της κατασκευής του πλοίου καθώς και η θερμική καταπόνηση των καλωδιώσεων του ηλεκτρικού συστήματος. Η θερμική καταπόνηση

των καλωδιώσεων μπορεί να προκαλέσει μόνιμη ζημιά στο ηλεκτρικό σύστημα του πλοίου και να απαιτείται η επισκευή του δικτύου ώστε αυτό να τεθεί σε λειτουργία. Πέρα από τις άμεσες επιπτώσεις στο σύστημα, το άμεσο κεραυνικό πλήγμα είναι δυνατό να επηρεάσει τα συστήματα επικοινωνίας του πλοίου καθώς και τα συστήματα ελέγχου, κυρίως μέσω επαγόμενων υπερτάσεων.



Σχήμα 2.1: Άμεσο κεραυνικό πλήγμα[7].

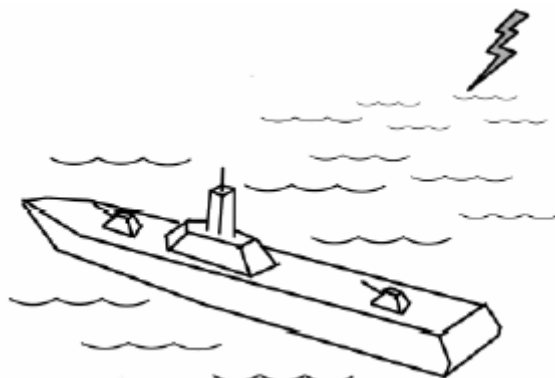
Στην περίπτωση που το κεραυνικό πλήγμα προσπίπτει σε μια κοντινή απόσταση από το πλοίο (Σχήμα 2.2), τότε παρατηρούνται επικίνδυνες υπερτάσεις μέσω μαγνητικής ή χωρητικής σύζευξης. Η απειλή για το ηλεκτρικό σύστημα είναι παρόμοια με εκείνη του άμεσου κεραυνικού πλήγματος με τη διαφορά πως εμπλέκεται μόνο ένα μέρος του κεραυνικού ρεύματος. Τα συστήματα απαγωγής κρουστικών υπερτάσεων (SPD) που τοποθετούνται στο ηλεκτρικό σύστημα αναμένεται να υποβληθούν σε μια μέτρια και ανεκτή κατοπόνηση από αυτό το είδος κεραυνικού πλήγματος. Επίσης, οι επαγόμενες υπερτάσεις είναι σημαντικά ασθενέστερες σε σχέση με εκείνες του άμεσου χτυπήματος αφού το κεραυνικό κανάλι βρίσκεται πιο μακριά από τα ηλεκτρικά κυκλώματα.



Σχήμα 2.2: Κεραυνικό χτύπημα σε κοντινή απόσταση από το πλοίο[7].

Στην περίπτωση της μακρινής κεραυνικής πρόσπτωσης (Σχήμα 2.3), το κεραυνικό κανάλι βρίσκεται ακόμα πιο μακριά και επομένως ο κίνδυνος από τις επαγόμενες υπερτάσεις είναι ακόμα πιο μικρός. Τα SPD αναμένεται να υποβληθούν σε μια ελάχιστη καταπόνηση λόγω του μακρινού πλήγματος. Ωστόσο, τα επανειλημμένα γεγονότα μακρινού κεραυνικού χτυπήματος είναι σε θέση να

προκαλέσουν διακοπή, φθορά και σωρευτική ζημιά με την πάροδο του χρόνου σε ευαίσθητα ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά κυκλώματα.



Σχήμα 2.3: Κεραυνικό πλήγμα σε μακρινή απόσταση από το πλοίο[7].

Ένα άλλο φαινόμενο που αξίζει να αναφερθεί είναι η ανακατανομή των ατμοσφαιρικών φορτίων, λόγω της γρήγορης κίνησης φορτίων μέσα σε ένα σύννεφο. Αυτό το φαινόμενο συνήθως παρατηρείται αφού έχει προηγηθεί ένα κεραυνικό πλήγμα, αλλά μπορεί να συμβεί χωρίς την ύπαρξη κεραυνού. Η ταχεία κίνηση φορτίων μέσα στο σύννεφο δημιουργεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο παρόμοιο με αυτό που δημιουργείται από κεραυνούς μεταξύ συννέφων. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η επαγωγή ρευμάτων και τάσεων στα κυκλώματα επικοινωνιών, ισχύος, στα συστήματα μεταφοράς σημάτων και δεδομένων χωρίς την ύπαρξη άμεσων, κοντινών ή μακρινών κεραυνικών πληγμάτων στο πλοίο [7].

2.1.2 Υπερτάσεις από τεχνητές πηγές (εσωτερικές υπερτάσεις)

Οι εσωτερικές υπερτάσεις δεν είναι πάντα καταστροφικές για το ηλεκτρικό σύστημα. Μπορούν να προκύψουν από φυσιολογικούς, καθημερινούς και επιθυμητούς χειρισμούς ή από ανεπιθύμητες λειτουργίες κάποιου μέρους του ηλεκτρικού συστήματος.

Οι συχνότητες των εσωτερικών υπερτάσεων διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την πηγή από την οποία προέρχονται. Η αντιπροσωπευτική κυματομορφή που χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει αυτές τις υπερτάσεις, έχει συχνότητα περίπου 100 kHz, αλλά είναι δυνατόν να είναι αρκετά υψηλότερη (500-1000 kHz). Παράλληλα, παρατηρούνται και υπερτάσεις χαμηλότερων συχνοτήτων (350 Hz έως 5 kHz).

Συχνά, οι υπερτάσεις δημιουργούνται από χειρισμούς ηλεκτρικών συστημάτων, οι οποίοι συμβαίνουν σκόπιμα και είναι μέρος της φυσιολογικής λειτουργίας του συστήματος. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένες περιπτώσεις τεχνητών υπερτάσεων.

- Ηλεκτρονόμος και λειτουργίες διακοπών: Το άνοιγμα των διακοπών είναι πιθανό να δημιουργήσει τόξο μεταξύ των επαφών του διακόπτη.
- Ζεύξη ή απόζευξη συστοιχιών πυκνωτών: Συστοιχίες πυκνωτών χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος σε πολλά ηλεκτρικά συστήματα. Συνεπώς, οι πυκνωτές συνδέονται ή αποσυνδέονται ανάλογα με τα

χαρακτηριστικά του φορτίου. Έτσι, μπορούν να δημιουργηθούν υπερτάσεις με πλάτος τετραπλάσιο του ονομαστικού και με μορφή ταλάντωσης (riging voltage waveforms).

- Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας: Παρόμοια με την παραπάνω περίπτωση μπορούν να δημιουργηθούν υπερτάσεις.
- Εκφορτίσεις επαγωγικών συσκευών: Διάφορες επαγωγικές συσκευές (όπως μετασχηματιστές) αποθηκεύουν ενέργεια κατά τη λειτουργία τους. Κατά την απενεργοποίηση των φορτίων, η συσκευή ελευθερώνει την ενέργεια στο σύστημα με αποτέλεσμα τη δημιουργία υπερτάσεων.
- Εκκίνηση φορτίων: Κατά την εκκίνηση επαγωγικών φορτίων ένα πολύ μεγάλο ρεύμα απαιτείται στιγμιαία για την εκκίνησή τους.
- Σφάλματα τα οποία δημιουργούν τόξα: Σφάλματα είναι δυνατό να δημιουργήσουν τόξα λόγω διάσπασης της μόνωσης, είτε των καλωδίων είτε σε συσκευές όπως στη μόνωση της περιέλιξης του κινητήρα.
- Εκκαθάριση σφαλμάτων: Είναι πιθανό να ανοίξει κάποιος διακόπτης λόγω της εμφάνισης κάποιου σφάλματος. Συνεπώς, είναι πιθανό να εγκλωβιστεί ενέργεια στο ηλεκτρικό σύστημα με αποτέλεσμα την εκδήλωση υπερτάσεων.
- Κακές ή χαλαρές συνδέσεις [7].

2.2 Επιπτώσεις των άμεσων κεραυνικών πλήγμάτων

Σε αντίθεση με τα συστήματα των ηπειρωτικών κατασκευών, σε ένα πλοίο, οι πλειονότητα των συστημάτων και των δικτύων είναι εκτεθειμένα στα άμεσα κεραυνικά χτυπήματα, επειδή αναπόφευκτα βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τις οδεύσεις του κεραυνικού ρεύματος, στο σπάνιο φαινόμενο του άμεσου κεραυνικού πλήγματος.

Καθώς ο οχετός προεκκένωσης ενός κεραυνού πλησιάζει το πλοίο, θα σταματήσει από κάποιον ιστό (mast) ενός πλοίου, καθώς οι ιστοί εξέχουν σημαντικά από το κατάστρωμα του πλοίου. Στα καινούργια πλοία οι ιστοί είναι κούφιοι μεταλλικοί ράβδοι (μεταλλικοί σωλήνες), οι διαστάσεις των οποίων επιλέγονται με βάση τη μηχανική αντοχή. Οι περισσότεροι από αυτούς συνδέονται μέσω καλωδίων (επίτονοι -guy wires-) με το κατάστρωμα. Σε μικρά σκάφη αναψυχής και ιστιοφόρα, οι ιστοί είναι φτιαγμένοι από ξύλο ή συνθετικά υλικά. Στην περίπτωση ενός κεραυνικού χτυπήματος, ακόμα και σε περιπτώσεις πλοίων με πολλούς ιστούς, η διέλευση του ρεύματος προς το κατάστρωμα συμβαίνει μέσω ενός ιστού, καθώς οι ιστοί δεν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, σε αντίθεση με το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας ενός κτηρίου το οποίο έχει εγκατασταθεί σύμφωνα με τα πρότυπα.

Όταν το κεραυνικό ρεύμα περνά μέσω ενός ιστού, κατά μήκος του παρατηρείται μια μεγάλη πτώση δυναμικού. Η επαγωγή ενός κούφιου ιστού με συνηθισμένη διατομή είναι της τάξης του 1 $\mu\text{H/m}$. Λαμβάνοντας υπόψη πως η μέγιστη τιμή της παραγωγού του ρεύματος είναι 30GA/s (μία αντιπροσωπευτική τιμή), η μέγιστη διαφορά δυναμικού για ύψος 20m είναι $V = L \cdot di/dt = 600\text{kV}$ (ακόμα και αν αγνοηθεί η πτώση τάσης λόγω της αντίστασης). Ας θεωρήσουμε έναν επίτονο (guy wire) δηλαδή ένα καλώδιο του οποίου η μία άκρη είναι συνδεδεμένη στο κατάστρωμα και η άλλη άκρη είναι συνδεδεμένη με τον ιστό σε ύψος 20m. Στην περίπτωση κεραυνοπληξίας σε έναν από τους ιστούς του πλοίου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα εκδήλωσης τόξου στα άκρα του καλωδίου και κυρίως στον εντατήρα (turnbuckle) του επιτόνου -δηλαδή στο σημείο σύνδεσης του καλωδίου και του ιστού ή του καταστρώματος- εξαιτίας της χαλαρής σύνδεσης των επαφών στα συγκεκριμένα σημεία.

Εάν εκδηλωθεί θετικός κεραυνός, από τις υψηλές τιμές ρεύματος λόγω του βραχέως κρουστικού ρεύματος, αλλά και εξαιτίας του μακρού κεραυνικού ρεύματος μπορεί να προκληθεί αρκετή απαγωγή θερμότητας ώστε να λιώσουν μεταλλικά τμήματα, δημιουργώντας κόκκινες, καυτές σταγόνες από το λιωμένο μέταλλο. Οι σταγόνες αυτές επιφέρουν τον κίνδυνο εκδήλωσης σοβαρής φωτιάς ή έκρηξης σε περιβάλλον υψηλού κινδύνου (πετροχημικά, εκρηκτικά κ.τ.λ.).

Εάν οι ιστοί είναι πολύ ψηλοί και όχι πολύ μακριά ο ένας με τον άλλο (ή υπάρχουν εκτεταμένα τμήματα των ιστών τα οποία πλησιάζουν τους παρακείμενους ιστούς), υπάρχει η πιθανότητα εκδήλωσης τόξου -ή πλευρικού πλήγματος (side flashing), όπως αναφέρεται συνήθως- μεταξύ του ιστού που πλήχθηκε από τον κεραυνό και των παρακείμενων ιστών. Τέτοια τόξα δημιουργούν υψηλό κίνδυνο ασφαλείας και επομένως πρέπει να αποφεύγονται με οποιοδήποτε τρόπο. Η τοποθέτηση μιας σειράς από επιτόνους, οι οποίοι θα είναι σωστά συνδεδεμένοι,

παρέχει παράλληλες οδεύσεις για την διέλευση του κεραυνικού ρεύματος, μειώνοντας την πιθανότητα εκδήλωση επικίνδυνων πτώσεων δυναμικού.

Το αποτέλεσμα θα είναι πολύ χειρότερο αν ο κεραυνός πλήξει μη-μεταλλικούς ιστούς, ιδιαίτερα αν υπάρχουν πανιά, αφού σε αυτές τις περιπτώσεις η εκδήλωση φωτιάς είναι σχεδόν βέβαιη. Το μεταλλικό κάλυμμα στην κορυφή του ιστού (το οποίο χρησιμοποιείται για την τοποθέτηση των πανιών και για την αποφυγή της διάβρωσης), επιδεινώνει την κατάσταση αφού το αγείοτο μεταλλικό κάλυμμα λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο σε ελεύθερο δυναμικό (floating electrode) και συμβάλλει στην εκδήλωση δύο οχετών με αντίθετη κατεύθυνση, οι οποίοι θα συνδέσουν τον κατερχόμενο οχετό με το κατάστρωμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορούν να εκδηλωθούν ισχυρές εκρήξεις. Επομένως, όταν οι ιστοί αποτελούνται από μη αγωγιμα υλικά, το μεταλλικό κάλυμμα πρέπει να συνδέεται με το μεταλλικό σκελετό του πλοίου, ή με μια πλάκα γείωσης. Για τη σύνδεση πρέπει να λάβουμε υπόψη το γεγονός πως δεν υπάρχουν άλλες παράλληλες οδεύσεις για τη διέλευση του ρεύματος.

Αν το ρεύμα διέρχεται μέσω διάφορων οδεύσεων από το επίπεδο του καταστρώματος προς τον τελικό προορισμό, δηλαδή τη θάλασσα, εκδηλώνονται πολλές διαφορές δυναμικού μεταξύ των τμημάτων των οδεύσεων και άλλων μεταλλικών τμημάτων/συστημάτων τα οποία είναι είτε απομονωμένα είτε συνδεδεμένα στο σκελετό του πλοίου σε μακρινές αποστάσεις. Αυτές οι διαφορές δυναμικού κυμαίνονται από μερικά volts μέχρι μερικές εκατοντάδες kilovolts. Σε αυτές τις καταστάσεις, οι επικίνδυνοι σπινθήρες μπορούν να αποφθεχθούν είτε μέσω άμεσης σύνδεσης οπουδήποτε είναι δυνατό, είτε μέσω κατάλληλα επιλεγμένων SPDs.

Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο και οι χρονικές παράγωγοι σε δεδομένη απόσταση εξαιτίας άμεσου πλήγματος ή πλήγματος σε κοντινή απόσταση είναι σημαντικά υψηλότερα για διάδοση πάνω από θάλασσα σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη για διάδοση πάνω από χερσαίες εκτάσεις. Συνεπώς, οι επαγόμενες υπερτάσεις θα είναι πιο ισχυρές στην περίπτωση της διάδοσης πάνω από τη θάλασσα.

Σε θαλάμους χειρισμών καινούριων πλοίων υπάρχουν τμήματα από γυαλί ή από συνθετικά υλικά, και επομένως εκτός από τα καλώδια που διέρχονται από ανοιχτούς χώρους (και διεγείρονται σημαντικά από τα πεδία των κεραυνών), ακόμα και στα καλώδια που βρίσκονται στους θαλάμους επάγονται σημαντικές υπερτάσεις. Οι συνέπειες των επαγόμενων φαινομένων μπορεί να είναι σημαντικές αφού κρίσιμα μηχανήματα (όπως συστήματα πλοήγησης) βρίσκονται σε κοντινή απόσταση.

Παρακάτω γίνονται ορισμένες συστάσεις, όπως αναφέρονται στο [9], για την ανάπτυξη καλύτερων προτύπων.

- Πρέπει να γίνεται διαχωρισμός του κεραυνικού ρεύματος σε παράλληλα μονοπάτια σε κοντινή απόσταση από το σημείο του χτυπήματος. Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να επιτευχθεί με διασύνδεση των ιστών σε μεγάλο ύψος, με τη σωστή τοποθέτηση επιτόνων κ.τ.λ. . Ωστόσο, περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις διαστάσεις και τη διαδικασία εγκατάστασης πρέπει να διερευνηθούν.

- Η προστασία μικρών πλοίων με μη μεταλλικούς ιστούς πρέπει να αναλυθεί ξεχωριστά, δίνοντας έμφαση στην πρόληψη πυρκαγιάς σε περιπτώσεις άμεσου πλήγματος στον ιστό του πλοίου.
- Για την προστασία των εργαζομένων πρέπει να προσδιοριστεί η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από ιστούς, επιτόνους, και άλλα τμήματα τα οποία διαρρέονται από ρεύμα σε περίπτωση κεραυνοπληξίας. Επίσης, πρέπει να αναπτυχθούν κανόνες που να αφορούν την εργασία με μεταλλικά συστήματα κάτω από συνθήκες καταιγίδας.
- Ακόμα, απαιτείται ο προσδιορισμός της απόστασης ασφαλείας για χώρους υψηλού κινδύνου, όπως δεξαμενές αποθήκευσης πετροχημικών, και ο προσδιορισμός των πιθανών σημείων στα οποία θα εκδηλωθεί υψηλό δυναμικό σε περίπτωση άμεσου κεραυνού.
- Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα SPDs για τις ναυτικές εφαρμογές.
- Η σωστή μόνωση πρέπει να προσδιοριστεί για συστήματα MV/LV σε πλοία για να αποφευχθεί η αστοχία της μόνωσης, η οποία προκαλείται από διεγέρσεις Common Mode (δηλαδή υπερτάσεις που συμβαίνουν μεταξύ των αγωγών τροφοδοσίας και του αγωγού γείωσης). Επίσης, απαιτείται η τοποθέτηση κατάλληλων SPDs για την αποφυγή καταστροφών από υπερτάσεις Differential Mode (δηλαδή υπερτάσεις που συμβαίνουν μεταξύ του αγωγού τροφοδοσίας και του ουδέτερου) [4].

2.3 Βλάβες στο σκελετό (hull)

Στα μεταλλικά πλοία η πλάκα γείωσης δεν είναι αναγκαία διότι το ρόλο της επιφάνειας γείωσης τον αναλαμβάνει η ίδια η γάστρα του πλοίου. Δηλαδή τα πλοία που είναι κατασκευασμένα από υλικά όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο παρέχουν στον κεραυνό αγωγίμο δρόμο προς τη θάλασσα. Παρακάτω θα αναλυθεί ο ρόλος της πλάκας γείωσης και πως σχετίζεται με τις βλάβες στο σκελετό σκάφους που προκύπτουν από ένα κεραυνικό χτύπημα. Αντίστοιχη συμπεριφορά επιδεικνύει συνολικά ο σκελετός του πλοίου στα μεταλλικά πλοία.

Η μέγιστη τιμή του κεραυνικού πλήγματος εξαρτάται από το φορτίο που φέρει ο οχετός προεκκένωσης. Άρα, ο κεραυνός συμπεριφέρεται σαν μια γεννήτρια ρευμάτων Norton χαμηλής αντίδρασης με την κυματομορφή ρεύματος να παρουσιάζει μέγιστο κοντά στα 30 kA. (Τα 30 kA είναι το πλάτος του ρεύματος που παρατηρείται κατά μέσο όρο στο πρώτο βραχύ χτύπημα αρνητικού κεραυνού ενώ το αντίστοιχο για το επακόλουθο πλήγμα είναι 12 kA)[10]. Τα αναπτυσσόμενα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από τη ροή ρεύματος από την πλάκα γείωσης προς το νερό που βρίσκεται κοντά της, εξαρτώνται από την πυκνότητα ροής ρεύματος που είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του συστήματος σκελετού-πλάκας γείωσης-νερού. Καθώς ο χρόνος αύξησης του ρεύματος είναι της τάξης των 100ns ή μεγαλύτερος, με φάσμα συχνοτήτων μικρότερο των μερικών MHz και μήκος κύματος 100m, το πεδίο δυναμικού που σχετίζεται με τη ροή ρεύματος μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτροστατικό κατά μήκος ενός σκάφους.

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

Μια γεωμετρική προσέγγιση για ένα σκάφος με μια πλάκα γείωσης είναι ένα οριζόντιο κυκλικό ηλεκτρόδιο στην επιφάνεια του νερού. Για την προσέγγιση αυτή, η αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί, σύμφωνα με τον Saraoja, από τη σχέση :

$$R = \frac{1}{2\sigma D} \quad (2.3.1)$$

όπου σ η αγωγιμότητα του γλυκού νερού χωρίς διαλυμένα άλατα ($\sigma = 10^{-3} (\Omega \cdot m)^{-1}$, και D η διάμετρος της πλάκας (34 cm για τα πρότυπα ISO 1013 και ABYC). Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στη σχέση (2.3.1), η αντίσταση ισούται με 1.45k Ω , που σημαίνει πως θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν φαινόμενα μείωσης της αντίστασης γείωσης, η μέγιστη τιμή του δυναμικού της πλάκας πλησιάζει τα 44MV για κεραυνικό ρεύμα 30 kA. Θεωρώντας τη ροή του ρεύματος

σχεδόν ακτινική, το δυναμικό του νερού μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης και επομένως μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν μηδέν για αποστάσεις μεγαλύτερες του 1m (δηλαδή για αποστάσεις ίσες με μερικές διαμέτρους της πλάκας γείωσης). Η κλίση του δυναμικού (ή ένταση ηλεκτρικού πεδίου) της τάξης των 500kV/m είναι αρκετή για να προκαλέσει ηλεκτρική διάσπαση. Καθώς διαφορές δυναμικού της τάξης των 44MV υπάρχουν σε αποστάσεις της τάξης του 1m, η δημιουργία ηλεκτρικής διάσπασης είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Άρα, μια πλευρική εκκένωση είναι πολύ πιθανό να συμβεί μεταξύ της πλάκας γείωσης (ή όποιου υπερθαλάσσιου ηλεκτρικού τμήματος είναι συνδεδεμένο με αυτήν) και του νερού.

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

$$R = \frac{\ln(2L/1.36d)}{\pi L \sigma} \Omega \quad (2.3.2)$$

Πιο συγκεκριμένα, για L=10m και d=9.3mm (για να επιτευχθεί το εμβαδόν που να συμμορφώνεται με τα πρότυπα) πετυχαίνεται αντίσταση 234Ω και το δυναμικό της πλάκας γείωσης είναι 7MV για κεραυνικό ρεύμα 30kA. Ακόμα και αν μειώθηκε κατά έξι φορές το δυναμικό σε σχέση με τα 44MV, η τάση βρίσκεται σε επικίνδυνα υψηλά επίπεδα.

Αντίθετα, σε συνθήκες θαλασσινού νερού ισχύει $\sigma = 4(\Omega \cdot m)^{-1}$, για το κυκλικό ηλεκτρόδιο η αντίσταση είναι 0.36Ω με τάση 11kV ενώ για ηλεκτρόδιο σε λωρίδα η αντίσταση είναι 0.06Ω με τάση 1.8kV. Καμία από τις παραπάνω τάσεις δεν αποτελεί σοβαρό κίνδυνο για το σχηματισμό πλευρικών εκκενώσεων. Άρα, το θαλασσινό νερό είναι πολύ ασφαλέστερο σε αυτόν τον τομέα σε σύγκριση με το γλυκό νερό [10].

2.4 Αντικεραυνική προστασία υπεράκτιων εξέδρων άντλησης πετρελαίου

Οι συνέπειες κεραυνικού πλήγματος σε υπεράκτιες εξέδρες άντλησης πετρελαίου (Offshore Oil Installations: OOI) μπορεί να είναι καταστροφικές. Οι πιθανές εκρήξεις λόγω των εύφλεκτων υλικών θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια των εργαζομένων. Επίσης, η απώλεια της λειτουργίας και της παραγωγής λόγω διαταραχών σε συστήματα χαμηλής τάσης είναι μια πιθανή συνέπεια. Οι OOI πρέπει να διαθέτουν ένα σωστά σχεδιασμένο και συντηρημένο σύστημα αντικεραυνικής προστασίας, το οποίο να προστατεύει από τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα αλλά και από τα επαγόμενα φαινόμενα. Για την κατάλληλη προστασία απαιτείται μια εξωτερική αντικεραυνική προστασία (τερματικά αέρα, καθοδικοί αγωγοί και γείωση) μαζί με μια εσωτερική αντικεραυνική προστασία (ισοδυναμικές συνδέσεις, θωράκιση και SPDs).

Όταν ένας κεραυνός πλήξει ένα OOI, εμφανίζονται μεταβατικά ρεύματα στον εξοπλισμό μέσω διάφορων μηχανισμών: χωρητική, μαγνητική, επαγωγική σύζευξη και αύξηση δυναμικού. Οι κύριες επιπτώσεις των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Ένας τρόπος περιορισμού των επιπτώσεων είναι η εγκατάσταση ενός εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας (External Lightning Protection System: ELPS)

Κύριες Επιπτώσεις	Συνέπειες
Βλάβη στους πύργους και τις πλωτές εξέδρες άντλησης πετρελαίου	Διακοπή της λειτουργίας της εγκατάστασης
Βλάβη στο ηλεκτρικό σύστημα	Απώλεια ή φθορά εξοπλισμού
Βλάβη στους ηλεκτρικούς κινητήρες	Απώλειες για την παραγωγή
Απώλεια της λειτουργίας κρίσιμων διαδικασιών	Απομόνωση του συστήματος
Απώλεια ηλεκτρικής ισχύος	Λάθος πληροφόρηση
Δημιουργία ταχέων μεταβατικών φαινομένων και παρεμβολών	Κίνδυνος για τους εργαζομένους
	Κίνδυνος έκρηξης και εκδήλωσης φωτιάς

Πίνακας 2.1: Κύριες επιπτώσεις των άμεσων κεραυνικών πληγμάτων για υπεράκτιες εξέδρες άντλησης πετρελαίου (OOI) [19].

Οι OOI είναι κατασκευές που θεωρούνται ιδιαίτερες για την αντικεραυνική προστασία καθώς: (α) είναι εγκαταστάσεις που περιέχουν εύφλεκτα υλικά, και (β) είναι μεταλλικές κατασκευές. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62305-2, για τις εγκαταστάσεις με μεταλλικό πλαίσιο δεν απαιτείται επιπλέον προστασία, αφού η σιδηροκατασκευή παρέχει μια συνεχή όδευση για τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος από το υψηλότερο σημείο στη γη. Επίσης, στο IEC 92 αναφέρεται πως η

εγκατάσταση αγωγών για την αντικεραυνική προστασία απαιτείται μόνο στα πλοία που διαθέτουν ξύλινους ιστούς. Ωστόσο, οι παραπάνω αναφορές παραβλέπουν το γεγονός πως πολλές κρίσιμες συσκευές είναι εκτεθειμένες και δεν προστατεύονται από το μεταλλικό πλαίσιο. Στο IEC 60092-401 επισημαίνεται πως για εξόδους εξαερισμού εύφλεκτων αερίων που βρίσκονται κοντά στους ιστούς δεξαμενοπλοίων, απαιτείται ο τερματικός αέρα να προεξέχει τουλάχιστον 2m από την έξοδο του εξαερισμού.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πρότυπα για τις ηπειρωτικές κατασκευές, οι οποίες αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο έκρηξης ή φωτιάς, μπορούν να γίνουν κάποιες συστάσεις για την εγκατάσταση ενός κατάλληλου ELPS στα ΟΟΙ:

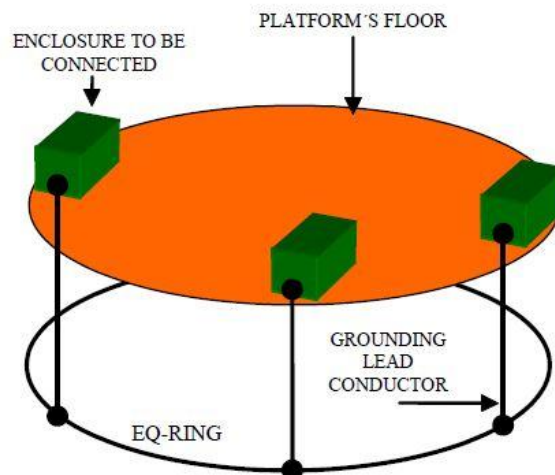
- Όλες οι συσκευές και ο εξοπλισμός βρίσκονται εντός του μεταλλικού πλαισίου του ΟΟΙ.
- Το εξωτερικό πλαίσιο της κατασκευής πρέπει να είναι ηλεκτρικά συνεχές. Σε διαφορετική περίπτωση, πρέπει να εγκατασταθούν βραχυκυκλωτήρες (jumpers) μεταξύ των κύριων μεταλλικών τμημάτων.
- Η τοποθέτηση καθοδικών αγωγών πρέπει να γίνεται μόνο όταν δεν εξασφαλίζεται η ηλεκτρική συνέχεια για τη διέλευση του κεραυνικού ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να συνδέονται στον κύριο σκελετό του ΟΟΙ (ή στους βασικούς πυλώνες της βάσης χωρίς να είναι απαραίτητο να φτάσουν ως το επίπεδο της θάλασσας). Οι καθοδικοί αγωγοί πρέπει να έχουν το μικρότερο δυνατό μήκος ενώ μπορεί να είναι είτε γυμνά καλώδια είτε να έχουν και κατάλληλη μόνωση.
- Εγκατάσταση ενός δικτύου ισοδυναμικής ζεύξης σε κάθε επίπεδο όπου απαιτείται ισοδυναμική σύνδεση εξοπλισμού και συσκευών.
- Εάν μία συσκευή είναι πιθανό να χτυπηθεί από κεραυνό, ή εάν μια επικίνδυνη περιοχή βρίσκεται κάτω από μία μεταλλική επιφάνεια που μπορεί να πληχθεί, συνίσταται η εγκατάσταση τερματικών αέρα τα οποία θα προστατεύουν την περιοχή με βάση τις ζώνες προστασίας *I* ή *II* και τη μέθοδο της κυλιόμενης σφαίρας πάνω και γύρω από το ΟΟΙ. Τα τερματικά αέρα συνδέονται με το δίκτυο ισοδυναμικής ζεύξης και με τη βάση του μεταλλικού πλαισίου του ΟΟΙ (το οποίο θα λειτουργήσει ως αγωγός καθόδου).
- Όποτε είναι δυνατό, ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να τοποθετείται στη ζώνη αντικεραυνικής προστασίας (Lightning Protection Zone: LPZ) O_B για προστασία ενάντια στα άμεσα κεραυνικά πλήγματα. Η ζώνη LPZ O_B είναι η ζώνη η οποία προστατεύεται πλήρως από τα κεραυνικά χτυπήματα, προστατεύεται μερικώς από τα επαγόμενα ρεύματα και τάσεις, ενώ είναι πλήρως εκτεθειμένη στο παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.
- Πρέπει να χρησιμοποιούνται διπλάσιες διατομές για τα τερματικά αέρα και τους καθοδικούς αγωγούς σε σχέση με τις προτάσεις του IEC 62305-1 για τις ηπειρωτικές εγκαταστάσεις.
- Για την εξωτερική αντικεραυνική προστασία πρέπει να χρησιμοποιούνται μέταλλα ανθεκτικά στη διάβρωση (υλικά ανθεκτικά στο θαλασσινό νερό).
- Δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται σωληνώσεις που μεταφέρουν εύφλεκτα υλικά ως καθοδικοί αγωγοί για την εξωτερική αντικεραυνική προστασία.

Διαφορετικά πρέπει να εξετάζεται η ισοδυναμική σύνδεση στα άκρα τους καθώς και το πάχος του σωλήνα ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία τόξου.

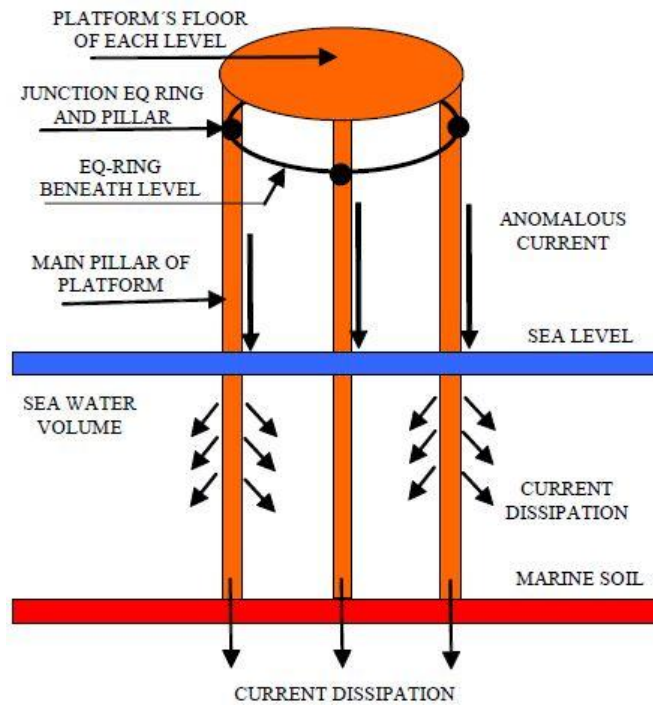
Η εγκατάσταση ενός απομονωμένου εξωτερικού συστήματος αντικεραυνικής προστασίας στο ΟΟΙ είναι δύσκολη λόγω της ύπαρξης του μεταλλικού πλαισίου. Το μεταλλικό πλαίσιο παρέχει ένα μεγάλο αριθμό οδεύσεων και επομένως μειώνεται η πιθανότητα ανάπτυξης μεγάλων τάσεων επαφής. Ο κίνδυνος ανάπτυξης μεγάλων βηματικών τάσεων μειώνεται εφόσον όλα τα τμήματα του μεταλλικού πλαισίου έχουν το ίδιο δυναμικό.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στους θαλάμους ελέγχου και στους χώρους με ευαίσθητο εξοπλισμό. Οι τοίχοι και η οροφή των δωματίων πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από συνεχή φύλλα χάλυβα που έχουν το απαιτούμενο πάχος ώστε να συμπεριφέρονται σαν κλωβός Faraday. Ωστόσο, ζημιά μπορεί να προκληθεί όταν το σύστημα κλιματισμού (ή άλλο απροστάτευτο σύστημα, όπως κινητήρες) είναι τοποθετημένο στην οροφή του δωματίου καθιστώντας το θάλαμο ευάλωτο στους κεραυνούς. Σε αυτή τη περίπτωση, πρέπει να τοποθετούνται τερματικά αέρα ώστε να αποφευχθούν άμεσες επιπτώσεις στο σύστημα.

Υπάρχουν δύο τύποι εγκαταστάσεων ΟΟΙ με μεταλλικό πλαίσιο: πλωτές εγκαταστάσεις (όπως τα πλοία) και εγκαταστάσεις που στηρίζονται στο βυθό της θάλασσας. Στις πλωτές εξέδρες οι αγωγοί προστασίας πρέπει να συνδέονται με το σκελετό του πλοίου ακολουθώντας τη συντομότερη διαδρομή. Στην περίπτωση των ΟΟΙ που στηρίζονται στο βυθό της θάλασσας, οι αγωγοί προστασίας πρέπει να συνδέονται με τους βασικούς πυλώνες μέσω ενός ισοδυναμικού δακτύλιου (equipotencial ring). Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2.4, τα μεταλλικά πλαίσια συνδέονται με τον ισοδυναμικό δακτύλιο που βρίσκεται κάτω από κάθε επίπεδο, και ο δακτύλιος συνδέεται με τους βασικούς πυλώνες όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.4: Σύνδεση των μεταλλικών πλαισίων στο πλησιέστερο ισοδυναμικό δακτύλιο κάθε επιπέδου. Οι αγωγοί προστασίας πρέπει να ακολουθούν τη συντομότερη διαδρομή (ευθεία, χωρίς καμία καμπύλη) [19].



Σχήμα 2.5: Τα ρεύματα σφαλμάτων διέρχονται μέσω του ισοδυναμικού δακτυλίου και των βασικών πυλώνων και διαχέονται στο έδαφος και σε μικρότερο βαθμό στο θαλασσινό νερό [19].

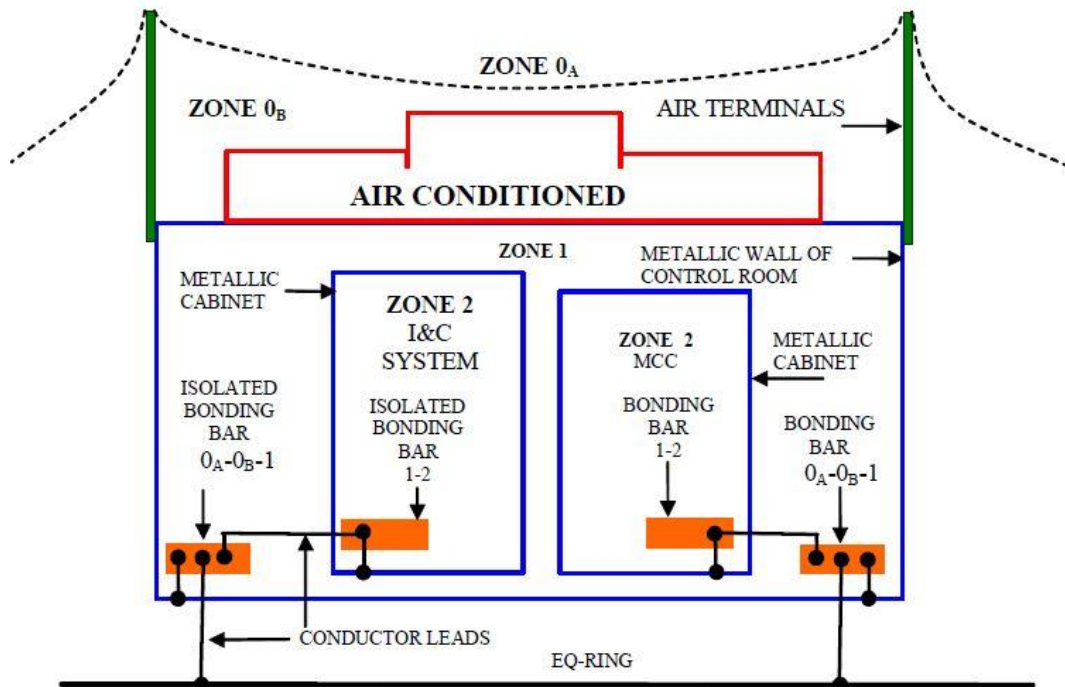
Ο εξοπλισμός που βρίσκεται στο εσωτερικό της κατασκευής του ΟΟΙ είναι προστατευμένος από τα άμεσα κεραυνικά πλήγματα. Ωστόσο, μεταβατικά ρεύματα που σχετίζονται με τον κεραυνό μπορούν να διέλθουν μέσω διάφορων τρόπων φτάνοντας ευαίσθητες συσκευές. Τα μεταβατικά ρεύματα μπορούν να διέλθουν μέσω των καλωδίων τροφοδοσίας, καλώδια σημάτων ή να επαχθούν άμεσα από το κεραυνικό κανάλι ή από μεταλλικές κατασκευές που διαρρέονται από το κεραυνικό ρεύμα.

Για τους θαλάμους και τις συσκευές μετρήσεων και ελέγχου, η προστασία γίνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Περιλαμβάνει ένα εξωτερικό σύστημα αντικεραυνικής προστασίας (εάν κριθεί απαραίτητο), δίκτυο ισοδυναμικής ζεύξης και εσωτερικό σύστημα γείωσης. Οι προστατευτικές ζώνες και η θωράκιση γίνεται με βάση το IEC 62305-3.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.6:

- Τερματικά αέρα τοποθετούνται όταν ευάλωτα συστήματα δεν είναι θωρακισμένα από μεταλλικά πλαίσια. Το ELPS μπορεί να παραληφθεί εάν δεν υπάρχουν συσκευές και συστήματα που βρίσκονται υπό κίνδυνο στην οροφή του θαλάμου ελέγχου.
- Το κεραυνικό ρεύμα διέρχεται μέσω των τερματικών και των τοίχων του θαλάμου ελέγχου, ο οποίος συμπεριφέρεται σαν κλωβός Faraday.
- Ζυγοί ισοδυναμικής σύνδεσης για συστήματα μετρήσεων και ελέγχου είναι απομονωμένα από μεταλλικούς τοίχους.
- Αντίθετα, οι ζυγοί ισοδυναμικής σύνδεσης για πίνακες ελέγχου κινητήρων (MCC), μπορούν να μην είναι απομονωμένοι από τους μεταλλικούς τοίχους του δωματίου.

- Οι θάλαμοι και οι καμπίνες ελέγχου είναι κατασκευασμένες από συνεχή μεταλλικά φύλλα, με αρκετό πάχος ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για τη ροή του κεραυνικού ρεύματος.
- Οι καμπίνες για συστήματα ελέγχου και μετρήσεων πρέπει να είναι απομονωμένες από το μεταλλικό πάτωμα και τους τοίχους του θαλάμου ελέγχου.



Σχήμα 2.6: Αντικεραυνική προστασία για ένα θάλαμο ελέγχου που περιέχει Πίνακες Ελέγχου Κινητήρων (Motor Control Center: MCC), συσκευές και κυκλώματα μετρήσεων σε ένα ΟΟΙ [19].

Οι απαγωγείς υπερτάσεων (Surge Protector Devices: SPD) είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για την αντικεραυνική προστασία. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών, ηλεκτρονικών συστημάτων, των κυκλωμάτων και των συσκευών μετρήσεων και ελέγχου (I&C), μερικά milli-joules ενέργειας μπορούν να είναι αρκετά για να προκαλέσουν λειτουργικές διαταραχές και βλάβες. Έτσι, είναι προφανής η ανάγκη για επιπρόσθετη προστασία για ορισμένες συσκευές. Ορισμένοι κανόνες που πρέπει να ακολουθούνται κατά την εγκατάσταση ενός SPD είναι οι εξής:

- Τα SPD για την προστασία εγκαταστάσεων χαμηλής τάσης είναι σχεδιασμένα ώστε να αντιμετωπίζουν μόνο ένα μέρος του συνολικού κεραυνικού ρεύματος. Συνεπώς, είναι σημαντική η θωράκιση των καλωδίων τροφοδοσίας και σημάτων.
- Τα SPD πρέπει να τοποθετούνται όσο δυνατό κοντινότερα στο σημείο εισόδου του καλωδίου ή του εξοπλισμού που πρέπει να προστατεύεται.
- Το πρώτο SPD πρέπει να αντιμετωπίζει το μεγαλύτερο μέρος του κεραυνικού ρεύματος. Με τον τρόπο αυτό, το κύριο μέρος ενός εισερχόμενου κεραυνικού ρεύματος θα οδηγηθεί στη γη με το SPD μεταξύ LPZ 0_A και LPZ 1. Τα επόμενα SPD θα πρέπει να επιλέγονται και να τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε η

εναπομένουσα κεραυνική απειλή που εισέρχεται στο θάλαμο και τα επαγόμενα ρεύματα και πεδία να αντιμετωπίζονται με επιτυχία.

