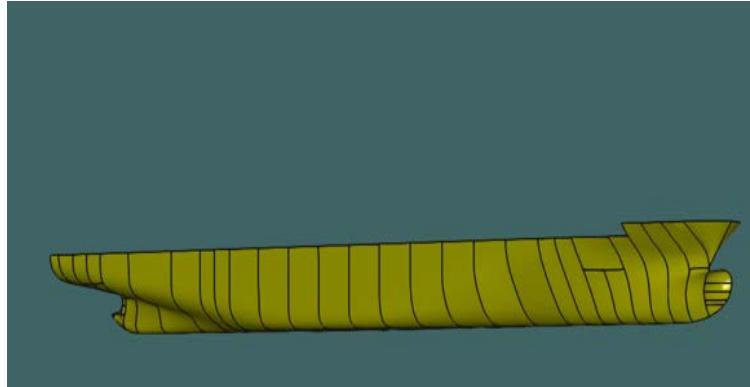




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος Εργασίας

Εφαρμογή κριτηρίων ευστάθειας 2ης γενιάς για παραμετρικό διατοιχισμό σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Implementation of 2nd generation stability criteria for parametric rolling on a container ship.

Συγγραφέας

Σωτηρόπουλος Σ. Ραφαήλ, Α.Μ. 51113020

Sotiropoulos S. Rafael, AM 51113020

Επιβλέπων Καθηγητής

Ιωάννης Τίγκας, Επίκουρος Καθηγητής Π.Α.Δ.Α.

Αιγάλεω, Ιούλιος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική εργασία

Τίτλος

Εφαρμογή κριτηρίων ευστάθειας 2ης γενιάς για παραμετρικό διατοιχισμό σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Συγγραφέας

Σωτηρόπουλος Σ. Ραφαήλ, Α.Μ. 51113020

Επιβλέπων καθηγητής

Ιωάννης Τίγκας, Επίκουρος Καθηγητής Π.Α.Δ.Α.

Ημερομηνία εξέτασης

20/07/2021

Εξεταστική Επιτροπή

Ιωάννης Τίγκας
Επίκουρος Καθηγητής
Π.Α.Δ.Α.

Θεόδωρος Γεροστάθης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Π.Α.Δ.Α.

Κωνσταντίνος Πολίτης
Καθηγητής Π.Α.Δ.Α.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ραφαήλ Αθανάσιος Σωτηρόπουλος του Σωκράτη, με αριθμό μητρώου 51113020 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ο Δηλών/



< Σωτηρόπουλος Ραφαήλ Αθανάσιος >

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο ορόσημο των σπουδών μου στο τμήμα **Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής Π.Α.Δ.Α.** Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους και καθηγητές μου, με τους οποίους μοιράστηκα όλα αυτά τα χρόνια. Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη μεγάλη υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου όλα αυτά τα χρόνια και για όλες τις προσπάθειες και τις θυσίες που έκαναν, ώστε να μπορέσω να επιτύχω τους στόχους μου και τα όνειρα μου πραγματικότητα.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέπον Καθηγητή μου Κ. Ι. Τίγκα. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω που μου έδωσε την ευκαιρία και το κίνητρο να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, για την ανάπτυξη μιας ιδανικής συνεργασίας, για την πολύτιμη συμβολή του στη διατριβή, για όλες τις συμβουλές του και οδηγίες.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο και φίλο Αγαθοκλή για τη μεγάλη του βοήθεια στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας (ιδιαίτερα στο κομμάτι **design model**), είναι γεγονός ότι χωρίς τη συμβολή του, αυτή η εργασία στο υπολογιστικό μέρος δε μπορούσε να επιτευχθεί με ένα τόσο ικανοποιητικό αποτέλεσμα αλλά και φυσικά την εταιρεία (**Streamlined Naval Architects Ltd**) η οποία μου έδωσε την άδεια και δυνατότητα να χρησιμοποιήσω το υπολογιστικό πρόγραμμα (**Maxsurf Stability**).

Περίληψη

Οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας χωρίζονται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος που έχει θεωρητικό υπόβαθρο, παρουσιάζεται η ανάλυση των βασικών κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ships**) από τον **IMO (International Maritime Organization)** και την εφαρμογή των κριτηρίων αυτών με βασικό γνώμονα τον έλεγχο του πλοίου ως προς την αυθεντική απώλεια ευστάθειας και κυρίως την συμπεριφορά του πλοίου ως προς τον παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**). Αρχικά παρουσιάζεται μία ιστορική αναδρομή της εξέλιξης των πλοίων (**container ships**) και μια γενική περιγραφή των κανονισμών-απαιτήσεων ως προς τα κριτήρια ευστάθειας 1^{ης} γενιάς από τον **IMO**. Στη συνέχεια θα αναφερθούν μέθοδοι οι οποίες μπορούν να προσδιορίσουν κατά πόσο ένα πλοίο είναι ευάλωτο στο φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) παρουσιάζοντας αναλυτικά κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς από τον **IMO**. Αξίζει να σημειωθεί ότι θα τεκμηριωθούν κριτήρια ανάλυσης (**susceptibility criteria**) για τον προσδιορισμό στο πόσο ευάλωτο είναι ένα πλοίο σε παραμετρικό διατοιχισμό από τον Αμερικανικό Νηογνώμονα (**ABS**) σύμφωνα με τις επιχειρησιακές κατευθυντήριες γραμμές του για την αξιολόγηση του φαινομένου στην εκτίμηση πλοίων (**container ships**) για κάθε εφικτή ταχύτητα και κατεύθυνση τους. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται εμβάθυνση των κριτηρίων 2^{ης} γενιάς πάνω στον παραμετρικό διατοιχισμό, αναλύοντας τα κριτήρια ευπάθειας πρώτου και δεύτερου επιπέδου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το υπολογιστικό κομμάτι στο οποίο θα προηγηθεί ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου σε σχεδιαστικό πρόγραμμα **Rhino 3d** από πραγματικές διαστάσεις πλοίου σχέδιο γραμμών **Lines Plan of Container ship**). Κατά την εισαγωγή του πλοίου στο πρόγραμμα θα δημιουργηθεί η γάστρα του πλοίου, όπου μας ενδιαφέρει κυρίως η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου για να μπορέσει να γίνει ο απαραίτητος έλεγχος πάνω στον φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού. Έχοντας δημιουργήσει τη γάστρα του μοντέλου θα εισάγουμε το **rhino 3dm** αρχείο σε ένα εξίσου πολύ σημαντικό πρόγραμμα μελέτης ευστάθειας, το **Maxsurf**. Από αυτό το πρόγραμμα θα γίνει η μελέτη όπου θα εξαχθούν τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου και θα γίνει ο έλεγχος της ευστάθειας του πλοίου για 2 καταστάσεις φόρτωσης **LC10** και **LC04** με βάση τα υφιστάμενα κριτήρια ευστάθειας (**Intact stability Criteria**). Επιπρόσθετα, θα γίνει σύγκριση των υδροστατικών αποτελεσμάτων του πλοίου (μέσω του προγράμματος **Maxsurf** με τα επίπεδα ευπάθειας (**Vulnerability Criteria**) στον παραμετρικό διατοιχισμό που εφαρμόστηκαν σε πραγματικές μελέτες πλοίων με βάση τις κατευθυντήριες γραμμές του **IMO**, όπως αναφέρθηκε στο θεωρητικό μέρος της εργασίας. Κλείνοντας θα παρουσιαστούν συμπεράσματα και προτάσεις πάνω στα αποτελέσματα του υπολογιστικού μοντέλου που μελετήθηκε πάνω στα επίπεδα ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό και στην αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**Container ships**).

Abstract

The objectives of this thesis are divided into two parts. In the first part that has a theoretical background, the analysis of the basic 2nd generation stability criteria for container ships by the IMO (International Maritime Organization) and the application of these criteria with the basic aim of controlling the ship with respect to the authentic loss of stability and especially the behavior of the ship with respect to parametric rolling. Initially presented a historical overview of the evolution of ships (container ships) and a general description of the regulations-requirements for the 1st generation stability criteria by IMO. Methods that can determine whether a ship is vulnerable to the parametric rolling phenomenon will be mentioned by presenting detailed 2nd generation stability criteria by IMO. It is worth noting that susceptibility criteria will be documented to determine how vulnerable a ship is in a parametric fit by the US classification society (ABS) in accordance with its operational guidelines for assessing the phenomenon in the estimation of ships (container ships) for each feasible speed and direction. In the next chapter there is a deepening of the 2nd generation criteria on the parametric configuration, analyzing the first and second level vulnerability criteria. Then the experimental piece is presented, which will be preceded by the development of an experimental model in a design program Rhino 3d from real ship dimensions (Lines plan of Container ship). During the introduction of the ship in the program will be created the hull of the ship, where we are mainly interested in the wet surface of the ship to be able to make the necessary control over the phenomenon of parametric arrangement. Having created the hull of the model we will import the rhino 3DM file into an equally important stability study program, the Maxsurf. From this program will be the study where the hydrostatic characteristics of the ship will be extracted and the stability control of the ship for 2 loading situations LC10 and LC04 based on the existing stability criteria (Intact stability Criteria). In addition, the hydrostatic effects of the ship (through the Maxsurf program) will be compared with the Vulnerability Criteria levels in parametric positioning applied to real ship studies based on IMO guidelines, as mentioned in the theoretical part of the paper. In conclusion, conclusions and suggestions will be presented on the results of the experimental model studied on the levels of vulnerability in parametric positioning and the treatment of this phenomenon for container ships.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract	6
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Οι βασικές έννοιες της ευστάθειας πλοίου.....	9
1.2 Κανονισμοί άθικτης ευστάθειας I.S.c με βάση τα κριτήρια του I.M.O.....	11
1.3 Κριτήρια καιρού.....	16
2.4 Από τον κώδικα ευστάθειας (I.S.Code) στα κριτήρια ευστάθειας δεύτερης γενιάς S.G.I.S.c.....	20
2. Ιστορική αναδρομή - εξέλιξη πλοίων container ships.....	23
2.1 Γενικές αναφορές.....	23
2.2 Εξέλιξη.....	23
2.3 Επιχειρησιακά Προβλήματα.....	26
2.4 Κατηγοριοποίηση πλοίων container ship.....	26
2.5 Μειονεκτήματα που αντιμετωπίζουν τα container ships.....	29
3. Παραμετρικός διατοιχισμός (parametric rolling).....	31
3.1 Εισαγωγή στον παραμετρικό διατοιχισμό (parametric rolling).....	31
3.2 Σύστημα συντεταγμένων (Coordinate system).....	35
3.3 Υπολογισμός μοχλοβραχίονα επαναφοράς GZ.....	38
3.4 Θέση κύματος σε σχέση με το πλοίο σε χρονικά διαστήματα.....	40
3.5 Φυσική σημασία του συντονισμού παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling resonance).....	42
3.6 Επίδραση της απόσβεσης παραμετρικού διατοιχισμού (roll damping).....	46
3.7 Επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης κύματος.....	48
4. Μοντέλα αξιολόγησης για τον παραμετρικό διατοιχισμό σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.....	51
4.1 Πρόβλεψη εμφάνισης παραμετρικού διατοιχισμού σε κανονικά κύματα (susceptibility criteria).....	51
4.2 Πρόβλεψη εύρους παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling) σε κανονικά κύματα (severity criteria) από τον Αμερικανικό Νηογνώμονα (ABS).....	55
4.3 Παραδείγματα κριτηρίων ευαισθησίας (susceptibility criteria) από το μοντέλο αξιολόγησης του Αμερικανικού Νηογνώμονα (ABS).....	58
5. Κριτήρια ευστάθειας 2 ^{ης} γενιάς (S.G.I.S.c.) – Second Generation of Intact Stability criteria.....	64
5.1 Εισαγωγή στα κριτήρια ευστάθειας 2 ^{ης} γενιάς (S.G.I.S.c).....	64
5.2 Η έννοια των κριτηρίων ευστάθειας 2 ^{ης} γενιάς.....	67