- Γραμμές που εισέρχονται από τη LPZ 0_A στη LPZ 1 μεταφέρουν μέρος του κεραυνικού ρεύματος. Γι' αυτό τα SPD είναι κλάσης I και δοκιμάζονται σε κρουστικούς παλμούς 10/350.
- Γραμμές που εισέρχονται από τη LPZ 0_B στη LPZ 1 μεταφέρουν μόνο επαγόμενους παλμούς και γι' αυτό τα SPD σε αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να αντιμετωπίζουν παλμούς 8/20 (κλάσης II).
- Μεταξύ LPZ 1 και LPZ 2, και για υψηλότερες ζώνες, τα SPD δοκιμάζονται στους παλμούς 8/20 (κλάση II) ή γεννήτριας συνδυασμού (κλάση III) -1.2/50 για ανοικτοκύκλωμα και 8/20 για βραχυκύκλωμα-.
- Πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή του τύπου SPD που θα χρησιμοποιηθεί: SPD τάσης διακοπτικού τύπου (voltage switching) και SPD τύπου περιορισμένης τάσης (voltage-limiting).
- Για τη σύνδεση ζωνών ίδιου επιπέδου μέσω καλωδίων τροφοδοσίας ή σημάτων, τα SPD μπορούν να παραληφθούν εάν τα καλώδια φέρουν μεταλλική θωράκιση ή είναι τοποθετημένα μέσα σε μεταλλικούς σωλήνες.

Η αποτελεσματικότητα της θωράκισης του ΟΟΙ εξαρτάται από τη συχνότητα, τη γεωμετρία της θωράκισης, τη θέση του δέκτη της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής εντός της θωράκισης, από το είδος του πεδίου και από τη πόλωσή του [19].

Κεφάλαιο 3: Πρόγραμμα προσομοίωσης CST STUDIO

3.1 Περιγραφή προγράμματος

Το λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης CST STUDIO SUITE προσφέρει αποτελεσματικές υπολογιστικές μεθόδους σε ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Περιλαμβάνει εργαλεία για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των συσκευών που λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων (από χαμηλές συχνότητες έως μερικές εκατοντάδες GHz). Οι αναλύσεις μπορούν να περιλαμβάνουν θερμικές και μηχανικές επιδράσεις, καθώς και προσομοιώσεις κυκλωμάτων. Χρησιμοποιώντας το συγκεκριμένο λογισμικό επιταχύνεται ο κύκλος ανάπτυξης ενός προϊόντος και επιτρέπεται η εικονική προτυποποίηση, προτού γίνουν φυσικές δοκιμές επιδρώντας θετικά στην ανάπτυξη νέων προϊόντων. Το πακέτο CST STUDIO SUITE περιλαμβάνει τις εξής ενότητες:

- **CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS):** αποτελεί τη σημαντικότερη ενότητα του λογισμικού προσφέροντας γρήγορη και αποδοτική σχεδίαση και ανάλυση διατάξεων όπως κεραίες, φίλτρα, τυποποιημένα κυκλώματα κ.ά. Θα παρουσιαστεί εκτενώς παρακάτω.
- **CST EM STUDIO (CST EMS):** είναι ένα εργαλείο για το σχεδιασμό και την ανάλυση εφαρμογών χαμηλών συχνοτήτων όπως κινητήρες, αισθητήρες και μετασχηματιστές.
- **CST PARTICLE STUDIO (CST PS):** έχει αναπτυχθεί για την προσομοίωση των ελεύθερα μετακινούμενων, φορτισμένων σωματιδίων. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν εκτοξευτές ηλεκτρονίων και καθοδικές λυχνίες.
- **CST CABLE STUDIO (CST CS):** πραγματοποιεί την τρισδιάστατη ανάλυση της ακεραιότητας σήματος (SI), των διαταραχών αγωγιμότητας και της ηλεκτρομαγνητικής ευαισθησίας (EMS) πολύπλοκων δομών καλωδίων σε μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα.
- **CST PCB STUDIO (CST PCBS):** είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο για την ανάλυση της ακεραιότητας ισχύος (PI), της ακεραιότητας του σήματος, της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (PCB).
- **CST MPHYSICS (CST MPS):** χρησιμοποιείται για την ανάλυση της θερμικής και μηχανικής αντοχής. Με την ταυτόχρονη προσομοίωση του MPS με το MWS ή το EM είναι δυνατή η μελέτη της ροής θερμότητας σε μία συσκευή και η παρακολούθηση της θερμοκρασίας σε ευαίσθητα σημεία.
- **CST DESIGN STUDIO (CST DS):** είναι ένα εργαλείο σχεδιασμού που επιταχύνει την ανάλυση, τη σύνθεση και την βελτιστοποίηση πολύπλοκων δομών και ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων [17].

3.2 Περιγραφή του CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS)

Όπως αναφέρθηκε, το CST MWS είναι ένα πλήρως εξοπλισμένο πακέτο λογισμικού για την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση και το σχεδιασμό διατάξεων υψηλών συχνοτήτων.

3.2.1 Διαθέσιμες τεχνικές προσομοίωσης

Δεδομένου πως καμία μέθοδος δεν λειτουργεί εξίσου ικανοποιητικά για όλες τις εφαρμογές, το λογισμικό διαθέτει πολλές διαφορετικές τεχνικές προσομοίωσης (Time Domain, Frequency Domain, Eigenmode, Integral Equation, Multilayer, Asymptotic, Thermal Stationary, Thermal Transient, Structural Mechanical), καθεμία από τις οποίες είναι κατάλληλη για συγκεκριμένα προβλήματα.

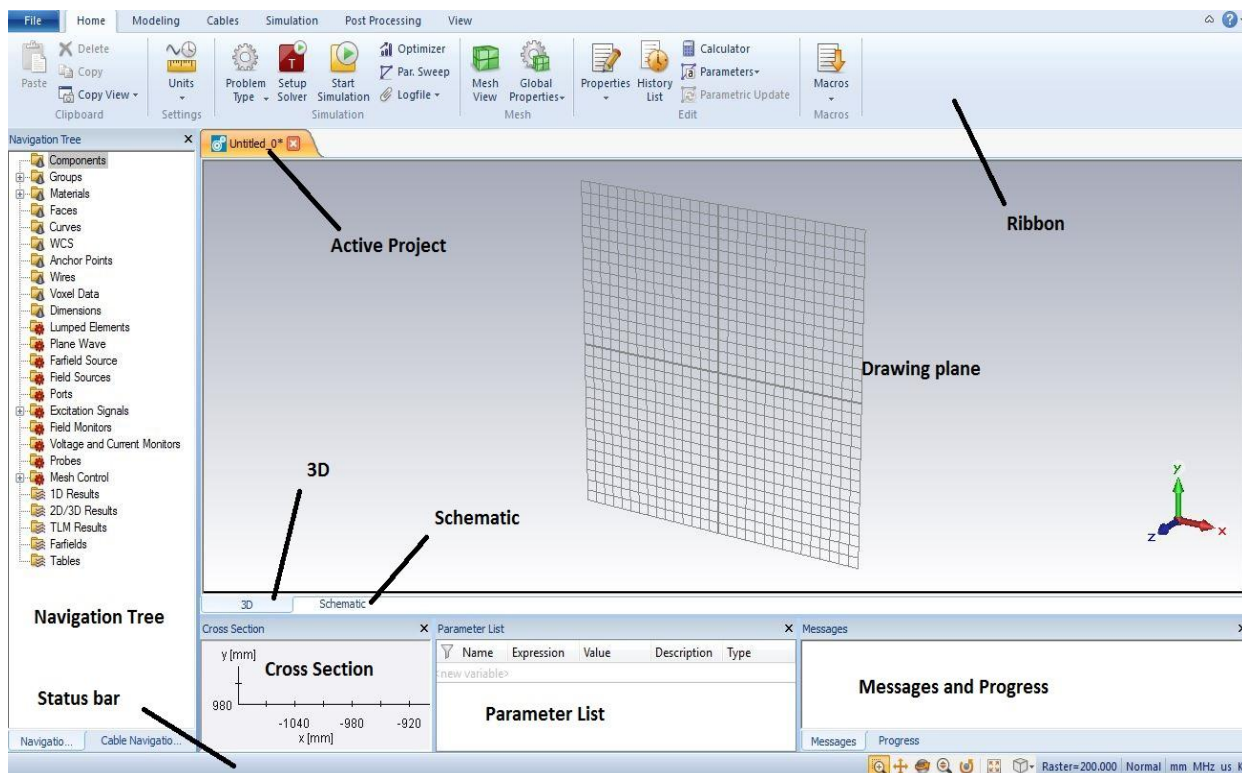
Το πιο ευέλικτο εργαλείο είναι ο Transient solver, ο οποίος με τη βοήθεια ενός ευρείας ζώνης σήματος διέγερσης, μπορεί να αναλύσει τη συμπεριφορά της υπό προσομοίωσης διάταξης σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, με ένα μόνο τρέξιμο. Η συγκεκριμένη τεχνική προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα αποδοτική για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων όπως γραμμές μεταφοράς, φίλτρα και κεραίες.

Ο Frequency Solver, όπως και ο Transient Solver, υπολογίζει τις S παραμέτρους. Λόγω του γεγονότος ότι για κάθε δείγμα συχνότητας απαιτείται η σύσταση και η επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων, η σχέση μεταξύ του χρόνου υπολογισμού και του εύρους της συχνότητας είναι γραμμική, εκτός αν εφαρμοστούν ειδικές μέθοδοι για την επιτάχυνση της επίλυσης των ακόλουθων συχνοτήτων. Ως εκ τούτου ο Frequency Solver είναι συνήθως ταχύτερος, όταν πρέπει να υπολογιστεί μόνο ένας μικρός αριθμός δειγμάτων συχνότητας. Ιδιαίτερα για προβλήματα χαμηλών συχνοτήτων με περιορισμένο αριθμό κελιών πλέγματος (mesh cells), ο Frequency solver αποτελεί μία εναλλακτική μέθοδο του Transient solver. Ωστόσο, για διατάξεις που μοντελοποιούνται με μεγάλο αριθμό κελιών, ο Transient solver είναι η κατάλληλη μέθοδος [17].

3.2.2 Περιγραφή του γραφικού περιβάλλοντος και της διαδικασίας προσομοίωσης

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του CST STUDIO είναι το φιλικό interface και το ισχυρό feedback που διευκολύνει τη μελέτη και την ανάλυση των διατάξεων. Για τη μελέτη της κεραυνοπληξίας πλοίου, χρησιμοποιήσαμε τον Transient solver λόγω του μεγάλου εύρους των συχνοτήτων που εξετάζουμε. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα σημαντικότερα βήματα για τη δημιουργία ενός project και τη συμπλήρωση των πεδίων που είναι απαραίτητα για την ανάλυσή του. Θα επικεντρωθούμε στην Transient ανάλυση, η οποία θα απασχολήσει την εργασία. Με το άνοιγμα του προγράμματος, επιλέγουμε τη δημιουργία νέου project και την περιοχή εφαρμογής ή την ενότητα στην επιθυμούμε να εργαστούμε (πχ MWS, EMS, CS κτλ). Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγουμε το CST CABLE STUDIO επειδή θέλουμε να καταγράψουμε τις επαγόμενες τάσεις και ρεύματα που αναπτύσσονται σε καλώδια τα οποία βρίσκονται σε πλοία, όταν αυτά πλήττονται από κεραυνό. Το CST STUDIO διαθέτει το workflow *Lightning* στο πεδίο εφαρμογής *EMC/EMI* και *Conducted Susceptibility*. Ωστόσο, τρέχοντας τις προσομοιώσεις στο συγκεκριμένο workflow, εντοπίστηκε πρόβλημα στην καταγραφόμενη ενέργεια του συστήματος (αυξανόταν συνεχώς). Αυτό, ίσως, οφείλεται στο γεγονός πως η υπό μελέτη διάταξη είναι αρκετά μεγάλη (το μήκος της ξεπερνά τα 800m). Αντίθετα, το workflow *Radar Cross Section* του *MW & RF & OPTICAL*, παρουσίασε λογικά

αποτελέσματα, αλλά δεν προτιμήθηκε λόγω προβλημάτων στην εισαγωγή των καλωδίων. Έτσι επιλέχθηκε το περιβάλλον του CST CABLE. Επιλέγοντάς το εμφανίζεται ένα παράθυρο, τα βασικότερα στοιχεία του οποίου σημειώνονται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 3.1: Βασικό παράθυρο CST CABLE STUDIO

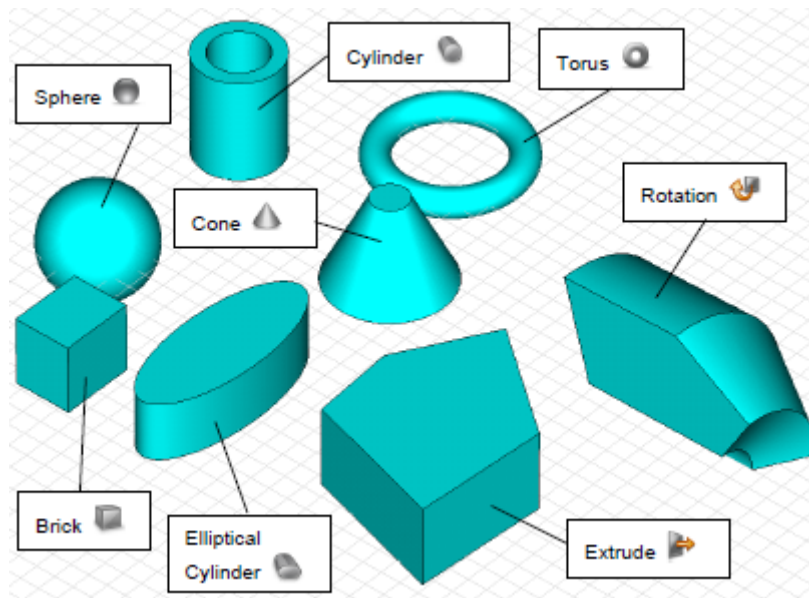
Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται τα σημαντικότερα στοιχεία του παραθύρου CST Cable Studio:

- Το *Ribbon* είναι η κεντρική γραμμή εντολών που οργανώνει τα χαρακτηριστικά του προγράμματος σε μία σειρά από καρτέλες. Τα *Home*, *Modeling*, *Cable*, *Simulation*, *Post Processing* και *View* είναι οι βασικές καρτέλες, κάθε μια από τις οποίες περιέχει ένα σύνολο από ομαδοποιημένες εντολές.
- Το *Drawing plane* είναι το επίπεδο στο οποίο σχεδιάζεται η τρισδιάστατη διάταξη.
- Το παράθυρο με το *Parameter List* εμφανίζει τις καθορισμένες παραμέτρους με τις τρέχουσες τιμές τους. Η ύπαρξη παραμέτρων επιτρέπει τη γρήγορη μεταβολή των τιμών των μεταβλητών του προβλήματος.
- Μέσω του *Navigation Tree* μπορούμε να προσπελάσουμε δομικά στοιχεία και αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Το *Navigation Cable tree* επιτρέπει τον ορισμό βασικών στοιχείων των καλωδίων.
- Το *Status bar* παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τις τρέχουσες ρυθμίσεις του project.
- Το παράθυρο *Messages and Progress* δίνει πληροφορίες σχετικά με το τρέξιμο των προσομοιώσεων.

- Μέσω του *Cross Section* μπορούμε να παρατηρήσουμε τη διατομή και τα δομικά στοιχεία των καλωδίων.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της γλώσσας VBA, για την αυτοματοποίηση των κοινών εργασιών. Παρακάτω παρατίθενται τα βασικότερα βήματα για το σχεδιασμό και μελέτη μιας διάταξης.

- Ορισμός μονάδων
Επιλέγονται οι μονάδες για τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται, δηλαδή του χρόνου, του μήκους, της συχνότητας και της θερμοκρασίας.
- Ορισμός υλικού ως background
Μπορούμε να ορίσουμε το υλικό που θα περιβάλλει τη διάταξη που προσομοιώνεται.
- Ορισμός υλικού
Μπορούμε να επιλέξουμε το υλικό των αντικειμένων από μια βιβλιοθήκη υλικών (*Material Library*), να τροποποιήσουμε συγκεκριμένες ιδιότητες ή να ορίσουμε ένα υλικό με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.
- Κατασκευή της διάταξης
Παρακάτω (Σχήμα 3.2) φαίνονται τα βασικά σχήματα που μπορούν να παραχθούν.



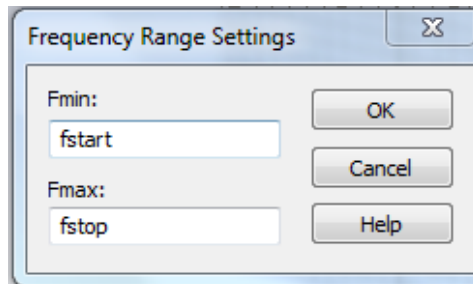
Σχήμα 3.2: Βασικά σχήματα για το σχεδιασμό αντικειμένων

Επίσης, υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος εντολών που επιτρέπουν την επεξεργασία των αντικειμένων: γεωμετρικοί μετασχηματισμοί, συνδυασμός σχημάτων με λογικές πράξεις, επιλογή σημείων, εργασία σε τοπικές ή γενικές (global) συντεταγμένες, ορισμός υλικών με συγκεκριμένες ηλεκτρικές ιδιότητες και εισαγωγή αγωγίων

συρμάτων αποτελούν κάποιες από τις λειτουργίες που διευκολύνουν τη δημιουργία του μοντέλου.

- Ορισμός εύρους συχνοτήτων

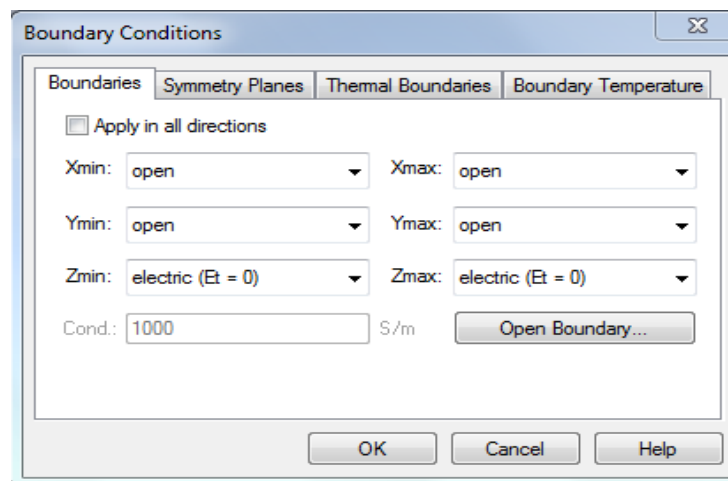
Ορίζεται η μέγιστη και ελάχιστη συχνότητα του εύρους στο οποίο θα γίνει προσομοίωση. Στα συγκεκριμένα πεδία μπορούν τα τοποθετηθούν είτε τιμές, είτε παράμετροι.



Σχήμα 3.3: Εύρος συχνοτήτων

- Ορισμός οριακών συνθηκών και επιπέδων συμμετρίας

Εδώ μπορούμε να ορίσουμε τις οριακές συνθήκες της περιοχής που εξετάζουμε [17].



Σχήμα 3.4: Οριακές συνθήκες

Στις χωρικές υπολογιστικές μεθόδους, όπου ο υπολογισμός των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων εκτελείται σε όλο τον υπολογιστικό χώρο και ο τελευταίος δεν μπορεί να εκτείνεται έως το άπειρο, χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες που οριοθετούν κατάλληλα το χώρο. Έτσι, οι προσομοιώσεις μπορούν να εκτελεστούν σε ρεαλιστικό χρόνο. Οι διαθέσιμες οριακές συνθήκες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες:

- Κλειστές οριακές συνθήκες

α) Ηλεκτρικές και μαγνητικές οριακές συνθήκες: Οι κλειστές ηλεκτρικές συνθήκες αναπαριστούν ένα τείχος από Perfect Electric Conductor (PEC), στο οποίο το

εφαπτόμενο πεδίο είναι μηδενικό και το προσπίπτον κύμα ανακλάται πλήρως, χωρίς να επιτρέπεται η διάδοση του κύματος διαμέσου του τείχους. Οι κλειστές μαγνητικές συνθήκες συμπεριφέρονται ανάλογα με τις ηλεκτρικές. Αν και ένας Perfect Magnetic Conductor (PMC) είναι υποθετικός, πολλά μέταλλα μπορούν να αναπαρασταθούν πολύ καλά από ένα PEC. Οι ηλεκτρικές οριακές συνθήκες έχουν φυσική σημασία στην περίπτωση που υπάρχουν μεταλλικά τοιχώματα στο πείραμα. Όταν η πεπερασμένη αγωγιμότητα ενός μετάλλου πρέπει να ληφθεί υπόψη, μπορεί να επιλεγεί ένα αγώγιμο τείχος (*Conducting Wall*). Το πλεονέκτημα των κλειστών οριακών συνθηκών είναι πως έχουν χαμηλές απαιτήσεις μνήμης, ενώ το βασικό μειονέκτημα είναι πως οι συνεχείς ανακλάσεις των κυμάτων μπορεί να προκαλέσουν παγίδευση της ενέργειας.

β) Αγώγιμος τείχος (Conducting wall)

- Ανοικτές οριακές συνθήκες

Ανοικτές και Ανοικτές με προσθήκη χώρου: Ο σκοπός των ανοικτών οριακών συνθηκών είναι να μιμηθούν την απουσία ενός ορίου. Το CST STUDIO παρέχει δύο τρόπους υλοποίησης των ανοικτών οριακών συνθηκών: τον SIBC ("Surface Impedance Boundary Condition"), ο οποίος χρησιμοποιείται στον frequency solver και το πλήρες απορροφητικό στρώμα PML ("Perfectly Matched Layer") το οποίο χρησιμοποιείται και στον transient solver. Το PML είναι ένα κατασκευασμένο υλικό που θεωρητικά δημιουργεί μηδενικές ανακλάσεις ανεξάρτητα από τη συχνότητα και την πόλωση του κύματος του πεδίου. Η υλοποίηση μέσω PML είναι πιο ακριβής από την υλοποίηση μέσω SIBC, αλλά οι απαιτήσεις μνήμης είναι σημαντικά υψηλότερες. Χρησιμοποιώντας την επιλογή *Open (add space)*, προστίθεται επιπλέον χώρος. Ο χώρος αυτός προσδιορίζεται στο 1/8 του μήκους κύματος που προκύπτει από τη μέση συχνότητα. Τα αντικείμενα που εφάπτονται των ορίων θεωρούνται ότι επεκτείνονται στο άπειρο.

- Περιοδικές οριακές συνθήκες

α) Περιοδικές οριακές συνθήκες

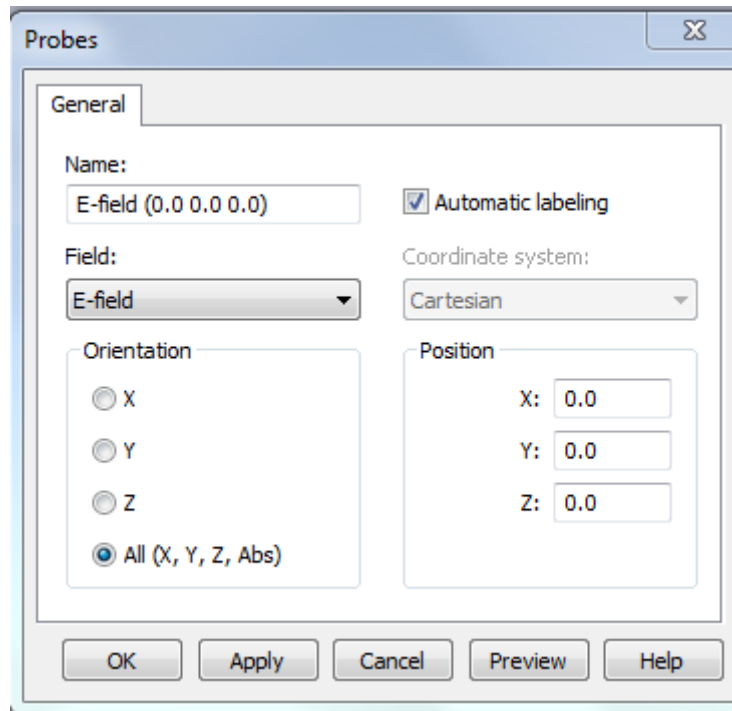
β) Στοιχειώδη δομική μονάδα (Unit cell)

γ) Ως ειδική περίπτωση: Ηλεκτρικές και μαγνητικές οριακές συνθήκες [20].

• Ορισμός θυρών (Port)

Υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής είτε διακριτής θύρας είτε θύρας κυματοδηγού. Για την προσομοίωση της κεραυνοπληξίας θα χρησιμοποιήσουμε μία διακριτή θύρα ρεύματος (μέσω της οποίας θα γίνεται η έγχυση του κεραυνικού ρεύματος) τοποθετημένη σε ένα αγώγιμο σύρμα, το οποίο προσομοιώνει το κεραυνικό κανάλι.

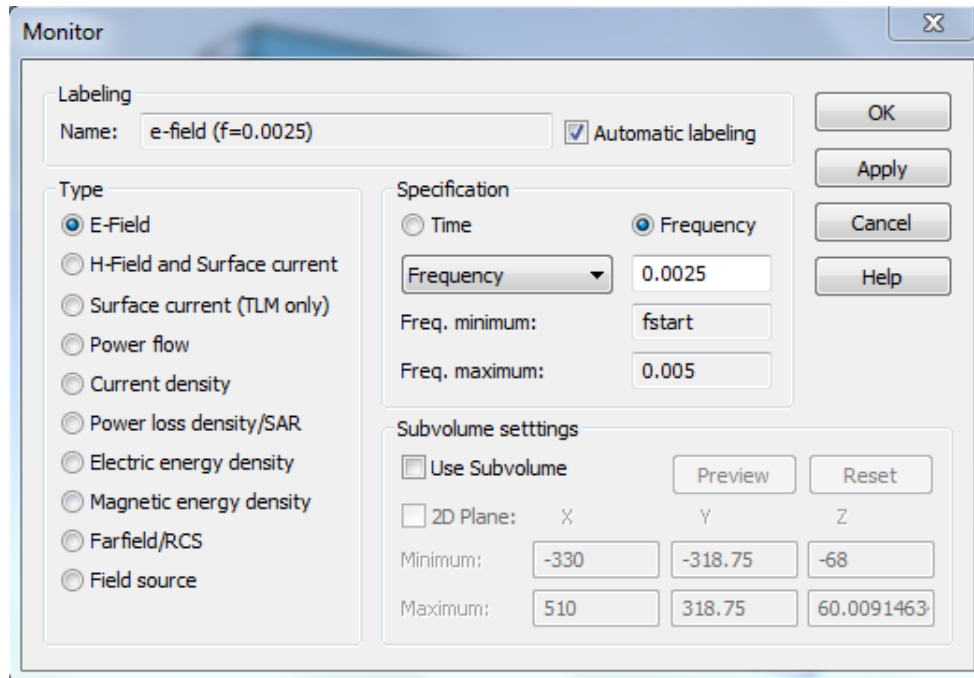
- Ορισμός Σημάτων Διέγερσης (*Excitation Signals*)
Το σήμα διέγερσης μπορεί να επιλεγεί μεταξύ προκαθορισμένων επιλογών (κατανομή Gauss, διπλοεκθετική κ.ά) ή να οριστεί από το χρήστη μέσω VBA ή πίνακα ASCII.
- Ορισμός Probe
Μέσω των Probes, τα οποία τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις στο μοντέλο μπορούμε να καταγράψουμε το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής.



Σχήμα 3.5: Ορισμός Probe Ηλεκτρικού πεδίου

- Ορισμός Καταγραφέων τάσης και ρεύματος (*Voltage and Current Monitors*)
Οι καταγραφείς τάσης και ρεύματος ορίζονται σε κλειστές και ανοιχτές καμπύλες αντίστοιχα. Ο καλύτερος τρόπος για να καταγραφεί η τάση μεταξύ δύο σημείων είναι να οριστεί μια καμπύλη που συνδέει τα σημεία κατά το ελάχιστο μήκος. Στη συνέχεια μπορούμε να ορίσουμε ένα voltage monitor σε αυτό το ευθύγραμμο τμήμα. Επειδή το ηλεκτρικό πεδίο ολοκληρώνεται κατά μήκος αυτού του ευθύγραμμου τμήματος, είναι καλύτερα αυτό να μην είναι λοξό σε σχέση με το πλέγμα (που προκύπτει από τη διακριτοποίηση του μοντέλου) ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του σφάλματος κλιμάκωσης (staircasing).
- Ορισμός Field Monitor
Σε αντίθεση με τις S-παραμέτρους, οι οποίες υπολογίζονται για όλες τις συχνότητες που ανήκουν στο εύρος που εξετάζουμε, το πεδίο που αναπτύσσεται μέσα και γύρω από την διάταξη δεν είναι δυνατόν να υπολογισθεί και να αποθηκευτεί για όλες τις τιμές της συχνότητας, εξαιτίας των τρομακτικών

απαιτήσεων σε υπολογιστική μνήμη. Για αυτό το λόγο, ορίζονται τα Field Monitors σε συγκεκριμένες συχνότητες που μας ενδιαφέρουν. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, υπάρχουν αρκετά μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν, όπως το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, η πυκνότητα ρεύματος και η ροή ισχύος.



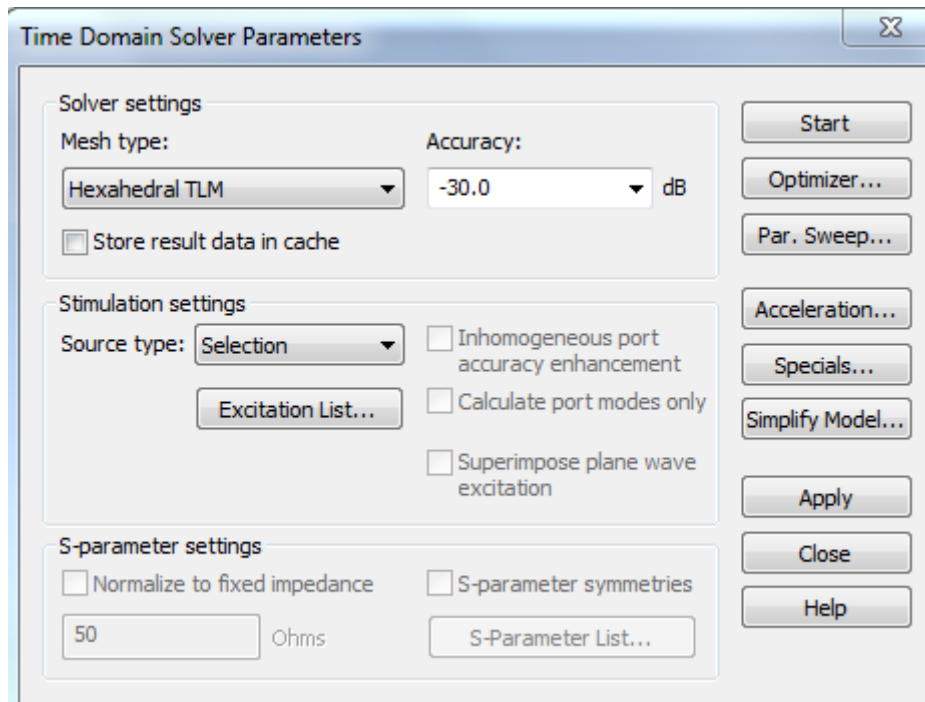
Σχήμα 3.6: Ορισμός Field Monitor

- Έναρξη προσομοίωσης

Αφού έχουν οριστεί τα παραπάνω στοιχεία, μπορούμε να επιλέξουμε τον επιλύτη που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε (στη συγκεκριμένη περίπτωση τον TLM) και να καθορίσουμε την επιθυμητή ακρίβεια των υπολογισμών, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ακρίβεια αυτή εκφράζεται σε dB. Παρέχεται η δυνατότητα της παραμετροποίησης και βελτιστοποίησης, κατά την οποία οι τιμές κάποιων παραμέτρων (π.χ διαστάσεις, θέσεις και ιδιότητες) μπορούν να μεταβάλλονται, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ή να μεγιστοποιηθεί ένα δεδομένο αποτέλεσμα (Επιλογή *Optimizer*).

- Ορισμός καλωδίων

Το CST CABLE STUDIO είναι ένα εξειδικευμένο εργαλείο για τη μελέτη της μετάδοσης σημάτων, της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI) και της ηλεκτρομαγνητικής ευαισθησίας (EMS) σε πολύπλοκες δομές καλωδίων. Το λογισμικό παρέχει ένα πλήθος καλωδίων (απλό καλώδιο, ομοαξονικό, θωρακισμένο καλώδιο, συνεστραμένου ζεύγους), αλλά ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να σχεδιάσει το καλώδιο που επιθυμεί. Η τοποθέτηση του καλωδίου στη 3D διάταξη γίνεται μέσω των κόμβων (αρχικών ή τελικών). Ο χρήστης επιλέγει ποιος θα είναι ο τερματικός κόμβος, ενώ καθορίζεται και το φορτίο ή αντίσταση τερματισμού.



Σχήμα 3.7: Παράθυρο έναρξης προσομοίωσης

Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα συν-προσομοίωσης του κυκλώματος των καλωδίων (όπως σχεδιάζεται στο CST CS) με το 3D domain (όπως σχεδιάστηκε στο CST MWS). Η συν-προσομοίωση μπορεί να είναι είτε μιας κατεύθυνσης είτε διπλής κατεύθυνσης.

- Συν-προσομοίωση μιας κατεύθυνσης (uni-directional co-simulation): Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο των καλωδίων μπορεί να λειτουργήσει είτε ως πηγή πεδίου (radiation) όπου όλα τα ρεύματα των καλωδίων προστίθενται και επηρεάζουν το 3D μοντέλο. Ωστόσο, το μοντέλο των καλωδίων μπορεί να δράσει και ως δέκτης πεδίου (irradiation), όπου το ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος των καλωδίων λαμβάνεται από το 3D και επηρεάζει ως πηγή τάσης κάθε αθωράκιστο καλώδιο του μοντέλου των καλωδίων. Η συν-προσομοίωση μιας κατεύθυνσης είναι διαθέσιμη και στο πεδίο της συχνότητας και στο πεδίο του χρόνου.
- Αμφίδρομη συν-προσομοίωση (bi-directional co-simulation): Σε αυτή την περίπτωση, η άθροιση του ρεύματος και ο υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται όπως στη συν-προσομοίωση μιας κατεύθυνσης. Αλλά σε αντίθεση με τη περίπτωση μιας κατεύθυνσης, τα ρεύματα και οι τάσεις ανταλλάσσονται ταυτόχρονα. Το μοντέλο των καλωδίων λειτουργεί συγχρόνως ως πηγή αλλά και ως δέκτης πεδίου. Αν αναμένεται ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των καλωδίων και του 3D περιβάλλοντος τότε η αμφίδρομη συν-προσομοίωση είναι πιο ακριβής από τη προσομοίωση μιας κατεύθυνσης. Η αμφίδρομη συν-προσομοίωση είναι διαθέσιμη μόνο για προβλήματα στο πεδίο του χρόνου.

Στη συγκεκριμένη εργασία, η συν-προσομοίωση θα γίνει στο πεδίο του χρόνου. Η επικοινωνία μεταξύ του κυκλώματος των καλωδίων και του 3D

περιβάλλοντος γίνεται σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης (time step). Η διαφορά μεταξύ του radiation και του irradiation είναι στον τρόπο μεταφοράς των δεδομένων: στη περίπτωση της ανάλυσης radiation, το ρεύμα κοινού σήματος (common mode current) του κυκλώματος των καλωδίων μεταφέρεται στο 3D. Αντίθετα, στη περίπτωση της ανάλυσης irradiation μεταφέρονται μόνο οι τάσεις κατά μήκος των καλωδίων από το 3D περιβάλλον στο κύκλωμα των καλωδίων. Στην αμφίδρομη συν-προσομοίωση η ανταλλαγή των παραπάνω δεδομένων γίνεται ταυτόχρονα σε κάθε time step. Για την ανάλυση του προβλήματος της κεραυνοπληξίας και των επιπτώσεών του στα καλώδια, θα χρησιμοποιηθεί η αμφίδρομη συν-προσομοίωση, αφού θα μας προσφέρει πληρέστερα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ένα καλώδιο, τμήμα του οποίου είναι εκτεθειμένο πάνω στο κατάστρωμα, εισέρχεται στο θάλαμο ελέγχου ή σε ένα χώρο με μεταλλικό περίβλημα. Η αμφίδρομη συν-προσομοίωση επιτρέπει τη μελέτη των επιπτώσεων της κεραυνοπληξίας στο καλώδιο (irradiation), αλλά και την επίδραση του καλωδίου στο θωρακισμένο θάλαμο (radiation) [17].

3.3 Μέθοδος επίλυσης προβλήματος

Για να υπολογιστούν το ηλεκτρικό πεδίο και η ρευματική κατανομή στο πλοίο και στην επιφάνεια της θάλασσας λόγω του κεραυνικού πλήγματος, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν αριθμητικές μέθοδοι για τη διακριτοποίηση του χώρου. Μία από τις δημοφιλέστερες μεθόδους επίλυσης προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (Finite-Differential Time-Domain Method: FDTD) που παρουσιάστηκε από τον Yee το 1966. Η μέθοδος αυτή θεωρείται επιτυχημένη, αφού δεν απαιτεί την επίλυση συστημάτων εξισώσεων και επομένως, με μια απλή προσομοίωση, προκύπτουν αποτελέσματα για την απόκριση ενός συστήματος σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Έτσι, μειώνονται σημαντικά η υπολογιστική ισχύς και η διάρκεια της επίλυσης σε σχέση με άλλες μεθόδους πεπερασμένων διαφορών. Η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς εξαρτάται από την πολυπλοκότητα των δομών και από το μέγεθος του χώρου προσομοίωσης, το οποίο πολλές φορές μπορεί να είναι ιδιαίτερα μεγάλο (όπως συμβαίνει και στη διάταξη που μελετάμε, όπου το μήκος της θάλασσας ξεπερνά το 1km σε ορισμένες περιπτώσεις). Ακόμα, όπως και στις υπόλοιπες μεθόδους πεπερασμένων διαφορών η προσέγγιση των καμπύλων επιφανειών είναι προβληματική (ωστόσο, το CST STUDIO παρέχει δυνατότητες αντιμετώπισης αυτού του προβλήματος, μέσω του PBA).

Η μέθοδος FDTD βασίζεται στην απευθείας επίλυση των χρονικά εξαρτώμενων διαφορικών εξισώσεων του Maxwell, με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών και τη χωροχρονική διακριτοποίηση των πεδιακών εντάσεων E και H . Κατά την εφαρμογή της μεθόδου λαμβάνονται υπόψη μόνο οι γειτονικές επιδράσεις των πεδιακών εντάσεων, καθώς η διαδικασία εξελίσσεται σε διακριτά χρονικά βήματα σε όλα τα σημεία του υπολογιστικού χώρου.

Η επίλυση του προβλήματος στο CST CS μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους : τον FIT και τον TLM. Η μέθοδος πεπερασμένης ολοκλήρωσης (Finite Integration

Technique : FIT) αποτελεί παραλλαγή της FDTD, αφού χρησιμοποιεί την ολοκληρωτική μορφή των εξισώσεων Maxwell, όπως φαίνονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} &= - \int_A \frac{\partial B}{\partial t} \cdot d\vec{A} \ , & \oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} &= \int_A \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{A} \ , \\ \oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} &= \int_V \rho \, dV \ , & \oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} &= 0 \ . \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

Προκειμένου να επιλυθούν οι παραπάνω εξισώσεις, ορίζεται ένας πεπερασμένος χώρος, ο οποίος περιλαμβάνει τη διάταξη και στον οποίο θα γίνουν οι υπολογισμοί. Με τη δημιουργία ενός κατάλληλου συστήματος πλέγματος, ο χώρος αυτός διαιρείται σε μικρότερα τμήματα, τα οποία ονομάζονται "κελιά πλέγματος" (mesh cells).

Αυξάνοντας τον αριθμό των κελιών, αυξάνεται και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, αυξάνεται ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης και οι αντίστοιχες απαιτήσεις μνήμης. Για τις προσομοιώσεις στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιείται τετραεδρικό πλέγμα. Αντίθετα, για τις προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιείται εξαεδρικό πλέγμα, δηλαδή κάθε κελί έχει σχήμα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο. Το εξαεδρικό πλέγμα παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία για την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας για δεδομένο χρόνο εκτέλεσης της προσομοίωσης. Έχει λιγότερες απαιτήσεις μνήμης και η ταχύτητα εκτέλεσης της προσομοίωσης αυξάνεται ανάλογα με τον αριθμό των κελιών (ιδιότητα, η οποία είναι επιθυμητή στις υπολογιστικές μεθόδους). Ωστόσο, το τετραεδρικό πλέγμα προσεγγίζει καλύτερα τις καμπύλες επιφάνειες σε σχέση με το εξαεδρικό πλέγμα αποφεύγοντας το Σφάλμα Κλιμάκωσης (Staircase Error).

Στο πεδίο του χρόνου, η προσομοίωση ξεκινά με τη διέγερση του υπολογιστικού χώρου που περιλαμβάνει την υπό μελέτη διάταξη. Συνήθως, η διέγερση εφαρμόζεται μέσω μιας διακριτής θύρας (τάσης, ρεύματος), ένα κυματοδηγό ή ένα επίπεδο κύμα. Μετά την εφαρμογή της διέγερσης, το σήμα διέγερσης διαδίδεται στον υπολογιστικό χώρο και καθώς προχωράει, η ενέργεια που περιέχει μειώνεται λόγω διάφορων μηχανισμών απωλειών (ακτινοβολία, απορρόφηση ενέργειας από θύρες). Η προσομοίωση θα σταματήσει, όταν η ενέργεια έχει μειωθεί στο επίπεδο που έχει επιλέξει ο χρήστης. Η ταχύτητα με την οποία η ενέργεια μειώνεται οφείλεται σε διάφορους μηχανισμούς, οι περισσότεροι από τους οποίους βασίζονται στο ίδιο το μοντέλο (π.χ. μέγεθος των απωλειών). Ωστόσο, είναι αλήθεια πως όσο πιο γρήγορο είναι το σήμα διέγερσης, τόσο πιο γρήγορα διαδίδεται σε όλο το χώρο και αλληλεπιδρά με τα άλλα στοιχεία και τόσο πιο γρήγορα θα τερματιστεί η προσομοίωση. Η ταχύτητα με την οποία το σήμα διαδίδεται στον υπολογιστικό χώρο ονομάζεται χρονικό βήμα (time step). Όπως είναι προφανές, ένα μεγάλο χρονικό βήμα είναι ιδιαίτερα επιθυμητό. Εντούτοις, δεν μπορεί να αυξηθεί αυθαίρετα, αφού πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη ευστάθειας του Courant :

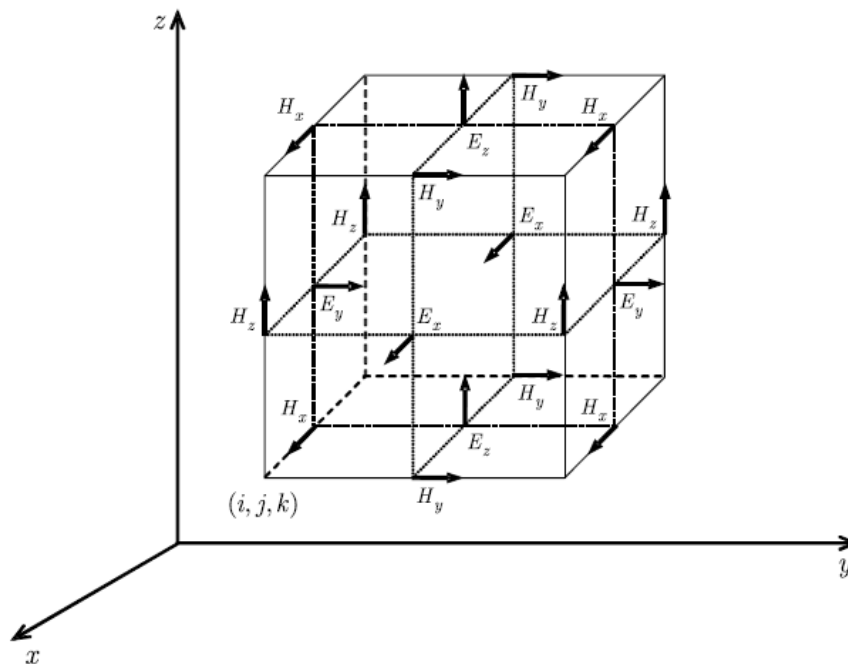
$$\Delta t_{max} \leq \frac{1}{u_{max}} \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right]^{-1/2} \quad (3.3.2)$$

όπου u_{\max} η ταχύτητα του φωτός στο μέσο που γίνεται η προσομοίωση (η οποία καθορίζεται από τις ιδιότητες των υλικών). Θεωρώντας πως τα κελιά είναι κύβου (δηλαδή $\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z$):

$$\Delta t_{\max} \leq \Delta l / (\sqrt{3} * u_{\max}) \quad (3.3.3)$$

Συνεπώς, όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κελιών τόσο μικρότερο πρέπει να είναι και το χρονικό βήμα [17].

Τα διανύσματα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χωρίζονται στις συνιστώσες τους και η επίλυση του συστήματος προσεγγίζεται με ένα σύστημα εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Κάθε συνιστώσα ενός πεδιακού διανύσματος, είτε πρόκειται για το ηλεκτρικό είτε για το μαγνητικό πεδίο, τοποθετείται σε τέτοια θέση, ώστε να περικλείεται από τέσσερις συνιστώσες του άλλου πεδιακού διανύσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8, ενώ η τοποθέτησή τους στο χρόνο γίνεται εναλλάξ. Κατά σύμβαση το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται τις χρονικές στιγμές $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$, κλπ ενώ το μαγνητικό στις $0.5\Delta t, 1.5\Delta t, 2.5\Delta t, \dots$, κλπ. Ο χώρος του προβλήματος χωρίζεται σε κελιά με διαστάσεις $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ με τις ηλεκτρικές πεδιακές συνιστώσες να βρίσκονται στο κέντρο των εδρών του κελιού, ενώ οι μαγνητικές στο κέντρο των ακμών του κελιού. Μετά από πράξεις προκύπτει πως η κάθε συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο σε μια χρονική στιγμή $(n+1)\Delta t$ εξαρτάται από τη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου στην ίδια θέση την προηγούμενη χρονική στιγμή $n\Delta t$ και από τις συνιστώσες του μαγνητικού πεδίου στις τέσσερις γειτονικές θέσεις την ενδιάμεση χρονική στιγμή $(n+1/2)\Delta t$, ενώ αντίστοιχα υπολογίζεται και η κάθε συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Με αυτό τον τρόπο δεν είναι αναγκαία η επίλυση κάποιου συστήματος εξισώσεων γεγονός που καθιστά τη μέθοδο πολύ αποτελεσματική [23].

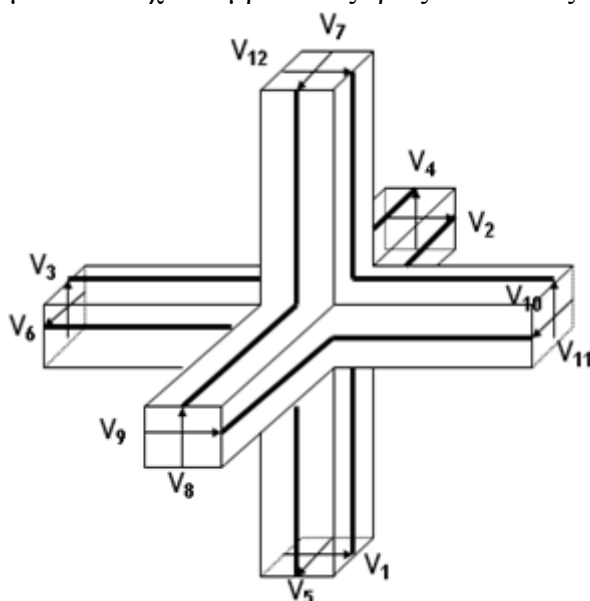


Σχήμα 3.8: Απεικόνιση διανυσμάτων E και H στο κελί [23].

3.4 Επιλύτης TLM

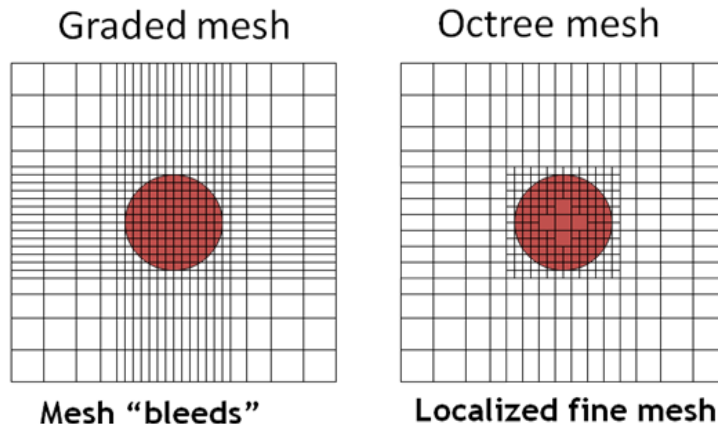
Ο επιλύτης TLM του CST MWS βασίζεται στη 3D μέθοδο των γραμμών μεταφοράς (Transmission Line Method: TLM) στο πεδίο του χρόνου. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε πριν 40 χρόνια και αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τη μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) και παρεμβολή (EMI).

Ο TLM παρέχει τη δυνατότητα της απευθείας επίλυσης στο χώρο και στο χρόνο των διαφορικών εξισώσεων του Maxwell. Ο επιλύτης χρησιμοποιεί ένα δίκτυο από γραμμές μεταφοράς ή κόμβους (nodes), για να προσομοιώσουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο τοπικά σε κάθε εξαεδρικό κελί του χώρου. Έτσι, ο χώρος διαμορφώνεται από μια συστοιχία κόμβων στις τρεις διαστάσεις.



Σχήμα 3.9: Κόμβος και πλέγμα του TLM [22].

Ο επιλύτης TLM του CST MWS χρησιμοποιεί μια μέθοδο πολλαπλών πλεγμάτων. Αρχικά, το εξαεδρικό πλέγμα εφαρμόζεται, ώστε να συλλάβει τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας της κατασκευής. Έπειτα, τα μικρά κελιά συγχωνεύονται, ενώ ο βαθμός συγχώνευσης αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από τα όρια των αντικειμένων. Συνεπώς, στις περιοχές που δεν παρατηρούνται αλλαγές στη γεωμετρία των αντικειμένων, ο αριθμός των κελιών μειώνεται σημαντικά. Αυτή η διαδικασία αφαιρεί οποιαδήποτε "αιμορραγία" του πλέγματος, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των κελιών και μειώνοντας τις υπολογιστικές απαιτήσεις. Σε πολλές περιπτώσεις ο αριθμός των κελιών μειώνεται κατά ποσοστό μεγαλύτερο του 90%.



Σχήμα 3.10: Η αρχική διακριτοποίηση του χώρου (αριστερά) και το πλέγμα (Octree mesh) όπως προκύπτει από τη συγχώνευση των κελιών (δεξιά) [22].

Ο TLM έχει βελτιωθεί ώστε να περιλαμβάνει την τεχνολογία "συμπαγούς μοντελοποίησης" ("compact modeling"). Σε εφαρμογές EMC/EMI, αντικείμενα με σχετικά μικρές διαστάσεις όπως σχισμές, οπές, θωρακισμένα καλώδια έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην απόδοση του συστήματος. Η συμπαγής μοντελοποίηση επιτρέπει την προσομοίωση αυτών των κρίσιμων σημείων με ένα ισοδύναμο μοντέλο γραμμών μετάδοσης. Επομένως, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν μικρά κελιά, ώστε να προσεγγιστούν αυτά τα αντικείμενα. Έτσι, μειώνονται οι απαιτήσεις του υπολογιστή κατά πολλές τάξεις μεγέθους [21,22].

Κεφάλαιο 4: Προσομοίωση κερανού σε πλοίο

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθεί η πορεία της προσομοίωσης από την κατασκευή του πλοίου μέχρι την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Αρχικά, θα περιγραφούν η σχεδίαση και τα υλικά του πλοίου. Το πλοίο δημιουργήθηκε εξολοκλήρου στο πρόγραμμα CST STUDIO.

Στη συνέχεια θα διευκρινιστεί ο τρόπος προσομοίωσης του κερανού στο πρόγραμμα, και θα περιγραφούν διάφορα κρίσιμα σημεία του πλοίου.

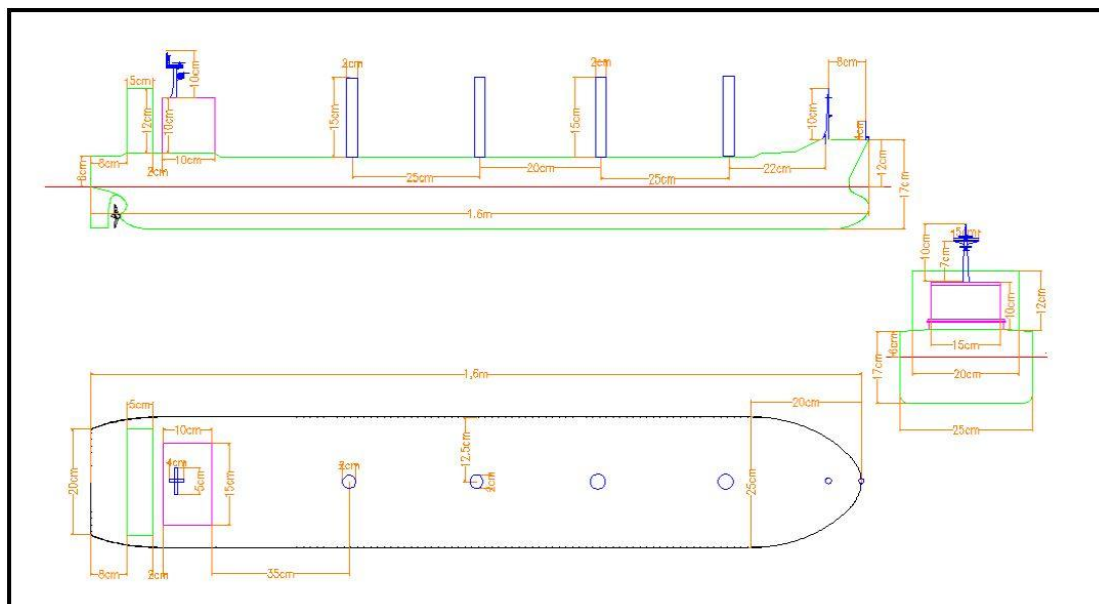
Ακολουθως θα δοθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διάφορα κεραυνικά πλήγματα σε διαφορετικά σημεία του πλοίου και θα μελετηθεί η επίδραση της αγωγιμότητας του νερού στο καταγραφόμενο ηλεκτρικό πεδίο καθώς και σε διάφορα καλώδια που αποτελούν μέρος του ηλεκτρικού πεδίου του πλοίου.

Οι προσομοιώσεις έγιναν στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε υπολογιστή όπου είχε εγκατασταθεί το πρόγραμμα CST STUDIO.

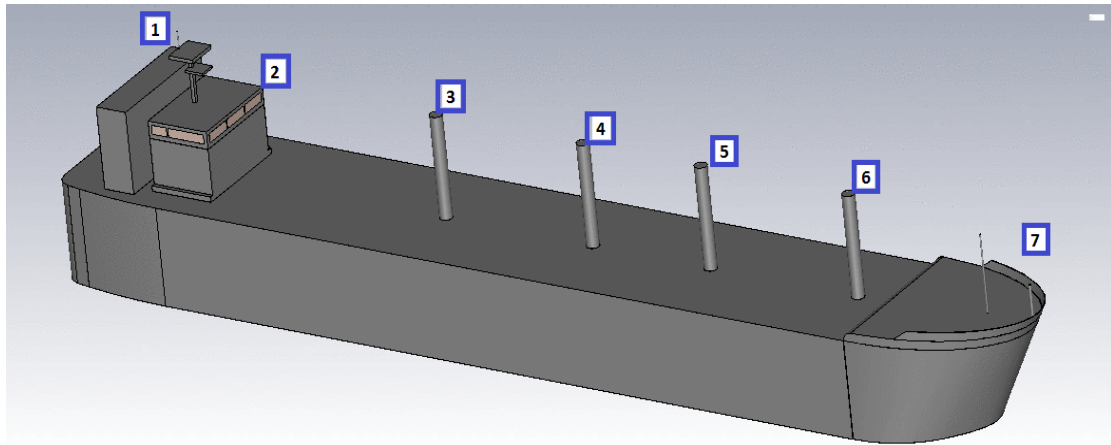
4.2 Προσομοίωση της κατασκευής του πλοίου

Για την παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάστηκαν εξολοκλήρου στο CST STUDIO το πλοίο, η θάλασσα και τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου.

Ο σχεδιασμός του πλοίου έγινε με βάση το υπό κλίμακα μοντέλο όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η κλίμακα που χρησιμοποιήθηκε είναι 1:120.

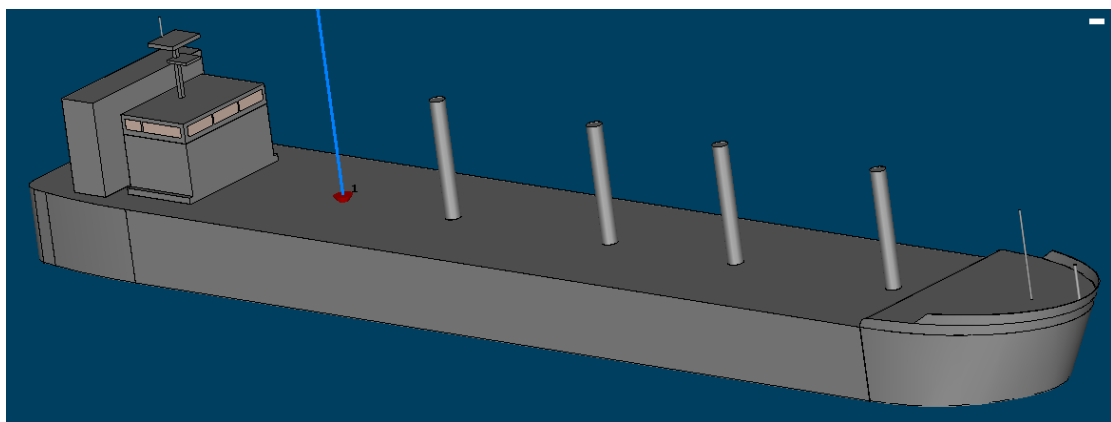


Σχήμα 4.1: 2D - Σχέδιο μοντέλου πλοίου υπό κλίμακα, σχεδιασμένο στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD με τις ακριβείς διαστάσεις του [10].



Σχήμα 4.2: Το μοντέλο όπως είναι σχεδιασμένο στο CST STUDIO με αριθμημένες τις κύριες κατασκευές του. (1): Καπνοδόχοι μηχανοστασίου, (2): Χώροι ναυσιπλοΐας και διαμονής του πληρώματος, ενώ στην κορυφή βρίσκεται η κεραία του πλοίου, (3-6): Γερανοί φορτίου, (7): Σύστημα πλοήγησης

Η σχεδίαση του πλοίου δεν είναι απόλυτα ακριβής, αφού έγιναν κάποιες παραδοχές για την απλοποίηση της γεωμετρίας. Χρησιμοποιήθηκαν βασικά σχήματα γιατί περίπλοκες γεωμετρίες δε θα προσέφεραν περισσότερες σημαντικές πληροφορίες, ενώ θα αύξαναν τον αριθμό των απαιτούμενων κελιών για τη μελέτη του προβλήματος, συνεπώς και το χρόνο ολοκλήρωσης της προσομοίωσης. Ωστόσο, ορισμένες περίπλοκες γεωμετρίες (όπως η γέφυρα του πλοίου και οι κεραίες πάνω από αυτόν) διατηρήθηκαν, αφού είναι κρίσιμες για το κεραυνικό φαινόμενο. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται το πλήρες μοντέλο με το πλοίο, τη θάλασσα ενώ διακρίνονται τα παράθυρα της γέφυρας, το κεραυνικό κανάλι και η θύρα με την οποία θα γίνει η έγχυση του κεραυνικού ρεύματος (η προσομοίωση του ρεύματος και της έγχυσής του θα αναλυθούν παρακάτω). Ο σχεδιασμός των αντικειμένων έγινε στο περιβάλλον του CST CABLE STUDIO το οποίο υποστηρίζει την εισαγωγή καλωδίων και τη μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής και ευαισθησίας σε πολύπλοκες δομές καλωδίων.



Σχήμα 4.3: Το πλήρες μοντέλο όπως είναι σχεδιασμένο στο CST STUDIO. Φαίνονται το πλοίο, τμήμα της θάλασσας, τα παράθυρα της γέφυρας, τμήμα του κεραυνικού καναλιού και η θύρα έγχυσης του ρεύματος.

4.3 Εισαγωγή υλικών και καθορισμός των ιδιοτήτων τους

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός των αντικειμένων του μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των υλικών που αποτελούν τα αντικείμενα. Το CST επιτρέπει είτε την επιλογή του υλικού από μια λίστα υλικών της σχετικής βιβλιοθήκης (*Material Library*) είτε την εισαγωγή νέων υλικών, αφού προσδιοριστούν οι ιδιότητές τους (ηλεκτρικές, θερμικές, μαγνητικές και μηχανικές). Τα κυριότερα μεγέθη που πρέπει να προσδιοριστούν είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά (relative permittivity ϵ_r) και η ηλεκτρική αγωγιμότητα (electric conductivity σ [S/m]).

- Για το πλοίο χρησιμοποιήθηκε ο χάλυβας *Steel-1008* με ηλεκτρική αγωγιμότητα 7.69×10^6 S/m. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλοίων έχει αγωγιμότητα της τάξης των 15×10^6 S/m. Για πάχος της λαμαρίνας θεωρήσαμε τα 2cm.
- Για τη θάλασσα δημιουργήθηκε νέο υλικό ("Lossy Metal") με ηλεκτρική αγωγιμότητα 3.53 S/m. Όσον αφορά τις διαστάσεις της θάλασσας, λάβαμε υπόψη πως κάθε σημείο του πλοίου πρέπει να απέχει από τα όρια του υπολογιστικού χώρου (*boundaries*) απόσταση τουλάχιστον $\lambda/8$. Με αυτό το τρόπο αποφεύγεται συσσώρευση του πεδίου στα όρια του υπολογιστικού χώρου. Σε κάθε περίπτωση, το σημείο έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος 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. Παρ' όλα αυτά προτιμήθηκε μια ρεαλιστική τιμή, αφού σε κάθε περίπτωση ο επιλύτης TLM δεν θα επιβαρύνει σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης. Συγκεκριμένα, για το πλήγμα 10/350 το βάθος ορίστηκε στα 70m, ενώ για τα 1/200 και 0.25/100 ορίστηκε βάθος 40m.
- Για τα παράθυρα της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε γυαλί *Glass(Pyrex)(lossy)*, αφού οι ιδιότητες αυτού του υλικού είναι αντιπροσωπευτικές εκείνων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παραθύρων. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά του γυαλιού είναι 4.82 με συντελεστή διηλεκτρικών απωλειών $\tan\delta=0.0054$. Το πάχος του παραθύρου θεωρήθηκε 1cm.
- Για υλικό του background, δηλαδή του υλικού που γεμίζει το bounding box και περιβάλλει το μοντέλο, επιλέχθηκε από τη βιβλιοθήκη ο αέρας (*Air* με $\epsilon_r = 1.00059$).

4.4 Προσέγγιση κεραυνικού πλήγματος στο CST STUDIO

Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε τις επιπτώσεις της κεραυνοπληξίας στην περίπτωση του άμεσου πλήγματος. Συνεπώς, για τη προσομοίωση πρέπει να προσδιορίσουμε τη θέση έγχυσης του κεραυνικού ρεύματος. Το CST δίνει τη δυνατότητα ορισμού διακριτής θύρας (port) μέσω της οποίας θα γίνει η έγχυση του ρεύματος. Για τον ορισμό της θύρας απαιτείται και ο ορισμός ενός σύρματος (wire) το οποίο προσομοιώνει το κεραυνικό κανάλι. Το σύρμα θεωρείται PEC (Perfect Electric Conductor) δηλαδή παρουσιάζει άπειρη αγωγιμότητα (και συνεπώς, δεν παρατηρούνται απώλειες). Προφανώς, δεν υπάρχει τέλειος αγωγός του ηλεκτρικού

ρεύματος, αλλά η θεώρηση ενός τέτοιου υλικού διευκολύνει την εκτέλεση υπολογισμών στην περίπτωση υλικών με πολύ μεγάλη αγωγιμότητα (στην περίπτωση αυτή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε PEC αντί του αγωγίμου υλικού). Για τον ορισμό του σύρματος δεν απαιτείται να προσδιορίσουμε τη διατομή, αφού το πρόγραμμα θα προσδώσει στη διατομή τέτοια τιμή ώστε να δημιουργηθεί το καλύτερο πλέγμα κατά τη διακριτοποίηση του χώρου (δηλαδή να δημιουργηθεί πλέγμα με τα λιγότερα αναγκαία κελιά). Ως μήκος του σύρματος, θεωρούμε την απόσταση εναύσεως, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 1. Έτσι, για την κυματομορφή 10/350 ορίστηκε σύρμα μήκους 310m, ενώ για τις κυματομορφές 1/200 και 0.25/100 ορίστηκε μήκος 200m και 127m αντίστοιχα. Όσον αφορά την κυματομορφή του ρεύματος, για τα πλήγματα 10/350 και 1/200 χρησιμοποιήθηκε η διπλοεκθετική, ενώ για το 0.25/100 χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Heidler για την καλύτερη αναπαράσταση του μετώπου της κυματομορφής. Οι παράμετροι φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

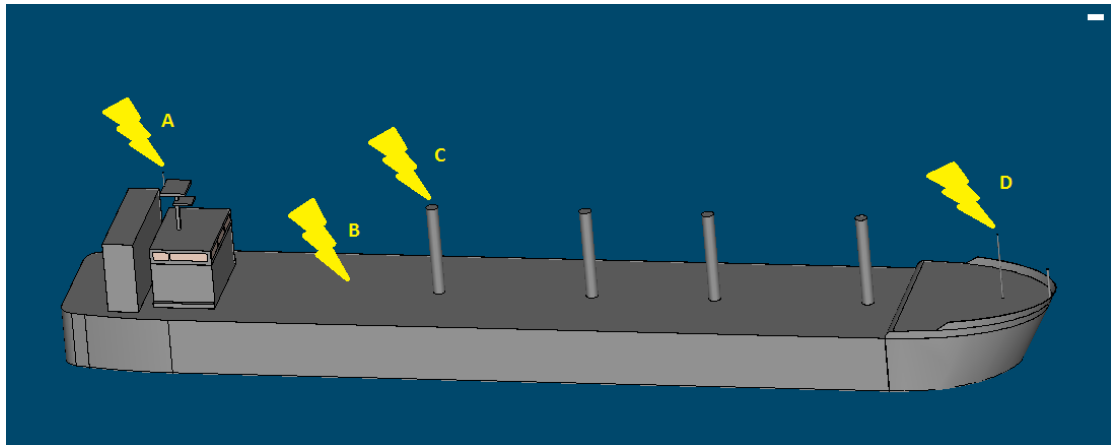
Προσομοιωμένο πλήγμα	Πρώτο Θετικό κεραυνικό πλήγμα	Πρώτο Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα	Επακόλουθο Αρνητικό κεραυνικό πλήγμα
i_{max} (kA)	200	100	50
T_1 (μs)	10	1	0.25
T_2 (μs)	350	200	100
τ_1 (μs)	470.1	284.3	0.454
τ_2 (μs)	4.064	0.3739	143.1
η	0.951	0.990	0.993

Πίνακας 4.1: Παράμετροι εξίσωσης του κεραυνικού ρεύματος με βάση τη διπλοεκθετική εξίσωση (για τα πρώτα κεραυνικά πλήγματα) και την εξίσωση Heidler (για το επακόλουθο πλήγμα).

Ο κεραυνός θα πλήξει τέσσερα διαφορετικά σημεία του πλοίου, σημεία τα οποία είναι πιθανότερο να πληγούν σε σχέση με άλλα μέρη της κατασκευής. Τα σημεία αυτά είναι τα εξής: (A): την κεραία πάνω από τη γέφυρα, (B): το κατάστρωμα σε κοντινή απόσταση από τη γέφυρα, (C): το γερανό που βρίσκεται πλησιέστερα στη γέφυρα, (D): την υψηλότερη κεραία στο σύστημα πλοήγησης.

Όσον αφορά την ελάχιστη και τη μέγιστη συχνότητα του εύρους στο οποίο θα γίνει η προσομοίωση, ανάλογα με το χρόνο μετώπου της κυματομορφής χρησιμοποιούνται διαφορετικές τιμές. Για την κυματομορφή 10/350 η προσομοίωση εκτελέστηκε από το 0 Hz έως τα 246 kHz. Τα πλήγματα 1/200 και 0.25/100 μελετήθηκαν από το 0 Hz έως τα 2.67 MHz. 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.

Εφόσον ο επιλύτης που χρησιμοποιήθηκε είναι ο TLM, οι οριακές συνθήκες ορίστηκαν ως "Ανοιχτές" (Open), και ο τερματισμός τους γίνεται με την αντίσταση του κενού.



Σχήμα 4.4: Σε κάθε προσομοίωση ο κεραυνός θα πλήττει ένα από τα παραπάνω σημεία.

4.5 Ρυθμίσεις πλέγματος

Ο επιλύτης TLM διακριτοποιεί τον υπολογιστικό χώρο μέσω ενός εξαεδρικού πλέγματος. Για τις ρυθμίσεις του Γενικού Πλέγματος (Global Mesh), χρησιμοποιήθηκαν κυρίως οι προκαθορισμένες τιμές εκτός από τα παρακάτω πεδία:

Μέγιστο κελί (Maximum Cell)		
	Κοντά στο μοντέλο	Μακριά από το μοντέλο
Κελιά ανά μήκος κύματος	11	10
Κελιά ως προς τη μέγιστη ακμή του υπολογιστικού χώρου που περιλαμβάνει το μοντέλο (bounding box)	33	10
Ελάχιστο κελί (Minimum Cell)		
Αναλογία ως προς το μέγιστο κελί	33	

Πίνακας 4.2: Ρυθμίσεις που αφορούν το μέγιστο και ελάχιστο κελί του Γενικού Πλέγματος.

Επίσης, καθορίστηκαν ειδικές ρυθμίσεις που αφορούν το Γενικό Πλέγμα.

Διόρθωση επιφανειών που είναι ευθυγραμμισμένες ως προς τους άξονες	
Ελάχιστος αριθμός κελιών από τη μια πλευρά έως την άλλη πλευρά των επιφανειών	30
Ρυθμίσεις PBA	
Ενεργοποίηση PBA για μέταλλα και λεπτά πλαίσια (thin panel)	
Ενεργοποίηση PBA για διηλεκτρικά υλικά	

Πίνακας 4.3: Τροποποίηση ειδικών ρυθμίσεων που αφορούν το Γενικό Πλέγμα

Επίσης, το CST δίνει τη δυνατότητα καθορισμού τοπικών πλεγμάτων για αντικείμενα του μοντέλου, τα οποία χρήζουν ειδικής αντιμετώπισης. Συγκεκριμένα, ο χώρος της Γέφυρας πρέπει να αναλυθεί με περισσότερα κελιά, ώστε να είναι εφικτή η ακριβέστερη καταγραφή του πεδίου. Γι' αυτό, για την περιοχή αυτή, ορίζουμε πως το μέγιστο κελί θα έχει διαστάσεις dx και dy 0.35m, ενώ το μέγεθος του μέγιστου κελιού ως προς τη διάσταση z θα οριστεί σύμφωνα με τις ρυθμίσεις του Γενικού Πλέγματος. Παράλληλα, η καταγραφή των βηματικών τάσεων κοντά στα άκρα του καταστρώματος είναι εφικτή εφόσον οριστούν ειδικές συνθήκες για τη διακριτοποίηση του πλοίου.

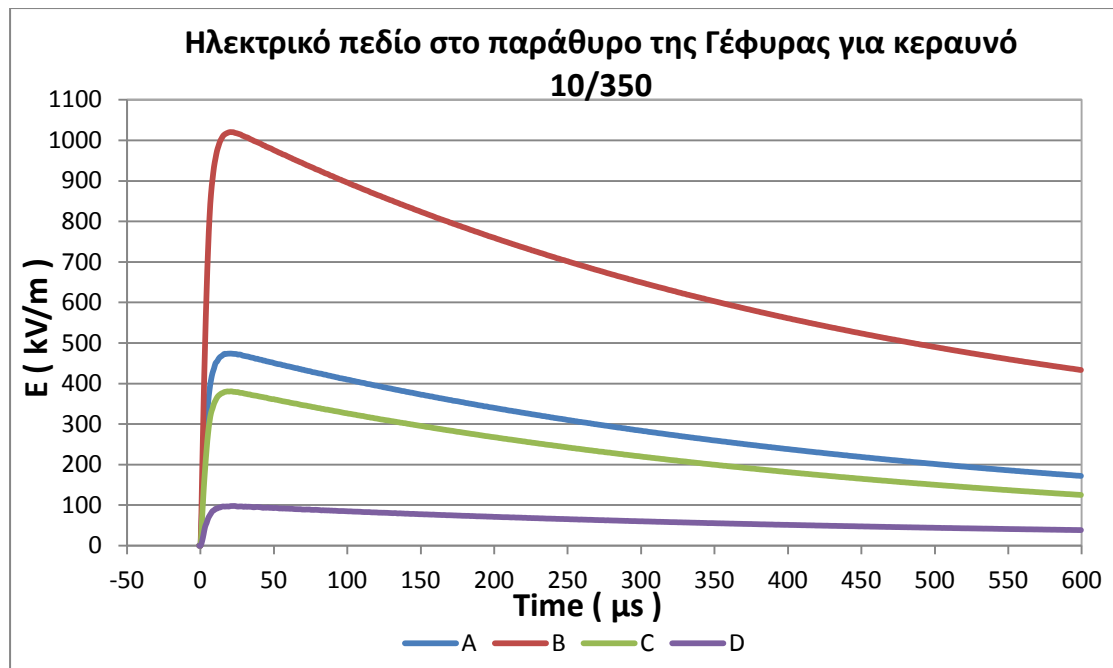
Για την τροφοδοσία, τα παράθυρα και γενικότερα την περιοχή της Γέφυρας	
Μέγιστο μέγεθος κελιών που βρίσκονται στη περιοχή της Γέφυρας	
Dx	0.35 m
Dy	0.35 m
Dz	όπως προκύπτει από το Global Mesh
Για την υπόλοιπη κατασκευή του πλοίου (εκτός της περιοχής της Γέφυρας)	
Συντελεστής τοπικής διόρθωσης στις περιοχές που βρίσκονται κοντά άκρα των αντικειμένων	30
Συντελεστής τοπικής διόρθωσης στον όγκο των αντικειμένων	30

Πίνακας 4.4: Ρυθμίσεις για Τοπικό πλέγμα (Local Mesh) για ορισμένα αντικείμενα του μοντέλου.

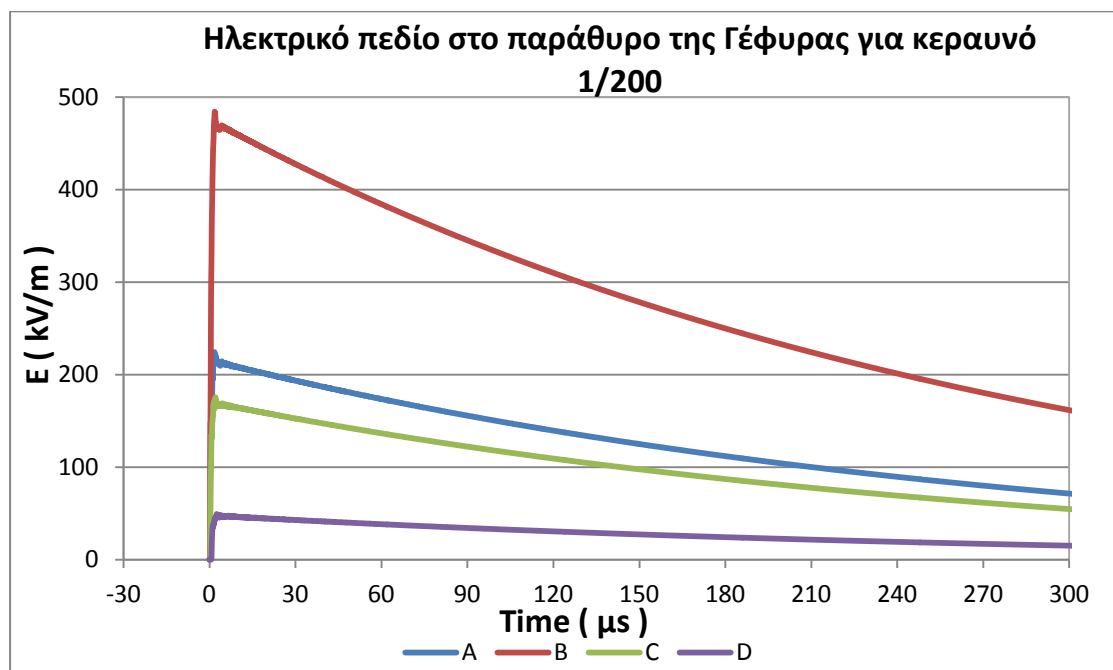
Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε υπολογιστής με 4πύρηνο επεξεργαστή (i5-4590, 3.3 GHz), και 8GB RAM. Ενδεικτικά, από τη διακριτοποίηση του μοντέλου προέκυπταν περίπου 20 εκατομμύρια κελιά. Τελικά, λόγω του TLM, υπολογισμοί εκτελούνταν σε 500 χιλιάδες κελιά, ενώ απαιτούνταν περίπου 18 ώρες για την ολοκλήρωση κάθε προσομοίωσης.