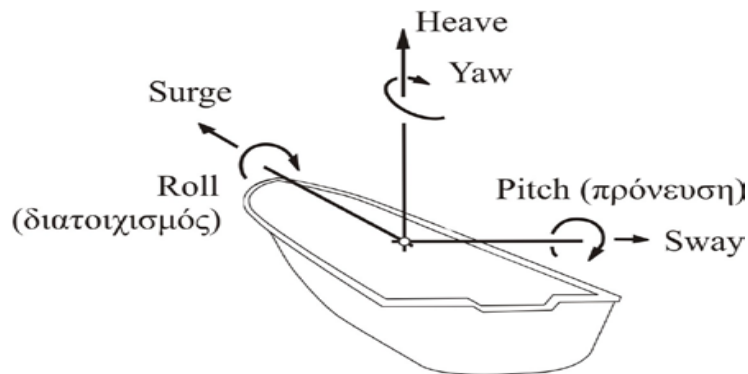
5.3	Κριτήρια ευπάθειας 1 ^{ου} επιπέδου για παραμετρικό διατοιχισμό (Level 1 Vulnerability Criteria for parametric rolling).....	69
5.4	Κριτήρια ευπάθειας 2 ^{ου} επιπέδου για παραμετρικό διατοιχισμό (Level 2 Vulnerability Criteria for parametric rolling).....	80
5.5	Συμπεράσματα και αποτελέσματα κριτηρίων ευστάθειας 2 ^{ης} γενιάς.	89
6.	Εκτίμηση – αξιολόγηση υπολογιστικού μοντέλου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ships) σε σχέση με τα κριτήρια ευστάθειας 1 ^{ης} και 2 ^{ης} γενιάς.....	90
6.1	Εισαγωγή σχεδίου γραμμών (Lines plan) πραγματικού πλοίου (container ship) σε σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhino 3d για τη δημιουργία γάστρας.....	90
6.2	Εισαγωγή του υπολογιστικού πλοίου – μοντέλου σε υδροστατικό πρόγραμμα μελέτης ευστάθειας Maxsurf.....	102
6.3	Περίπτωση έμφορτης κατάστασης πλοίου LC10 (Load Line Condition 10 - 3592 Cont. 14t/TEU hom., Mid) – Έλεγχος κριτηρίων ευστάθειας στο υδροστατικό πρόγραμμα Maxsurf Stability Advanced.....	104
6.4	Περίπτωση κατάστασης φόρτωσης έρματος πλοίου LC04 (Loading Condition - Normal Ballast Condition/Midway) – Έλεγχος κριτηρίων ευστάθειας στο υδροστατικό πρόγραμμα Maxsurf Stability Advanced.....	113
6.5	Εκτίμηση μοντέλου – γάστρας σε φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling) μέσω του υδροστατικού προγράμματος (Maxsurf).....	123
6.6	Έλεγχος ευπάθειας πλοίου επιπέδου 1 – (Level 1 Vulnerability check).....	134
6.7	Έλεγχος ευπάθειας πλοίου επιπέδου 2 – (Level 2 Vulnerability check).....	137
7	Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	147
7.1	Συμπεράσματα.....	147
7.2	Προτάσεις.....	150
8	Βιβλιογραφία.....	152
	Παράρτημα Ι.....	153
	Παράρτημα ΙΙ.....	154
	Παράρτημα ΙΙΙ.....	161

1. Εισαγωγή

1.1 Οι βασικές έννοιες της ευστάθειας πλοίου

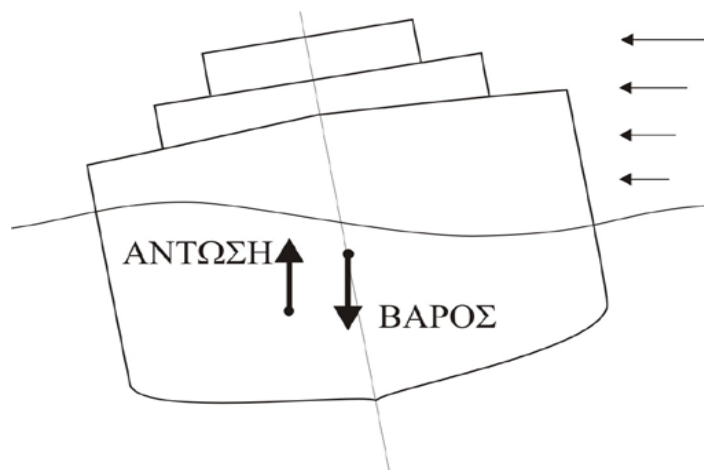
Είναι γεγονός ότι μία από τις πρωταρχικές απαιτήσεις τις οποίες καλείται να ικανοποιήσει ένας ναυπηγός μηχανικός κατά το στάδιο της σχεδίασης ενός πλοίου είναι η **πλευστότητα** και η **ευστάθεια** του. Στην απλούστερη θεώρησή της, η πλευστότητα έχει να κάνει με τη δυνατότητα επίτευξης ισορροπίας του πλοίου σε όρθια θέση κάτω από την επίδραση του βάρους του και της άντωσης του. Η ευστάθεια συμπληρώνει την έννοια της πλευστότητας, καθώς αναφέρεται στη δυνατότητα του πλοίου να διατηρεί σε ασφαλή και λειτουργικά αποδεκτή κατάσταση υπό την επίδραση διαταραχών οι οποίες μπορεί να είναι εξωγενείς (π.χ. κύματα) ή ενδογενείς (π.χ. διαγωγή). Ουσιαστικά, υποθέτουμε ότι σε ένα πλοίο ασκείται, στιγμιαία, εξωτερική ροπή γύρω από τον διαμήκη άξονά του. Αυτή θα προκαλούσε εγκάρσια περιστροφή του πλοίου, θα άρχιζε δηλαδή να αποκτά κλίση η οποία θα αυξανόταν με τον χρόνο. Αν το πλοίο είναι **ευσταθές**, η περιστροφή θα πρέπει μετά από λίγο να αναστραφεί και το πλοίο να τείνει να επανέλθει προς την αρχική του κατάσταση. Αν όμως είναι **ασταθές**, το πλοίο θα συνεχίσει να απομακρύνεται από την όρθια θέση, μέχρι που θ' ανατραπεί.

Συχνά, στη διάρκεια των ταξιδιών, δρουν επί των πλοίων διεγέρσεις (κυρίως λόγω ανέμου και κυμάτων) οι οποίες είναι αποσταθεροποιητικές ως προς την επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας. Για σκάφος που θεωρείται αξιόπλοο, η εκτροπή του από την όρθια θέση θα πρέπει να επάγει αυτομάτως την ανάπτυξη υδροστατικών κυρίως δυνάμεων, ούτως ώστε, σε συνδυασμό με το βάρος του σκάφους, να δημιουργείται **ροπή επαναφοράς**. Αυτή θα τείνει να διατηρεί το πλοίο σχεδόν στην όρθια κατάσταση πλευσης, δίχως να είναι απαραίτητη η χρήση ειδικών συστημάτων. Γενικά, ροπές επαναφοράς πρέπει να αναπτύσσονται όταν, λόγω εξωτερικού ή εσωτερικού αιτίου, προκαλούνται περιστροφές κατά τις δύο διευθύνσεις οι οποίες συναρτώνται με κίνδυνο ανατροπής του πλοίου διατοιχισμός(**rolling**) και προνευστασμός(**pitching**).



Εικόνα 1 – Κύριοι άξονες περιστροφής πλοίου στους 6 βαθμούς ελευθερίας. (Σπίρου, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ, 2006)

Επιπλέον η δύναμη επαναφοράς αναπτύσσεται, επίσης, κατά την κατακόρυφη κίνηση **heave**, λόγω της διαφοράς της στιγμιαίας τιμής της άντωσης από το βάρος. Η διαφορά αυτή τείνει να περιορίζει την κατακόρυφη απομάκρυνση. Η δυνατότητα, με κατασκευαστικά απλές μορφές γάστρας που συγχρόνως είναι κατάλληλες για τη μεταφορά ανθρώπων και αγαθών, να επιτυγχάνεται ικανότητα επαναφοράς στις τρεις κρίσιμες για να συμβεί βύθιση κινήσεις ενός πλοίου, ήταν βασικό κίνητρο για τη δημιουργία των πρώτων ξύλινων κατασκευών που σταδιακά μετεξελίχθηκαν στα πλοία που γνωρίζουμε μέχρι σήμερα.



Εικόνα 2 - Απεικόνιση ζεύγους δυνάμεων βάρους και άντωσης παράγοντας ροπή επαναφοράς. (Σπύρου, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ, 2006)

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις, η εξέταση της στατικής κατάστασης (δηλαδή απλή σύγκριση των διανυσμάτων βάρους και άντωσης), επαρκεί για να συμπεράνουμε τον τρόπο απόκρισης του πλοίου και επομένως για να χαρακτηρίσουμε την ευστάθεια του. Για να γίνει πιο κατανοητό, θα μπορούσε εύκολα να προβλεφθεί τι θα συνέβαινε αν σε ένα πλοίο το οποίο ευρίσκεται σε λιμάνι ή σε προστατευμένη από τον καιρό περιοχή μετατοπιζόταν σιγά-σιγά κάποιο σημαντικό βάρος. Στην περίπτωση αυτή, το πλοίο θα προσάρμοζε τα βυθίσματά του, την εγκάρσια κλίση του, έτσι ώστε σχεδόν να μπορούσε συνεχώς να διατηρήσει τη κατάσταση ισορροπίας του. Αν όμως η μετακίνηση βάρους πραγματοποιούταν ξαφνικά γρήγορα, ή αν κάποια εξωτερική επίδραση, όπως άνεμος ή κύματα, επηρέαζαν ξαφνικά το πλοίο, τότε για να κατανοηθεί τι επιπτώσεις θα είχε αυτό στο πλοίο, θα επιβαλλόταν να θεωρηθούν και να εκτιμηθούν επίσης τα χαρακτηριστικά **δυναμικής ευστάθειας** του πλοίου. Το βασικό ζήτημα στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή είναι η λεγόμενη **μεταβατική δυναμική συμπεριφορά του πλοίου** στις διευθύνσεις στις οποίες είναι ελεύθερο να κινείται. Κατά το μεταβατικό στάδιο, ένα πλοίο μπορεί να λάβει σημαντική κλίση που είναι δυνατό να το θέσει σε κίνδυνο αν υπάρξει υπέρβαση της μέγιστης κλίσης που μπορεί να λάβει το πλοίο παραμένοντας ασφαλές. Ο προσδιορισμός και ο έλεγχος των μεγίστων τα οποία προκύπτουν κατά τη διάρκεια μεταβατικών αποκρίσεων είναι το βασικό αντικείμενο μιας μελέτης **δυναμικής ευστάθειας**.



Εικόνα 3 – Απεικόνιση καμπύλης ροπής επαναφοράς. (Σπύρου, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ, 2006)

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο ότι η ευστάθεια του πλοίου εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό και από την ικανότητα και εμπειρία του πλοίαρχου. Στο λιμάνι καταρχάς, ο πλοίαρχος πρέπει να μεριμνά για την ασφαλή φόρτωση του πλοίου, τόσο ως προς τη θέση του φορτίου όσο και ως προς τη δυνατότητα μετατόπισης του κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Αν το πλοίο συναντήσει θαλασσοταραχή, ο πλοίαρχος πρέπει να είναι σε θέση να εκτιμήσει γρήγορα την επικινδυνότητα της κατάστασης και να επιλέξει πορεία και ταχύτητα ασφαλούς πλεύσης. Δυστυχώς οι καταστάσεις που εν δυνάμει οδηγούν σε ανατροπή ενός πλοίου είναι πολλές. Σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, μπορεί να προκληθεί επικίνδυνος **διατοιχισμός** ή **παραμετρικός διατοιχισμός** όπως θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια λόγω υψηλών κυμάτων και ισχυρών ανέμων. Επιπλέον ένας από τους πλέον συνηθισμένους λόγους ανατροπής, είναι η μετατόπιση φορτίου που συνήθως είναι αποτέλεσμα υψηλής εγκάρσιας επιτάχυνσης. Κίνδυνος ανατροπής συναντάται επίσης με ξαφνικές αλλαγές πορείας του πλοίου, ειδικά για πλοία που διαθέτουν μεγάλα πηδάλια όπως τα αλιευτικά. Τάση για ανάπτυξη μεγάλων κλίσεων εμφανίζουν επίσης τα πλοία που λειτουργούν (ή μάλλον λειτουργούσαν, προς της εποχής του λεγόμενου (**slow steaming**) σε σχετικά υψηλές ταχύτητες, όπως τα πλοία μεταφοράς τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων (**Containers ships**) που θα αποτελέσουν και το αντικείμενο της εργασίας μας στη συνέχεια.

1.2 Κανονισμοί άθικτης ευστάθειας I.S.c με βάση τα κριτήρια του I.M.O

Είναι γεγονός ότι τα θέματα της ευστάθειας πλοίου, αναφέρονται στην ιδανική κατάσταση ισορροπίας σε ήρεμη κατάσταση στο νερό. Υπό αυτή την προϋπόθεση, η υδροστατική ισορροπία εξασφαλίζεται, εφόσον ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες και η λύση του προβλήματος είναι μοναδική. Στην πραγματικότητα όμως, τα πλοία που κινούνται στο θαλάσσιο χώρο, που χαρακτηρίζεται από τη διάδοση τυχαίων κυματισμών, οι οποίοι διαφέρουν κατά πολύ ως προς την ένταση, την κατεύθυνσή,

καθώς και από την επίδραση ευμετάβλητων καταστάσεων ανέμου. Δυστυχώς και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν αρνητικά ως προς την ευστάθεια του πλοίου, διότι παράγονται ισχυρά εξωτερικά φορτία και ροπές οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες γωνίες κλίσης, που ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανατροπή ή και ολική απώλεια των πλοίων. Επομένως, η πιθανότητα αντοχής ενός πλοίου σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες μπορεί να εκτιμηθεί, μέχρι τις μέρες μας, μόνο εμπειρικά, σύμφωνα με κριτήρια που βασίζονται πάντα από τους κανονισμούς του **IMO**.