4.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

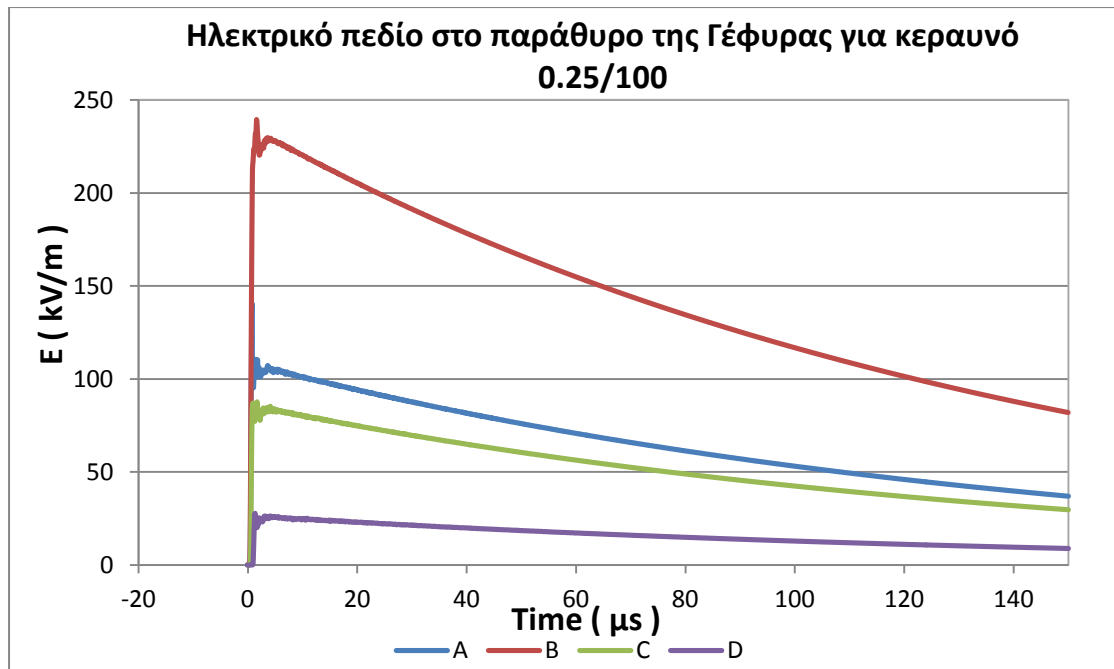
4.6.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για το Ηλεκτρικό και Μαγνητικό πεδίο



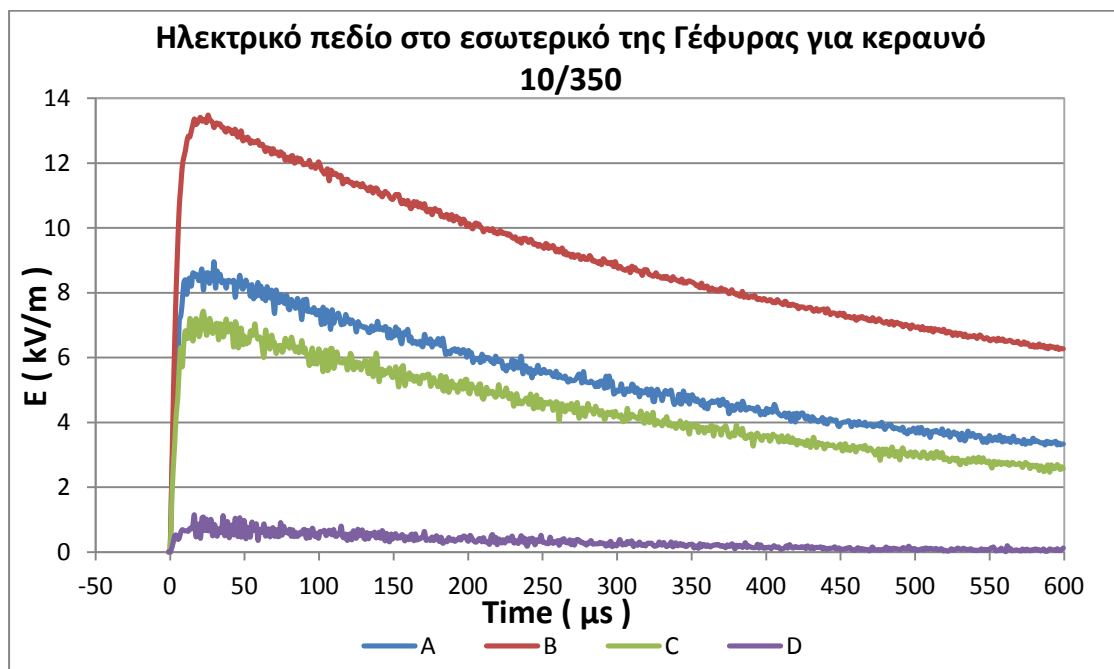
Σχήμα 4.5: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο παράθυρο της Γέφυρας για πλήγμα 10/350 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



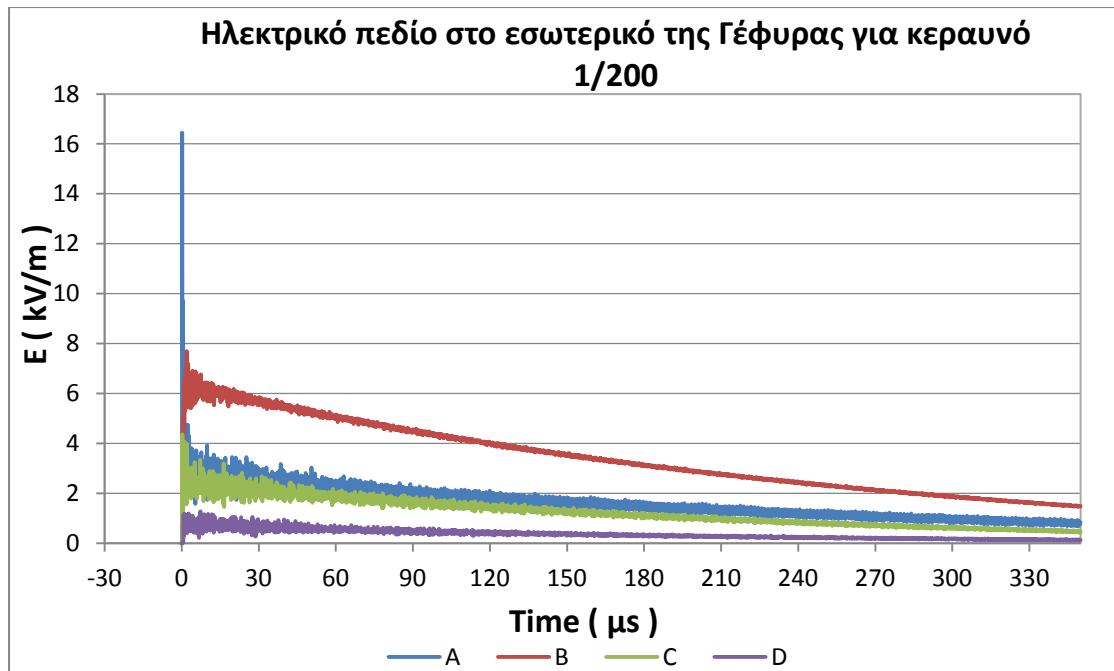
Σχήμα 4.6: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο παράθυρο της Γέφυρας για πλήγμα 1/200 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



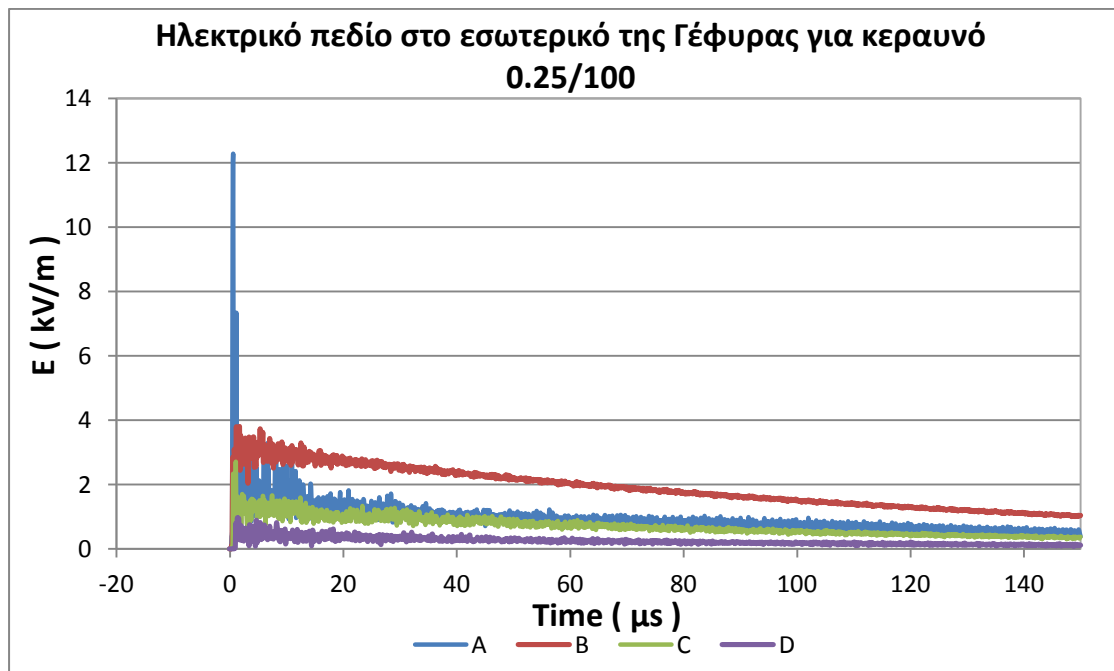
Σχήμα 4.7: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο παράθυρο της Γέφυρας για πλήγμα 0.25/100 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



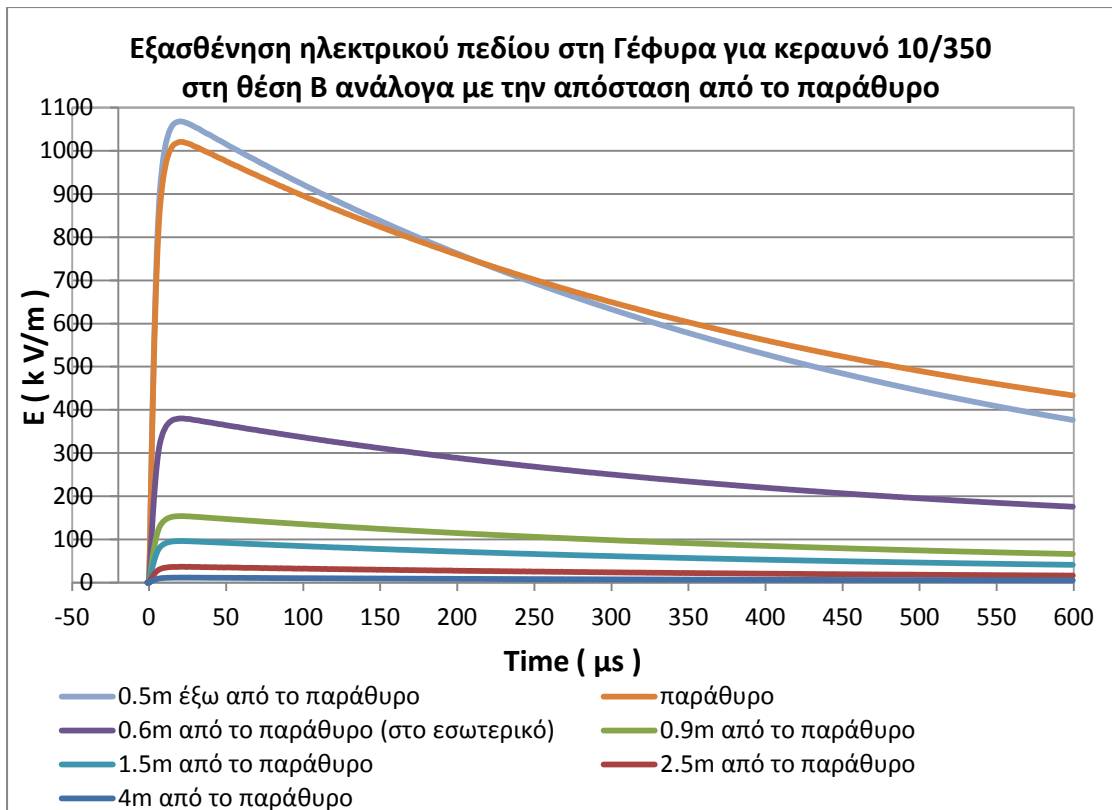
Σχήμα 4.8: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της Γέφυρας (3.5m από το παράθυρο) για πλήγμα 0.25/100 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



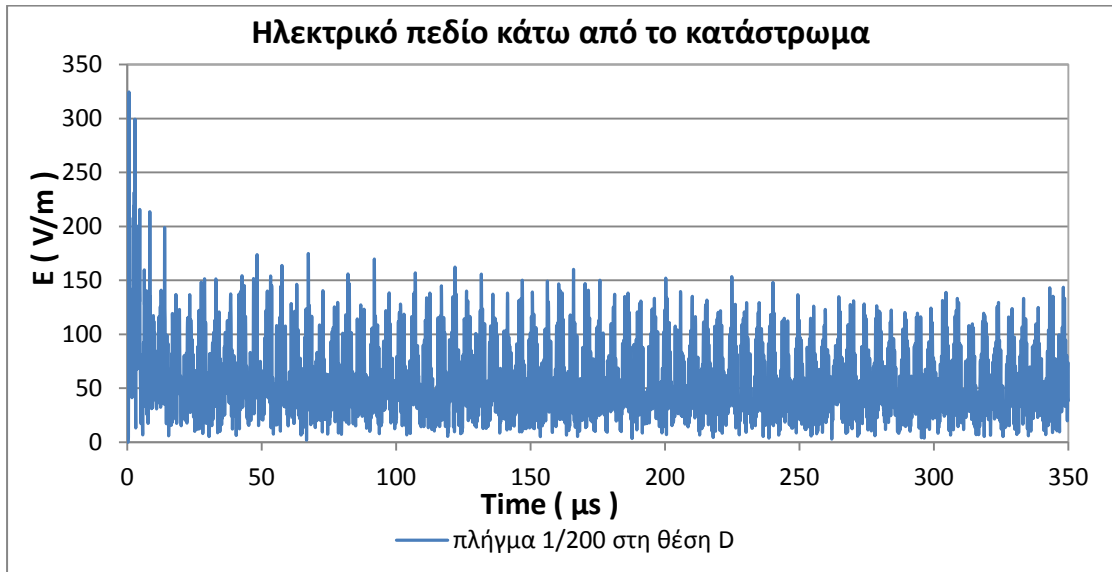
Σχήμα 4.9: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της Γέφυρας (3.5m από το παράθυρο) για πλήγμα 1/200 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



Σχήμα 4.10: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της Γέφυρας (3.5m από το παράθυρο) για πλήγμα 0.25/100 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



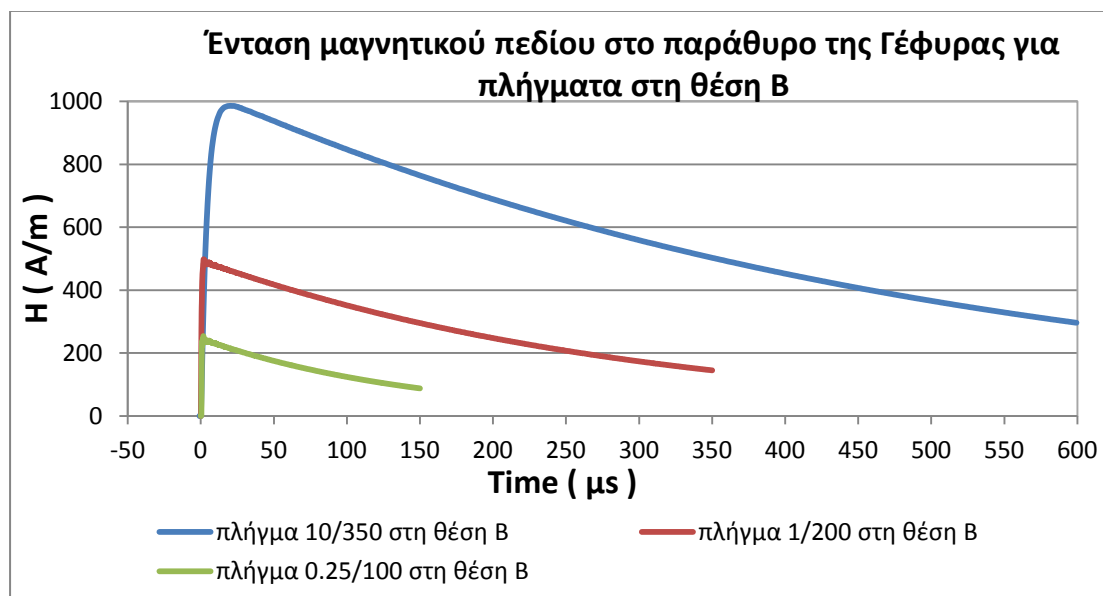
Σχήμα 4.11: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε διάφορα σημεία της Γέφυρας για πλήγμα 10/350 στη θέση Β.



Σχήμα 4.12: Εμφανιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε σημείο κάτω από το κατάστρωμα (συγκεκριμένα 10m κάτω από το κατάστρωμα) για πλήγμα 1/200 στη θέση D.

E_{max} (V/m) [κάτω από το κατάστρωμα]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	58.4	47.3	43.9
B	17	69.9	44.5
C	47.5	70.7	53.7
D	236.9	324.7	207.2

Πίνακας 4.5: Οι μέγιστες τιμές ηλεκτρικού πεδίου όπως καταγράφονται κάτω από το κατάστρωμα (10m κάτω από το κατάστρωμα) για όλα τα είδη και θέσεις πλήγματος.

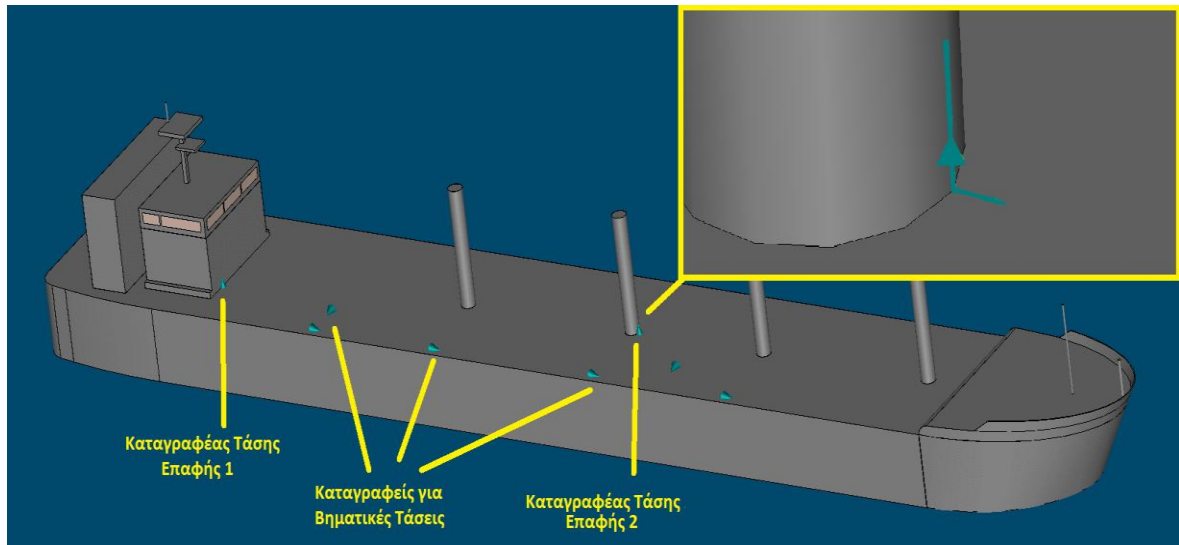


Σχήμα 4.13: Η ένταση μαγνητικού πεδίου στο παράθυρο της Γέφυρας για πλήγματα στη θέση B.

H_{max} (A/m) [στο παράθυρο της Γέφυρας]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	646.5	317.4	180.2
B	986.4	499	254.4
C	535.6	278.3	154.6
D	157.3	132.5	105.2

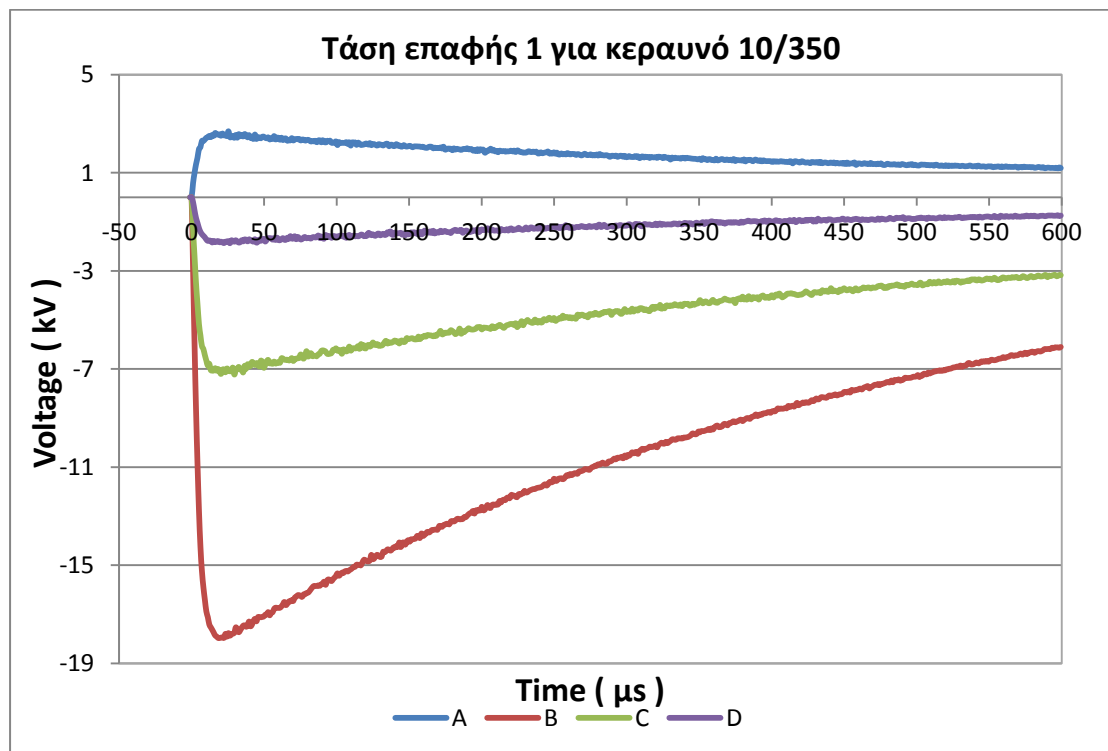
Πίνακας 4.6: Οι μέγιστες τιμές της έντασης μαγνητικού πεδίου όπως καταγράφονται στο παράθυρο της Γέφυρας για όλα τα είδη και τις θέσεις πλήγματος.

4.6.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για Τάσεις Επαφής και Βηματικές Τάσεις

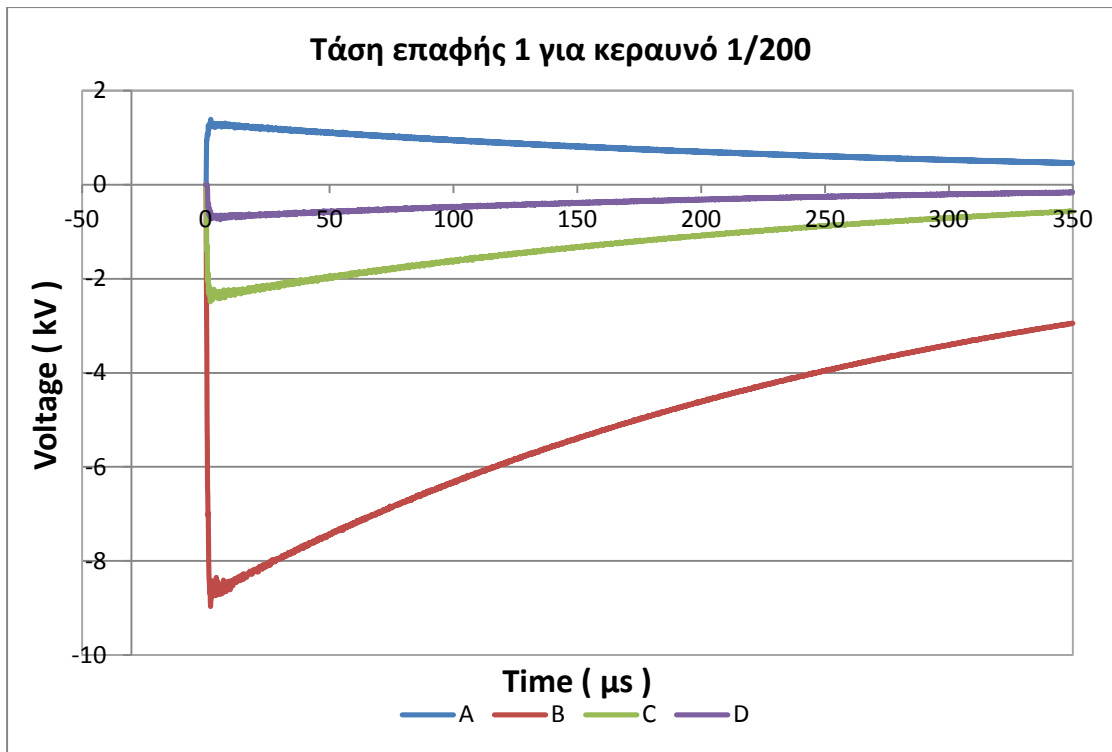


Σχήμα 4.14: Θέσεις των καταγραφέων τάσεων επαφής 1 & 2 και διάφορων καταγραφέων βηματικών τάσεων πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου. Στο πάνω μέρος φαίνεται μια μεγέθυνση του σχήματος, όπου διακρίνεται ο καταγραφέας τάσης επαφής 2.

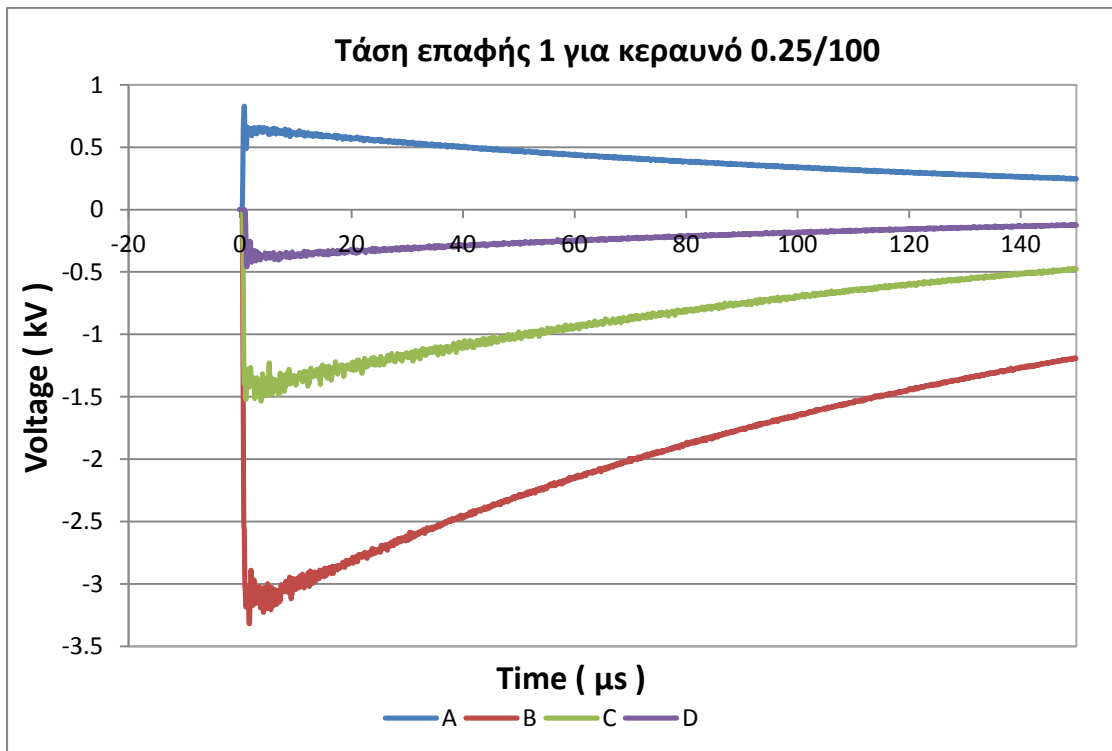
Για τη μέτρηση των τάσεων επαφής τοποθετούνται οι καταγραφείς 1 και 2. Σε αυτές τις περιπτώσεις θεωρούμε πως ο άνθρωπος στέκεται σε απόσταση 0.5m από ένα γερανό και ακουμπάει τη μεταλλική κατασκευή σε ύψος 1.5m.



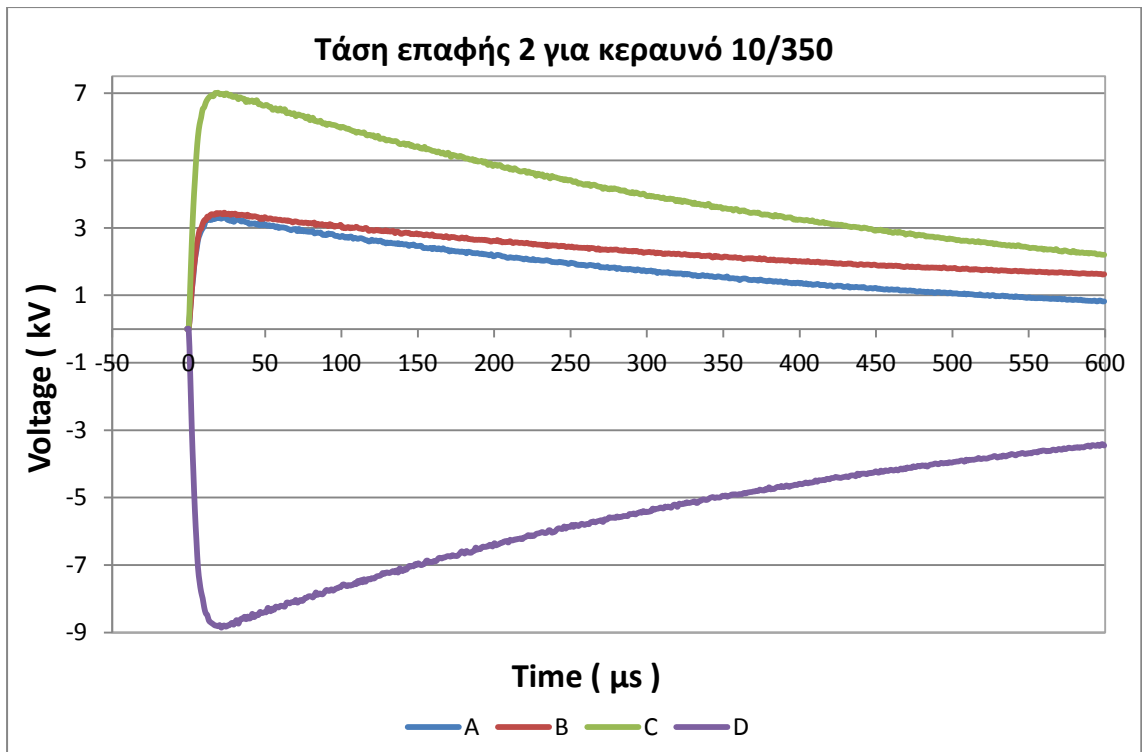
Σχήμα 4.15: Τάση επαφής, όπως υπολογίστηκε στον Καταγραφέα Τάσης Επαφής 1 για πλήγμα 10/350 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



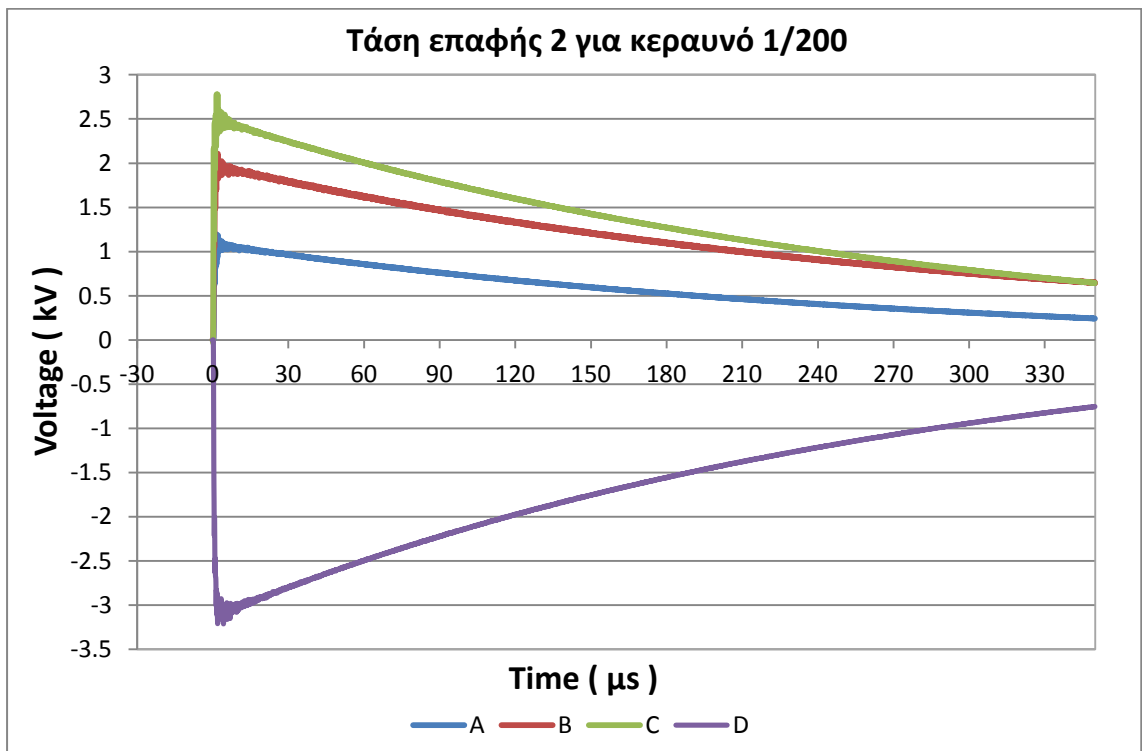
Σχήμα 4.16: Τάση επαφής, όπως υπολογίστηκε στον Καταγραφέα Τάσης Επαφής 1 για πλήγμα 1/200 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



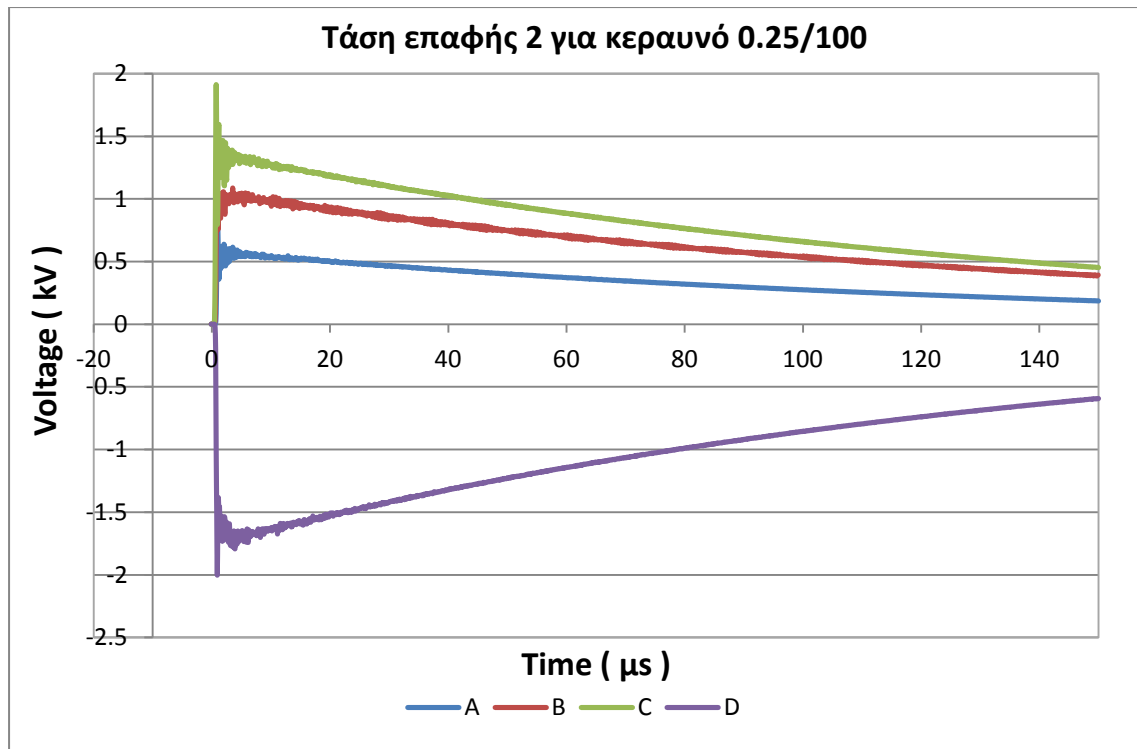
Σχήμα 4.17: Τάση επαφής, όπως υπολογίστηκε στον Καταγραφέα Τάσης Επαφής 1 για πλήγμα 0.25/100 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



Σχήμα 4.18: Τάση επαφής, όπως υπολογίστηκε στον Καταγραφέα Τάσης Επαφής 2 για πλήγμα 10/350 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.

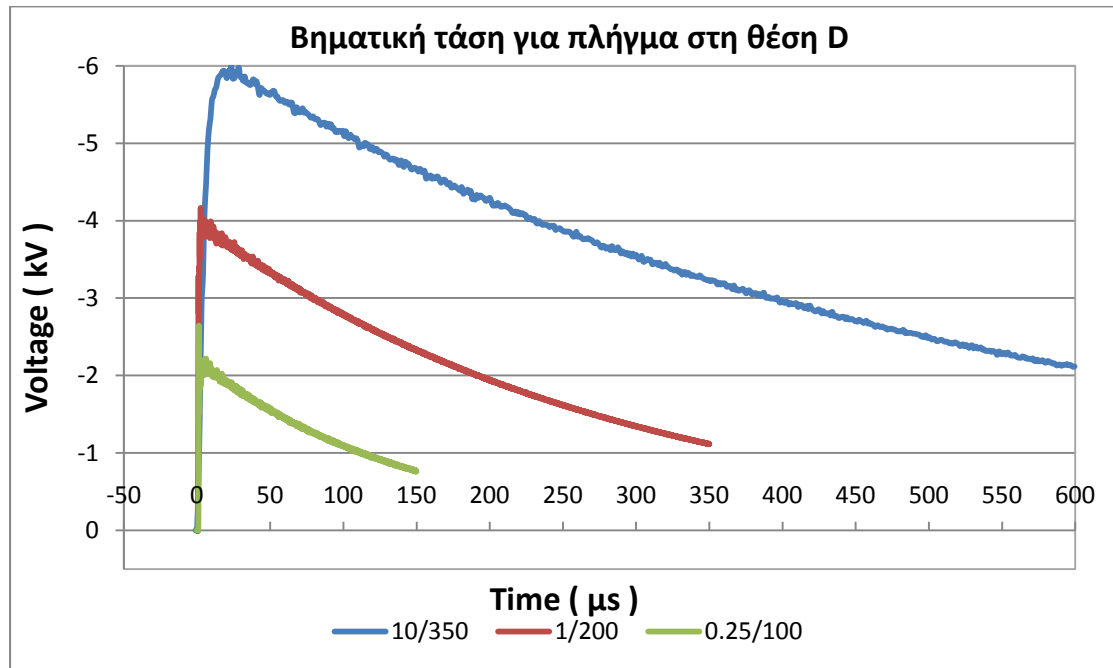


Σχήμα 4.19: Τάση επαφής, όπως υπολογίστηκε στον Καταγραφέα Τάσης Επαφής 2 για πλήγμα 1/200 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



Σχήμα 4.20: Τάση επαφής, όπως υπολογίστηκε στον Καταγραφέα Τάσης Επαφής 2 για πλήγμα 0.25/100 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.

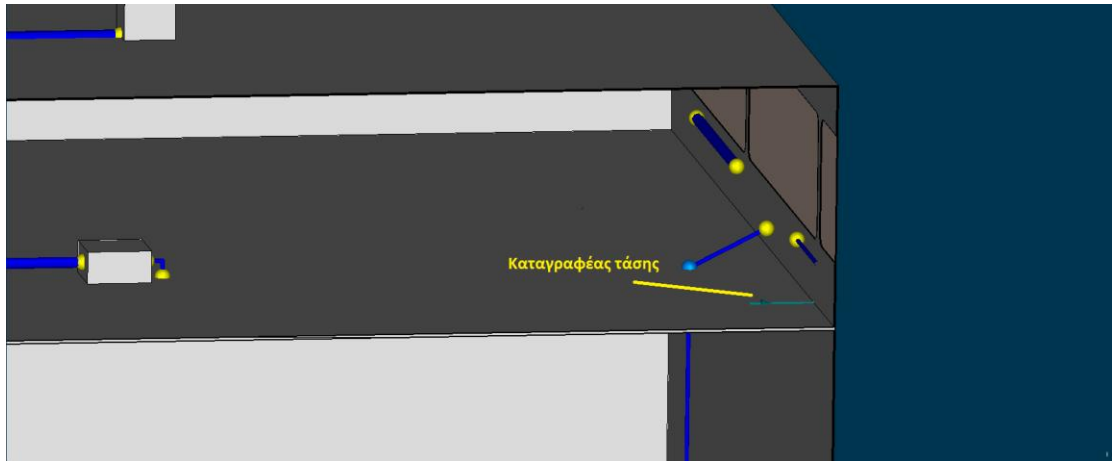
Όσον αφορά τις βηματικές τάσεις, αναπτύσσονται ιδιαίτερα επικίνδυνες τιμές στο κατάστρωμα αλλά και στην περιοχή κοντά στη Γέφυρα. Ενδεικτικά, για πλήγμα 10/350 στη θέση A οι βηματικές τάσεις που καταγράφονται στο κατάστρωμα ξεπερνούν τα 2500 V. Οι μέγιστες τιμές για τις κυματομορφές 1/200 και 0.25/100 είναι 800 V και 400 V αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.21 φαίνονται οι βηματικές τάσεις για την περιοχή πάνω από τη Γέφυρα για πλήγματα στη θέση D.



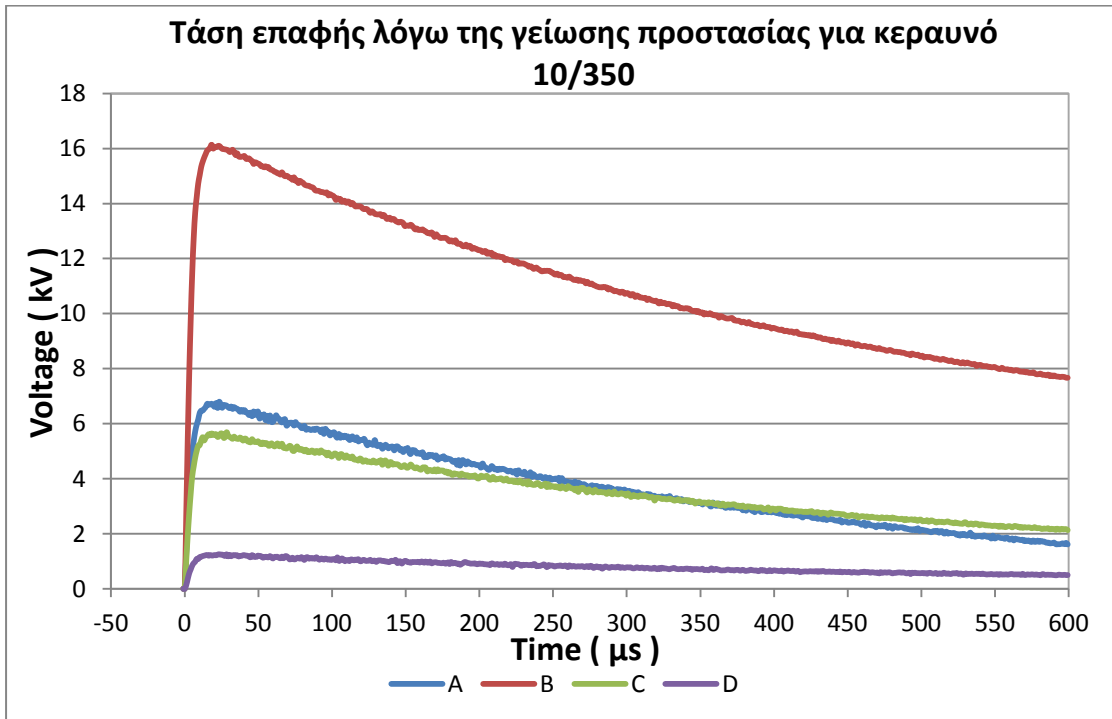
Σχήμα 4.21: Οι βηματικές τάσεις πάνω από τη Γέφυρα για πλήγμα στη θέση D.

4.6.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων για τις τάσεις επαφής λόγω της γείωσης προστασίας

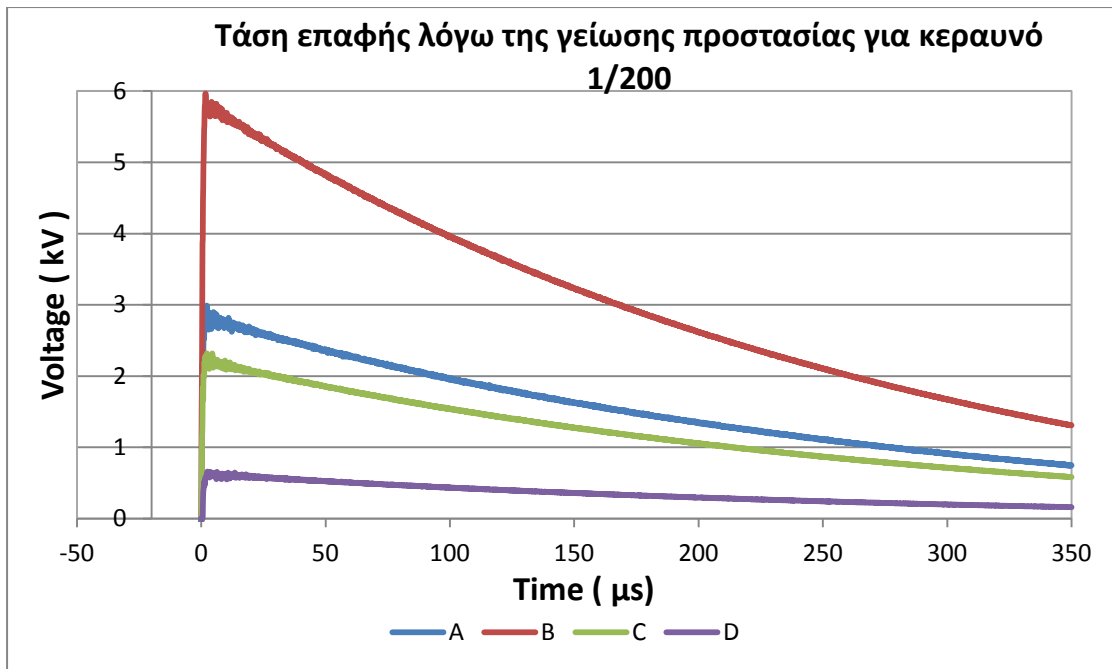
Το δίκτυο γείωσης των πλοίων είναι κατά κανόνα αγείωτο (IT). Στο αγείωτο σύστημα τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη του εξοπλισμού συνδέονται απευθείας με τη γάστρα του πλοίου, ώστε να προφυλάξουν το προσωπικό από επικίνδυνες τάσεις επαφής, που προέρχονται από την καταστροφή της μόνωσης των αγωγών. Ωστόσο, σε περίπτωση κεραυνοπληξίας, μπορεί να προκληθεί μια τάση επαφής αν κάποιος άνθρωπος που βαδίζει στο μεταλλικό πάτωμα στο εσωτερικό της γέφυρας, αγγίξει το μεταλλικό μέρος μιας συσκευής, η οποία γειώνεται στη γάστρα σε κάποια απόσταση (π.χ. 1m) από το σημείο που στέκεται. Η περίπτωση αυτή εξετάζεται με τη βοήθεια ενός Καταγραφέα τάσης (μήκους 1m) στο εσωτερικό της γέφυρας, ο οποίος δίνει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου που στέκεται ο άνθρωπος και του αντίστοιχου σημείου γείωσης στη γάστρα (θεωρώντας με μια αρχική απλουστευμένη προσέγγιση ότι το περίβλημα της συσκευής βρίσκεται στο ίδιο δυναμικό με τη γάστρα, αγνοώντας την επίδραση του αγωγού της γείωσης μεταλλικών). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω για τα τρία πλήγματα και τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



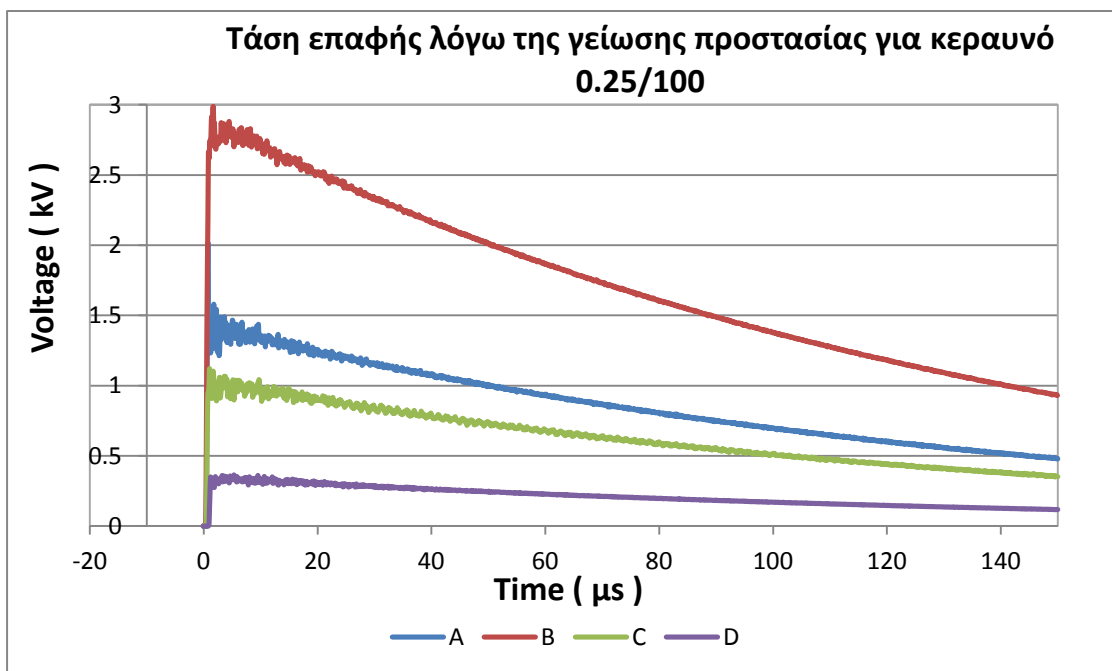
Σχήμα 4.22: Η θέση του Καταγραφέα τάσης (μήκους 1m), ο οποίος δίνει τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου που στέκεται ο άνθρωπος και του αντίστοιχου σημείου γείωσης στη γάστρα.



Σχήμα 4.23: Τάση επαφής λόγω της γείωσης προστασίας για καταγραφέα τάσης (μήκους 1m) για πλήγμα 10/350 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



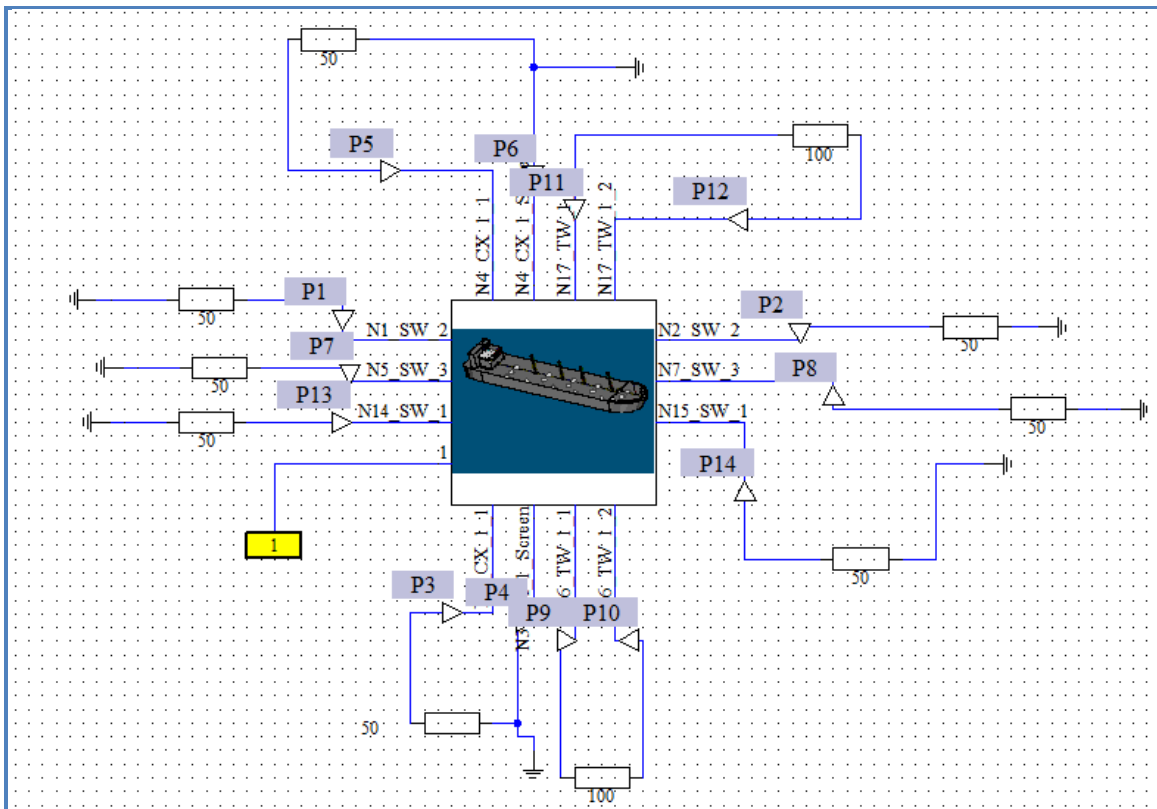
Σχήμα 4.24: Τάση επαφής λόγω της γείωσης προστασίας για καταγραφέα τάσης (μήκους 1m) για πλήγμα 1/200 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.



Σχήμα 4.25: Τάση επαφής λόγω της γείωσης προστασίας για καταγραφέα τάσης (μήκους 1m) για πλήγμα 0.25/100 για τις διάφορες θέσεις πλήγματος.

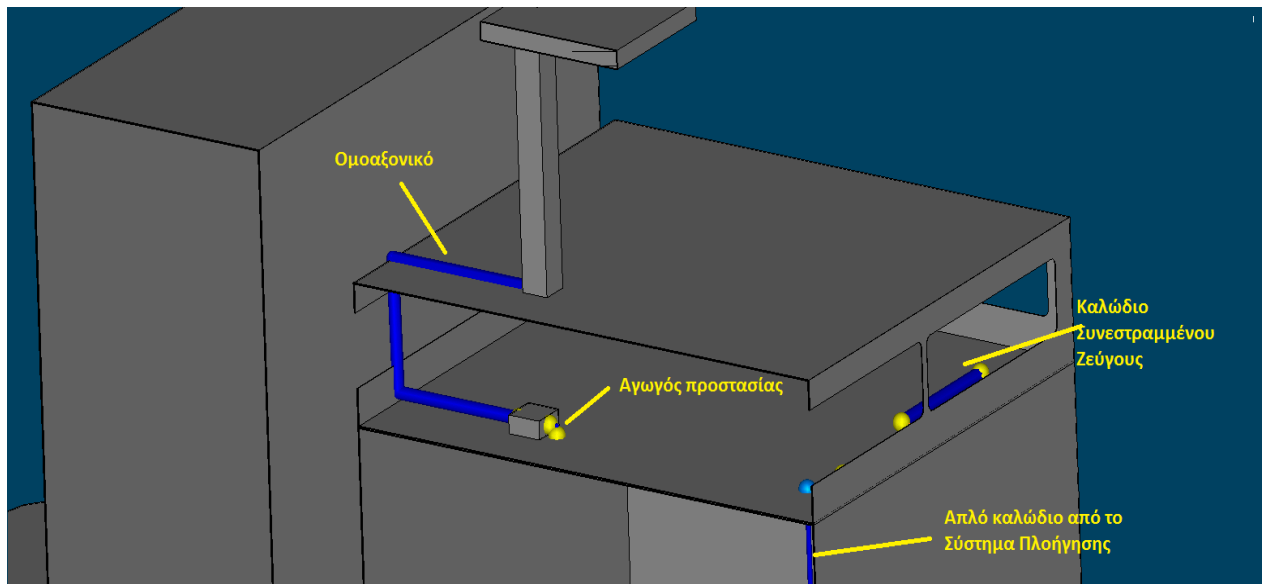
4.6.4 Ορισμός Καλωδίων στο μοντέλο

Το CST παρέχει ένα ξεχωριστό παράθυρο για το σχεδιασμό των καλωδίων. Μέσω του *Schematic* μπορούμε εισάγουμε κυκλώματα μέσω PSpice, εξωτερικές θύρες (external ports). Οι εξωτερικές θύρες αναπαριστούν τις εισόδους και τις εξόδους του συστήματος, δηλαδή τις πηγές και τα φορτία. Για να εξετάσουμε τα επαγόμενα φαινόμενα λόγω της κεραυνοπληξίας τοποθετούμε αντιστάσεις τερματισμού στα καλώδια. Για το ομοαξονικό καλώδιο θα τερματίσουμε τον εσωτερικό αγωγό με αντίσταση 50 Ohm, ενώ ο εξωτερικός αγωγός γειώνεται και στις δύο πλευρές. Μεταξύ των αγωγών του καλωδίου συνεστραμμένου ζεύγους θεωρούμε αντίσταση 100 Ohm. Τα απλά καλώδια (single wires) τερματίζονται με αντιστάσεις των 50 Ohm.



Σχήμα 4.26: Παράθυρο schematic του CST CABLE STUDIO

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε το εσωτερικό της Γέφυρας, στο οποίο διακρίνονται το ομοαξονικό καλώδιο, το οποίο συνδέει την κεραία του πλοίου με την τροφοδοσία, τον αγωγό προστασίας για την τροφοδοσία, ένα καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους κοντά στο μπροστινό παράθυρο της γέφυρας και ένα τμήμα ενός απλού καλωδίου το οποίο προέρχεται από το σύστημα πλοήγησης του πλοίου. Υπάρχει επίσης ένα απλό καλώδιο μήκους 4m στο παράθυρο της γέφυρας το οποίο δεν φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



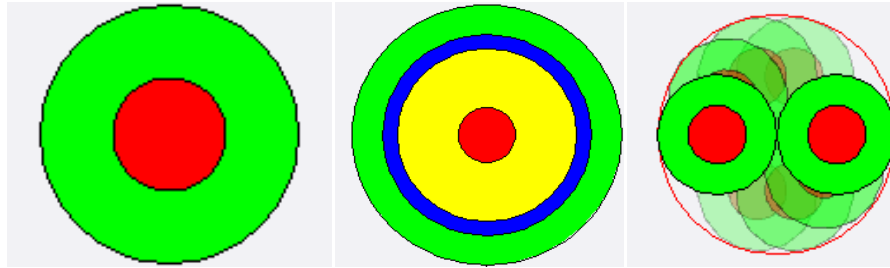
Σχήμα 4.27: Η τομή της Γέφυρας μας επιτρέπει να διακρίνουμε τα καλώδια (απλό καλώδιο 1, καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους, ομοαξονικό).

Καλώδια	Τύπος	Περιγραφή	
Απλό καλώδιο 1	LIFY_0qmm50	Διάμετρος Καλωδίου	2mm
Καλώδιο Συνεστραμμένου ζεύγους	UTP_LIFY_1qmm	Διάμετρος Καλωδίου	2.5mm
Απλό καλώδιο 2	LIFY_0qmm50	Διάμετρος Καλωδίου	2mm
Ομοαξονικό	RG58	Διάμετρος εσωτερικού αγωγού	0.94mm
		Διάμετρος εξωτερικής μόνωσης	4.438mm
Απλό καλώδιο 3	LIFY_0qmm50	Διάμετρος Καλωδίου	2mm

Πίνακας 4.7: Οι τύποι των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν και τα κύρια χαρακτηριστικά τους.

Καλώδιο	Τερματικοί Κόμβοι	Περιγραφή
Απλό Καλώδιο 1	N14, N15	Καλώδιο μήκους 0.35m που χρησιμοποιείται για την γείωση προστασίας της τροφοδοσίας
Καλώδιο Συνεστραμμένου Ζεύγους	N16, N17	Καλώδιο μήκους 4m στο παράθυρο της Γέφυρας
Απλό Καλώδιο 2	N1, N2	Καλώδιο μήκους 4m στο παράθυρο της Γέφυρας
Ομοαξονικό	N3, N4	Καλώδιο μήκους 8.52m που συνδέει την τροφοδοσία με την κεντρική κεραία
Απλό Καλώδιο 3	N5, N7	Καλώδιο μήκους 227.77m που συνδέει το σύστημα πλοήγησης με εξοπλισμό στη Γέφυρα

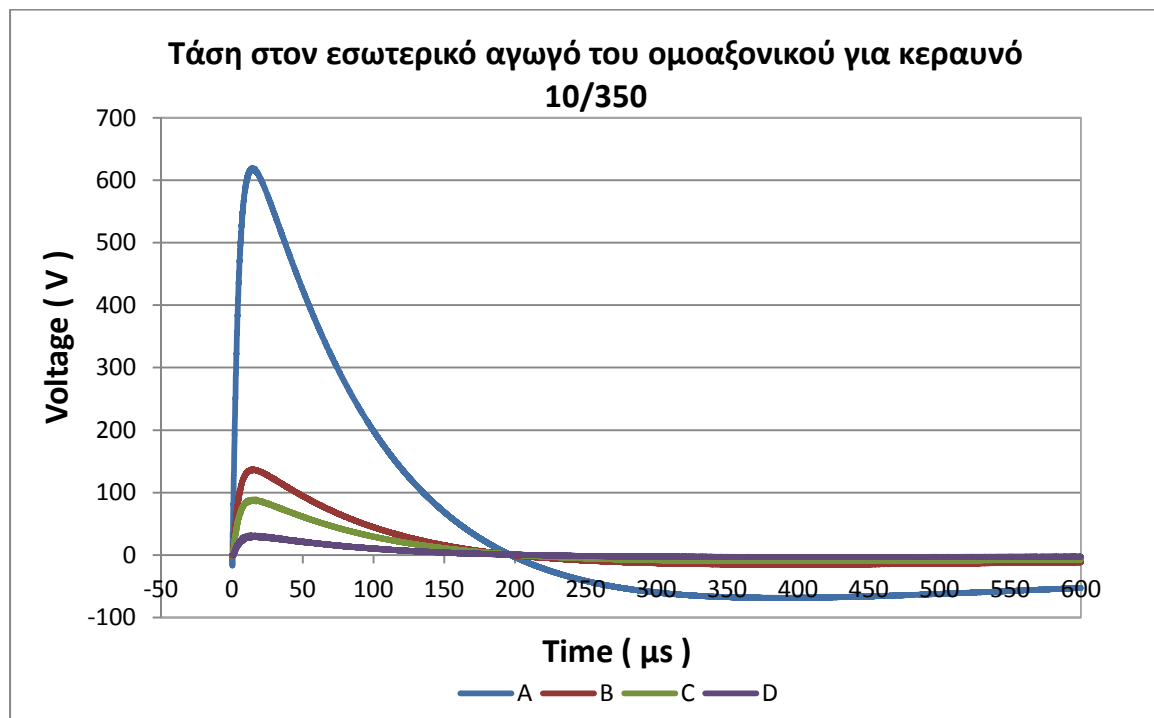
Πίνακας 4.8: Οι τερματικοί κόμβοι των καλωδίων, το μήκος και η χρήση των καλωδίων στο μοντέλο.



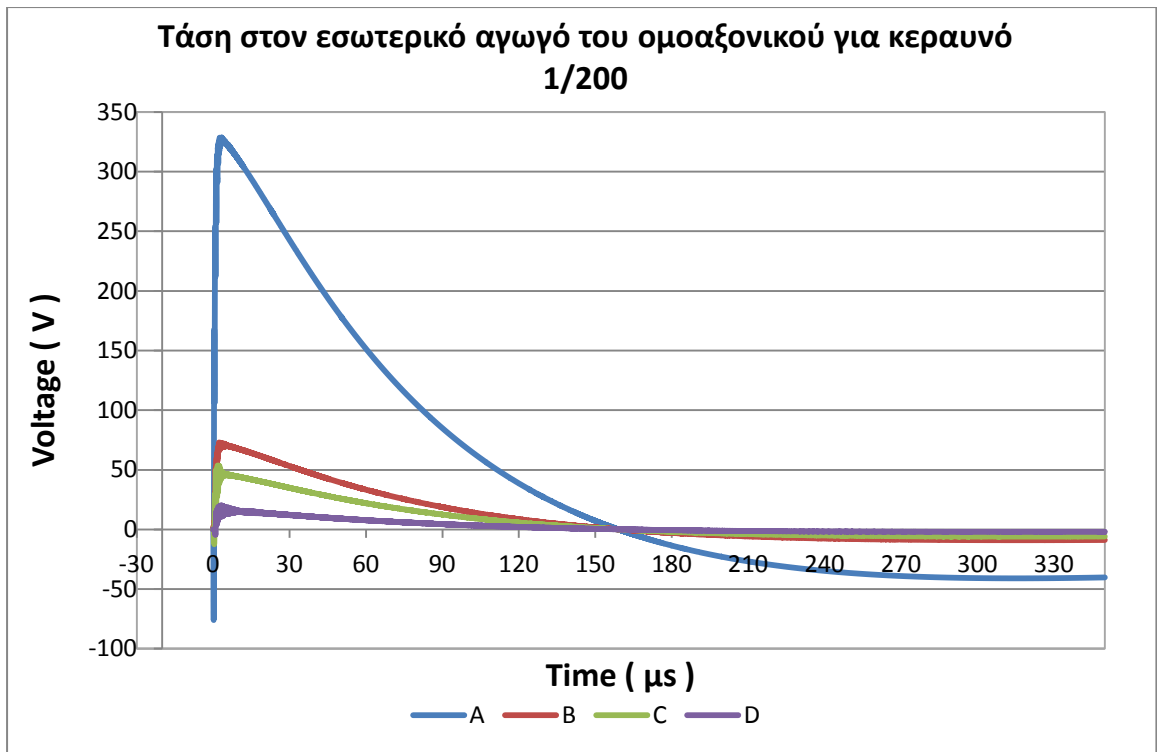
Σχήμα 4.28: Κατασκευή του απλού καλωδίου, του ομοαξονικού και του καλωδίου συνεστραμμένου ζεύγους.

Για την καταγραφή των τάσεων και των ρευμάτων στα καλώδια, οι προσομοιώσεις γίνονται στο πεδίο του χρόνου. Χρησιμοποιείται η συν-προσομοίωση (co-simulation) της κεραυνοπληξίας πλοίου (3D domain - όπως σχεδιάστηκε στο CST MWS-) και του κυκλώματος των καλωδίων και των αντιστάσεων (circuit - όπως σχεδιάστηκε στο CST CS-). Για τη συν-προσομοίωση στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιείται η επιλογή αμφίδρομης συν-προσομοίωσης (bi-directional co-simulation), ώστε να είναι εφικτή η αλληλεπίδραση του 3D domain και του κυκλώματος σε κάθε βήμα της προσομοίωσης (time step). Η εξωτερική θύρα 1 συμβολίζει την πηγή ρεύματος μέσω της οποίας γίνεται έγχυση του κεραυνικού ρεύματος.

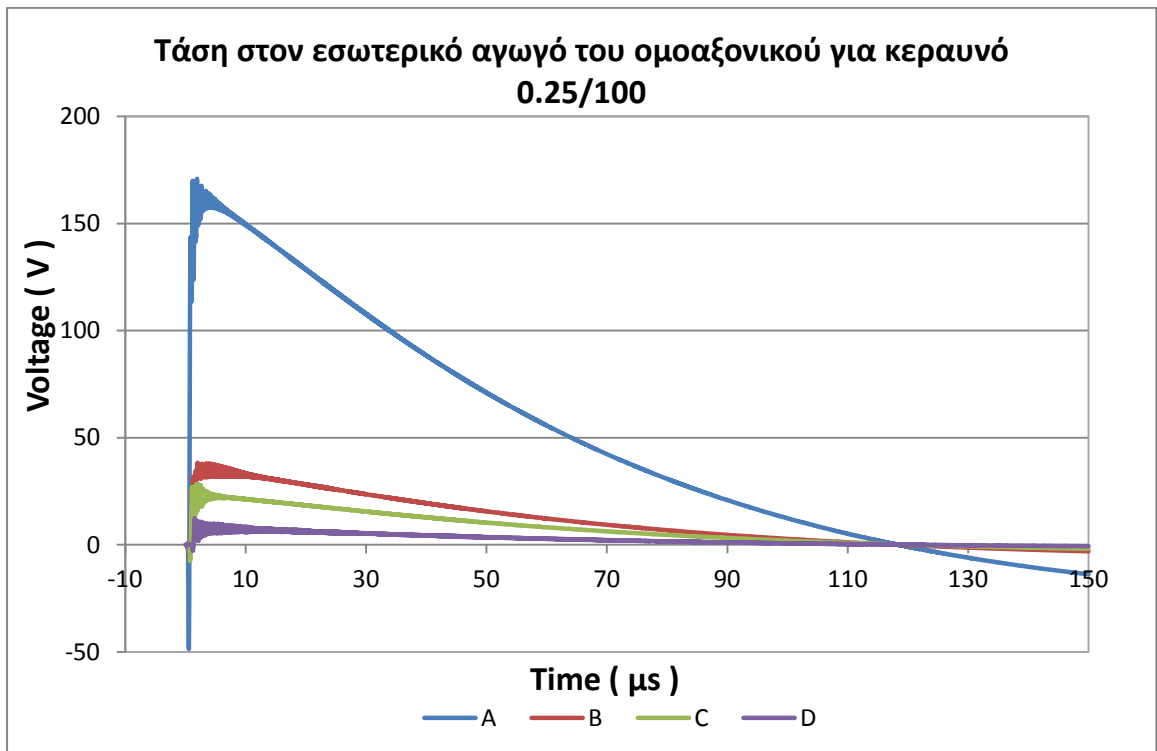
4.6.4.1 Επίδραση κεραυνικών πληγμάτων στο ομοαξονικό καλώδιο



Σχήμα 4.29: Τάση στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στον κόμβο N4 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 10/350 στις διάφορες θέσεις πλήγματος.



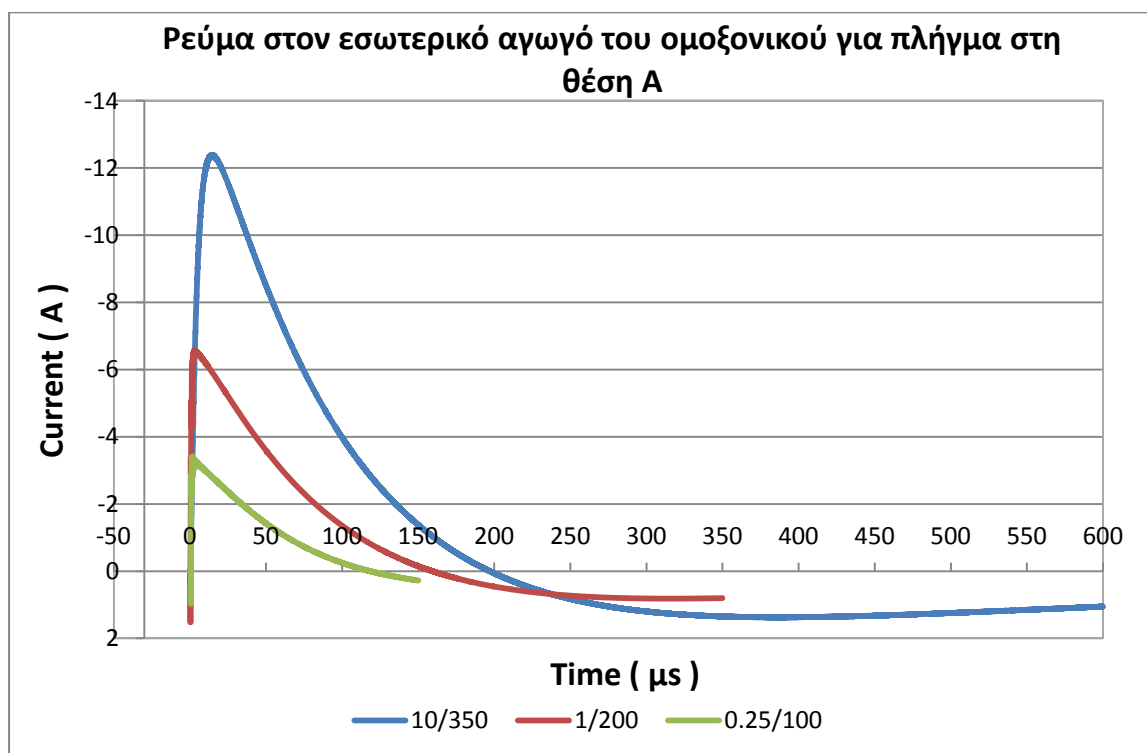
Σχήμα 4.30: Τάση στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στον κόμβο N4 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 1/200 στις διάφορες θέσεις πλήγματος.



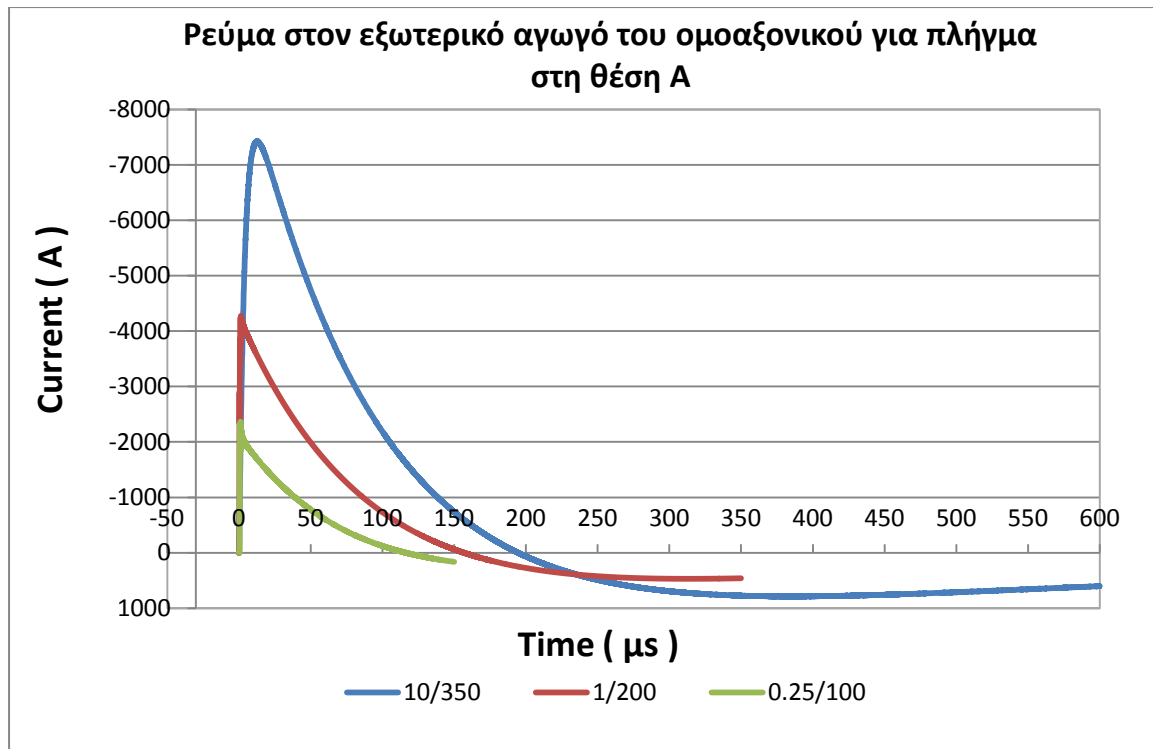
Σχήμα 4.31: Τάση στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στον κόμβο N4 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 0.25/100 στις διάφορες θέσεις πλήγματος.

V _{max} (V) [εσωτερικός αγωγός ομοαξονικού, στο N4]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	620	328	170.9
B	137.2	73	38.3
C	89.3	53.7	28.4
D	31.6	20.4	12.3

Πίνακας 4.9: Μέγιστη τιμή της τάσης στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στον κόμβο N4 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για όλες τις εξεταζόμενες κυματομορφές και θέσεις πλήγματος.



Σχήμα 4.32: Ρεύμα στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στον κόμβο N4 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για τα διάφορα πλήγματα στη θέση A.



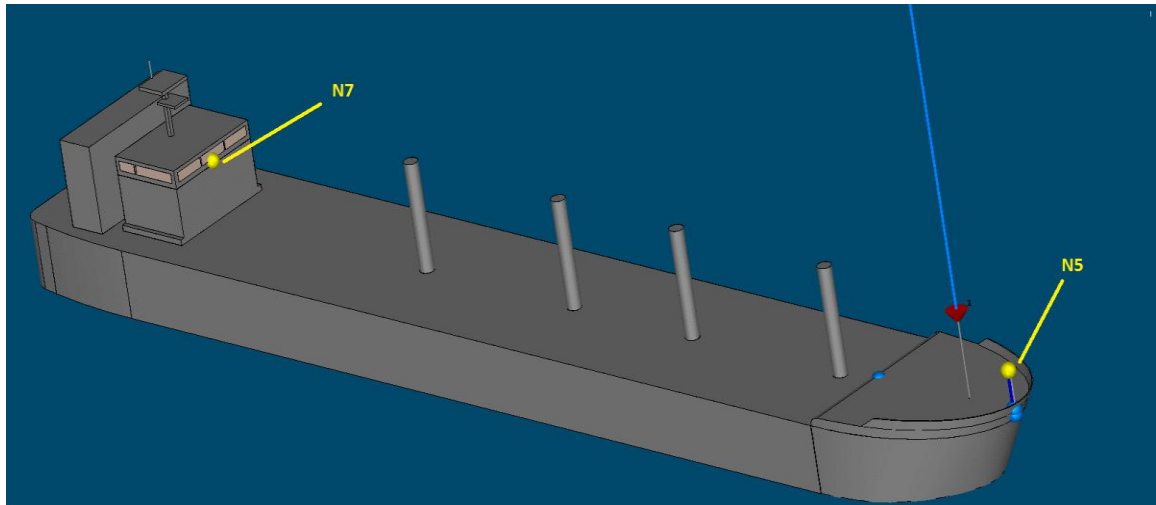
Σχήμα 4.33: Ρεύμα στον εξωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στον κόμβο N4 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για τα διάφορα πλήγματα στη θέση Α.

I_{max} (A) [στον εσωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στο N4]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	12.4	6.57	3.42
B	2.74	1.46	0.77
C	1.78	1	0.57
D	0.63	0.41	0.25

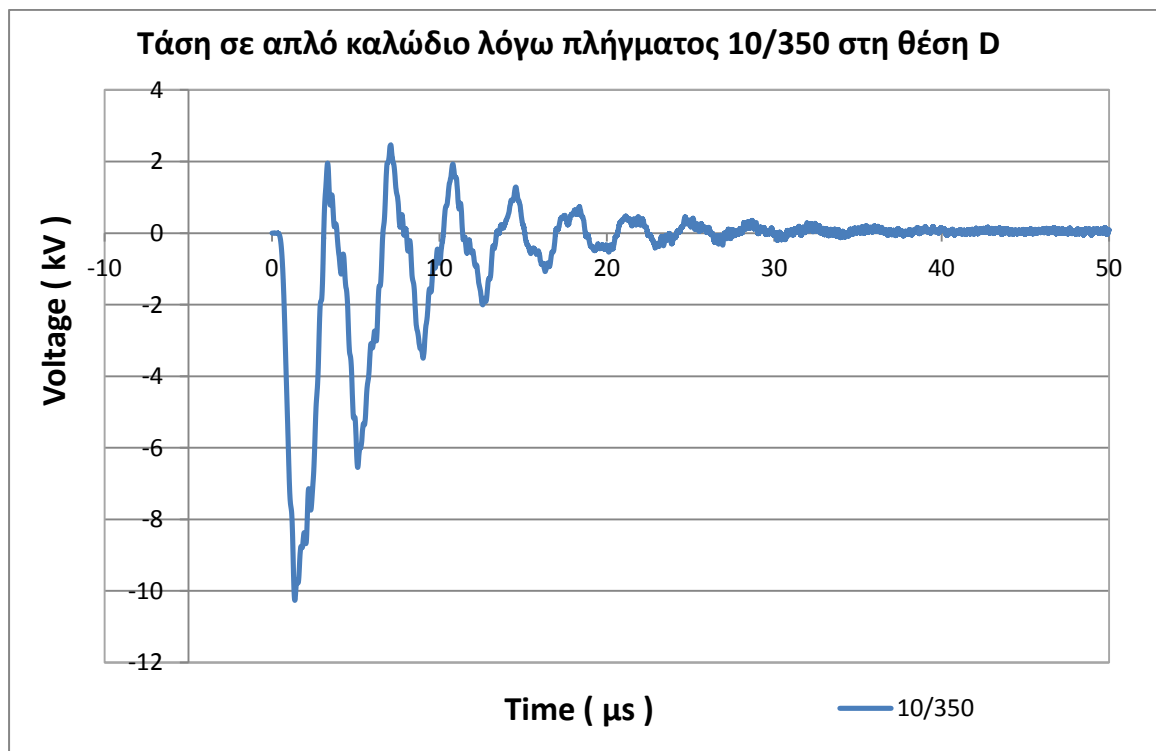
I_{max} (A) [στον εξωτερικό αγωγό του ομοαξονικού, στο N4]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	7434	4275	2369
B	1645	903.2	500.3
C	1070.8	692	377.5
D	376.7	249.7	161.1

Πίνακας 4.10 (αριστερά) & 4.11(δεξιά): Μέγιστη τιμή του ρεύματος στον εσωτερικό και εξωτερικό αγωγό του ομοαξονικού αντίστοιχα, στον κόμβο N4, για όλες τις εξεταζόμενες κυματομορφές και θέσεις πλήγματος.

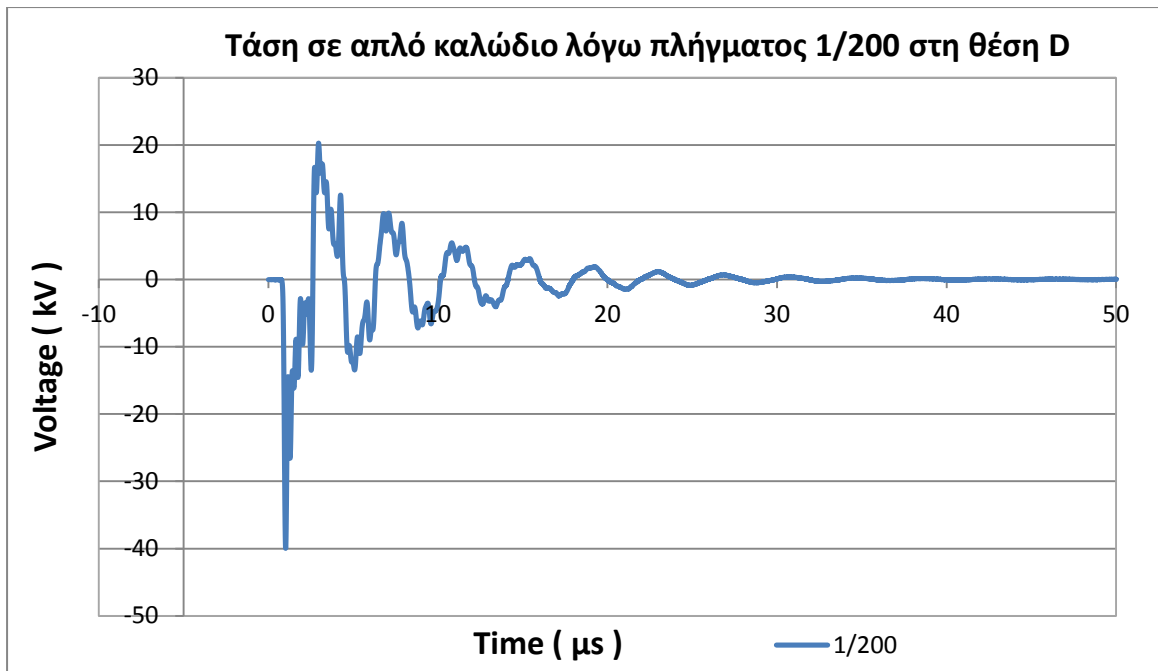
4.6.4.2 Επίδραση κεραυνικών πληγμάτων σε απλό καλώδιο που συνδέει το σύστημα πλοήγησης με εξοπλισμό που βρίσκεται στη Γέφυρα του πλοίου



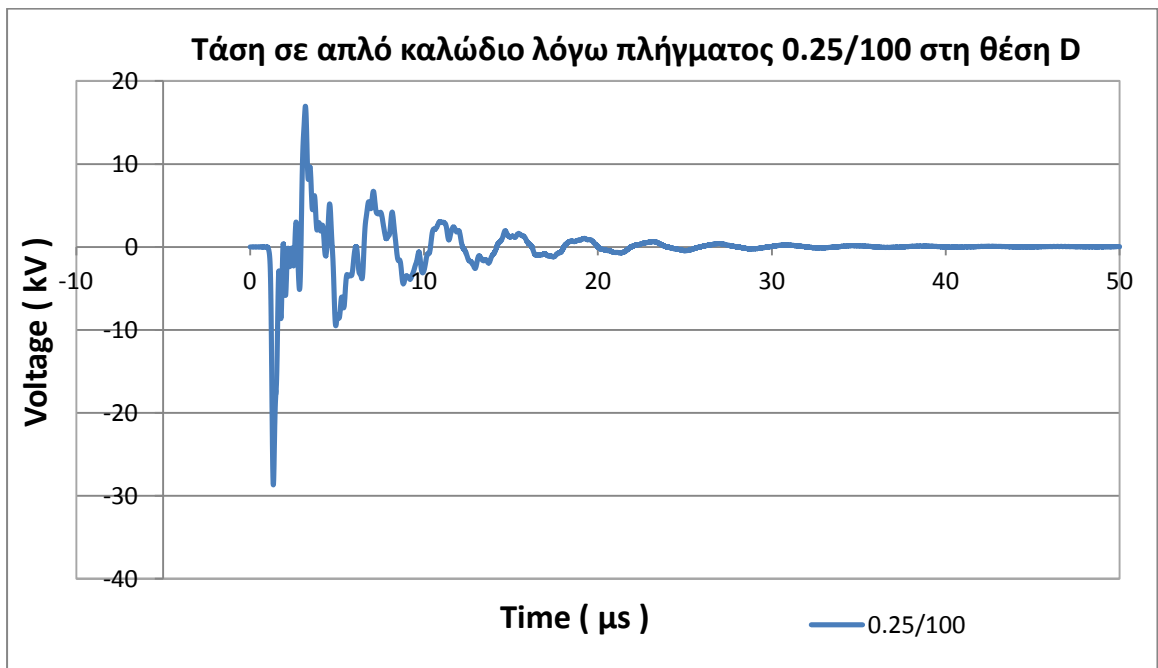
Σχήμα 4.34: Στο παραπάνω σχήμα διακρίνονται οι τερματικοί κόμβοι (οι κόμβοι με το κίτρινο χρώμα) του απλού καλωδίου που συνδέει το σύστημα πλοήγησης με εξοπλισμό που βρίσκεται στη Γέφυρα. Το καλώδιο διέρχεται μέσω του χώρου που βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα.



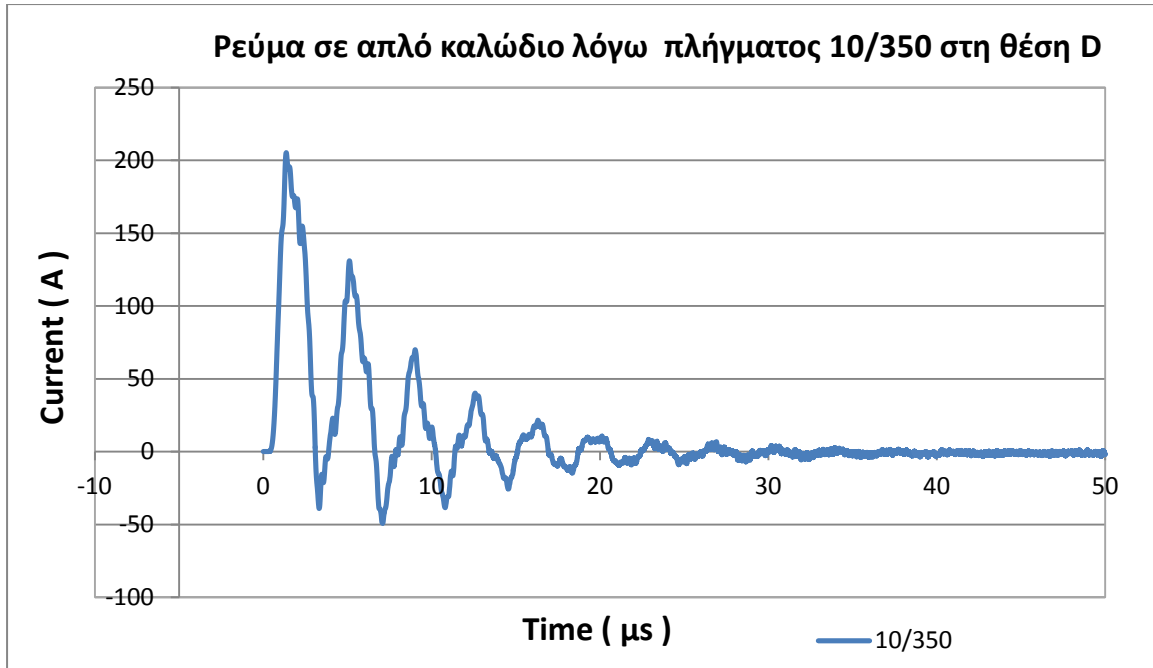
Σχήμα 4.35: Τάση στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 10/350 στη θέση D για χρόνο έως 50 μs. Από τα 50 μs έως τα 600 μs η τάση μειώνεται από τα 25V στα 15V.