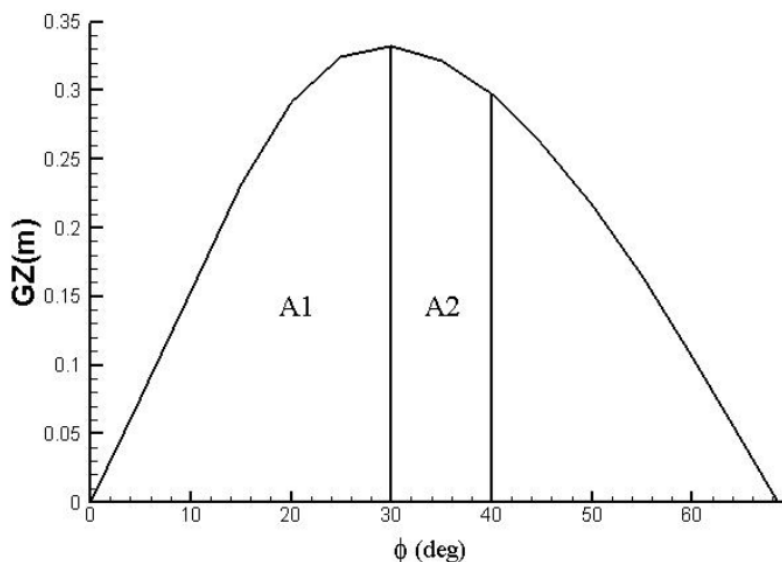
(**IMO Intact Stability Criteria, 2008**) Οι κανονισμοί που αφορούν την ευστάθεια ενός πλοίου, δηλαδή η θέσπιση απαιτήσεων για την ασφάλεια του, άρχισε να απασχολεί τους ναυπηγούς μηχανικούς εδώ και πολλά χρόνια, καθώς με την πάροδο των χρόνων, έχουν συμβεί σοβαρά ατυχήματα σε εμπορικά και επιβατηγά πλοία. Σε ό,τι αφορά την άθικτη ευστάθεια, η επινόηση των σχετικών κριτηρίων βασίζεται στην υδροστατική συμπεριφορά των πλοίων, που κυρίως χαρακτηρίζεται από την καμπύλη **GZ** του μοχλοβραχίονα επαναφοράς. Για συγκεκριμένο εκτόπισμα και κέντρο βάρους ενός πλοίου, η καμπύλη αυτή εξαρτάται από τη γεωμετρία της γάστρας του πλοίου καθώς, εισέρχεται στους υπολογισμούς μέσω των καμπυλών ευστάθειας. Αναλύοντας την ανταπόκριση διαφόρων πλοίων στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες κυματισμών ή καιρού, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει αξιοσημείωτη συσχέτιση της πιθανότητας απώλειας ή αντοχής τους με συγκεκριμένα κριτήρια της καμπύλης της στατικής ευστάθειας. Η βασική μεθοδολογία που τεκμηριώθηκε ήταν η ενδελεχής στατιστική ανάλυση δεδομένων όλων των σχετικών ατυχημάτων που έχουν συμβεί στην παγκόσμια ναυτιλία, η οποία κατέληξε στη διατύπωση των προαναφερθέντων εμπειρικών κριτηρίων ευστάθειας, που πρέπει να ικανοποιούνται αυστηρά ώστε να θεωρείται ένα πλοίο ασφαλές και αξιόπλοο. Οι αντίστοιχοι κανονισμοί αναπροσαρμόζονται συνεχώς (σχεδόν κάθε χρόνο) από τον **IMO** και τους **Νηογνώμονες**, σύμφωνα με τα νέα στοιχεία, τα οποία εισέρχονται στις βάσεις δεδομένων και αφορούν, ατυχήματα που δεν είχαν προβλεφθεί. Βέβαια οι τεχνολογία αναπτύσσετε συνεχώς με ραγδαίους ρυθμούς, ιδιαίτερα στον τομέα την Ναυπηγικής με αποτέλεσμα οι μελέτες και σχεδιάσεις νέων τύπου πλοίων να επηρεάσουν άμεσα τα κριτήρια ευστάθειας των πλοίων και να διαφοροποιηθεί όλη η προσέγγιση των προβλημάτων ευστάθειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 1991, ο **IMO** υιοθέτησε παλαιότερες διατάξεις που αφορούσαν ειδικές περιπτώσεις και προχώρησε στην αναθεώρηση της γνωστής οδηγίας **A-749** του 1987, ώστε να συμπεριλάβει τους περισσότερους τύπους των πλοίων. Ο κανονισμός που προέκυψε συμπεριέλαβε εμπειρικά κριτήρια και υπολογιστικά, για την πραγματική υδροδυναμική συμπεριφορά των πλοίων σε καταστάσεις διατοιχισμού και προνευστασμού. Πρέπει να τονιστεί ότι αυτά τα κριτήρια ισχύουν για τις εξής κατηγορίες πλοίων, που έχουν μήκος **L** άνω των **25m**:

- Φορτηγά πλοία (**cargo ships**)
- Φορτηγά που μεταφέρουν ξυλεία (**timber deck cargoes**)
- Φορτηγά που μεταφέρουν φορτία χύδην (**bulk carriers**)
- Επιβατηγά – Οχηματαγωγά πλοία (**passengers ships**)
- Αλιευτικά πλοία (**fishing vessels**)
- Πλοία ειδικών σκοπών (**special purpose ships**)

- Πλοία εφοδιασμού πλωτών κατασκευών γενικής υποστήριξης (**offshore supply vessels**)
- Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ships**)
- Κινητές πλωτές κατασκευές εξόρυξης (**mobile off shore drilling units**)
- Δυναμικώς υποστηριζόμενα πλοία (**dynamically supported crafts**)

Πρέπει να επισημανθεί ότι σύμφωνα με την **SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea)** τα πλοία άνω των 24 μέτρων απαιτείται να διαθέτουν εγχειρίδιο άθικτης ευστάθειας (**intact stability booklet**) στο οποίο περιγράφεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής των σχετικών κριτηρίων για διάφορες καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου.



Εικόνα 4 – Απεικόνιση εμβαδών για την εφαρμογή των κριτηρίων A-749. (Σπύρου, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ, 2006)

Τα γενικά κριτήρια ευστάθειας που πρέπει να ισχύουν, σχετίζονται με την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς που απεικονίζεται στην εικόνα 4 για κάθε κατάσταση φόρτωσης, και είναι τα εξής:

- 1) Η επιφάνεια **A1** κάτω από την καμπύλη στατικής ευστάθειας (**GZ-φ**) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από **0,055 m.rad** μέχρι τη γωνία των **30°**. Η αντίστοιχη επιφάνεια μέχρι τη γωνία **min(40°, φ_f)** πρέπει να είναι μεγαλύτερη από **0,09 m.rad**. Η φ_f είναι η γωνία εγκάρσιας κλίσης, πάνω από την οποία μεγάλα μη στεγανά ανοίγματα στη γάστρα ή τις υπερκατασκευές του πλοίου αρχίζουν να εμβαπτίζονται στο νερό. Επιπλέον, η επιφάνεια **A2**, την οποία ορίζει η καμπύλη του μοχλοβραχίονα στατικής ευστάθειας στο διάστημα μεταξύ των **30°** και **min(40°, φ_f)**, θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από **0,03 m.rad**.

- 2) Ο μοχλοβραχίονας στατικής ευστάθειας **GZ** θα πρέπει να είναι τουλάχιστον **0,20 m** σε μια γωνία εγκάρσιας κλίσης μεγαλύτερη από ή ίση με **30°**.
- 3) Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα στατικής ευστάθειας θα εμφανίζεται σε μια γωνία εγκάρσιας κλίσης μεγαλύτερη κατά προτίμηση από **30°** και όχι μικρότερη από **25°**.
- 4) Το αρχικό μετακεντρικό ύψος **GM** πρέπει να είναι μεγαλύτερο από **0,15 m**.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην περίπτωση πλοίων **container ship** που θα εξεταστεί ενδελεχώς στην πορεία της εργασίας για μήκος **LOA > 100 m** στα οποία πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω κριτήρια:

$$max \geq \frac{0,042}{C}$$

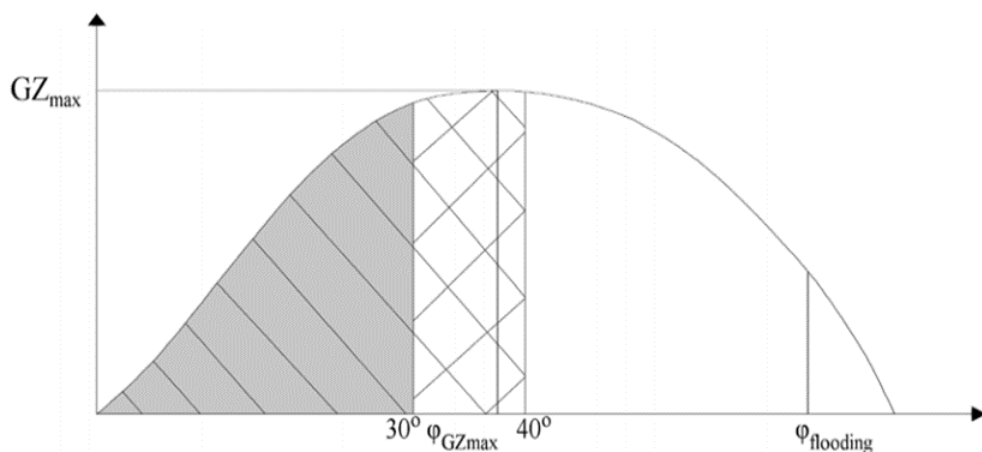
$$GZ\varphi \geq \frac{0,033}{C}, \varphi \geq 30^\circ$$

$$(area)_{0 \rightarrow 30^\circ} \geq \frac{0,009}{C}$$

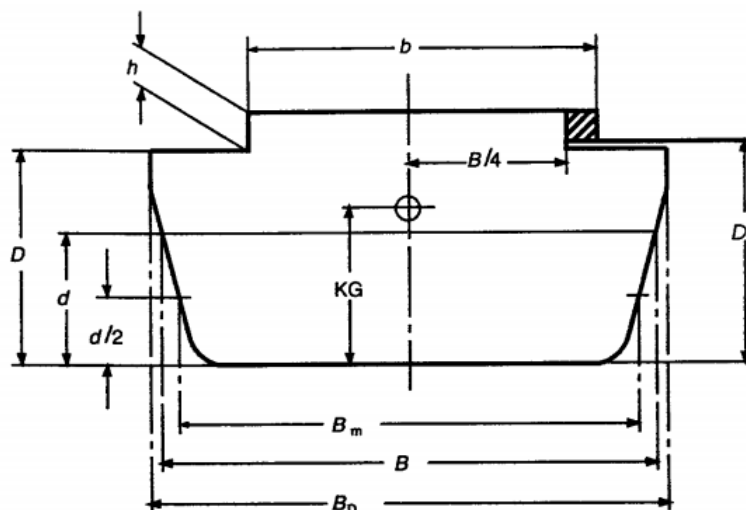
$$(area)_{30^\circ \rightarrow 40^\circ, \varphi \text{ flooding}} \geq \frac{0,016}{C}$$

$$(area)_{30^\circ \rightarrow 40^\circ, \varphi \text{ flooding}} \geq \frac{0,006}{C}$$

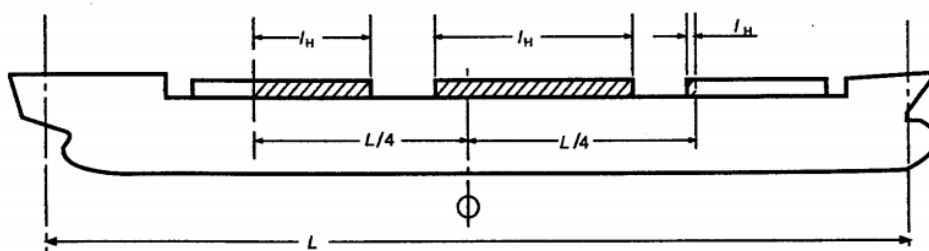
$$(area)_{0 \rightarrow 40^\circ, \varphi \text{ flooding}} \geq \frac{0,029}{C}$$



Εικόνα 5 – Απεικόνιση μοχλοβραχίονα **GZ** για γωνίες φ σύμφωνα με τα κριτήρια ευστάθειας για **container ship**. (Σπύρον, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)



Εικόνα 6 – Απεικόνιση των διαστάσεων και μεγεθών που χρησιμοποιούνται στα κριτήρια ευστάθειας για container ship ως προς τον άξονα y IMO-2008. (Σπύρου, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)



Εικόνα 7 – Απεικόνιση των διαστάσεων και μεγεθών που χρησιμοποιούνται στα κριτήρια ευστάθειας για container ship ως προς τον άξονα x IMO-2008. (Σπύρου, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)

$$C = \frac{d * D'}{B} * \sqrt{\frac{d}{KG}} * \left(\frac{Cb^2}{Cw}\right) * \sqrt{\frac{100}{L}}$$