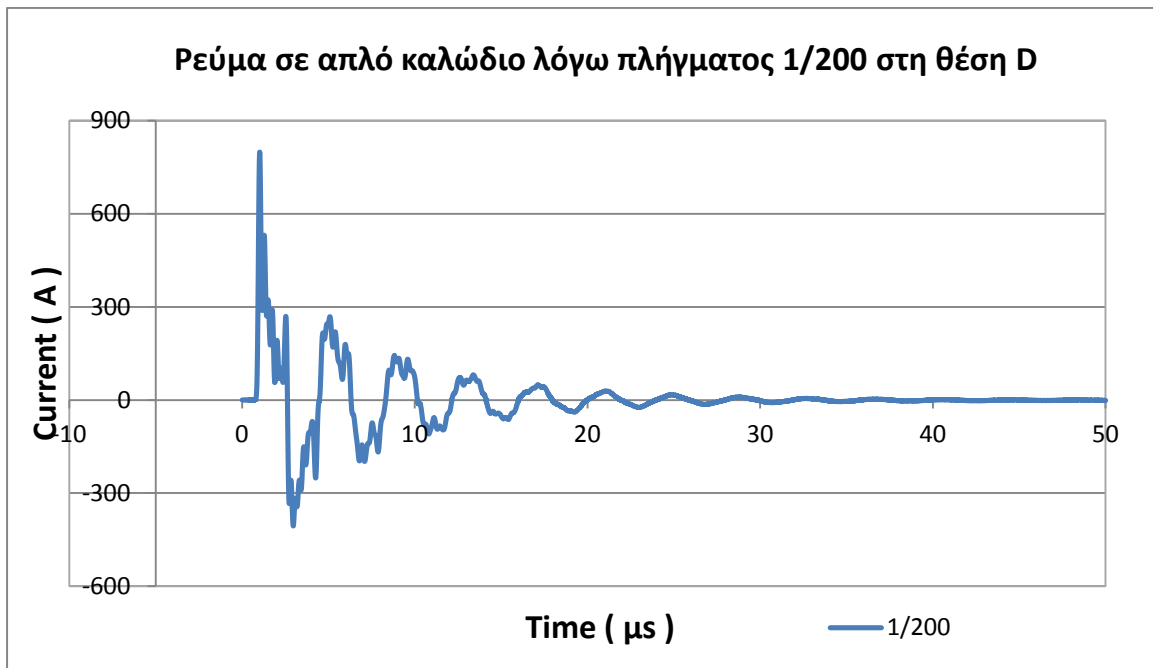
Σχήμα 4.36: Τάση στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 1/200 στη θέση D για χρόνο έως 50 μs. Από τα 50 μs έως τα 350 μs η τάση μειώνεται από τα 50V έως τα 15V.



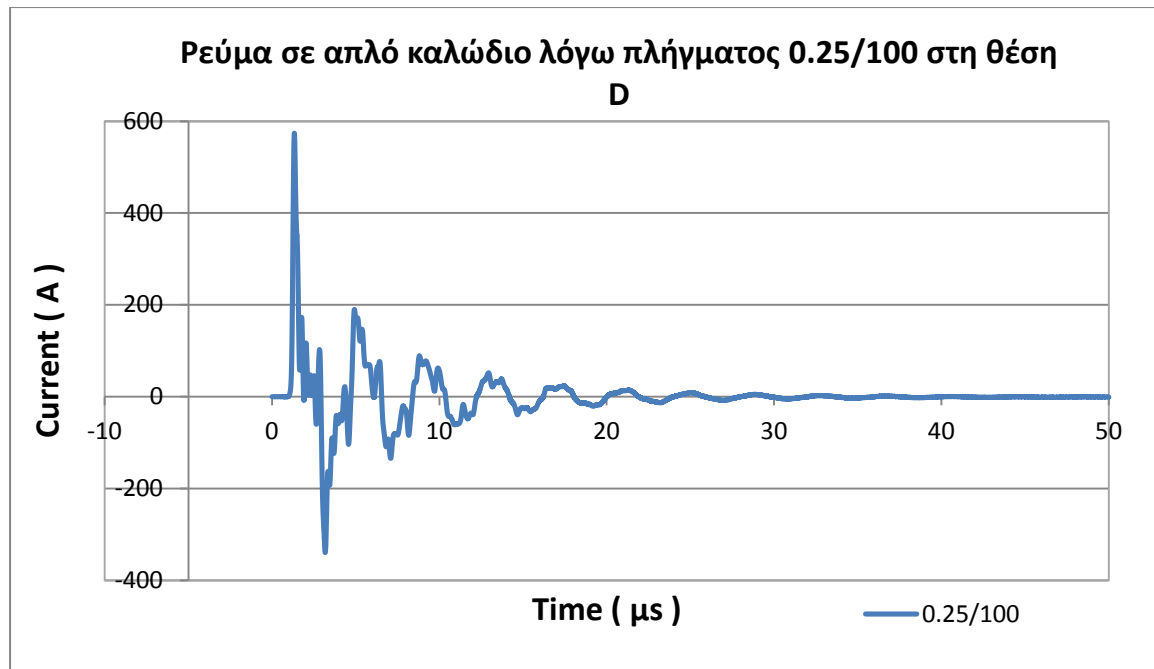
Σχήμα 4.37: Τάση στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 0.25/100 στη θέση D για χρόνο έως 50 μs. Από τα 50 μs έως τα 150 μs η τάση μειώνεται από τα 45V έως τα 10V.



Σχήμα 4.38: Ρεύμα στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 10/350 στη θέση D για χρόνο έως 50 μs . Από τα 50 μs έως τα 600 μs το ρεύμα μειώνεται (κατά απόλυτη τιμή) από 2A σε 0.35A.



Σχήμα 4.39: Ρεύμα στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 1/200 στη θέση D για χρόνο έως 50 μs . Από τα 50 μs έως τα 350 μs το ρεύμα μειώνεται (κατά απόλυτη τιμή) από τα 1.2A έως τα 0.2A.



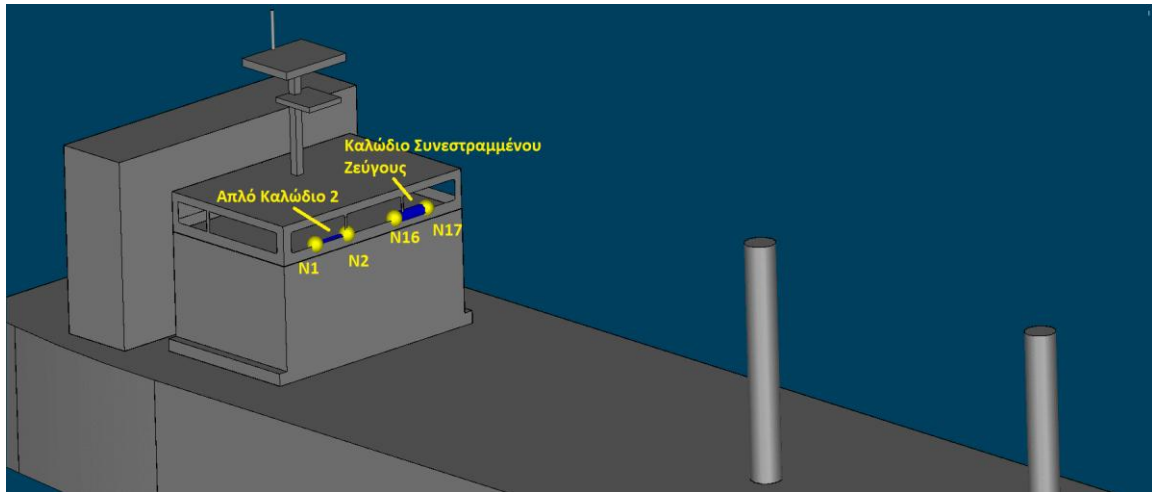
Σχήμα 4.40: Ρεύμα στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7 (ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της Γέφυρας) για πλήγμα 0.25/100 στη θέση D για χρόνο έως 50 μ s. Από τα 50 μ s έως τα 150 μ s το ρεύμα μειώνεται (κατά απόλυτη τιμή) από το 1A έως τα 0.2A.

V_{max} (V) [στον αγωγό του απλού καλωδίου, στο N7]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	1143	5786	4552
B	1318	4655	3733
C	1613	7708	6044
D	10262	39965	28686

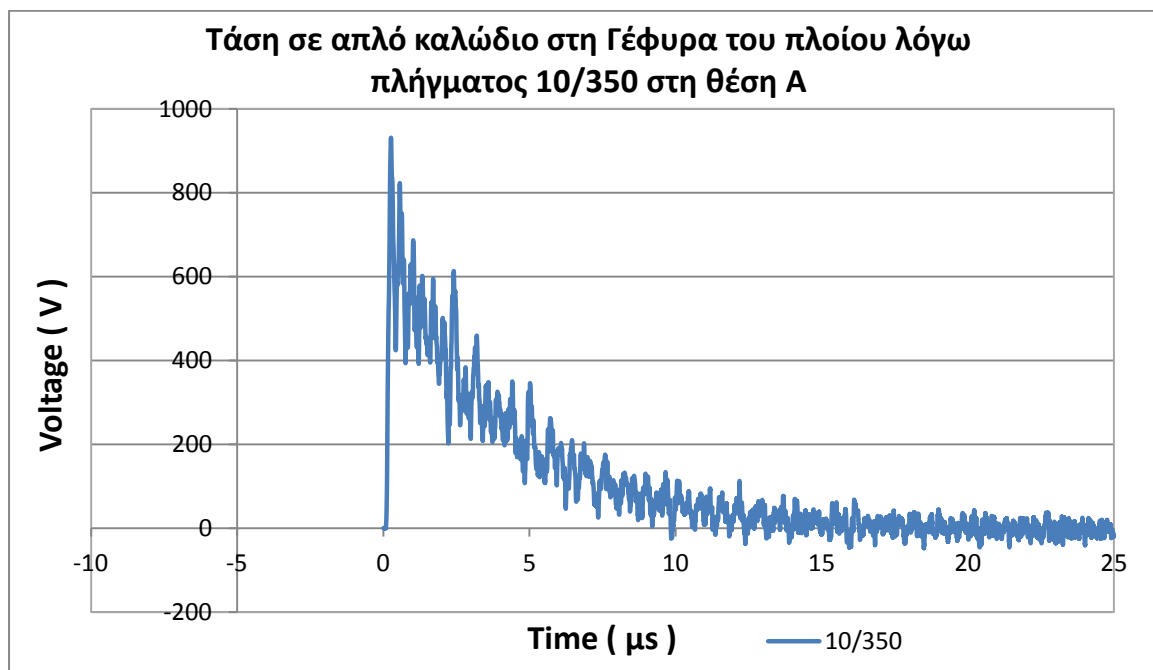
I_{max} (A) [στον αγωγό του απλού καλωδίου, στο N7]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	22.9	115.7	91
B	26.4	93.1	74.7
C	32.3	154.2	120.9
D	205.2	799.3	573.7

Πίνακας 4.12 (αριστερά) & 4.13(δεξιά): Μέγιστη τιμή της τάσης και του ρεύματος, αντίστοιχα, στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N7, για όλες τις εξεταζόμενες κυματομορφές και θέσεις πλήγματος.

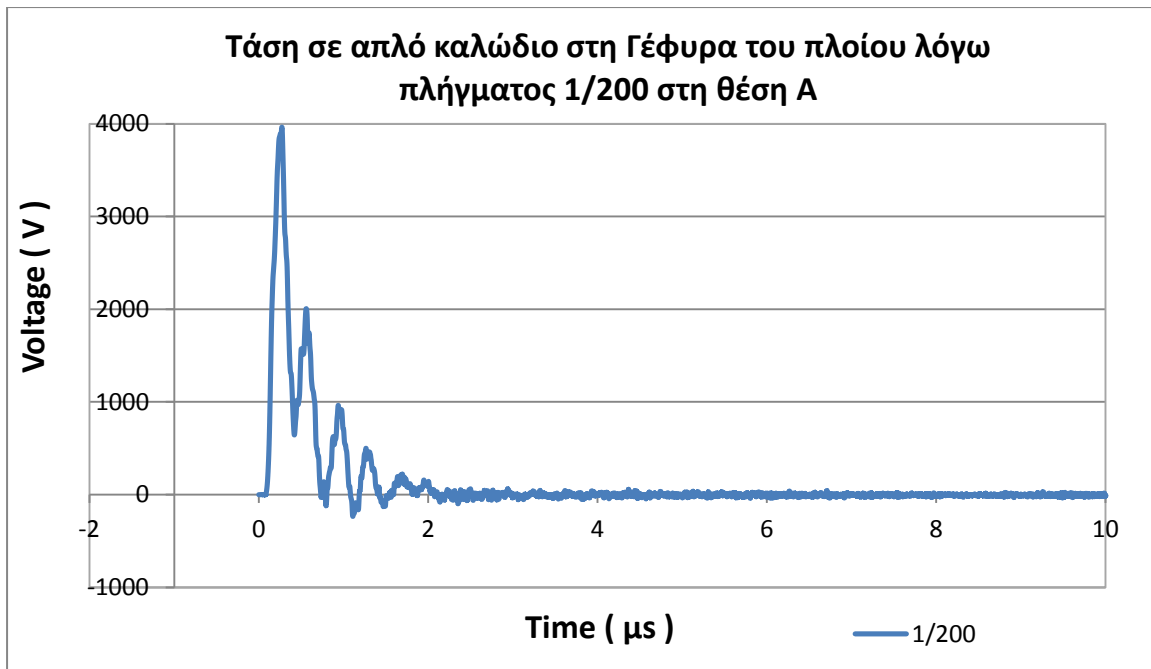
4.6.4.3 Επίδραση κεραυνικών πληγμάτων σε απλό καλώδιο και σε καλώδιο συνεστραμμένου ζεύγους, τα οποία βρίσκονται στη Γέφυρα



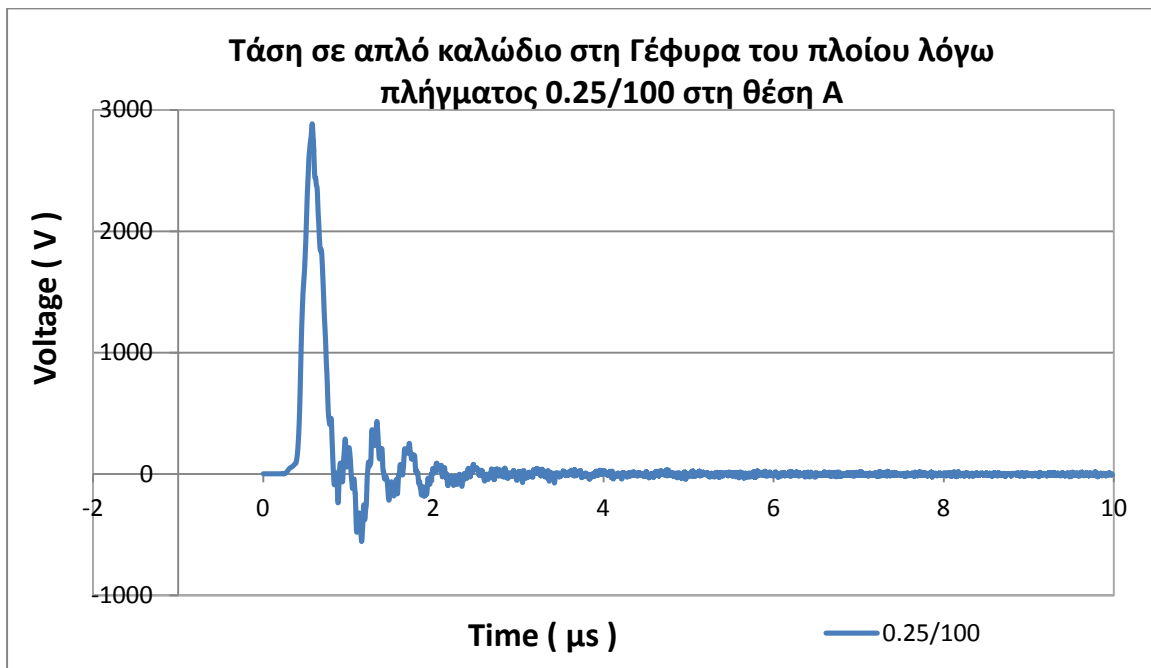
Σχήμα 4.41: Οι θέσεις του Απλού Καλωδίου 2 και του Καλωδίου Συνεστραμμένου Ζεύγους στη Γέφυρα του πλοίου. (Στο παραπάνω σχήμα δε φαίνονται τα παράθυρα)



Σχήμα 4.42: Τάση στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N1, για πλήγμα 10/350 στη θέση A για χρόνο έως 25 μs . Από τα 25 μs έως τα 600 μs η τάση μειώνεται από τα 5V έως το -1V.



Σχήμα 4.43: Τάση στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N1, για πλήγμα 1/200 στη θέση A για χρόνο έως 10 μs. Από τα 10 μs έως τα 350 μs η τάση μειώνεται από τα 10V στο -1V.

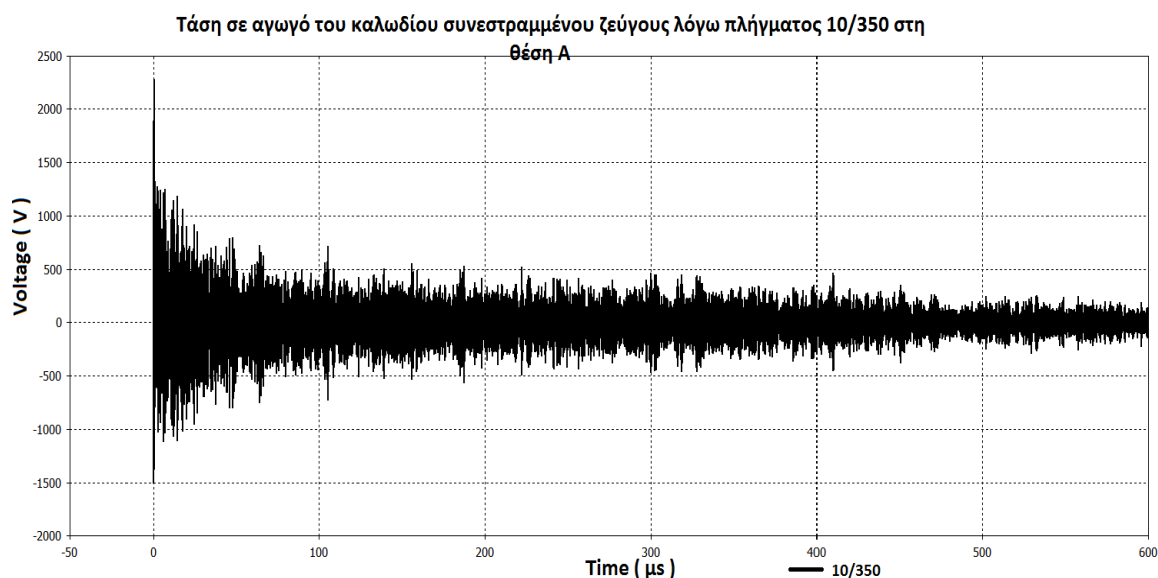


Σχήμα 4.44: Τάση στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N1, για πλήγμα 0.25/100 στη θέση A για χρόνο έως 10 μs. Στα 10μs η τάση έχει τιμή -3V ενώ στα 150μs έχει τιμή -1.64V.

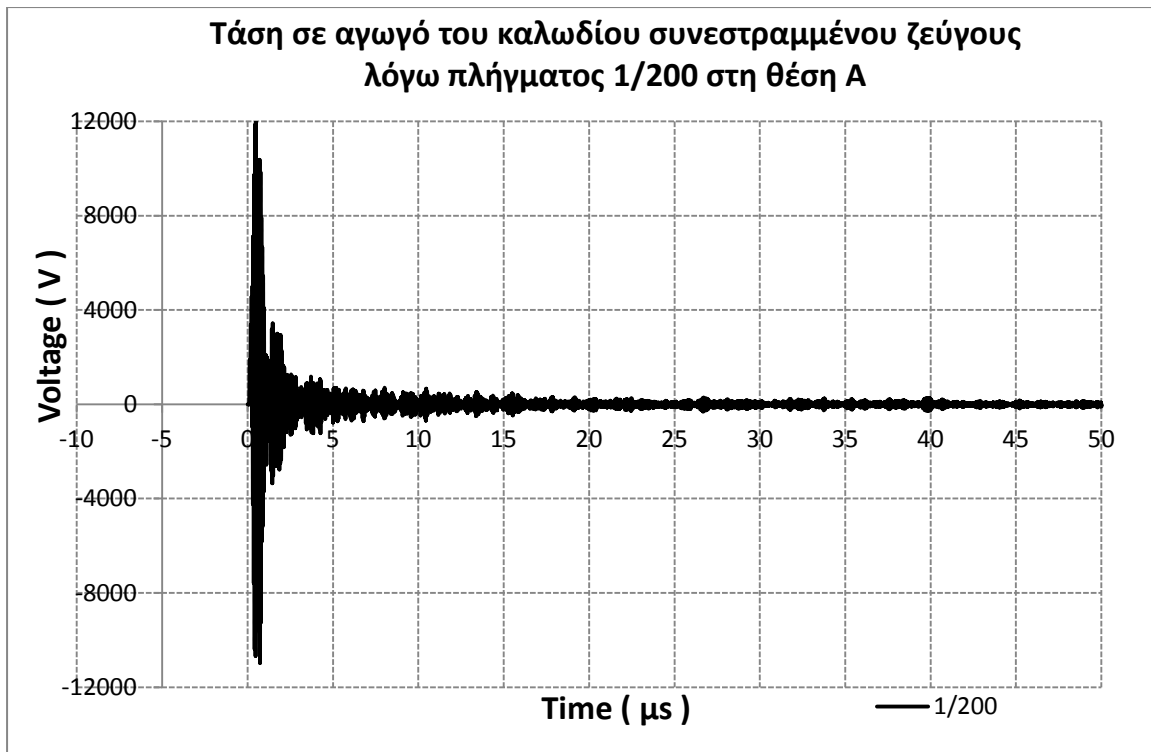
V _{max} (V) [στον αγωγό του απλού καλωδίου, στο N1]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	931	3965	2886
B	286	1153	815
C	292	1201	846
D	114	393	333

Πίνακας 4.14: Μέγιστη τιμή της τάσης (σε απόλυτη τιμή) στον αγωγό του απλού καλωδίου, στον κόμβο N1, για όλα τα είδη και τις θέσεις πλήγματος.

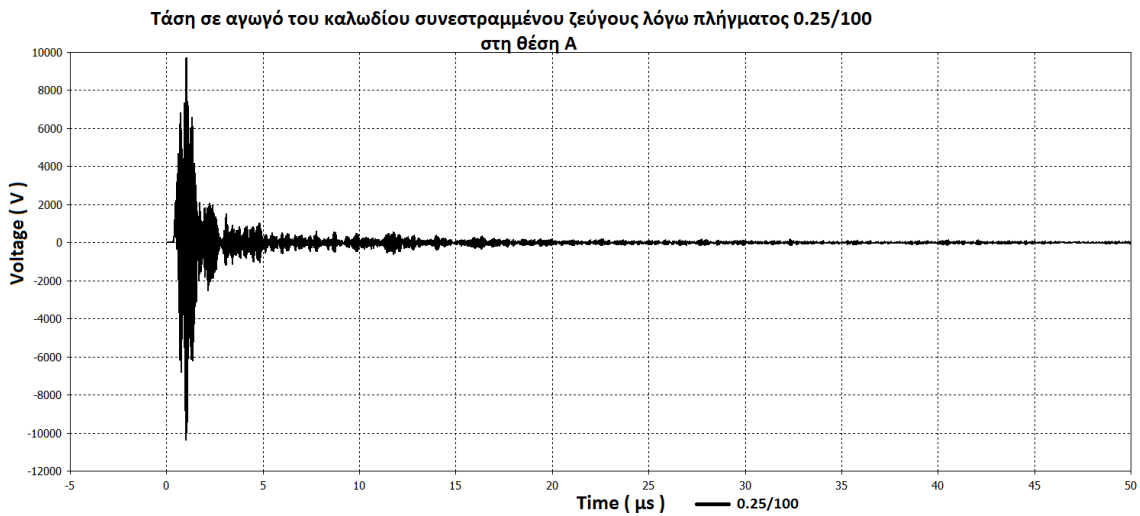
Καλώδιο Συνεστραμμένου Ζεύγους



Σχήμα 4.45: Τάση σε αγωγό του καλωδίου του συνεστραμμένου ζεύγους, στον κόμβο N17 για πλήγμα 10/350 στη θέση A.



Σχήμα 4.46: Τάση σε αγωγό του καλωδίου του συνεστραμμένου ζεύγους, στον κόμβο N17 για πλήγμα 1/200 στη θέση A. Από τα 50 μs έως τα 350 μs τάση κυμαίνεται στα -2V.



Σχήμα 4.47: Τάση σε αγωγό του καλωδίου του συνεστραμμένου ζεύγους, στον κόμβο N17 για πλήγμα 0.25/100 στη θέση A.

V_{max} (V) [σε αγωγό του συνεστραμμένου ζεύγους, στο N17]			
	10/350	1/200	0.25/100
A	2281	12084	10376
B	1181	3412	1382
C	1052	4126	1947
D	1127	1398	964

Πίνακας 4.15: Μέγιστη τιμή της τάσης (σε απόλυτη τιμή) σε αγωγό του συνεστραμμένου ζεύγους, στον κόμβο N17, για όλα τα είδη και τις θέσεις πλήγματος.

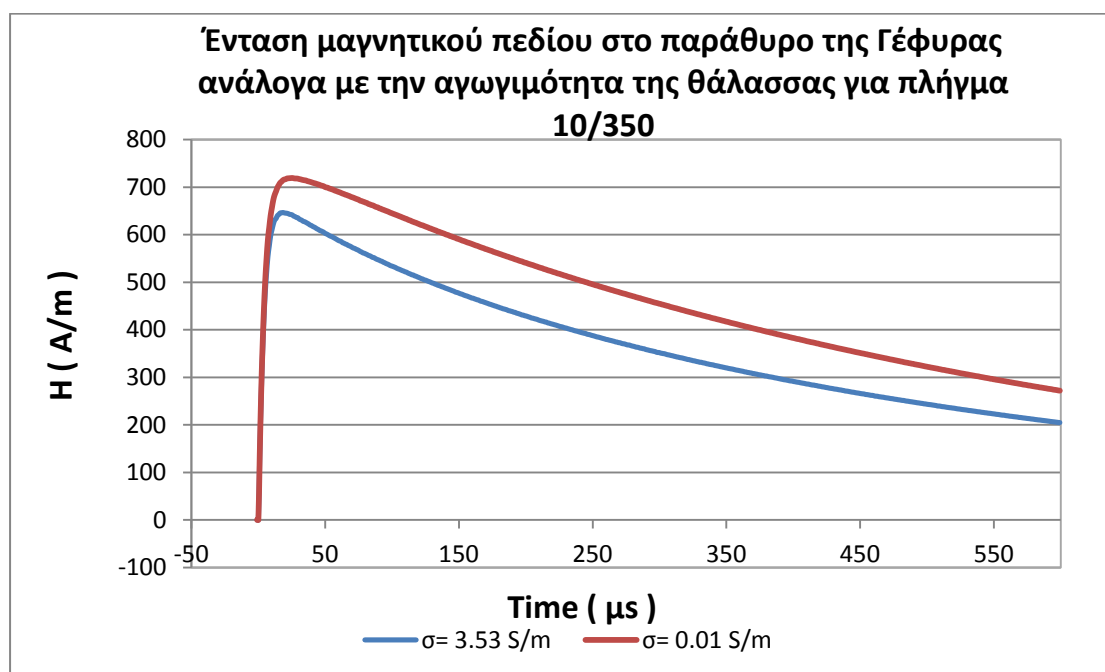
4.6.5 Επίδραση της αγωγιμότητας του νερού στις επιπτώσεις της κεραυνοπληξίας πλοίου

Η αγωγιμότητα του νερού εξαρτάται από τη θερμοκρασία αλλά και την παρουσία ιόντων. Στον Πίνακα 4.15 φαίνονται ενδεικτικές τιμές για την αγωγιμότητα του νερού.

Τύπος νερού	Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (S/m)
Νερό ωκεανών	2 -10
Υπόγεια ύδατα	0.0067 - 0.1
Λίμνες και ποτάμια	0.0025 - 0.01
Νερό βροχής	7.69×10^{-4} - 0.00125
Αποσταγμένο νερό	0.00025 - 0.001
Νερό θαλασσών	5
Πόσιμο Νερό	0.005 - 0.05

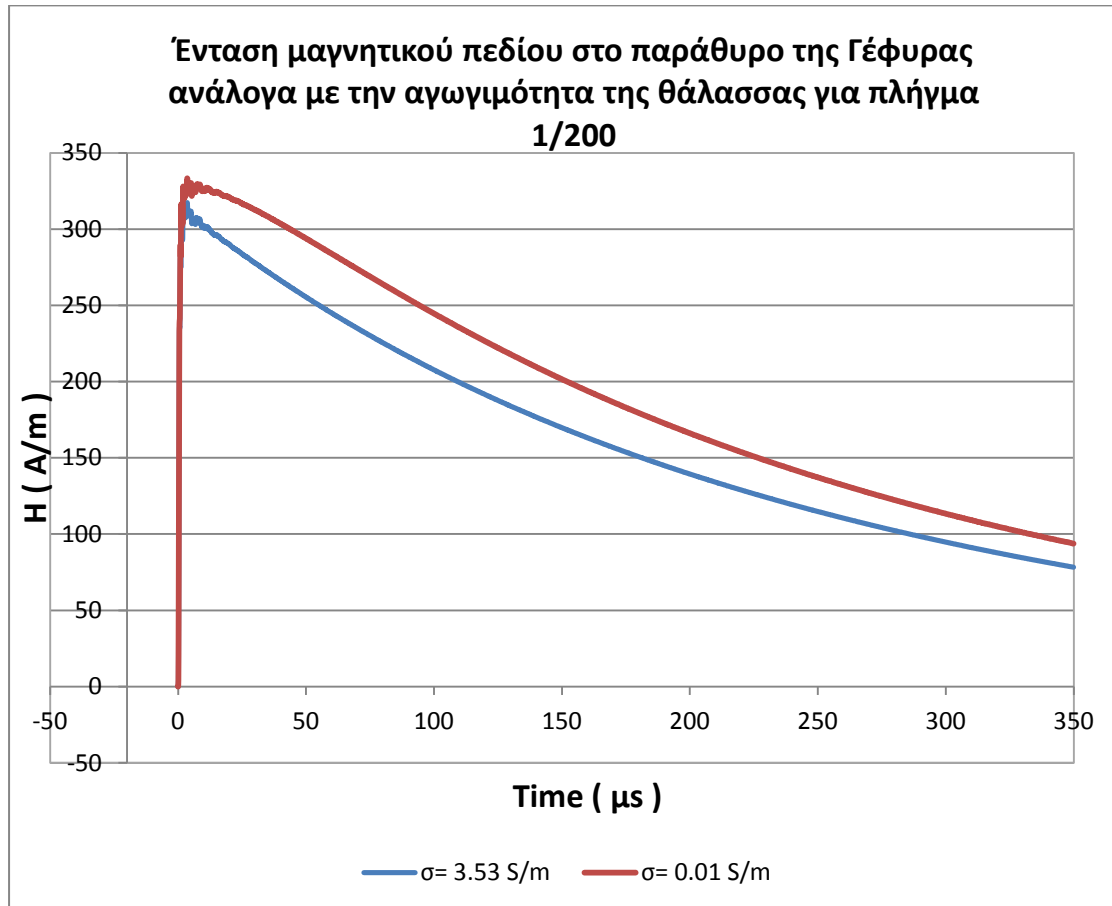
Πίνακας 4.16: Τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας για διάφορους τύπους νερού [11].

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες αφορούσαν αγωγιμότητα νερού 3.53 S/m. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν συγκριτικά αποτελέσματα για αγωγιμότητα νερού 0.01 S/m. Η σύγκριση αφορά πλήγμα στη θέση A και για τις τρεις κυματομορφές. Η θέση A επιλέχθηκε αφού η κεραία είναι η πιθανότερη θέση πλήγματος, διότι είναι το υψηλότερο σημείο του μοντέλου.



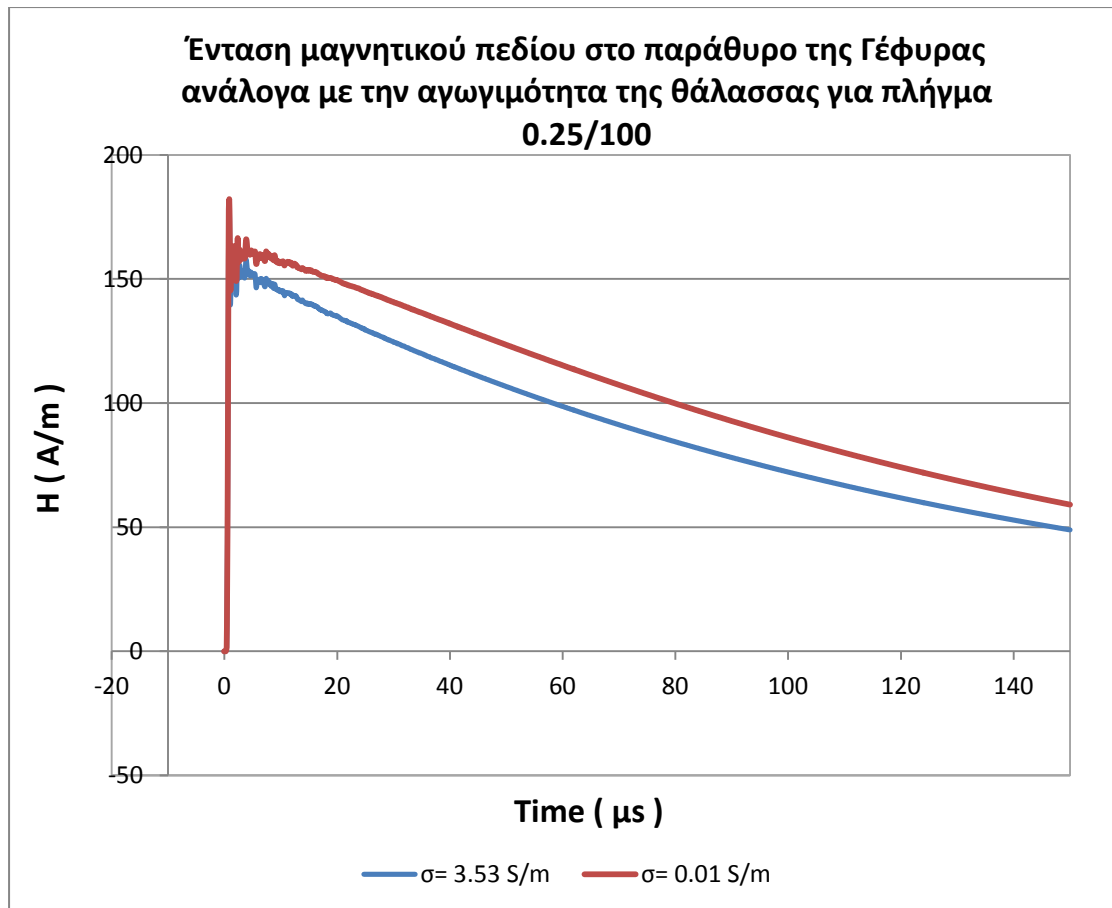
Σχήμα 4.48: Ένταση μαγνητικού πεδίου στο παράθυρο της Γέφυρας για δύο τιμές αγωγιμοτήτων νερού για πλήγμα 10/350.

Επίσης, οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζονται αυξημένες για $\sigma = 0.01$ S/m, αφού η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο παράθυρο της Γέφυρας είναι 475750 V/m αντί 473920 V/m (για $\sigma = 3.53$ S/m)



Σχήμα 4.49: Ένταση μαγνητικού πεδίου στο παράθυρο της Γέφυρας για δύο τιμές αγωγιμοτήτων νερού για πλήγμα 1/200.

Αντίστοιχα, για τη μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στη συγκεκριμένη θέση, παρατηρούμε μια μικρή αύξηση από 224230 V/m (για $\sigma = 3.53$ S/m) σε 227170 V/m (για $\sigma = 0.01$ S/m).

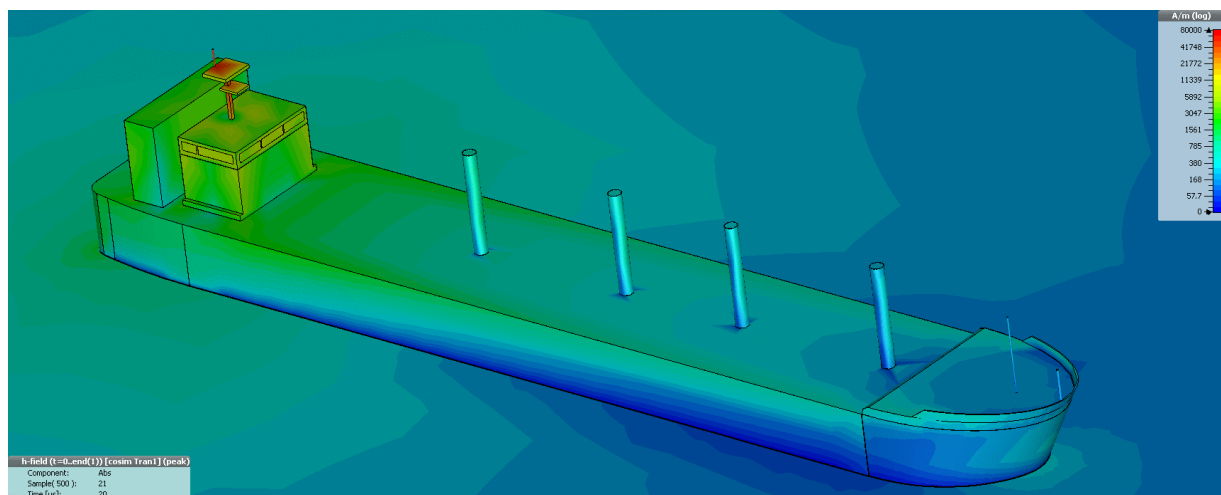


Σχήμα 4.50: Ένταση μαγνητικού πεδίου στο παράθυρο της Γέφυρας για δύο τιμές αγωγιμοτήτων νερού για πλήγμα 0.25/100.

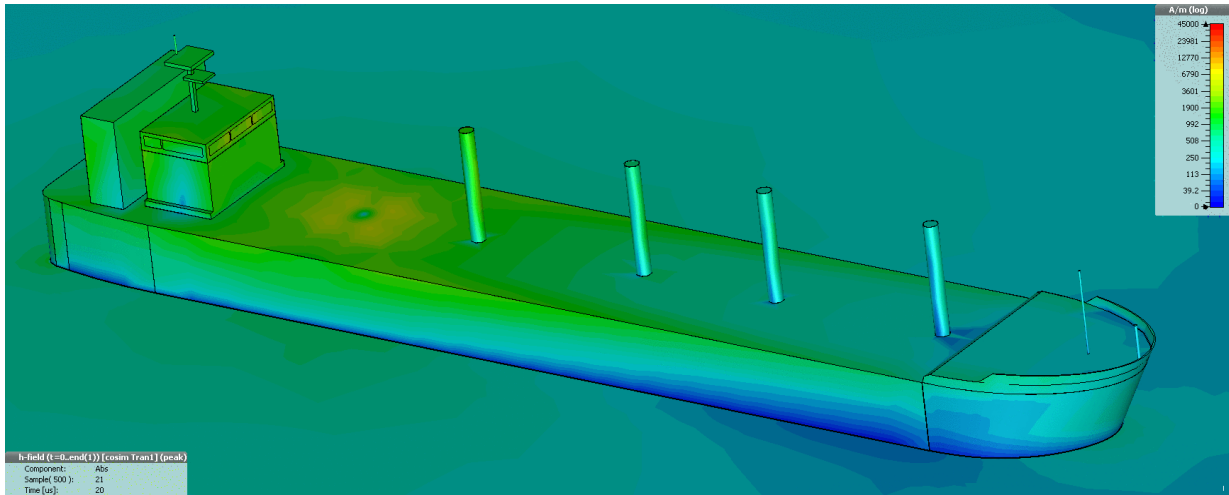
Για τη μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στη συγκεκριμένη θέση, παρατηρούμε μια μικρή αύξηση από 140720 V/m (για $\sigma = 3.53 \text{ S/m}$) σε 142530 V/m (για $\sigma = 0.01 \text{ S/m}$).

4.6.6 Παρουσίαση αποτελεσμάτων από την τρισδιάστατη απεικόνιση των πεδίων στην επιφάνεια του μοντέλου

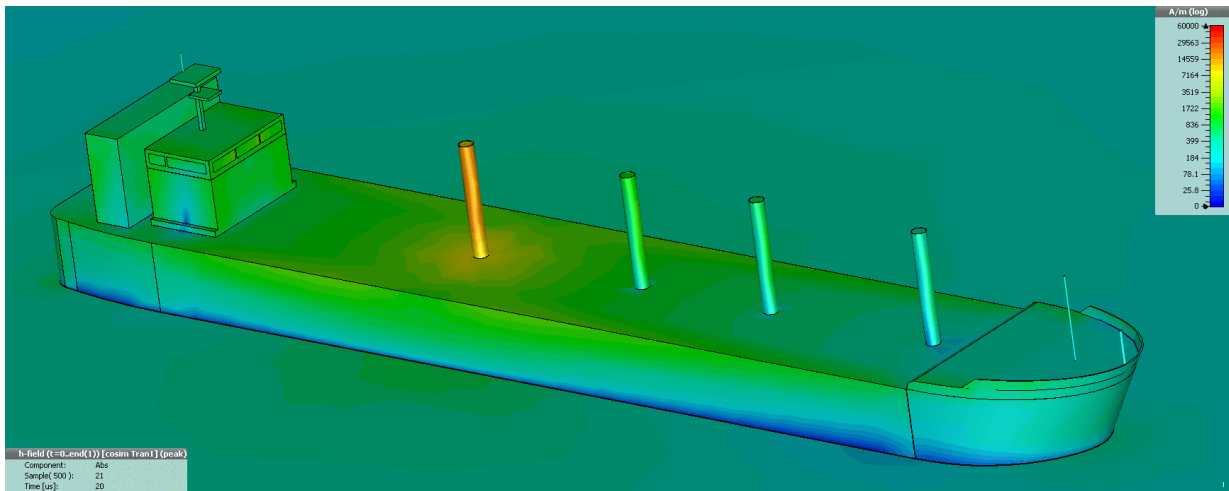
Στην ενότητα αυτή θα περιγραφούν τα αποτελέσματα από την καταγραφή του ηλεκτρικού πεδίου, του μαγνητικού πεδίου και του επιφανειακού ρεύματος στις τρεις διαστάσεις. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται *Field Monitors* και συγκεκριμένα *E-field Monitor* (για το ηλεκτρικό πεδίο) και *H-field and Surface current* (για μαγνητικό πεδίο και επιφανειακό ρεύμα). Το χρονικό βήμα για την καταγραφή και απεικόνιση του πεδίου μπορεί να οριστεί από το χρήστη. Συνεπώς, για την κυματομορφή 10/350 ορίζεται χρονικό βήμα 1μs, ενώ για τις κυματομορφές 1/200 και 0.25/100 επιλέγεται αρχικά ένα μικρότερο βήμα για την καλύτερη καταγραφή και απεικόνιση του ταχέως μεταβαλλόμενου τμήματος (έως 2μs) και έπειτα χρησιμοποιείται βήμα 1μs για το υπόλοιπο τμήμα. Παρακάτω δίνονται στιγμιότυπα από το ηλεκτρικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο και το επιφανειακό ρεύμα τη χρονική στιγμή που το κεραυνικό ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (δηλαδή για $t=20\mu\text{s}$ για την 10/350, $t=2\mu\text{s}$ για την 1/200 και $t=0.9\mu\text{s}$ για την 0.25/100).