Όπου ισχύει ότι:

d = Μέσο βύθισμα σε m

$$D' = D + h \left(\frac{2b - Bd}{Bd}\right) * \left(\frac{2 \sum H}{L}\right)$$

D = Μέσο κοίλο του πλοίου σε m

B = Μέσο πλάτος του πλοίου σε m

KG = Κατακόρυφη απόσταση του κέντρου βάρους από την τρόπιδα (m) και να μην λαμβάνεται μικρότερο του d

Cb = O συντελεστής γάστρας του πλοίου

Cw = O συντελεστής ισάλου επιφάνειας του πλοίου

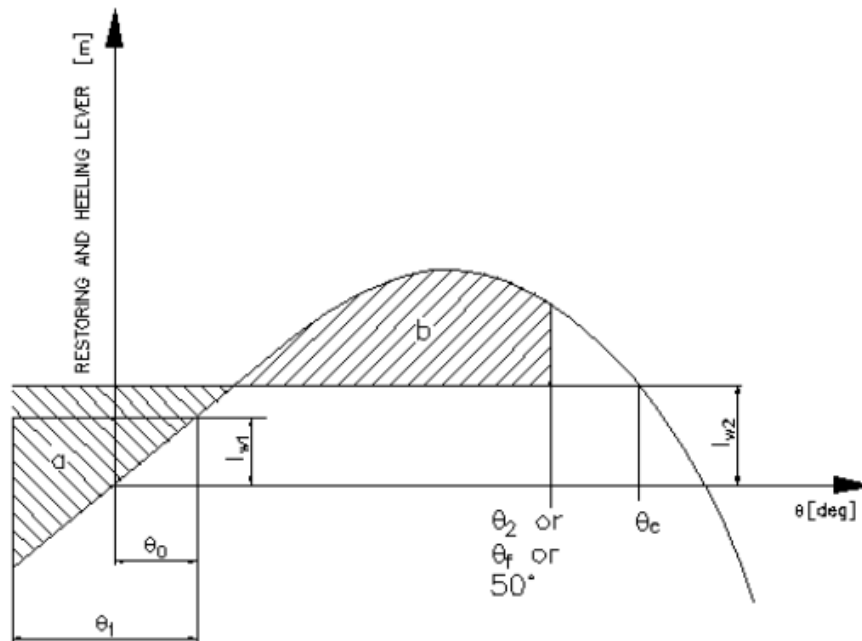
1.3 Κριτήρια καιρού

(IMO Intact Stability Criteria, 2008) Ένα από τα πρότυπα κριτήρια ευστάθειας πλοίου είναι γνωστά και ως κριτήρια καιρού (**weather criteria**), που υιοθετήθηκαν από τον **IMO** ως ψήφισμα **A. 562**, βασίζονται σε μια σειρά απλοποιητικών υποθέσεων όπως περιγράφονται και στη συνέχεια. Περιλαμβάνουν τον ενεργειακό ισολογισμό που υποδηλώνει τη φύση του ως κριτήριο δυναμικής ευστάθειας.

Πρέπει να ισχύουν τα παρακάτω:

- Το πλοίο επιτυγχάνει με σταθερή γωνία εγκάρσιας κλίσης θ_0 λόγω πλευρικής φόρτωσης ανέμου που αντιπροσωπεύεται από ένα συντελεστή I_{w1} , ο οποίος δεν εξαρτάται από τη γωνία εγκάρσιας κλίσης και είναι το αποτέλεσμα ενός ανέμου με ταχύτητα περίπου 26 m/s.
- Γύρω από αυτή τη γωνία το πλοίο υποτίθεται ότι εκτελεί συντονισμένη κίνηση **rolling** λόγω πλευρικής δράσης του κύματος, με αποτέλεσμα της οποίας φθάνει σε μια στιγμιαία μέγιστη γωνία θ_1 .
- Καθώς σε αυτή τη θέση το πλοίο είναι πιο ευάλωτο από την άποψη των καιρικών διεγέρσεων, θεωρείται περαιτέρω ότι το πλοίο ενεργοποιείται από ριπές ανέμου που αντιπροσωπεύονται από ένα τύπο $I_{w2} = 1.5 * I_{w1}$. Αυτό μεταφράζεται σε αύξηση ($1.5 = 1.2247$) της ταχύτητας του ανέμου, που υποτίθεται ότι επηρεάζει το πλοίο για σύντομο χρονικό διάστημα, αλλά τουλάχιστον ίση με το ήμισυ της φυσικής περιόδου υπό την προϋπόθεση της συντονισμένης απόκρισης του πλοίου.
- Η απαίτηση για την ευστάθεια πλοίου διατυπώνεται ως εξής. Εάν το πλοίο κάνει κίνηση **roll** ελεύθερα από τη θέση του εκτός ισορροπίας θ_1 με μηδενική γωνιακή ταχύτητα, η οριακή γωνία θ_2 που υπολογίζεται με βάση την κατάσταση $b > a$ (εικόνα 8) δεν πρέπει να υπερβαίνει κατά τη διάρκεια του επόμενου μισού κύκλου. Αυτή η οριακή γωνία παρουσιάζεται είτε όταν η γωνία όπου τα σημαντικά ανοίγματα είναι κατηφορικά, δηλαδή η γωνία απώλειας ευστάθειας θ_v , είτε όταν είναι γωνία 50° η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ξεκάθαρο όριο ασφάλειας, όποιο από τα τρία είναι το χαμηλότερο. Ουσιαστικά εκφράζεται ένα ενεργειακό ισοζύγιο, το έργο που επιτελείται από τη διέγερση του ανέμου

καθώς το πλοίο κάνει κίνηση **roll** ως προς την πλευρά που διεγείρεται από τις καιρικές συνθήκες κατά το οποίο δεν πρέπει υπερβαίνει την πιθανή συσσωρευμένη ενέργεια στην οριακή γωνία θ_2 .



Εικόνα 8 – Απεικόνιση κριτηρίου καιρού (weather criterion). (Σπύρου, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)

Το **heeling level** l_{w1} υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$l_{w1} = \frac{P * A * z}{1000 * g * \Delta}$$

Όπου έχουμε,

- $P = 504 \text{ (N/m}^2\text{)}$ σταθερή πίεση του ανέμου.
- $A \text{ (m}^2\text{)}$ = Προβλεπόμενη πλευρική επιφάνεια του ανέμου και φορτίου καταστρώματος πάνω από την ίσαλο γραμμή WL.
- $Z \text{ (m)}$ = Κάθετο εκτόπισμα μεταξύ του κέντρου της επιφάνειας A και του κέντρου της ύψαλης πλευρικής επιφάνειας (ή περίπου σε ένα σημείο στο μισό του βυθίσματος).
- $\Delta \text{ (t)}$ = Όγκος εκτοπίσματος.
- $g \text{ (m/s}^2\text{)}$ = Επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η μέγιστη γωνία κίνησης **rolling** πρέπει να υπολογίζεται από τους ακόλουθο τύπο:

$$\theta_1 = 109 * k * X1 * X2 * \sqrt{r * s}$$

- **k=1** Για πλοίο με καμπυλωτή, σε εγκάρσιες τομές, γάστρα, δίχως εμφανή τρόπιδα ή παρατροπίδια (**bilge keels**).
- **k=0.7** Για πλοία με έντονες ακμές.
- Διαφορετικά, το **k** λαμβάνεται απ' τον σχετικό πίνακα που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

B/d	X_1
≤ 2.4	1.0
2.5	0.98
2.6	0.96
2.7	0.95
2.8	0.93
2.9	0.91
3.0	0.90
3.1	0.88
3.2	0.86
3.4	0.82
≥ 3.5	0.80

C_B	X_2
≤ 0.45	0.75
0.50	0.82
0.55	0.89
0.60	0.95
0.65	0.97
≥ 0.70	1.0

$\frac{A_k \times 100}{L \times B}$	k
0	1.0
1	0.98
1.5	0.95
2	0.88
2.5	0.79
3	0.74
3.5	0.72
≥ 4.0	0.70

T	s
≤ 6	0.100
7	0.098
8	0.093
12	0.065
14	0.053
16	0.044
18	0.038
≥ 20	0.035

Εικόνα 9 – Πίνακες υπολογισμού παραμέτρων κριτηρίου καιρού. (Σπύρου, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)

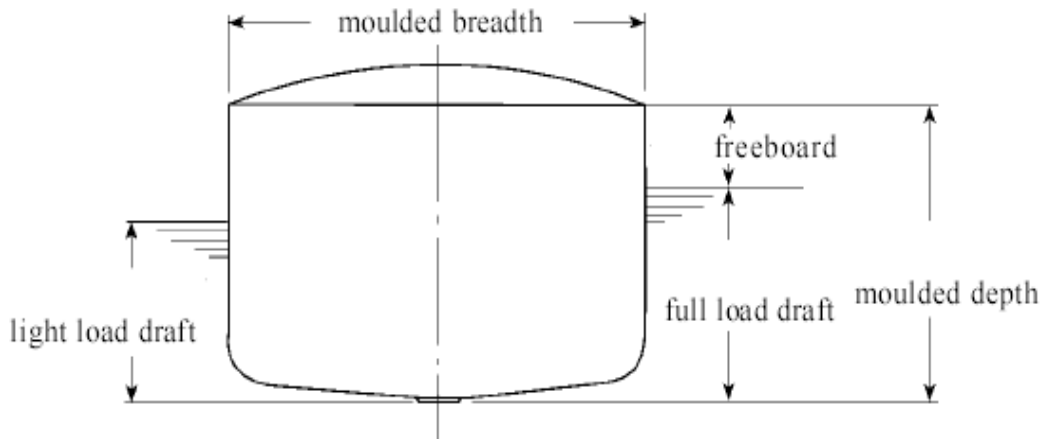
Όπου ο συντελεστής **k** εξαρτάται από τη σχετική περιοχή των παρατροπιδίων (**bilge keels**), το **X₁** εξαρτάται από την αναλογία πλάτους (**Beam**) προς το βύθισμα (**Draught**), το **X₂** είναι συνάρτηση του συντελεστή γάστρας **C_B**, και το **s** είναι συνάρτηση της περιόδου κίνησης **rolling T_φ**, η οποία μπορεί με τη σειρά της υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T_{\varphi} = \frac{2 * C * B}{\sqrt{GMT}}$$

Όπου το **C** είναι:

$$C = 0,373 + 0,023 * \frac{B}{T} - 0,043 * \frac{Lw}{100}$$

- **T** = Βύθισμα του πλοίου.
- **L_w** = Μήκος της ισάλου πλευσης.
- **B** = Moulded Breadth (εκφράζει το μέγιστο πλάτος ενός πλοίου που μετρείται ανάμεσα από τις εξωτερικές ακμές των νομέων, δηλαδή στο εσωτερικό της γάστρας. (Εικόνα 9)



Εικόνα 10 – Απεικόνιση διαστάσεων Moulded Breadth και Moulded Depth στη γάστρα πλοίου. (Σπύρου, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)

- **GM_T** = Μετακεντρικό ύψος.

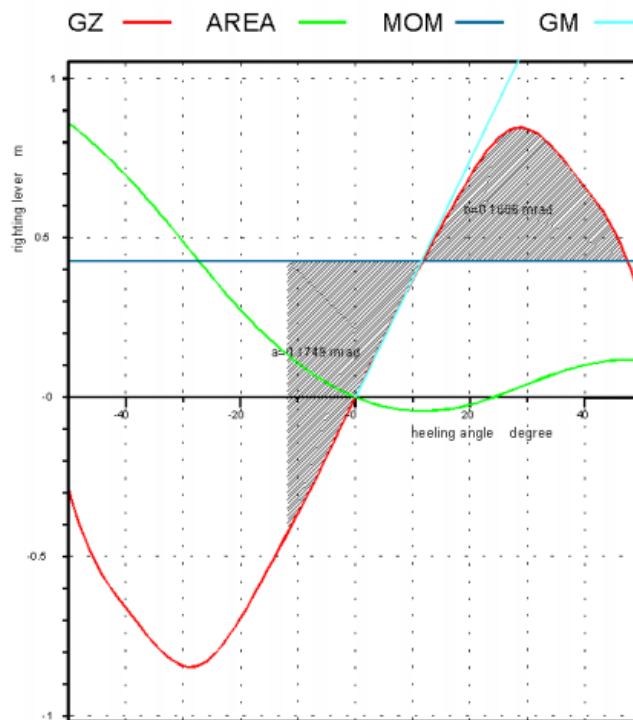
$$r = 0,73 \pm 0,6 * \frac{OG}{T}$$

- **OG** = Απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και της ισάλου γραμμής ("+" εάν το CG είναι πάνω από την ίσαλο γραμμή και "-" εάν το CG είναι κάτω).

Αξίζει να σημειωθεί ότι από την απλοποίηση των υποθέσεων που επιγράφηκαν προηγουμένως, προκύπτουν τα ακόλουθα προβλήματα που θα μπορούσαν να αναφερθούν με ιδιαίτερη έμφαση για μεγάλα πλοία.