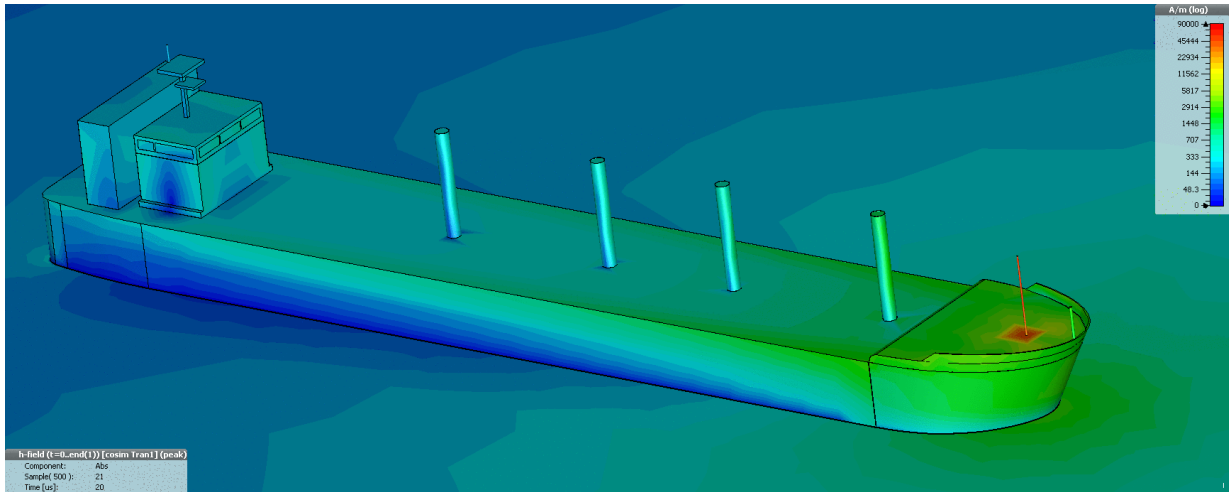
Σχήμα 4.51: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 87170 A/m.



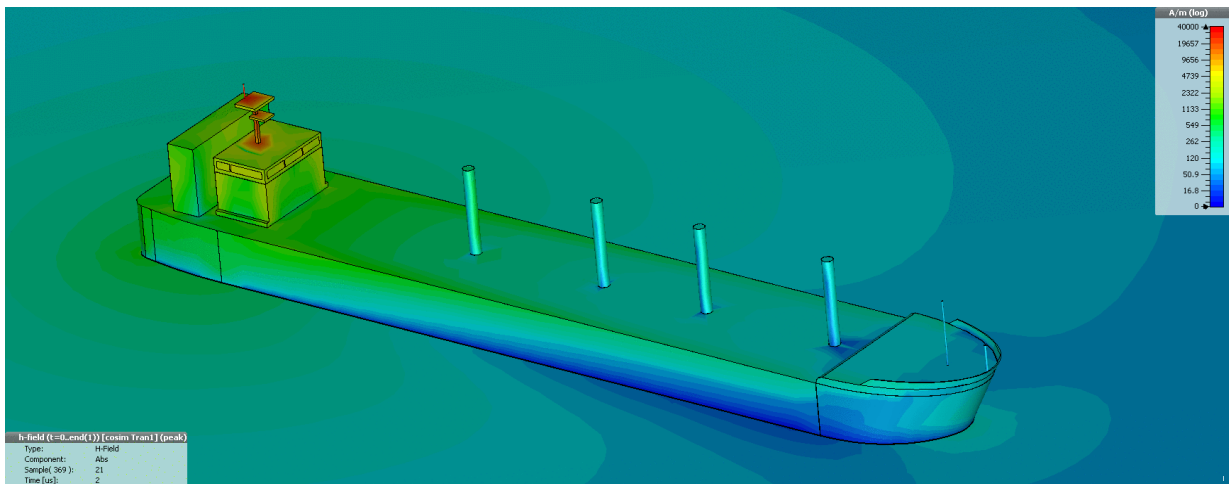
Σχήμα 4.52: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 45330 A/m.



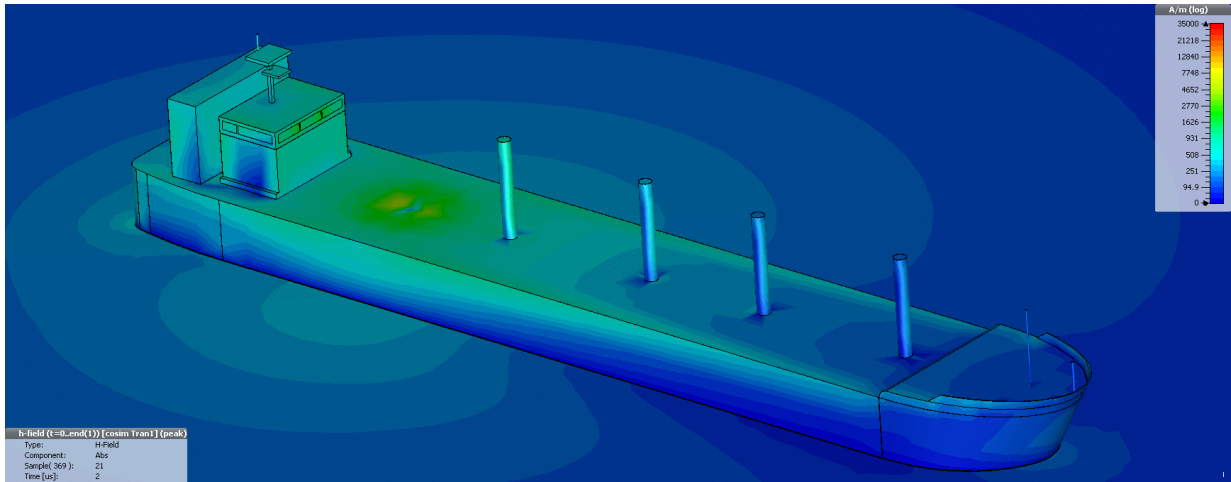
Σχήμα 4.53: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 10/350, στη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 62690 A/m.



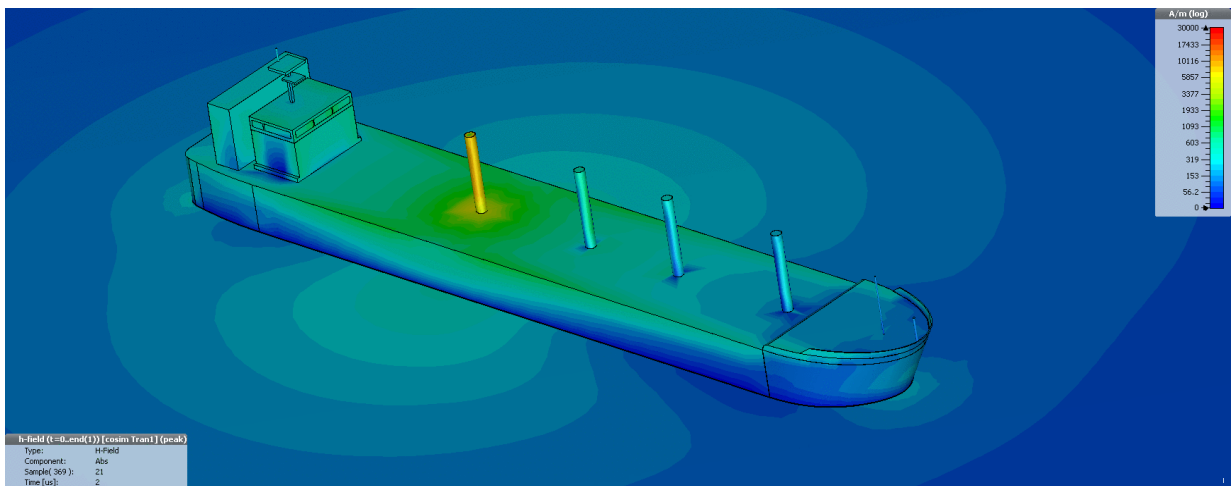
Σχήμα 4.54: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 91090 A/m.



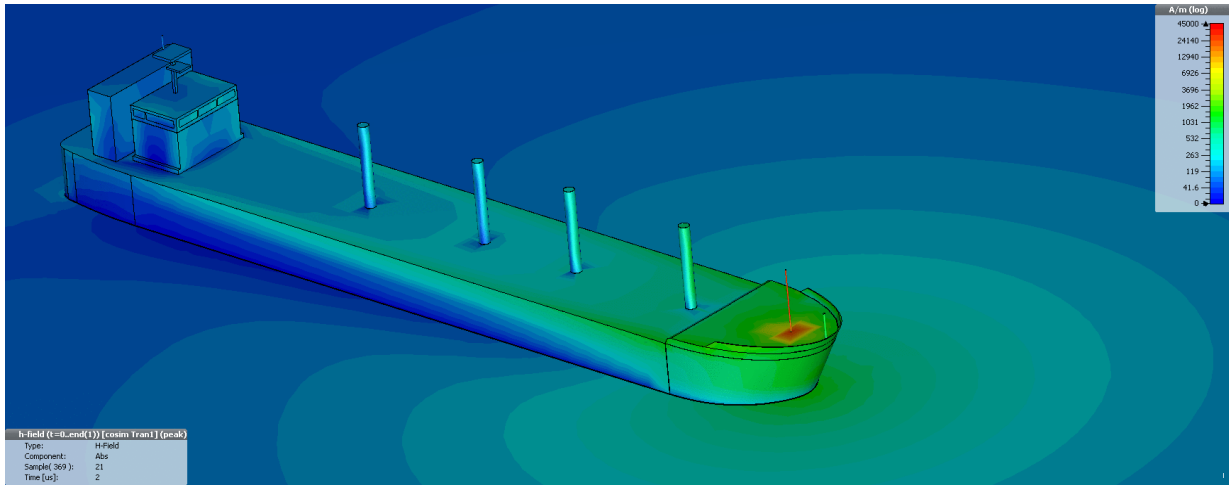
Σχήμα 4.55: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 43350 A/m.



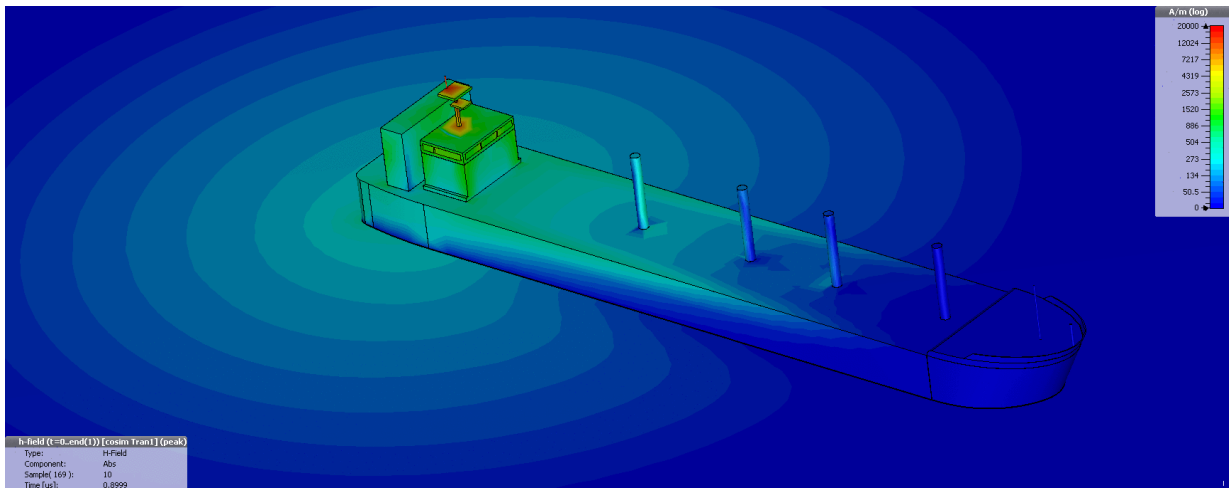
Σχήμα 4.56: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 36040 A/m.



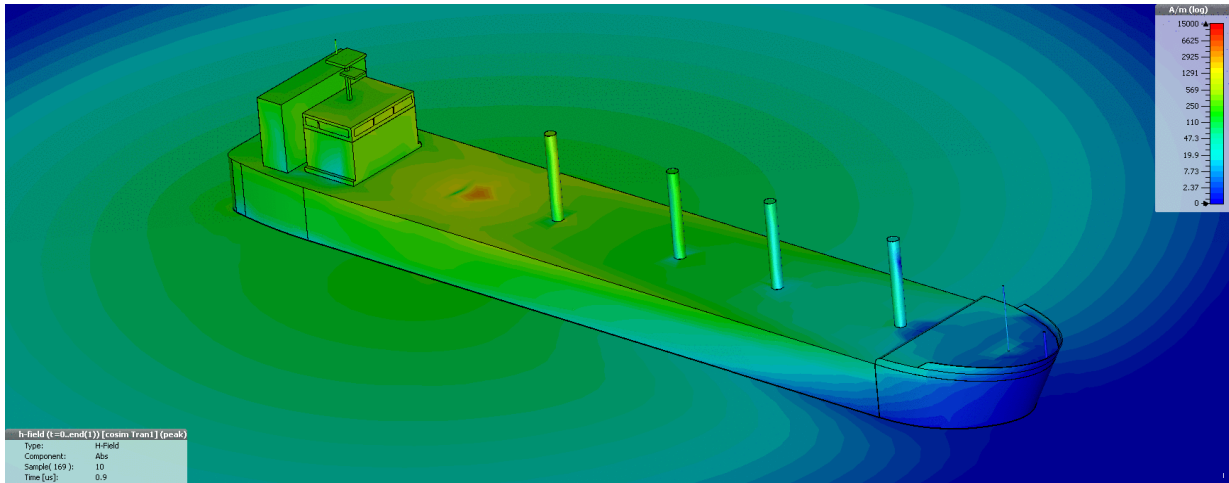
Σχήμα 4.57: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 32110 A/m.



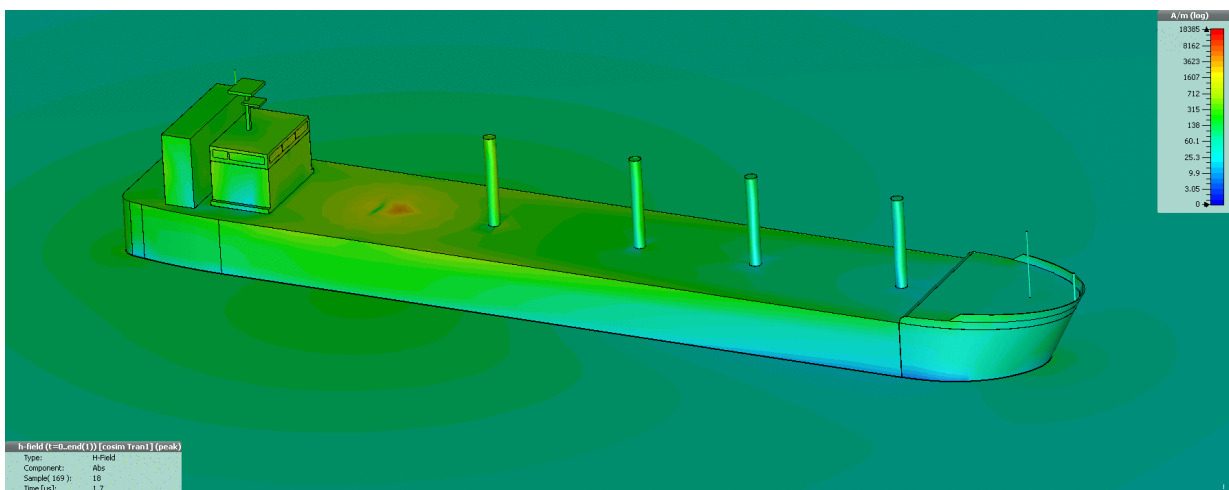
Σχήμα 4.58: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα $1/200$, τη χρονική στιγμή $2\mu\text{s}$. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 46700 A/m .



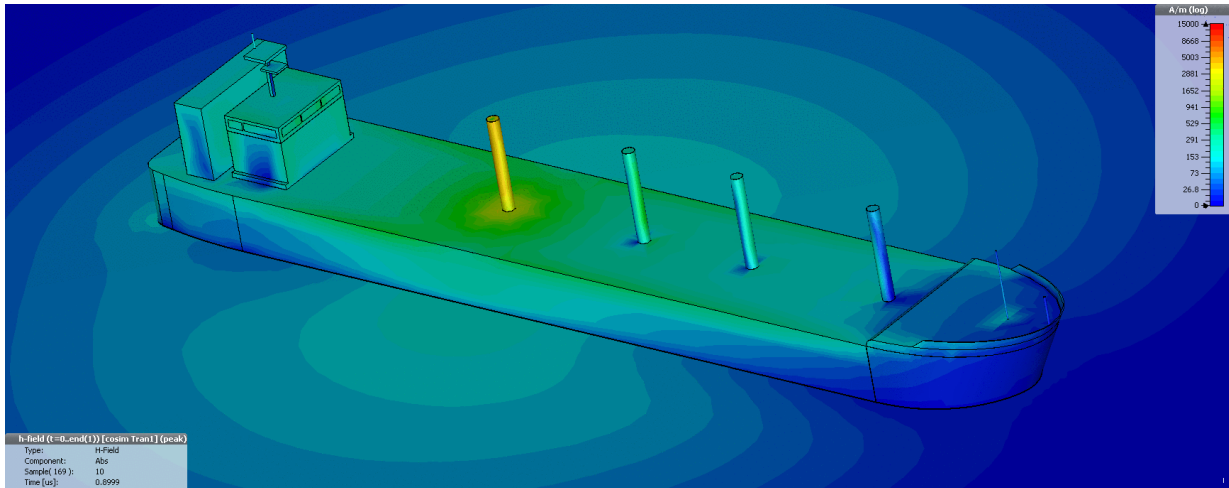
Σχήμα 4.59: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα $0.25/100$, τη χρονική στιγμή $0.9\mu\text{s}$. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 21650 A/m .



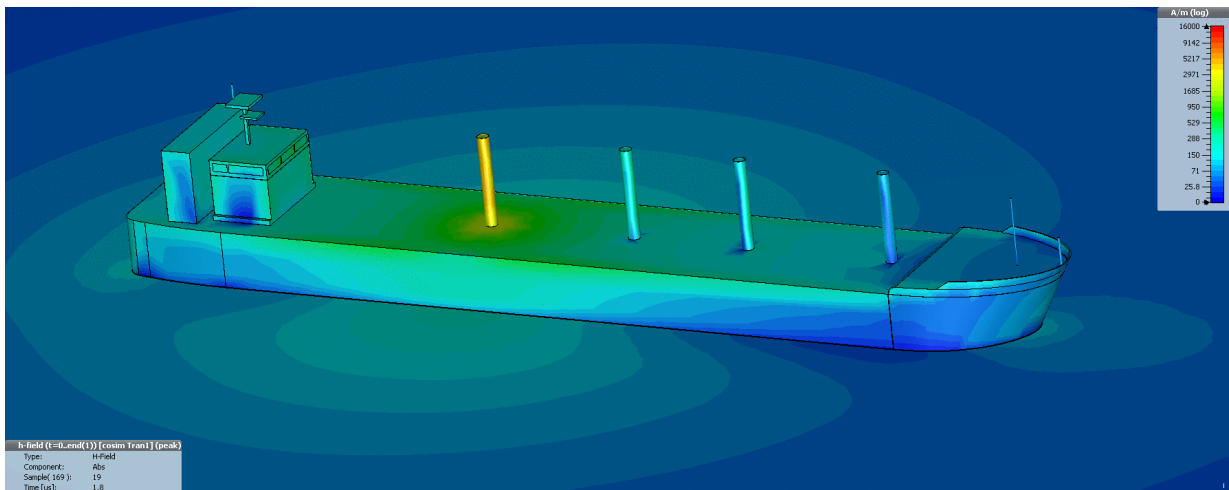
Σχήμα 4.60: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται αυτή τη χρονική στιγμή είναι 17670 A/m.



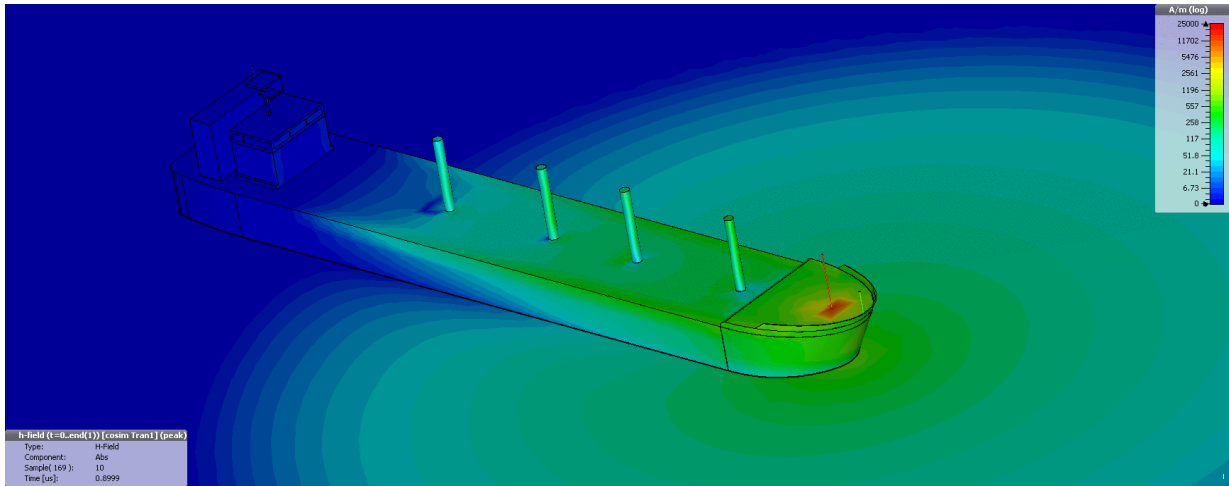
Σχήμα 4.61: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 1.7μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται αυτή τη χρονική στιγμή είναι 18385 A/m και είναι η μέγιστη που παρατηρείται σε όλο το χρονικό διάστημα μέχρι τα 150 μs.



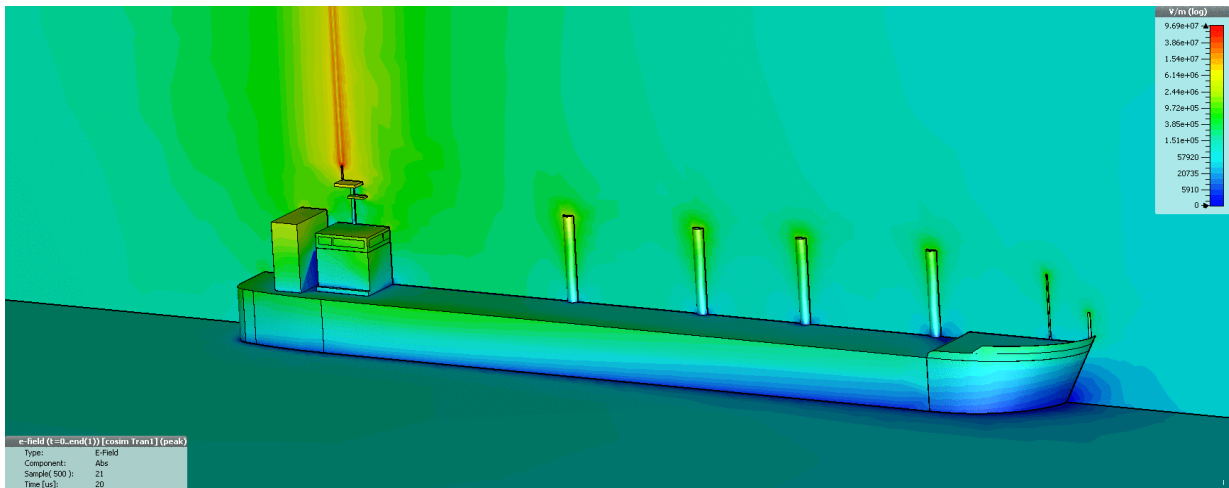
Σχήμα 4.62: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται αυτή τη χρονική στιγμή είναι 15740 A/m.



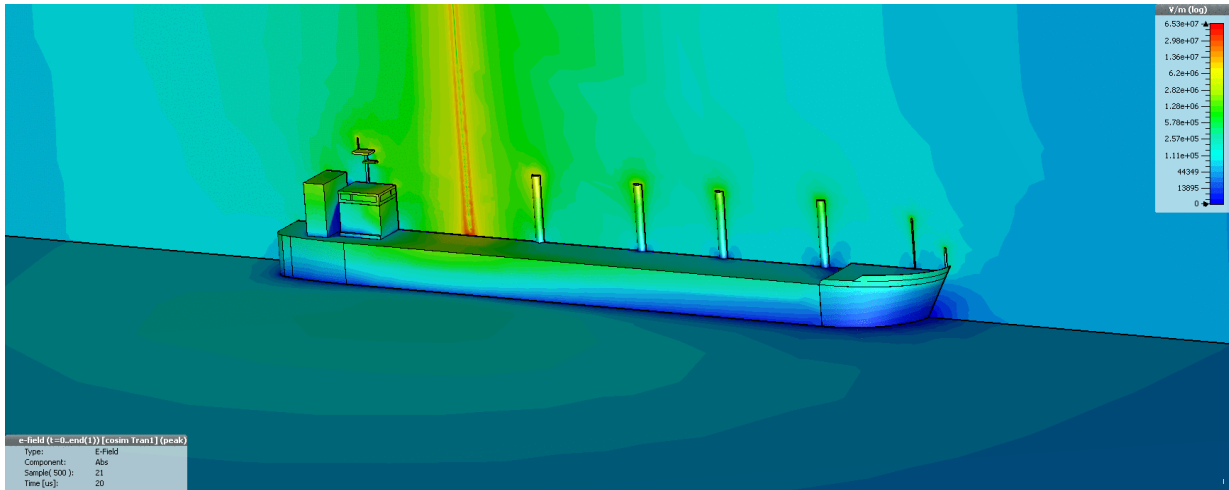
Σχήμα 4.63: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 1.8μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται αυτή τη χρονική στιγμή είναι 16190 A/m και είναι η μέγιστη που παρατηρείται σε όλο το χρονικό διάστημα μέχρι τα 150 μs.



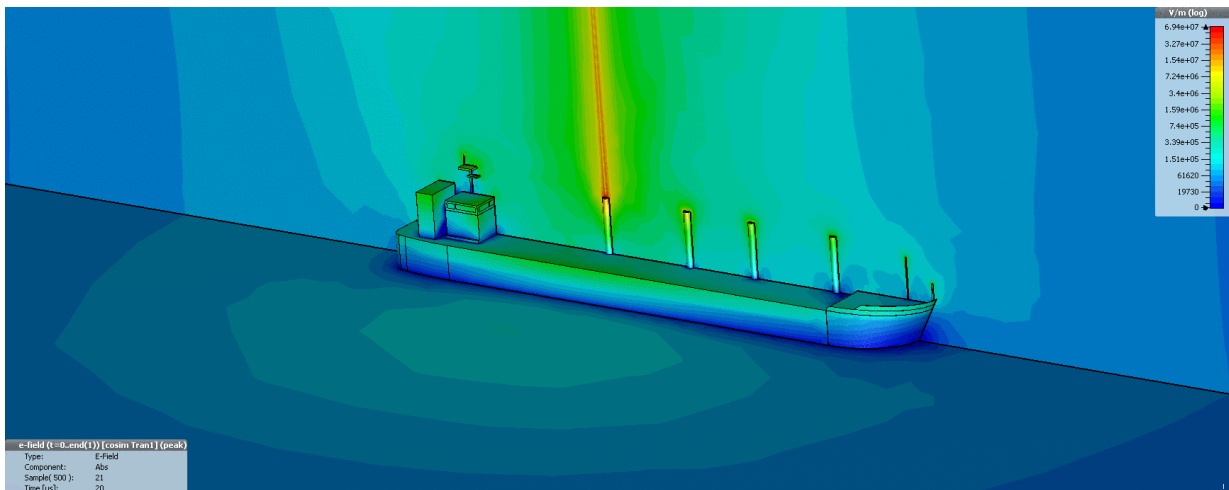
Σχήμα 4.64: Τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι 25120 A/m.



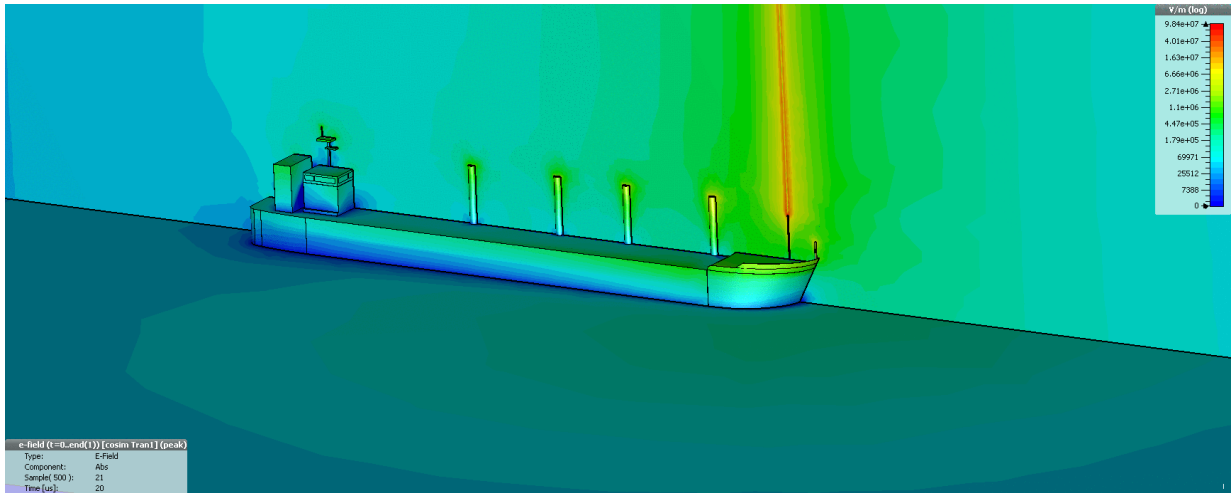
Σχήμα 4.65: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $96.88 \cdot 10^6$ V/m.



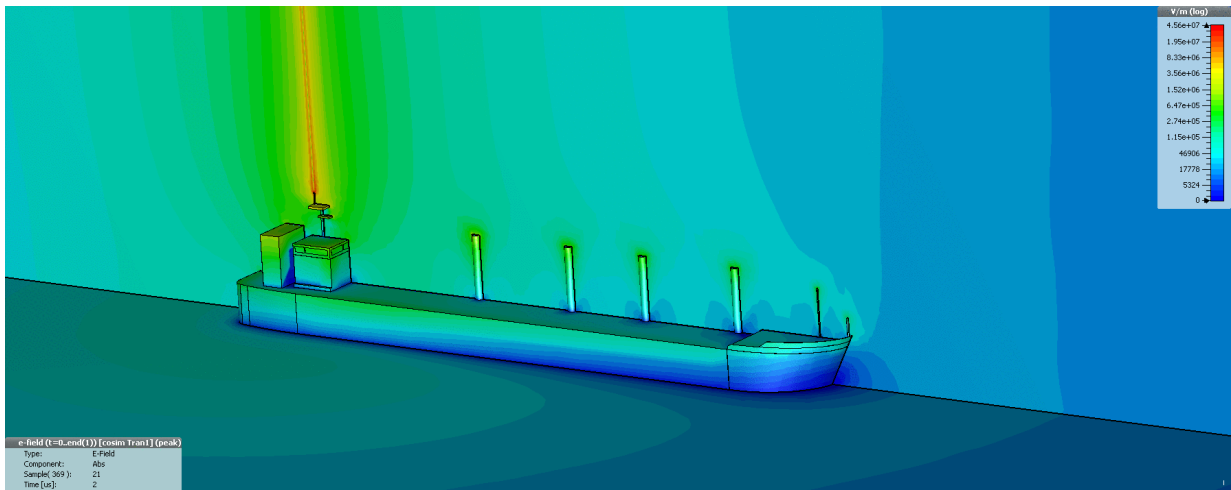
Σχήμα 4.66: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $65.34 \cdot 10^6$ V/m.



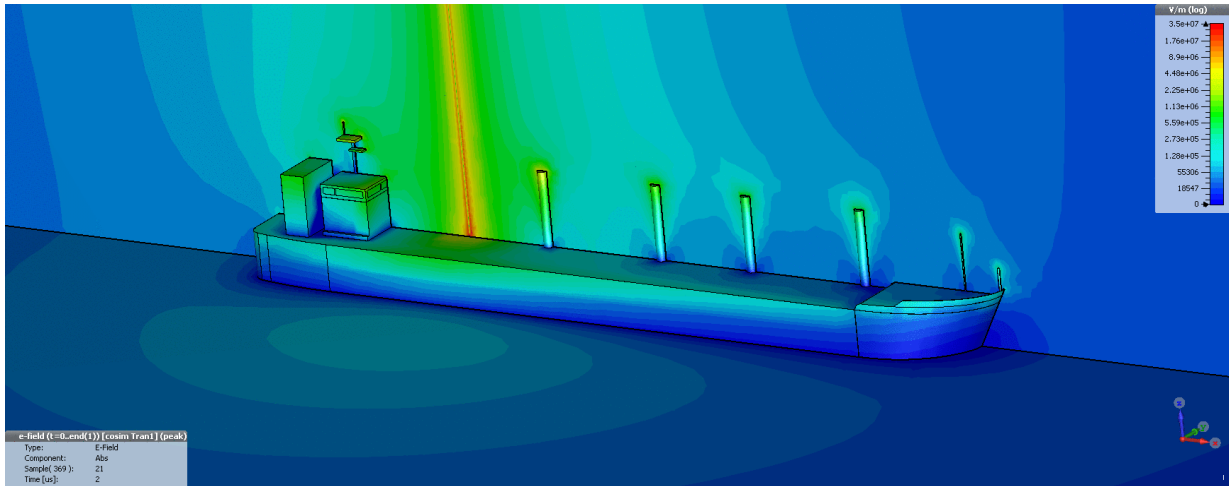
Σχήμα 4.67: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $69.4 \cdot 10^6$ V/m.



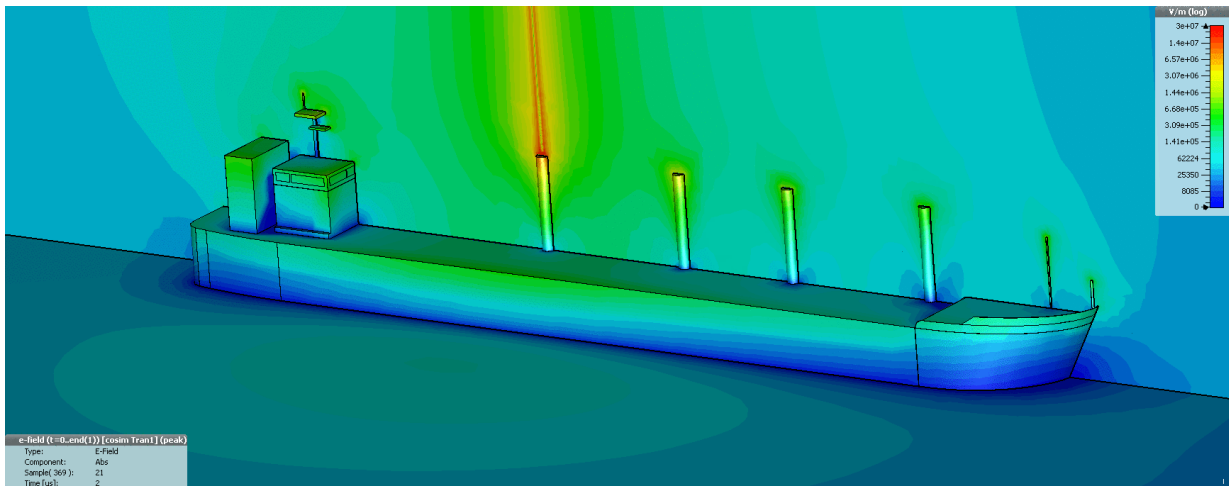
Σχήμα 4.68: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $98.41 \cdot 10^6$ V/m.



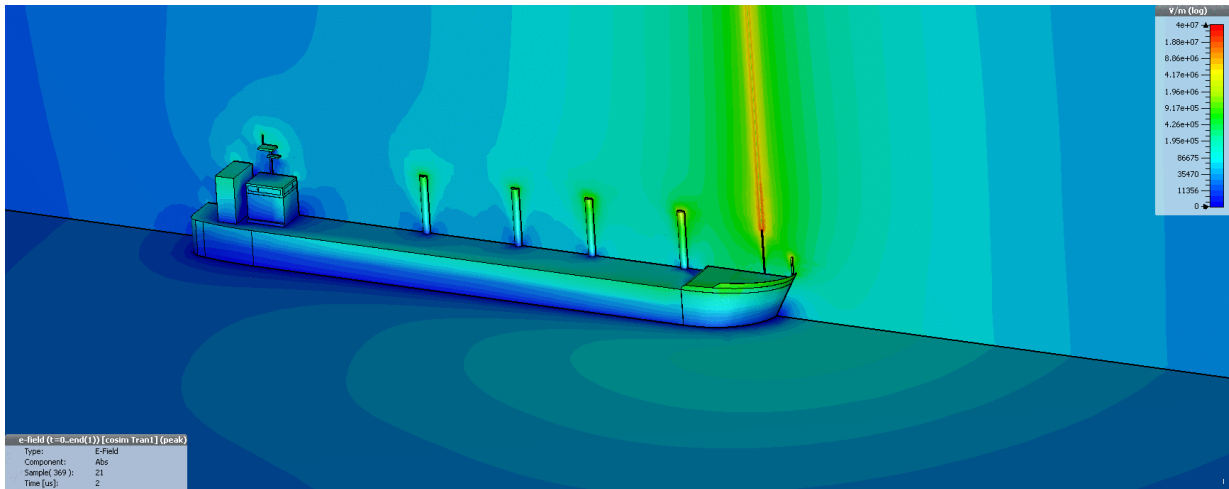
Σχήμα 4.69: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $46.37 \cdot 10^6$ V/m.



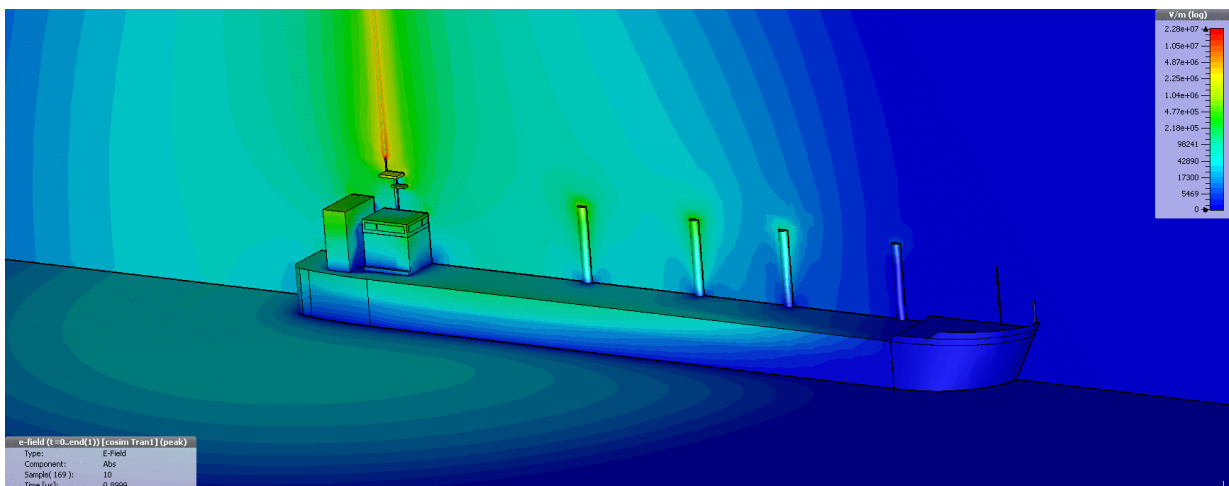
Σχήμα 4.70: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $38.93 \cdot 10^6$ V/m.



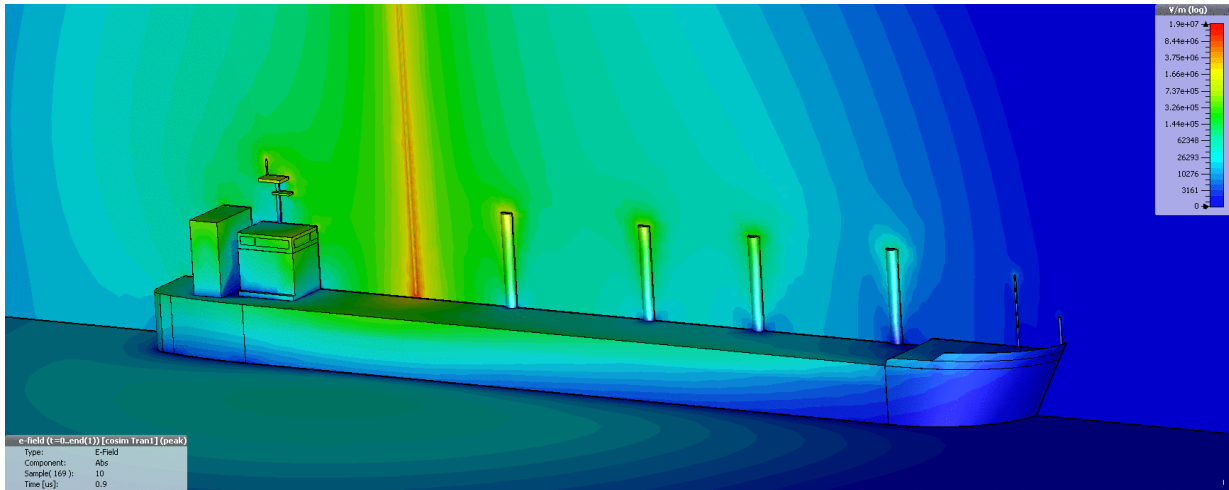
Σχήμα 4.71: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $31.62 \cdot 10^6$ V/m.