- Οι επιλεγμένες τιμές των διαφόρων παραμέτρων του κριτηρίου καιρού είναι ακατάλληλες για σύγχρονα (μεγάλα) **επιβατηγά πλοία**, ο βασικός λόγος για τον **IMO** να ξεκινήσει μία σύστατη ομάδα εργασίας κώδικα **IS** για να συντονίσει αυτές τις παραμέτρους ανάλογα ως προσωρινό μέτρο, πριν από την εξέταση εναλλακτικών κριτηρίων ή μακροπρόθεσμων προσεγγίσεων.
- Το δυναμικό μοντέλο που εξετάζεται περιγράφει μόνο έναν βαθμό ελευθερίας, εξετάζει ρητά μόνο τα πιθανά αποτελέσματα (θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι ο υπολογισμός της θ_1 λαμβάνει υπόψη ρητά την επίδραση των κυμάτων και της απόσβεσης της κίνησης **roll**, παρόλο που η επίδραση των κυμάτων στη στιγμή αποκατάστασης και η επίδραση των ριπών ανέμου σε αυτούς τους υπολογισμούς αγνοείται εντελώς).

- Επιπρόσθετα στα κριτήρια καιρού, οι κυματισμοί, ο άνεμος και ασταθείς ριπές ανέμου, καθώς και περιεργες επιδράσεις κίνησης όπως παραμετρική κίνηση **rolling** και ταλαντώσεις στην κίνηση **yawing** στις **beam seas** (όταν το πλοίο δέχεται κύματα ως προς τη διαμήκη πλευρά του πλοίου **port** ή **starboard side**) της θάλασσας δεν έχουν λάβει καμία προσοχή ή ακόμη κάποια σημαντική εξέταση.



Εικόνα 11 – Κριτήριο καιρού για ένα τυπικό φορτηγό πλοίο. (Σπύρου, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου., 2006)

2.4 Από τον κώδικα ευστάθειας (I.S.Code) στα κριτήρια ευστάθειας δεύτερης γενιάς S.G.I.S.c.

Τα λεγόμενα κριτήρια άθικτης ευστάθειας 2^{ης} γενιάς **S.G.I.S.c (Second Generation Intact Stability criteria)** οριστικοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της 7ης συνόδου της υποεπιτροπής σχεδιασμού και κατασκευής πλοίων του **I.M.O.** το **2020**. Επί του παρόντος, τα κριτήρια δεν προορίζονται να είναι υποχρεωτικά, αλλά έλαβαν την έγκριση από τον **I.M.O.**, η οποία θα εφαρμοστεί εκτενώς στην παγκόσμια ναυτιλιακή κοινότητα. Προβλέπεται ότι θα χρειαστούν περαιτέρω βελτιώσεις, αλλά αναμένεται ότι τα **SGISc** θα επηρεάσουν θετικά τη διαδικασία σχεδιασμού πλοίων τα μεταγενέστερα χρόνια. Πρέπει να επισημανθεί ότι η απόδοση ευστάθειας πλοίου σε κύματα έχει αντιμετωπιστεί από τα **SGISc**, με ιδιαίτερη έμφαση σε πέντε δυναμικά φαινόμενα που είναι τα εξής:

- Παραμετρικός διατοιχισμός (**parametric rolling**).
- Καθαρή απώλεια ευστάθειας (**pure loss stability**).
- Κατάσταση νεκρού πλοίου (**dead ship condition**).
- Φαινόμενο (**surf-riding**) και (**broaching to**).
- Υπερβολικές επιταχύνσεις (**excessive accelerations**).

(W. Peters (M), 2011) Μια ενδιαφέρουσα καινοτομία που εισήχθησαν τα κριτήρια ευστάθειας δεύτερης γενιάς **SGISc** είναι η πολυεπίπεδη προσέγγιση που καθορίζει τρία επίπεδα αξιολόγησης, που χαρακτηρίζονται από διαφορετικό επίπεδο ακρίβειας και, ως εκ τούτου, τη διατήρησή τους. Υιοθετώντας αυτή τη δομή, ένας ναυπηγός μελετητής μπορεί να επιλέξει το είδος της ανάλυσης που πρέπει να πραγματοποιηθεί σχετικά με την απόδοση ευστάθειας πλοίου που θα μελετήσει.

Επιπλέον, στο πλαίσιο των **SGISc**, έχουν εισαχθεί διάφορες επιχειρησιακές πτυχές πλοίων κατά τη ναυσιπλοΐα. Αναγνωρίζεται ότι, προκειμένου να επιτευχθεί μια ασφαλέστερη απόδοση του πλοίου, η αντιμετώπιση μόνο της πτυχής του σχεδιασμού δεν μπορεί να είναι αρκετή. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη τα επιχειρησιακά μέτρα και να παρέχονται ενδείξεις στον υφιστάμενο πλοίαρχο. Για το λόγο αυτό, τόσο οι επιχειρησιακοί περιορισμοί όσο και η επιχειρησιακή καθοδήγηση έχουν αναπτυχθεί σημαντικά στο πλαίσιο των κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (**SGISc**).

Βέβαια για μεγάλο χρονικό διάστημα, μέσω των κριτηρίων ευστάθειας 1^{ης} γενιάς και των κριτηρίων καιρού, έως ότου ο κώδικας άθικτης ευστάθειας (**I.S.c**) που εκδόθηκε στις αρχές του 21ου αιώνα το 2008, η ευστάθεια των άθικτων πλοίων σε ήρεμα νερά ήταν ένα από τα κύρια θέματα στον τομέα της Ναυπηγικής βιομηχανίας και στο περιβάλλον θέσπισης κανονισμών. Κατά τη διάρκεια των συζητήσεων σχετικά με την οριστικοποίηση του κώδικα **I.S.c**, επισημάνθηκε η ανάγκη να εξεταστεί πιο προσεκτικά η φυσική σημασία αυτού του παράγοντα που μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ευστάθειας. Αυτή η προσέγγιση, η οποία εξαρτάται λιγότερο από τη βάση δεδομένων προηγούμενων συμβάντων, θα μπορούσε να εγγυηθεί κριτήρια που εφαρμόζονται καταρχήν ανεξάρτητα από την τυπολογία του πλοίου, προσαρμοσίμα και για νέα **project** πλοίων, αλλά κυρίως ικανά να λάβουν υπόψη και τη δυναμική συμπεριφορά των πλοίων λόγω της παρουσίας κυμάτων. Σε γενική αναφορά, η νέα μέθοδος έχει συχνά ονομαστεί ως φυσική προσέγγιση, υπονοώντας επομένως επίσης τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη οι υδροδυναμικοί παράγοντες ενός πλοίου σε κατάσταση θαλάσσιας κατεύθυνσης. Η υιοθέτηση μιας τέτοιας προσέγγισης απαιτεί ενισχυμένη γνώση της σύνθετης συμπεριφοράς των πλοίων σε άγριες θάλασσες (μεγάλους και επικίνδυνους κυματισμούς) που θα μπορούσαν να συνεπάγονται ακόμη και τα φαινόμενα ανατροπής πλοίων.

Αξίζει να σημειωθεί όμως, ότι οι τρόποι αστοχίας ευστάθειας που προσδιορίζονται από τον κώδικα **I.S.c** είναι αυτοί που εξετάζονται στο πλαίσιο των νέων άθικτων κριτηρίων ευστάθειας και έχουν ήδη ληφθεί υπόψη σε ορισμένες εγκυκλίους του **I.M.O**.

- Αποκατάσταση διακυμάνσεων λόγω εγκάρσιων ροπών που προκαλούν κυματισμοί (παραμετρικός διατοιχισμός και καθαρή απώλεια ευστάθειας).

- Βλάβη ευστάθειας σε κατάσταση νεκρού πλοίου.
- Αποτυχία ευστάθειας που σχετίζεται με ελιγμούς (**Surf-Riding** και **Broaching to**).

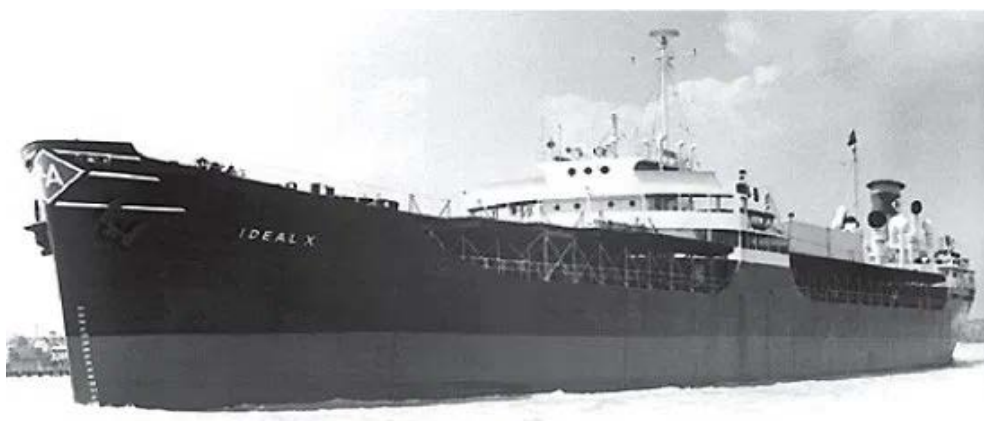
(IMO Intact Stability Criteria, 2008)Στις αρχές του 2008, κατά τη διάρκεια της 51^{ης} συνόδου της υποεπιτροπής του **I.M.O.** για τις γραμμές φόρτωσης, την άθικτη ευστάθεια και για την ασφάλεια των αλιευτικών πλοίων **S.L.F. (Fishing vessels safety)**, συστάθηκε ομάδα αλληλογραφίας μεταξύ των συνεδριών με στόχο την ανάπτυξη ενός συνόλου κριτηρίων για τους προαναφερθέντες προσδιορισθέντες τρόπους αστοχίας ευστάθειας πλοίου. Στην 53^η σύνοδο του **S.L.F.** το 2010 αντί για κριτήρια νέας γενιάς, προτάθηκε το τρέχον όνομα των κριτηρίων, δηλαδή κριτήρια άθικτης ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (**SGISc**). Επιπλέον, το πρόβλημα της υπερβολικής ανοχής στην ευστάθεια προστέθηκε ως ένα ακόμη φαινόμενο που πρέπει να αντιμετωπιστεί στα πλαίσια του **SGISc**. Το πλαίσιο και η σχετική ορολογία έχουν προσδιοριστεί μαζί με την ανάπτυξη της διαδικασίας για τη μεθοδολογία και τον προσδιορισμό των κριτηρίων. Σύντομα όμως, το έργο του **I.M.O.** φάνηκε να είναι αρκετά περίπλοκο και ο απαιτούμενος χρόνος για την επίτευξη του χρειάζεται πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για να καθοριστεί σωστά. Στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα στάδια εφαρμογής των κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (**SGISc**) και πιο συγκεκριμένα για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ship**).

2. Ιστορική αναδρομή - εξέλιξη πλοίων container ships

2.1 Γενικές αναφορές

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι φορητά πλοία αρκετά λεπτόγραμμα για να ταξιδεύουν σε υψηλές ταχύτητες, τα οποία μεταφέρουν όλο το φορτίο τους σε τυποποιημένα μεταλλικά κιβώτια, τα λεγόμενα (**Containers**). Η χωρητικότητα των συγκεκριμένων πλοίων μετριέται σε ισοδύναμα **TEU** (κιβώτια 20 ποδών μήκους). Διαθέτουν μεγάλα ανοίγματα κυτών στο κατάστρωμα λόγω της αποκλειστικής κάθετης φορτοεκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων.

Στις 26 Απριλίου **1956**, **Ideal-X** είναι το πρώτο πλοίο που μετέφερε εμπορευματοκιβώτια, απέπλευσε από το λιμάνι του **Newark** (ΗΠΑ). Το **Ideal-X** μετέφερε, εκτός από συμβατικό υγρό φορτίο, 58 εμπορευματοκιβώτια (Ε/Κ) 35-ποδών έκαστο. Ουσιαστικά επρόκειτο για ένα μετασκευασμένο τάνκερ, του οποίου την ιδέα είχε συλλάβει ο τότε μεγαλοπαράγοντας χερσαίων μεταφορών στις Η.Π.Α. και αργότερα ιδρυτής της **Sea Land, Malcom McLean (1914-2001)**.



Εικόνα 13 - 1^ο container ship Ideal X, 1956.¹

2.2 Εξέλιξη

Σήμερα, ύστερα από 50 χρόνια εξέλιξης των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα **container ships** πρωταγωνιστούν στην παγκόσμια ναυτιλιακή σκηνή. Οι θαλάσσιοι μεταφορείς **Containers** και οι τερματικοί σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων, οι δυο σημαντικότεροι παράγοντες της συγκεκριμένης βιομηχανίας, παρουσιάζουν αξιοσημείωτη ανάπτυξη τις τελευταίες δεκαετίες.

¹ <https://www.maritimeprofessional.com/blogs/post/ss-ideal-x-13478>

Σύμφωνα με στοιχεία των Ηνωμένων Εθνών (UNCTAD, 2004), η χωρητικότητα του στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβώτιων παγκοσμίως αυξήθηκε κατά **727%** την περίοδο **1980-2003**. Κατά την ίδια περίοδο, η χωρητικότητα του παγκοσμίου στόλου αυξήθηκε κατά **25%**. Ανάλογη αύξηση παρουσιάζουν οι κινήσεις εμπορευματοκιβωτίων στα λιμάνια.

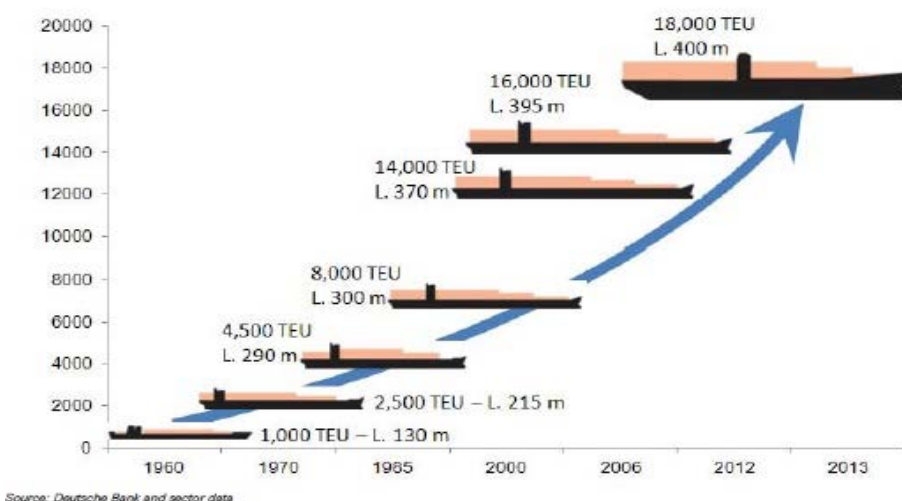
Ενδεικτικά, το παγκόσμιο (**through put**) εμπορευματοκιβώτιων σε λιμένες το 2002 ανήλθε στα **266.3 Twenty-Foot Equivalent Units (TEUs)**, αυξανόμενο κατά **22.5 εκ. TEUs** ή **9.2%** πιο πάνω από το **2001**. Αυτή η σημαντική αύξηση της κίνησης εμπορευματοκιβώτιων αναμένεται να συνεχιστεί στο εγγύς μέλλον. Σύμφωνα με στοιχεία του Διεθνούς Εμπορικού Επιμελητηρίου (ICC, 2005), το παγκόσμιο **through put** εμπορευματοκιβωτίων στους λιμένες αναμένεται να αυξάνεται με ρυθμό περί το **10%** ετησίως. Μάλιστα, σε συγκεκριμένες αγορές η ανάπτυξη αναμένεται να είναι μεγαλύτερη.

Συγκεκριμένα οι κινήσεις εμπορευματοκιβωτίων στις αγορές του Ειρηνικού και της Ρωσίας αναμένεται να αυξηθούν ετησίως κατά **10-12%** και **15-20%**, αντιστοίχως. Αλλά και πέρα από τον μικρόκοσμο της ναυτιλίας, η μέθοδος μεταφοράς με **container** υπήρξε καταλύτης της παγκοσμιοποίησής του εμπορίου, καθώς επιτάχυνε την μεταφορά των αγαθών, μείωσε το συνολικό κόστος μεταφοράς και παρείχε αυξημένη προστασία από ανεπιθύμητες ενέργειες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η σημαντική αυτή ανάπτυξη της εισαγωγής μεταφορών φορτίου εντός τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων στηρίζεται σε τρεις αρχές:

- Ταχεία μεταφορά (**JIT: Just in Time**).
- Ασφαλής μεταφορά (ασφάλεια έναντι καταστροφής/βλάβης ή κλοπής/απώλειας).
- Άνετη παραλαβή και παράδοση (**Door to Door Delivery Concept**).

Figure 1: Increase in size of the largest container ships



Εικόνα 14 – Απεικόνιση της σταδιακής αύξησης μεγέθους των Container ship με το πέρασμα των χρόνων.²

² <http://www.vesseltracking.net/article/biggest-container-ship>

Στην διάρκεια του μισού αιώνα παρουσίας των containerships επήλθαν σημαντικές αλλαγές στην αγορά των θαλάσσιων μεταφορέων **Ε/Κ**, κυρίως όσον αφορά το μέγεθος το πλοίων και τον ανταγωνισμό.

- **Μέγεθος container ships:** Το σημερινό μεγαλύτερο πλοίο μεταφοράς Ε/Κ (το **Emma Maersk**, επίσημης χωρητικότητας **11.000 TEUs**, αλλά ανεπίσημης ίσως παρά πάνω) μπορεί να μεταφέρει περίπου 190 φορές περισσότερα εμπορευματοκιβώτια από ότι το **Ideal-X**. Αυτή η αύξηση του μεγέθους κινήθηκε από την μείωση κόστους ανά **Ε/Κ** (κυρίως εν πλω) και απορρέει από οικονομίες κλίμακας σε κόστη κεφαλαίου και λειτουργικά κόστη (κόστη πληρώματος, εφοδιασμού, κατανάλωσης). Αντιθέτως, ανοικονομίες κλίμακας μπορεί να προκύψουν στα λιμάνια, καθώς η υποδομή τους (γερανοί, χώρος αποθήκευσης, κλπ.) δεν είναι έτοιμη να εξυπηρετήσει τα πλοία αυτά με αποδοτικό τρόπο.
- **Ανταγωνισμός:** Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί η είσοδος ανεξάρτητων εταιριών (εκτός κοινοπραξίας) στην αγορά. Επίσης, σύγχρονες μεγάλες εταιρίες **liners**, που αρχικά ήταν οργανωμένες σε κοινοπραξίες, αποσχίστηκαν από τις κοινοπραξίες και έγιναν ανεξάρτητες (**Maersk**, **Evergreen**). Παρά το όποιο ρεύμα ανταγωνισμού, η αγορά **container ships** παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη συγκέντρωση, με τις 10 μεγαλύτερες εταιρίες να κατέχουν το 60% της αγοράς.



Εικόνα 15 - Emma Maersk, χωρητικότητας 11.000 TEUs.³

³ <https://www.vesselfinder.com/vessels/EMMA-MAERSK-IMO-9321483-MMSI-220417000>

2.3 Επιχειρησιακά Προβλήματα

Παρά τα δίχως άλλο ανθηρά οικονομικά οφέλη που συνεπάγεται αυτή η ραγδαία άνοδος των όγκων φορτίου **E/K**, η αγορά μεταφοράς **E/K** δεν είναι απαλλαγμένη από επιχειρησιακά προβλήματα. Τα βασικότερα από αυτά τα προβλήματα είναι τα ακόλουθα:

- Ανισορροπία εμπορικών ροών, κυρίως από και προς την Κίνα.
- Παρατεταμένος χρόνος αναμονής πριν την πρόσδεση πλοίων στην προκυμαία.
- Μη ικανοποιητική παραγωγικότητα τερματικών σταθμών **E/K**.
- Συμφόρηση στις πύλες εισόδου/εξόδου φορτηγών στους λιμένες.
- Χρονοβόρες διαδικασίες επιθεώρησης των **E/K** λόγω ασφαλείας (**security**).
- Προβλήματα συντονισμού ενεργειών ανάμεσα σε διαφορετικούς φορείς.

2.4 Κατηγοριοποίηση πλοίων container ship

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων(**container ships**) διακρίνονται σε επτά μεγάλες κατηγορίες οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με το μέγεθός τους:

- 1) **Small feeder** (κάτω από 1000 TEU).
- 2) **Feeder** (1001-2000 TEU).
- 3) **Feeder ax** (2001-3000 TEU).
- 4) **Panamax** (3001-5000 TEU).
- 5) **Post panamax** (5001-10000 TEU).
- 6) **New panamax** (10001-14500 TEU).
- 7) **Ultra large** (14501 TEU και πάνω).

Τα μικρότερα πλοία των κατηγοριών που ονομάζονται **feeder** συνήθως έχουν τοποθετημένους γερανούς για μεγαλύτερη ευελιξία στα λιμάνια που δεν έχουν τις απαραίτητες εγκαταστάσεις.



Εικόνα 16– Small feeder container ship.⁴

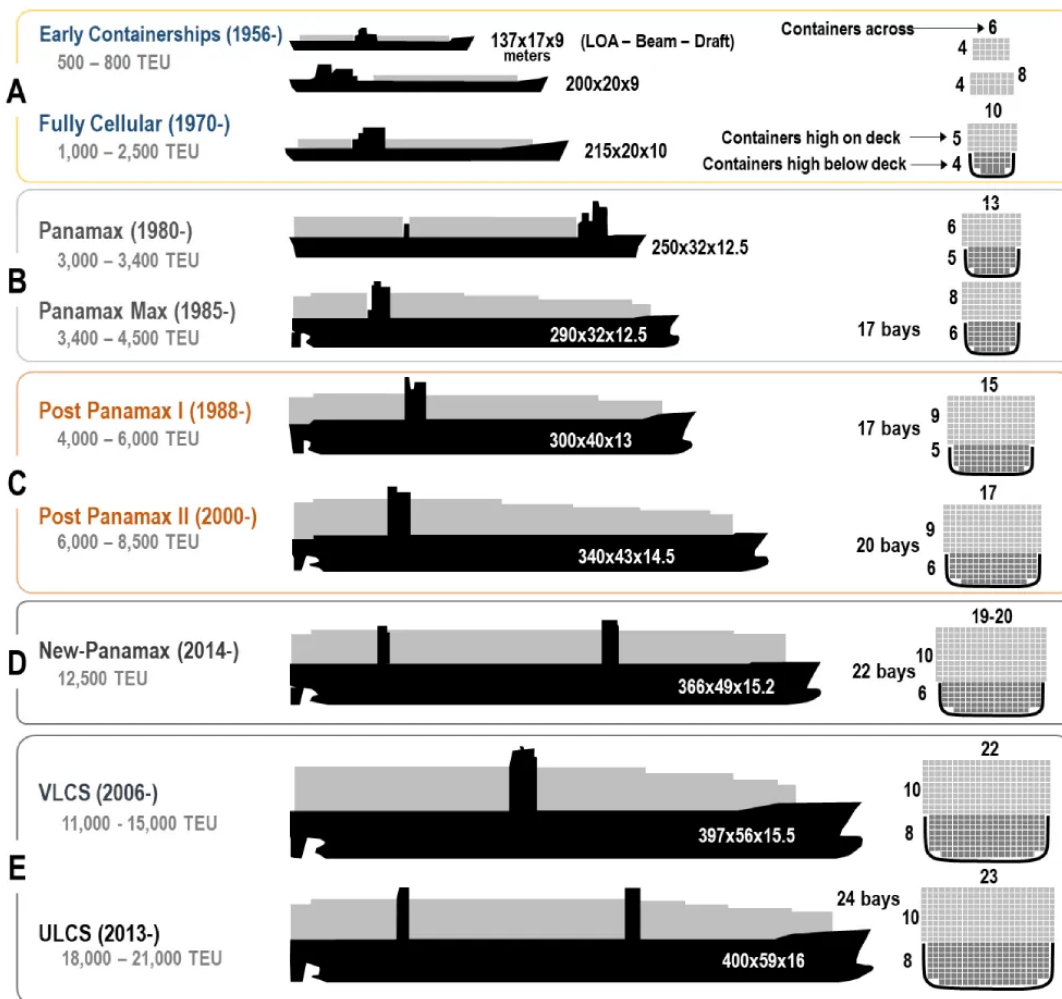
Τα πλοία της κατηγορίας **Panamax** με μήκος **L** ως **294.13 m**, πλάτος **B** ως **32.31 m** και βύθισμα **T** ως **12.04 m** σχεδιάστηκαν με σκοπό να διασχίζουν τη διώρυγα του Παναμά. Όμως από το 1985 μέχρι σήμερα γίνονται έργα επέκτασης της διώρυγας του Παναμά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται νέες κατηγορίες πλοίων κάθε 10 περίπου χρόνια. Μετά την τελευταία επέκταση της διώρυγας δημοσιεύτηκαν νέα όρια διαστάσεων των πλοίων που έχουν την δυνατότητα να περάσουν δημιουργώντας την κατηγορία **New Panamax** με τα εξής όρια: μήκος **L** ως **365.8 m**, πλάτος **B** ως **48.8 m** και βύθισμα **T** ως **15.2 m**. Τέλος τα **Ultra Large Containers ships** έχουν αυξηθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια, παρόλο που η παγκόσμια οικονομική κρίση έχει πλήξει την ναυτιλία τα τελευταία 10 χρόνια.