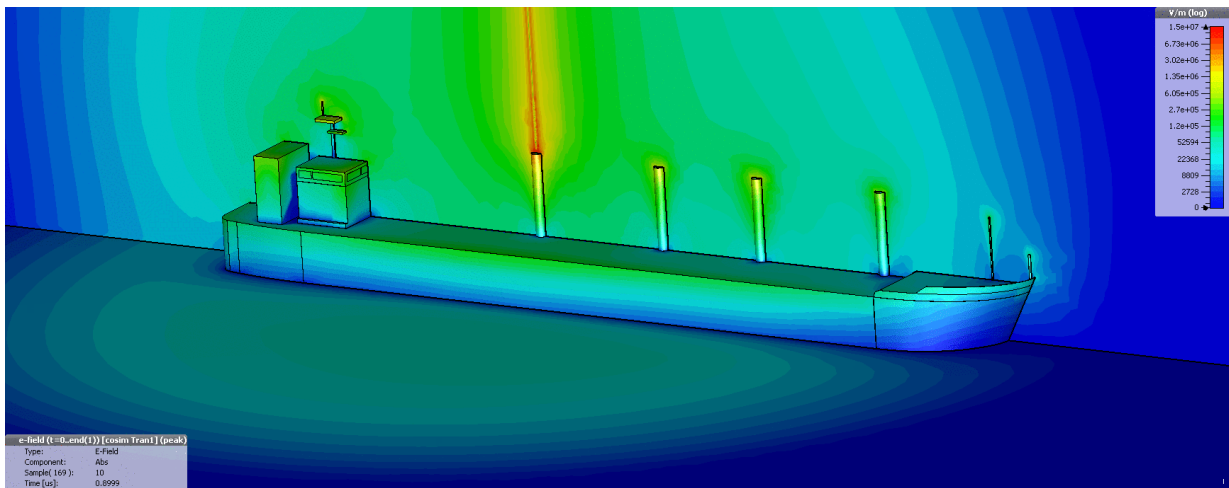
Σχήμα 4.72: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $45.37 \cdot 10^6$ V/m.



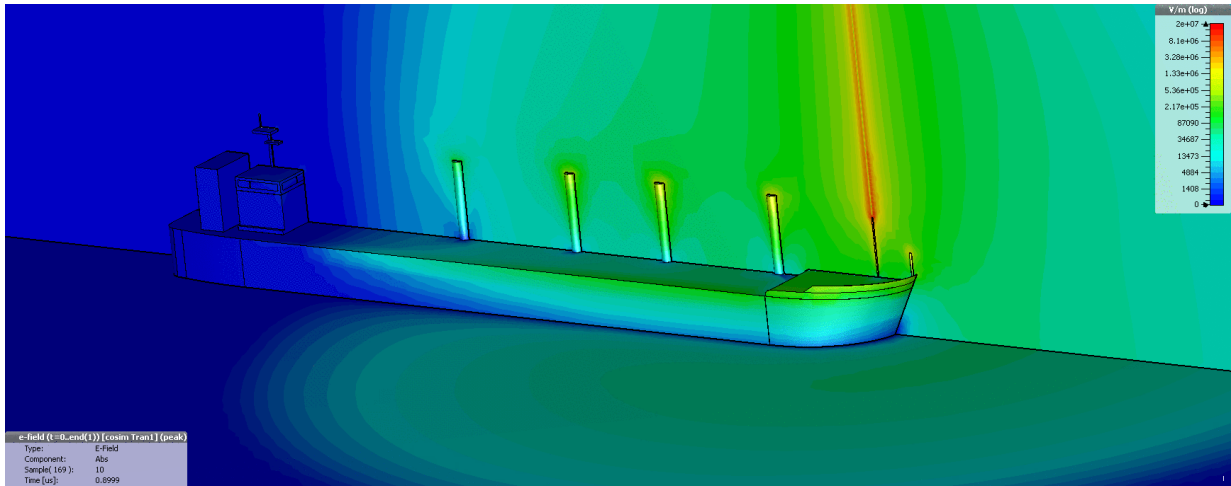
Σχήμα 4.73: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $22.3 \cdot 10^6$ V/m.



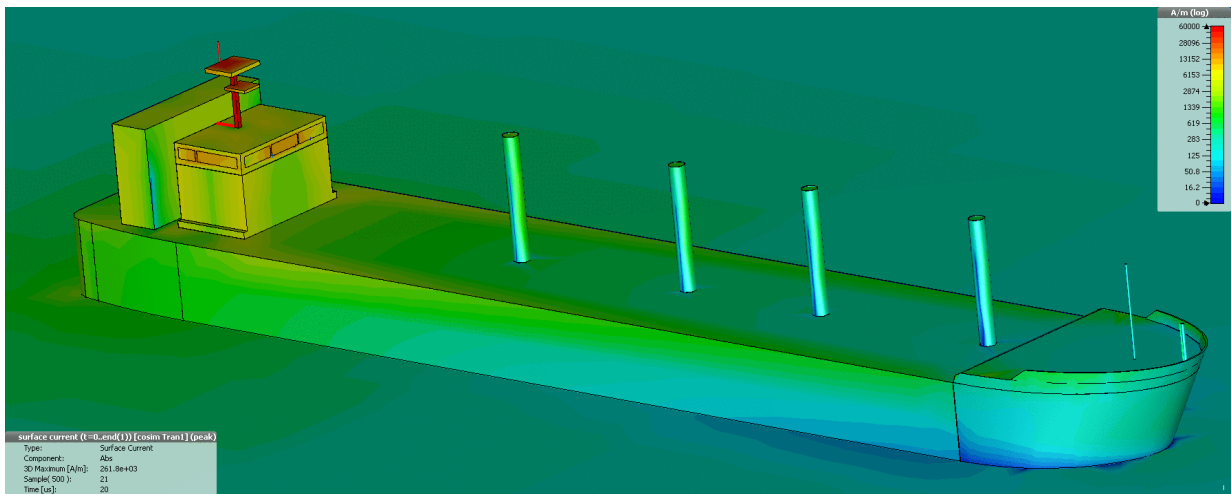
Σχήμα 4.74: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $19.02 \cdot 10^6$ V/m.



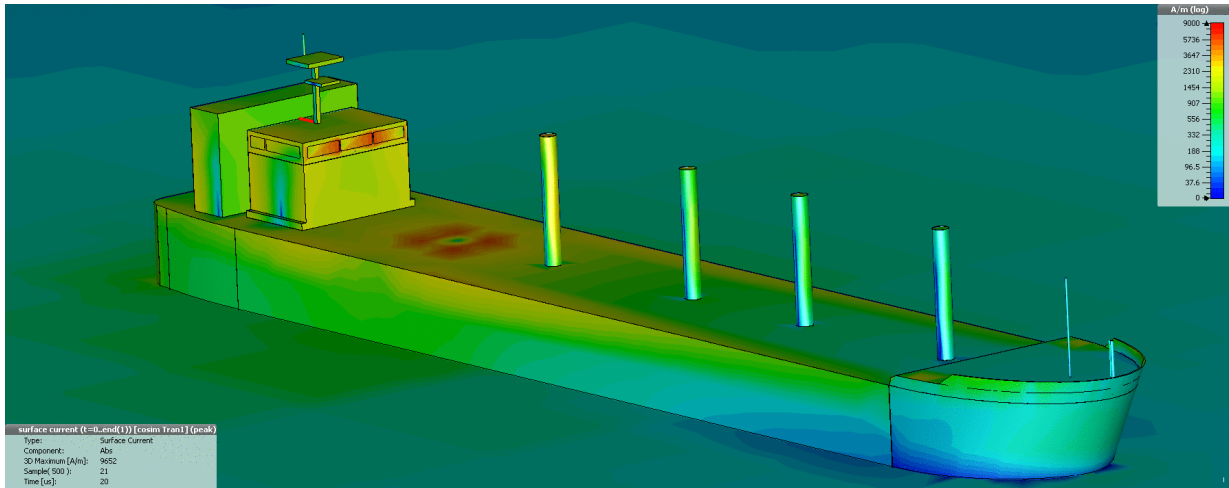
Σχήμα 4.75: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $15.43 \cdot 10^6$ V/m.



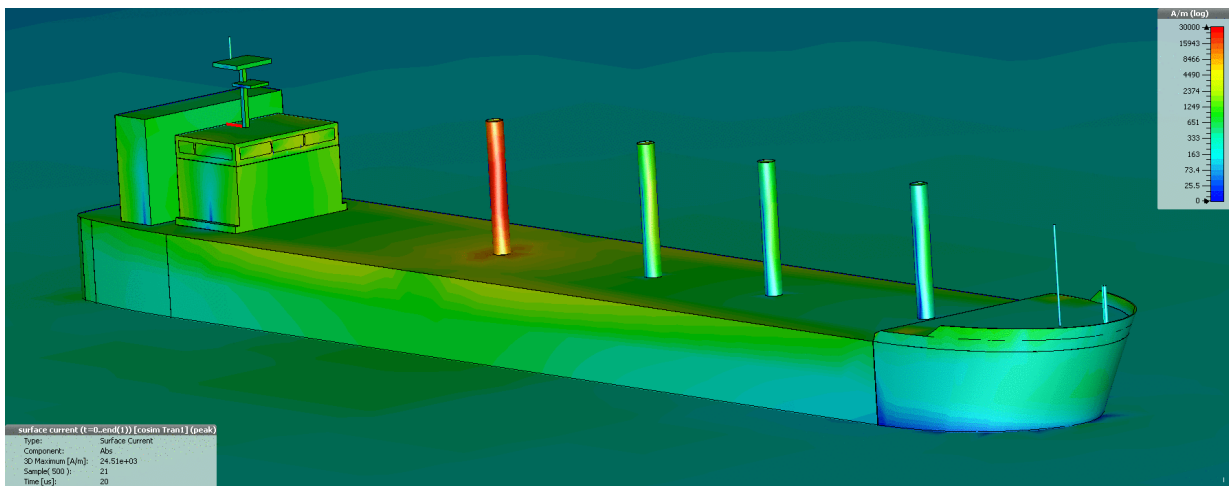
Σχήμα 4.76: Τιμές ηλεκτρικού πεδίου για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs. Η μέγιστη τιμή που καταγράφεται είναι $22.3 \cdot 10^6$ V/m.



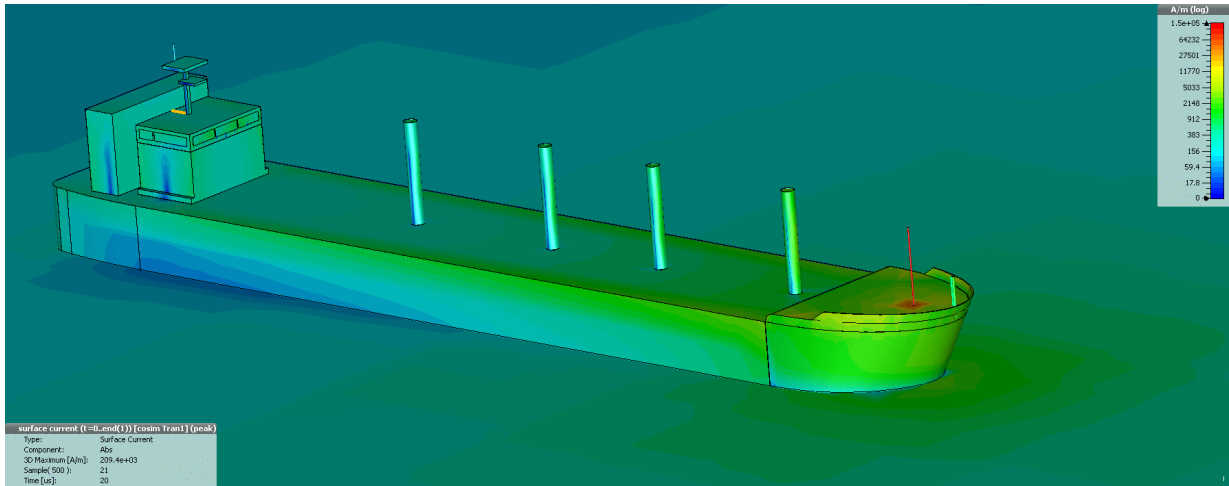
Σχήμα 4.77: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs.



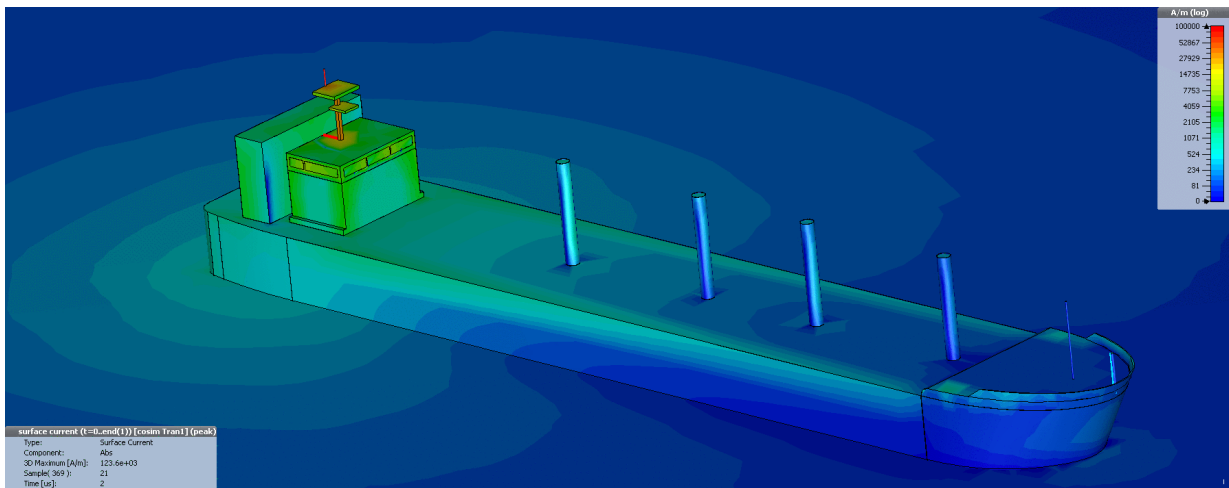
Σχήμα 4.78: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs.



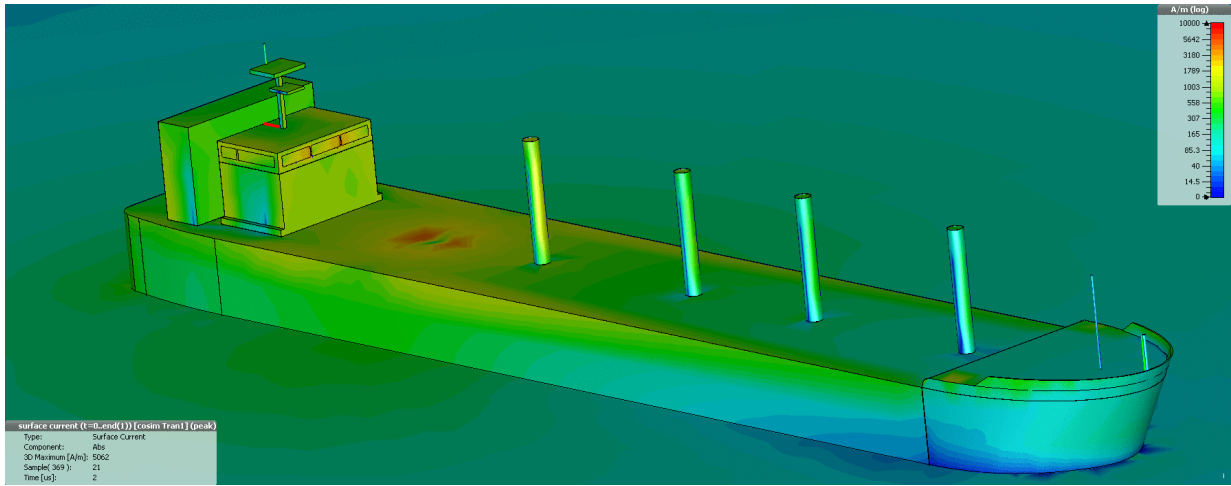
Σχήμα 4.79: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs.



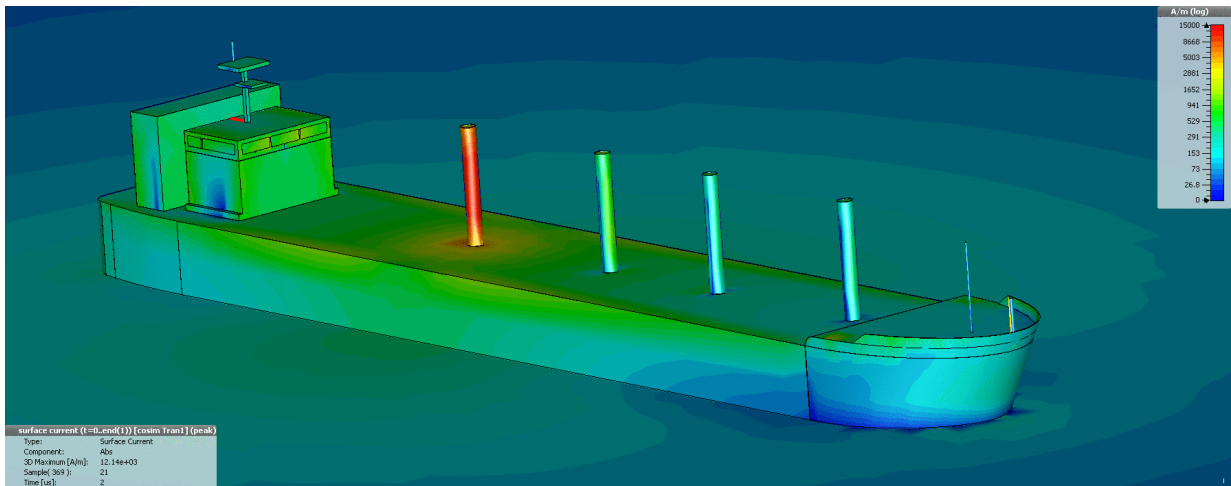
Σχήμα 4.80: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 10/350, τη χρονική στιγμή 20μs.



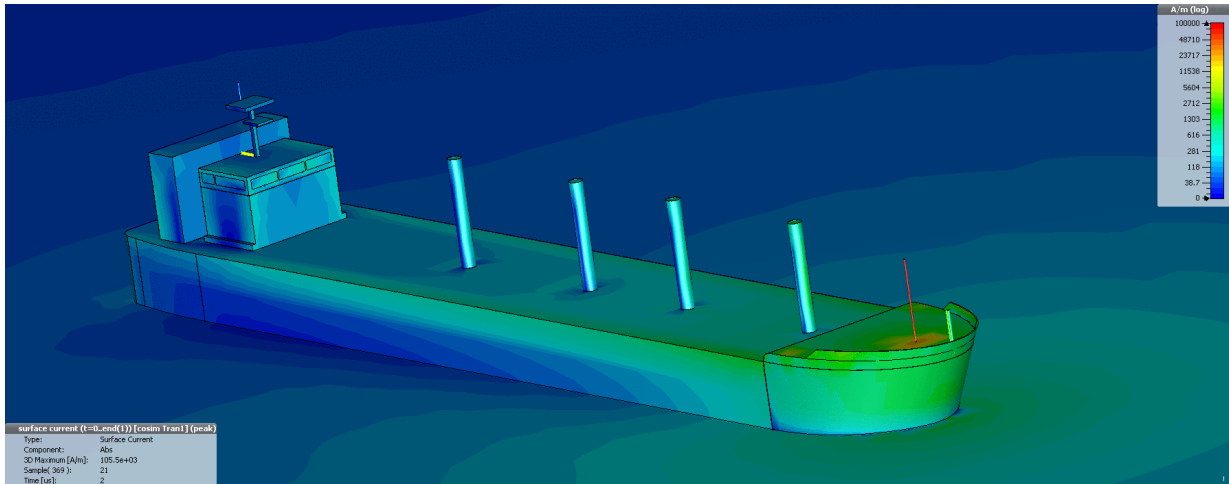
Σχήμα 4.81: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs.



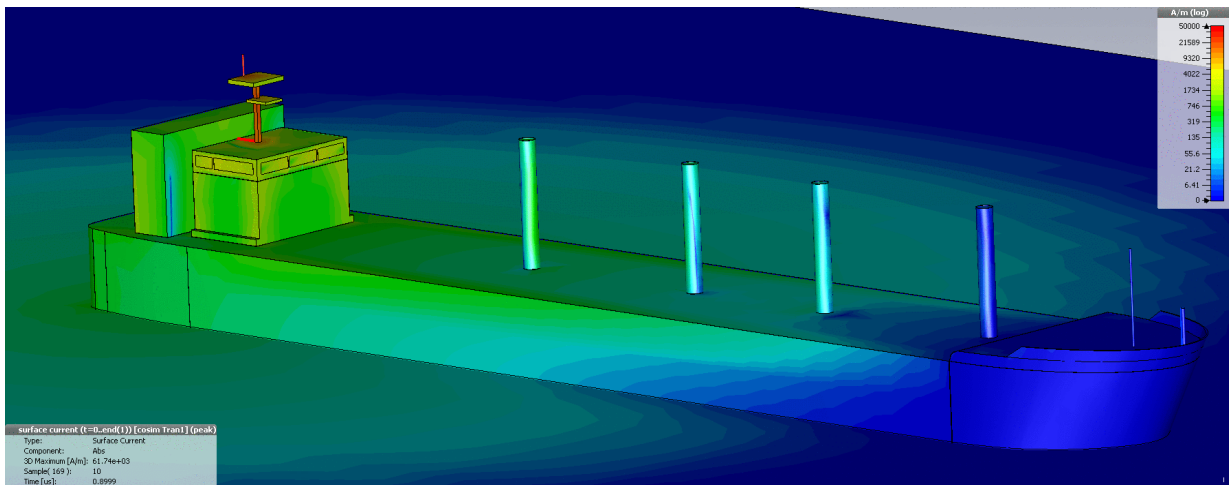
Σχήμα 4.82: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs.



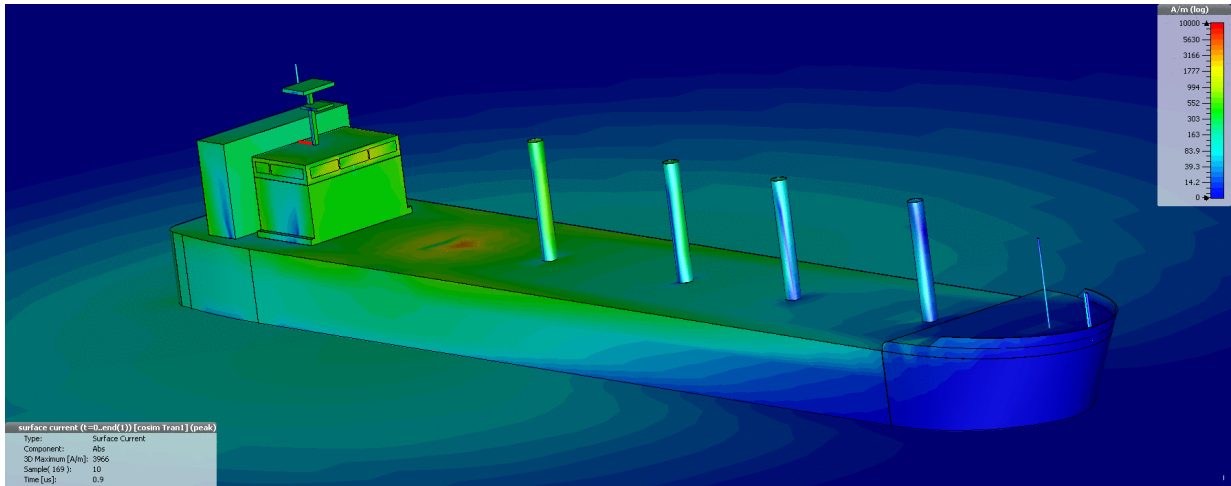
Σχήμα 4.83: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs.



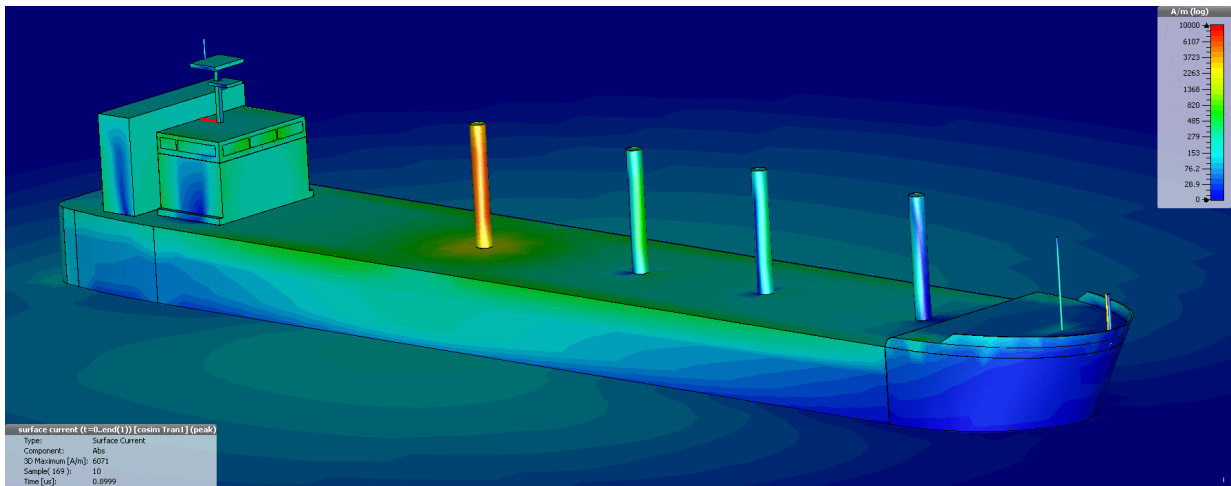
Σχήμα 4.84: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 1/200, τη χρονική στιγμή 2μs.



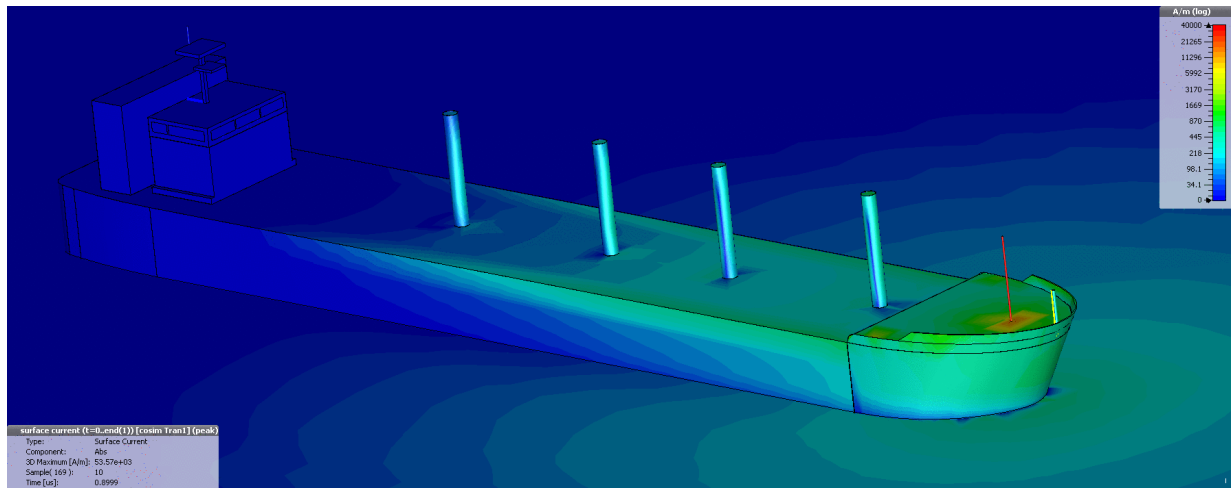
Σχήμα 4.85: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση A για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs.



Σχήμα 4.86: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση B για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs.



Σχήμα 4.87: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση C για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs.



Σχήμα 4.88: Τιμές επιφανειακού ρεύματος για πλήγμα στη θέση D για πλήγμα 0.25/100, τη χρονική στιγμή 0.9μs.

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - Περαιτέρω διερεύνηση

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η επίδραση του κεραυνικού φαινομένου σε κρίσιμες περιοχές του πλοίου, αλλά και οι επιπτώσεις του σε διάφορα καλώδια. Μελετήθηκαν τρεις κυματομορφές οι οποίες προσομοίωναν το πρώτο βραχύ κρουστικό ρεύμα θετικού και αρνητικού κεραυνού και το επακόλουθο βραχύ κρουστικό ρεύμα. Τα βασικότερα συμπεράσματα σχετίζονται με τις αυξημένες τιμές του ηλεκτρικού πεδίου και των βηματικών τάσεων, αλλά και τα επαγόμενα φαινόμενα στην καλωδίωση.

- Οι βηματικές τάσεις και οι τάσεις επαφής που παρατηρούνται στο κατάστρωμα εξαιτίας της κεραυνοπληξίας, είναι σημαντικά μεγάλες. Όπως αναφέρθηκε, οι βηματικές τάσεις που αναπτύσσονται στο κατάστρωμα λαμβάνουν τιμές μεγαλύτερες από 400 V και σε ορισμένες περιπτώσεις ξεπερνούν τα 2000 V, ακόμα και σε μεγάλες αποστάσεις από το σημείο κεραυνοπληξίας. Γνωρίζουμε πως η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος κατά μέσο όρο είναι 1000 Ω. Συγκεκριμένα, η αντίσταση για διαδρομή ρεύματος μεταξύ των ποδιών είναι 1000 Ω, ενώ για διαδρομή από το χέρι προς το πόδι είναι 500 Ω. Συνεπώς, το ρεύμα που θα πλήξει έναν άνθρωπο ο οποίος περπατάει στο κατάστρωμα είναι πολύ πιθανό να ξεπεράσει τα 0.1 - 0.2 A, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρότατες επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου[24]. Για τις τάσεις επαφής οι επιπτώσεις είναι δυσμενέστερες, αφού η παρατηρούμενη τάση είναι μεγαλύτερη και η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος για ρεύμα που διέρχεται από το χέρι προς το πόδι είναι μικρότερη. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η αναθεώρηση των κανόνων ασφαλείας, ώστε να είναι εφικτή η προστασία του προσωπικού κατά την εκδήλωση καταιγίδων. Συνιστάται επομένως η παραμονή του πληρώματος σε εσωτερικούς, θωρακισμένους χώρους ώστε να αποφεύγονται τέτοια ατυχήματα κατά τη διάρκεια καταιγίδας.
- Το δίκτυο γείωσης των πλοίων είναι κατά κανόνα αγείωτο (IT). Έτσι, σε περίπτωση εκδήλωσης ενός ρεύματος σφάλματος, συνεχίζεται η λειτουργία των μηχανημάτων. Σε περίπτωση εκδήλωσης και δεύτερου σφάλματος, διακόπτεται η λειτουργία του εξοπλισμού. Στο αγείωτο σύστημα, τα εκτεθειμένα αγωγίμα μέρη συνδέονται απευθείας με τη γάστρα του πλοίου. Ωστόσο, όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα, παρατηρούνται υψηλές τάσεις επαφής σε περίπτωση που ένας άνθρωπος που στέκεται στο εσωτερικό της γέφυρας έρθει σε επαφή με το μεταλλικό περίβλημα συσκευής συνδεδεμένο με αγωγό προστασίας στη γάστρα σε ενδεικτική απόσταση 1m. Επομένως, συνιστάται για λόγους ασφαλείας η άμεση γείωση προστασίας κάθε συσκευής στην κοντινότερη δυνατή απόσταση, ιδιαίτερα σε κρίσιμες περιοχές (όπως η γέφυρα του πλοίου).
- Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει πως το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται λόγω του κεραυνού είναι ιδιαίτερα υψηλό. Είναι χαρακτηριστικό πως για πλήγμα στο σύστημα ναυσιπλοΐας (στη θέση D), σε απόσταση 190m από τη Γέφυρα, το παρατηρούμενο ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του θαλάμου ξεπερνά το 1kV/m για πλήγμα 10/350. Παράλληλα, για τα πλήγματα 1/200 και

0.25/100 το ηλεκτρικό πεδίο καταγράφει πολύ υψηλές τιμές (1kV/m και 0.7kV/m αντίστοιχα). Οι τιμές αυτές ξεπερνούν σημαντικά τις τιμές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ατρωσίας του εξοπλισμού. Επίσης, η τοποθέτηση απλού τζαμιού στα παράθυρα της Γέφυρας δεν προσφέρει ουσιαστική θωράκιση. Ωστόσο, υψηλές τιμές παρατηρούνται και στο εσωτερικό μεταλλικών χώρων, όπως κάτω από το κατάστρωμα. Η ύπαρξη καλωδίων, τμήματα των οποίων είναι εκτεθειμένα και διέρχονται στο εσωτερικό μεταλλικών κατασκευών, είναι πιθανό να προκαλέσουν αύξηση του πεδίου σε τιμές μεγαλύτερες των 100 V/m (δηλαδή οι επαγόμενες υπερτάσεις λόγω της κεραυνοπληξίας του εκτεθειμένου τμήματος μπορούν να προκαλέσουν ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό της γάστρας). Στην περίπτωση κεραυνοπληξίας στη θέση D, το ηλεκτρικό πεδίο σε κλειστό χώρο κάτω από το κατάστρωμα λαμβάνει τιμές της τάξης των 200 V/m. Οι τιμές αυτές οφείλονται στην ύπαρξη του καλωδίου, τμήμα του οποίου βρίσκεται πάνω στο κατάστρωμα και είναι εκτεθειμένο στο κεραυνικό πλήγμα. Οι τιμές του πεδίου θα ήταν ακόμα μεγαλύτερες αν λαμβάναμε υπόψη τα πιθανά ανοίγματα που υπάρχουν συνήθως στο κατάστρωμα (για τα κύτη φορτίων).

- Οι συνέπειες του κεραυνικού φαινομένου στα καλώδια του πλοίου είναι επίσης σημαντικές. Η εμφάνιση κρουστικών υπερτάσεων στους αγωγούς ηλεκτρικής τροφοδοσίας δημιουργεί προβλήματα στις σύγχρονες ηλεκτρονικές διατάξεις. Εξάλλου, στα σύγχρονα συστήματα παρατηρείται αυξημένη χρήση συσκευών οι οποίες λειτουργούν με πιο μικρές τιμές τάσης και ισχύος και είναι πιο επιρρεπείς στις υπερτάσεις. Ο εξοπλισμός έχει σχεδιαστεί ώστε να παρουσιάζει ατρωσία σε γρήγορα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα, ο έλεγχος της ατρωσίας γίνεται για 2kV σε ac θύρες τροφοδοσίας και 1kV σε θύρες σημάτων και ελέγχου για τα ταχεία μεταβατικά φαινόμενα, ενώ για τα αργά μεταβατικά φαινόμενα εξετάζονται μόνο οι ac θύρες τροφοδοσίας στα 500V, L-N και στο 1kV L-PE, ενώ αγνοείται η περίπτωση dc τροφοδοσίας [8]. Ωστόσο, από τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε πως οι επαγόμενες υπερτάσεις λόγω της κεραυνοπληξίας φτάνουν τα 12kV, ξεπερνώντας σημαντικά τις τιμές ελέγχου.
- Το επιφανειακό ρεύμα που καταγράφεται στη μεταλλική επιφάνεια είναι πολύ υψηλό, κυρίως κοντά στην περιοχή πρόσπτωσης του κεραυνού. Σε περίπτωση που η ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ δυο μεταλλικών μερών είναι κακή, το λιώσιμο του μετάλλου είναι πιθανό, ακόμα και για περιοχές μακριά από το σημείο πρόσπτωσης. Ωστόσο, για το λιώσιμο μετάλλου απαιτείται σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα και επομένως το μακρό και σταθερό ρεύμα -το οποίο δεν εξετάζεται στη συγκεκριμένη εργασία- αποτελεί τη σημαντικότερη παράμετρο. Επίσης, είναι πιθανή η υπερθέρμανση και το λιώσιμο των αγωγών. Για το λόγο αυτό, τα καλώδια που σχετίζονται με κρίσιμες λειτουργίες πρέπει να μην είναι εκτεθειμένα.
- Για την προσομοίωση του βραχέως κρουστικού ρεύματος του αρνητικού κεραυνού χρησιμοποιήθηκε η διπλοεκθετική συνάρτηση, από την οποία, ωστόσο προκύπτουν αυξημένες τιμές για τη κλίση του ανερχόμενου τμήματος. Για το λόγο αυτό για το πλήγμα 1/200 παρατηρούνται μεγάλες τιμές στις δημιουργούμενες

υπερτάσεις στα καλώδια, σημαντικά μεγαλύτερες από εκείνες που δημιουργούνται από το επακόλουθο πλήγμα 0.25/100.

5.2 Περαιτέρω διερεύνηση

Ως επέκταση της παρούσας εργασίας, μπορούν να μελετηθούν οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες λόγω του κεραυνικού φαινομένου. Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει μέσω του CST MPHYSICS. Η προσομοίωση του μακρού και σταθερού πλήγματος θα μπορούσε να προσφέρει μια πληρέστερη εικόνα για τις θερμικές επιπτώσεις στη κατασκευή του πλοίου λόγω του κεραυνικού φαινομένου. Επίσης, η διερεύνηση των επιπτώσεων του κεραυνού σε πιθανές ασυνέχειες υλικών στη κατασκευή του πλοίου θα μπορούσε να είναι αντικείμενο μελέτης κυρίως για φορτηγά πλοία υγρού φορτίου (π.χ δεξαμενόπλοια), όπου υπάρχει ο κίνδυνος εκδήλωσης φωτιάς. Η τοποθέτηση καλωδίων με διαφορετική κατασκευή και διατομή θα προσέφερε περισσότερες πληροφορίες για τις επαγόμενες υπερτάσεις. Για τη μελέτη των συνεπειών των υπερτάσεων σε συγκεκριμένες διατάξεις θα μπορούσε να γίνει συν-προσομοίωση με μοντέλα SPICE. Ακόμα, η μελέτη των συνεπειών του κεραυνικού φαινομένου για διάφορες τιμές αγωγιμότητας της θάλασσας θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για πλοία κλειστών υδάτων (δηλαδή για πλοία που πλέουν σε ποτάμια και λίμνες). Όσον αφορά την επίδραση της βαφής των πλοίων στις αναπτυσσόμενες βηματικές τάσεις, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις οι οποίες δεν έδειξαν αξιοσημείωτες διαφορές. Ωστόσο, η επίδραση της βαφής για διαφορετικά υλικά και πάχη θα μπορούσε να διερευνηθεί περισσότερο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ι. Α. Σταθόπουλος, "Προστασία τεχνικών εγκαταστάσεων έναντι υπερτάσεων", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, Οκτώβριος 1989
- [2] V. A. Rakov, M. A. Uman, "Lightning: Physics and effects", Cambridge, 2003
- [3] F. Heidler, Z. Flisowski, Ch. Bouquegneau, C. Mazzetti, "Parameters of lightning current given in IEC 62305 - Background, experience and outlook", 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala Sweden, 2008
- [4] C.Gomes, M.Z.A.Ab Kadir, "Protection of naval System against Electromagnetic effects due to lightning", Progress In Electromagnetics Research, Vol. 113, 333-349, 2011
- [5] Παντελής Ν. Μικρόπουλος, "Συστήματα αντικεραυνικής προστασίας", Θεσσαλονίκη, 2006
- [6] IEC62305-1, "Protection against lightning – Part 1: General principles", IEC – standard, 2006
- [7] Ronald W. Hotchkiss, Andrea T. Haa, "Electric Ship Surge Environment", 2007
- [8] IEC 61000-4-4: 2012, "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test"
- [9] DEHN, SOHNE, "Lightning Protection Guide", 3rd updated edition, December 2014
- [10] Ανδρέας Χ. Αλεξάνδρου, Διπλωματική Εργασία: "Κεραυνοπληξία πλοίου: Πειραματική διερεύνηση, μέσω δοκιμών σε μοντέλα υπό κλίμακα", Αθήνα, 2014
- [11] Lightning Protection (IET Power and Energy), edited by Vernon Cooray, The Institution of Engineering and Technology, London 2010
- [12] Πληροφορίες από <http://iqelectric.com/ti-einai-o-keraynos/>
- [13] Ε. Πυργιώτη, "Προστασία Κατασκευών Από Κεραυνούς", Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2009
- [14] F. Heidler, J. Cvetić, "A Class of Analytical Functions to Study the Lightning Effects Associated With the Current Front", ETEP Vol.12, No.2, March/April 2002

- [15] I. Metwally, F. Heidler, W. Zischank, "Magnetic Fields and Loop Voltages Inside Reduced and Full-Scale Structures Produced by Direct Lightning Strikes", IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility, Vol.48, No.2, May 2006
- [16] A. Andreotti, U. De Martinis, L. Verolino, "Comparison of Electromagnetic Field for two Different Lightning Pulse Current Models", ETEP Vol.11, No.4, July/August 2001
- [17] CST Studio Suite 2015, manual
- [18] I. M. Προυσαλίδης, I. K. Χατζηλάου, E. Στυβακτάκης, Φ. Κανέλλος, N. Χατζηαργυρίου, X. Φραγκόπουλος, Η. Σόφρας, "Ηλεκτροπρόωση πλοίων και πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο: Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος", "Ηλεκτροκίνηση μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα - Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές", ΤΕΕ, Αθήνα, 12 - 13 Ιαν., 2006
- [19] Arturo Galván, "A Technical Basis for Guidance of Lightning Protection for Offshore Oil Installations", Journal of Lightning Research, Vol. 3, 2007
- [20] CST, Boundary and Symmetry Conditions, White Paper
- [21] <https://www.cst.com/>
- [22] David P. Johns, "Development of the TLM Method for EMC/EMI Analysis", International Symposium on Electromagnetic Theory, 2010
- [23] Νικόλαος Δ. Δουσλατζής, Διπλωματική Εργασία: "Αντικεραυνική Προστασία Ανεμογεννητριών", Πάτρα 2010
- [24] N. A. Μπορμπιλάς, "Επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος στον ανθρώπινο οργανισμό, Ηλεκτροπληξία"