Εικόνα 17 – New Panamax Vessel Container ship στο λιμάνι του Wilmington στις Η.Π.Α.⁵

⁴ <https://www.freightwaves.com/news/investment-pitch-on-feeder-container-ships-has-yet-to-pay-off>

⁵ http://www.wilmingtonbiz.com/maritime/2019/04/23/first_new-panamax_ship_a_harbinger_of_more_business_for_port_of_wilmington/18850



Εικόνα 18 - Όλες οι διαστάσεις είναι σε μέτρα για συνολικό LOA μήκος. Τα φορτία που εμφανίζονται στο κατάστρωμα αντιπροσωπεύουν τα μέγιστα δυνατά φορτία, τα οποία θα περιλάμβαναν μεγάλο μερίδιο κενών containers. Τα φορτία είναι συνήθως 1 έως 3 containers λιγότερα σε ύψος.⁶

Οι ταχύτητες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχουν κορυφωθεί κατά μέσο όρο σε 20 έως 25 κόμβους **knots**, όμως αυτό το γεγονός καθιστά απίθανο να αυξηθούν οι ταχύτητες λόγω της μεγάλης κατανάλωσης ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο πολλές ναυτιλιακές γραμμές επιλέγουν αργό ατμό για να αντιμετωπίσουν υψηλότερες τιμές καυσίμων (όταν υπάρχουν αιχμές της αγοράς) και πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα (για να έχουν περισσότερα πλοία σε πιο αργή υπηρεσία). Η ανάπτυξη μιας κατηγορίας ταχέων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παρέμεινε στους πίνακες σχεδίασης, διότι τα πλεονεκτήματα ταχύτητας που θα προσέφεραν δεν θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν τα πολύ υψηλότερα έξοδα αποστολής. Οι αλυσίδες εφοδιασμού έχουν απλώς συγχρονιστεί με τις ταχύτητες αποστολής εμπορευματοκιβωτίων και η ρύθμιση των χερσαίων γεφυρών, όπως η Ευρασιατική **Landbridge**, η οποία προσφέρει μια ανταγωνιστική υπηρεσία για ευαίσθητα στο χρόνο φορτία.

⁶ <https://transportgeography.org/contents/chapter5/maritime-transportation/evolution-containerships-classes/>

Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε επόμενη γενιά **container ship** αντιμετωπίζει έναν συρρικνωμένο αριθμό λιμανιών που είναι σε θέση να τα χειριστεί και να ασκήσει πιέσεις στις λιμενικές υποδομές και τον εξοπλισμό.

Οι ναυτιλιακές εταιρείες ωστόσο ενθαρρύνονται στο να χρησιμοποιούν όλο και μεγαλύτερα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που είναι δυνατόν στις ναυτιλιακές τους διαδρομές, δεδομένου ότι επωφελούνται από οικονομικές κλίμακες. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι, οι λιμένες και τα συστήματα εσωτερικών μεταφορών πρέπει να παρέχουν σημαντικές επενδύσεις κεφαλαίου εάν αναμένουν να φιλοξενήσουν μεγαλύτερα εμπορευματοκιβώτια. Συνεπώς, υπάρχουν επιχειρησιακοί περιορισμοί για την ανάπτυξη πλοίων μεγαλύτερων από **8.000 TEU** όσον αφορά τους λιμένες κλήσης και την απαιτούμενη υποδομή για την παροχή αποδεκτού ρυθμού απόδοσης φόρτωσης και εκφόρτωσης.

Επίσης, οι μεγάλες αναπτύξεις εμπορευματοκιβωτίων απαιτούν σημαντική ποσότητα φορτίου για να είναι εμπορικά εφικτές, όπως η επαρκής συχνότητα εξυπηρέτησης. Τα εμπορευματοκιβώτια που κυμαίνονται από **5.500** έως **6.500 TEU** φαίνεται να είναι τα πιο ευέλικτα όσον αφορά τους λιμένες που μπορούν να έχουν πρόσβαση και την αγορά που μπορούν να εξυπηρετήσουν, καθώς η χρήση μεγαλύτερων πλοίων απαιτεί λιγότερες λιμενικές κλήσεις. Ως εκ τούτου, τα όρια για τις οικονομικές κλίμακες στη ναυτιλία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι πολύ πιο περιορισμένα από τα εμπορικά χαρακτηριστικά παρά από τους τεχνικούς περιορισμούς.

2.5 Μειονεκτήματα που αντιμετωπίζουν τα container ships.

Είναι γεγονός ότι τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ship**) εκτός τα πλεονεκτήματα τους στη παγκόσμια εμπορική ναυτιλία, παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία είναι τα εξής:

- **Ευστάθεια (παραμετρικός διατοιχισμός-parametric rolling):** Το φαινόμενο της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) παρατηρείται σε όλα τα πλοία με τη διαφορά όμως ότι κυρίως στα μεγάλα **container ships** και λόγω της λεπτόγραμης γάστρας τους με έντονη κλίση της πλώρης (**bow flare**) σε συνδυασμό με επίπεδη πρύμνη (**flat stern**) που έχουν, παρατηρείται ότι είναι πιο ευάλωτα στο φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**). Αξίζει να σημειωθεί ότι τέτοια πλοία έχουν μια ευρεία ακτίνα πλάτους (**beam**) για να αποθηκεύουν έναν μεγάλο αριθμό εμπορευματοκιβωτίων και την ίδια στιγμή, τα ύφαλα τους είναι βελτιστοποιημένα για να ελαχιστοποιούν την αντίσταση, καθώς τα **container ships** απαιτούν από τον πλοιοκτήτη τους ταχύτητα (**Just in Time**). Ωστόσο, το 1998 ένα **Post-Panamax**, κλάσης **C11 container ship** έχασε σχεδόν το 1/3 των εμπορευματοκιβωτίων του καταστρώματος και καταστράφηκε άλλο ένα 1/3 σε μια σοβαρή καταιγίδα. Τα αποδεικτικά στοιχεία του παραμετρικού διατοιχισμού σε πρωραίους κυματισμούς (**head seas**) σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κατηγορίας **C11 Panamax** έλαβαν ευρεία και ανανεωμένη προσοχή και το περιστατικό αυτό αναλύθηκε μέσω

αριθμητικών προσομοιώσεων και δοκιμαστικών μοντέλων όπου θα αναλυθούν στη συνέχεια της εργασίας στα επόμενα κεφάλαια. Γενικά, ο παραμετρικός διατοιχισμός (**parametric rolling**) έχει παρατηρηθεί σε μεμονωμένες συνθήκες όπως οι παρακάτω ή και σε συνδυασμό αυτών:

- Όταν η φυσική περίοδος της κίνησης **rolling** είναι ίση περίπου με το διπλάσιο της περιόδου συναντήσεων κυμάτων.
 - Όταν το μήκος κυμάτων είναι καλύπτει το μήκος του πλοίου (μεταξύ **0.8** και **2** φορές του **LBP**).
 - Όταν το ύψος κύματος υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο.
 - Όταν η απόσβεση της κίνησης **rolling** είναι χαμηλή (έλλειψη αντιδιατοιχιστικών μέσων (π.χ. **stabilizers, bilge keels**)).
-
- **Αντοχή πλοίου:** Είναι γεγονός ότι τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ships**) λόγω των μεγάλων ανοιγμάτων του κύριου καταστρώματος **Main Deck** παρουσιάζουν σχετικά μικρή ακαμψία σε σχέση με τις στρεπτικές τάσεις με αποτέλεσμα να χρειάζεται ειδική μελέτη για την αντοχή τους σύμφωνα πάντα με τους κανονισμούς των Νηογνωνόμων.
 - **Επιπτώσεις στην εκμετάλλευση χώρων:** Δυστυχώς λόγω των τυποποιημένων διαστάσεων που έχουν τα εμπορευματοκιβώτια, έχουν σαν αποτέλεσμα να μένουν ανεκμετάλλευτοι χώροι στο πλοίο που ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται ως κεντρικοί διαδρόμοι.



Εικόνα 24 – Απεικόνιση επίπτωσης παραμετρικού διατοιχισμού σε πλοίο container ship.⁷

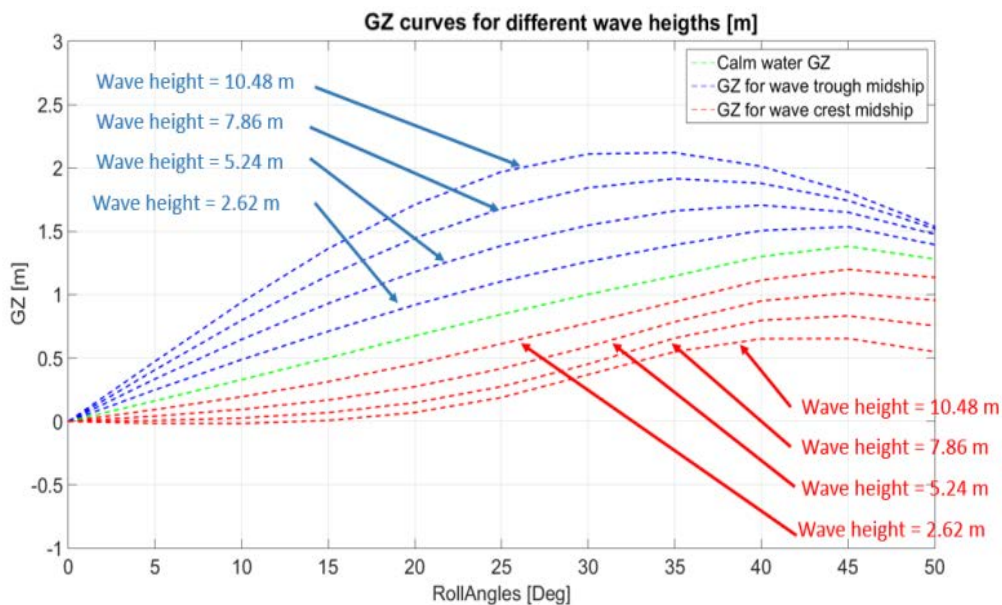
⁷ <https://lshipdesign.blogspot.com/2014/04/the-physics-behind-parametric-rolling.html>

3. Παραμετρικός διατοιχισμός (parametric rolling)

3.1 Εισαγωγή στον παραμετρικό διατοιχισμό (parametric rolling)

Είναι γεγονός ότι το φαινόμενο συντονισμού παραμετρικού διατοιχισμού στους διαμήκεις πλωραίους (**Heading seas**) και πρυμναίους κυματισμούς (**Following seas**) παρατηρείται ως σημαντική ενίσχυση των κινήσεων **rolling**, οι οποίες μπορεί να καταστούν επικίνδυνες για το πλοίο, το φορτίο ή ακόμα και το πλήρωμά του. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με την περιοδική αλλαγή της ευστάθειας καθώς το πλοίο κινείται με ταχύτητα σε διαμήκεις κυματισμούς όταν η συχνότητα συνάντησης του κύματος με το πλοίο είναι περίπου διπλάσια από τη φυσική συχνότητα διατοιχισμού (**rolling**) και η απόσβεση του πλοίου για να αντισταθεί στην παραμετρική ενέργεια διατοιχισμού είναι ανεπαρκής για να αποφύγει την έναρξη μιας συντονισμένης κατάστασης.

Ένα εγκάρσια συμμετρικό πλοίο που κινείται μέσα σε πλωραίες ή πρυμναίες θάλασσες θα βιώσει κινήσεις ανύψωσης (**heave**), προνευστασμού (**pitch**) και διατοιχισμού (**roll**) λόγω κυμάτων. Ουσιαστικά ποικίλες δυνάμεις (υδροστατικές και δυναμικές) από τα κύματα που προκύπτουν από τη δεξιά (**starboard**) ή από την αριστερή (**port**) πλευρά του πλοίου είναι πολύ πιθανό να προκαλέσουν παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**). Πρέπει να τονίσουμε ότι ο παραμετρικός διατοιχισμός προκαλείται από αλλαγές στην ευστάθεια ενός πλοίου κυρίως σε καταστάσεις δυσμενών καιρικών συνθηκών μέσω ακανόνιστων μεγάλων κυματισμών. Η διακύμανση της ευστάθειας στα κύματα μπορεί να απεικονιστεί μέσω της καμπύλης **GZ** η οποία μεταβάλλεται για τις διαφορετικές θέσεις του κύματος και για διαφορετικά ύψη κύματος, όπως παρουσιάζεται **εικόνα 27**.



Εικόνα 27 - Παράδειγμα καμπυλών GZ σε ήρεμο νερό, όταν η κορυφή του κύματος βρίσκεται στη μέση του πλοίου (midship) και όταν οι κοιλάδες του κύματος περνούν από τη μέση του πλοίου, για πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τύπου C11. Θεωρείται ότι το μήκος κύματος είναι ίσο με το μήκος του πλοίου. (SJULE, 2016)

Όπως φαίνεται στην **εικόνα 27**, η ευστάθεια του πλοίου αυξάνεται με το ύψος κύματος όταν οι κοιλάδες του κύματος βρίσκονται στη μέση του πλοίου (**amidship**), ενώ μειώνεται η ευστάθεια όταν η κορυφή του κύματος βρίσκεται στη μέση του πλοίου (**amidship**). Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του **GZ** είναι τελείως διαφορετική. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική επιφάνεια ισάλου (**waterplane area**) που έχει το πλοίο όταν το μέσο του βρίσκεται στην κοιλάδα (**trough amidship**) ή στην κορυφή (**crest amidship**) του κύματος. Συνεπώς αλλάζει η επιφάνεια ισάλου και άρα μεταβάλλεται σημαντικά και το **I** (**δεύτερη ροπή επιφανείας**), άρα το **BM** του πλοίου καθώς:

$$BM = \frac{I}{Vol}$$

I = δεύτερη ροπή επιφανείας

Vol = Όγκος εκτοπίσματος

Από την άλλη πλευρά, καθώς το **KG** (**κέντρο βάρους**) παραμένει σταθερό και το **KB** (**κέντρο άντωσης**) σχεδόν σταθερό, τότε μεταβάλλεται σημαντικά το **GM** όπου,

$$GM = KB + BM - KG$$

Άρα και το **GZ** σημαντικά αντίστοιχα καθώς το **GZ** είναι συνάρτηση του **GM**.

Αυτή η αλλαγή στην ευστάθεια καθώς περνάει το κύμα προκαλεί παραμετρικό διατοιχισμό. Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της ευστάθειας από την κορυφή των κυμάτων και κοιλάδων που περνούν από τη μέση του πλοίου (**amidship**) τόσο μεγαλύτερο το εύρος του διατοιχισμού (**rolling**) που θα δημιουργηθεί. Όταν η κορυφή του κύματος βρίσκεται στο μέσο νομέα του πλοίου, τότε θα έχει μειωμένη τιμή του **GM** και το πλοίο θα πάρει κλίση προς τη μία πλευρά. Όταν το πλοίο κάνει **roll** προς εκείνη την πλευρά, οι κοιλάδες του κύματος φτάνουν στο μέσο νομέα του πλοίου με αποτέλεσμα να παρέχεται αυξημένη ευστάθεια που θα ωθήσει το πλοίο πίσω στην αρχική του θέση. Στο χρονικό σημείο που το πλοίο έχει φτάσει σε όρθια θέση από την ώθηση προς τα πίσω, το πλοίο μεταφέρει ορμή λόγω **rolling** έχοντας φτάσει η κορυφή κύματος στη μέση του πλοίου, έτσι οι ιδιότητες ευστάθειας είναι και πάλι χαμηλές. Η κίνηση **rolling** αυξάνεται σε πλάτος έως ότου οι δυνάμεις απόσβεσης να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να απορροφήσουν την ενέργεια που δημιουργεί παραμετρικό διατοιχισμό.

Ο παραμετρικός διατοιχισμός (**parametric rolling**) συμβαίνει όταν η περίοδος συνάντησης του κύματος είναι κοντά στο ήμισυ της φυσικής περιόδου κίνησης **rolling** του πλοίου. Αξίζει να σημειωθεί, ότι μπορεί να συμβεί παραμετρικός διατοιχισμός όταν ένα κύμα περνά για κάθε φυσική περίοδο **rolling** του πλοίου. Το πλοίο θα κυλίσει στη συνέχεια στη μία πλευρά για να ωθηθεί πίσω και να πέσει ξανά στην άλλη πλευρά του πλοίου. Όσο για την ανάπτυξη παραμετρικού συντονισμού (**parametric resonance**) για να αναπτυχθεί πρέπει να περάσει μια σειρά κυμάτων ίσου μήκους κύματος έτσι ώστε να αυξηθούν τα πλάτη συντονισμού.

Για να αξιολογηθεί εάν ένα πλοίο κινδυνεύει από παραμετρικό διατοιχισμό, μπορεί να εξεταστεί από ορισμένους παράγοντες για να διαπιστωθεί εάν το πλοίο είναι ευάλωτο σε αυτό το φαινόμενο.

- Λειτουργικότητα (Operability):
 - Η παρουσία αρκετά μεγάλων κυμάτων και κυμάτων ορισμένου ύψους κύματος που προκαλούν μεγάλη διακύμανση του **GM**.
 - Η κατεύθυνση του πλοίου σε σχέση με τα κύματα (πλωραίους και μετά πρυμναίους κυματισμούς).

- Απόσβεση στην κίνηση διατοιχισμού (Roll damping):
 - Χαμηλή απόσβεση διατοιχισμού λόγω των μικρών ή έλλειψης παρατροπιδίων (**bilge keels**), **stabilizers**, προσαρτημάτων απόσβεσης διατοιχισμού και του υδροδυναμικά γεωμετρικού σχεδιασμού της γάστρας.

- Μεταβολή GM (GM variation):
 - Η έντονη κλίση λεπτόγραμης πλώρης (**bow flare**), καθώς αυτό αυξάνει το πλάτος της ισάλου γραμμής όταν οι κοιλάδες κυματισμών βρίσκονται στη μέση του πλοίου (**amidship**).

 - Μεγάλη αναλογία **B/T** (Πλάτους/Βυθίσματος).

- Συντονισμός (Resonance):
 - Όταν η φυσική περίοδος της κίνησης **rolling** είναι ίση περίπου με το διπλάσιο της περιόδου συνάντησης κυμάτων.
 - Όταν το μήκος κυμάτων καλύπτει το μήκος του πλοίου (μεταξύ 0.8 έως και 2 φορές του **LBP**).
 - Για να αναπτυχθεί συντονισμός πρέπει να δημιουργηθούν πολλά επανειλημμένα κύματα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι ο διατοιχισμός (**rolling**) για ένα πλοίο σε πλωραίους κυματισμούς (**heading seas**), πρυμναίους (**following seas**) κυματισμούς μπορεί να εξηγηθεί με το δεύτερο νόμο του **Newton** χωρίς εξωτερικές εγκάρσιες δυνάμεις να δρουν στο σύστημα.

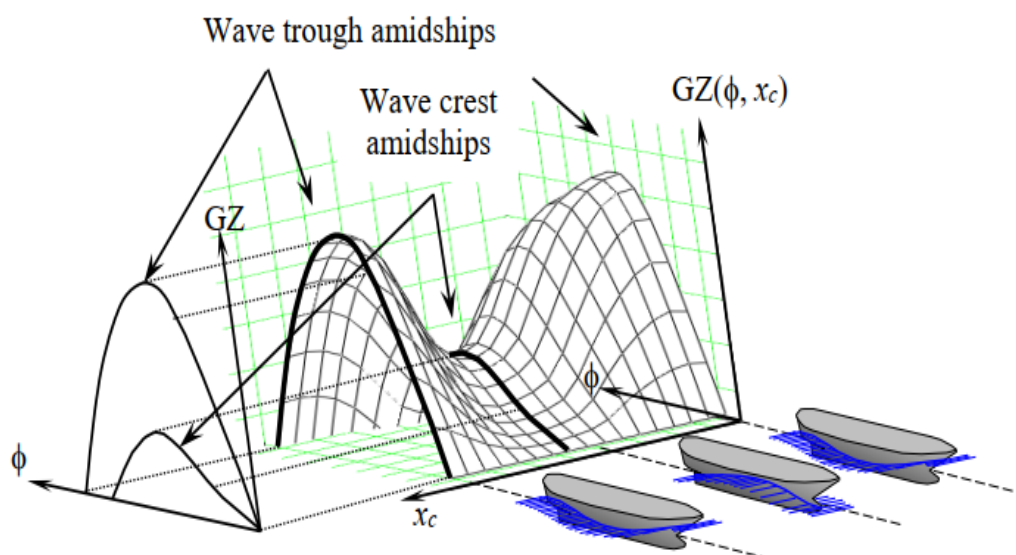
$$M_{IN}(\ddot{\varphi}) + M_D(\dot{\varphi}) + M_R(t, \varphi) = 0 \quad (4, 1)$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει τη στιγμιαία αδράνεια του πλοίου γύρω από τον διαμήκη άξονά του ως συνάρτηση της γωνιακής επιτάχυνσης. Ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει τη στιγμιαία ταχύτητα γωνία εγκάρσιας κλίσης του συστήματος που συνδέεται με την απόσβεση. Ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει τη στιγμιαία κίνηση του πλοίου στο διατοιχισμό (**rolling**). Αυτή τη χρονική στιγμή, η δύναμη της άντωσης από το εκτοπισμένο νερό του πλοίου εμφανίζεται ο μοχλοβραχίονας **GZ** επαναφοράς, που

είναι η εγκάρσια απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και του κέντρου πλευστότητας. Όσο για τις παραμετρικές ταλαντώσεις ενός πλοίου δεν υπάρχουν εξωτερικές ροπές διατοιχισμού (**rolling**) που να δρουν στο σύστημα. Υπάρχει ακριβώς αυτή η αλλαγή στο **GZ** που προκαλεί την ταλαντευόμενη κίνηση. Αυτή η εξίσωση της κίνησης διατοιχισμού μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\ddot{\phi} + (2\alpha + \gamma\dot{\phi}^2) * \dot{\phi} + \frac{1}{I_x + A_{44}} * \rho V g * GZ(t, \phi) = 0 \quad (4,2)$$

Ο τρίτος όρος σε αυτή την εξίσωση (4,2) περιέχει την αλλαγή του **GZ** που προκαλεί παραμετρικό συντονισμό. Ο δεύτερος όρος στη σχέση (4,2) περιέχει τον όρο απόσβεσης που συνδέεται με τη γωνιακή ταχύτητα διατοιχισμού (**roll**). Αυτός ο όρος επηρεάζει στο πόσο μεγάλα θα γίνουν τα μέγιστα πλάτη διατοιχισμού (**rolling**) για την μεταβολή του **GZ**, α και γ είναι οι συντελεστές απόσβεσης.



Εικόνα 28 - Αποκαθιστώντας τη χρονική στιγμή ως συνάρτηση της θέσης κυμάτων και της γωνίας εγκάρσιας κλίσης. (SJULE, 2016)

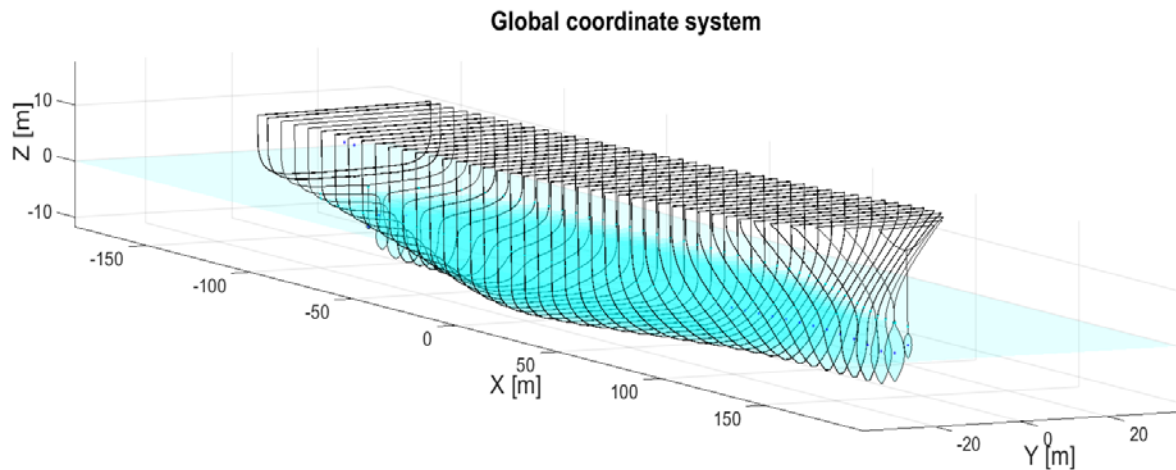
Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροπή επαναφοράς κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) στη σχέση 4,1 μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$M_R = \rho * V * g * GZ(t, \phi)$$

Για να γίνει πιο κατανοητό, για να υπολογιστεί αυτή ροπή πρέπει να υπολογιστεί πώς συμπεριφέρεται ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς **GZ** σε κάθε κυματισμό που δέχεται το πλοίο.

3.2 Σύστημα συντεταγμένων (Coordinate system)

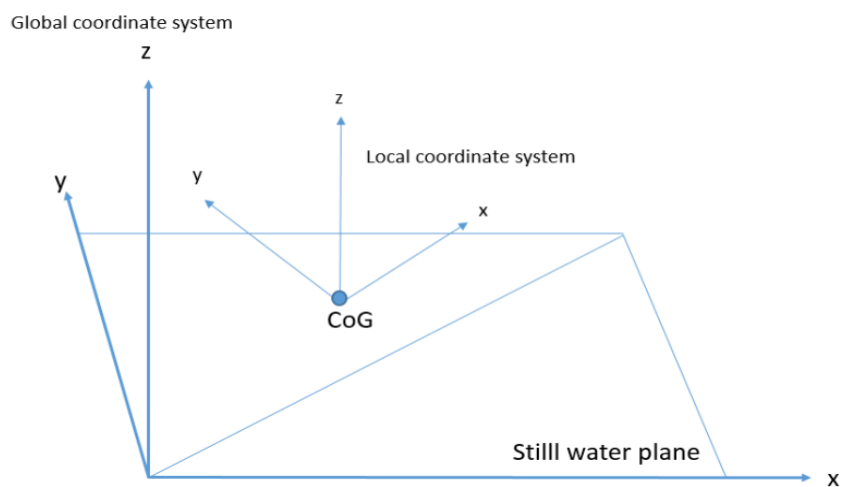
Πρέπει να τονιστεί ότι για μπορέσουμε να μελετήσουμε εκτενέστερα το φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού, πρέπει να θέσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων. Η γεωμετρία του πλοίου έχει χωριστεί σε άξονες, όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 29** όπου αναπαρίσταται η πραγματική γεωμετρία του πλοίου.



Εικόνα 29 – Απεικόνιση της γάστρας σε παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων C11. (SJULE, 2016)

Κατά την μελέτη επεξεργασίας της γεωμετρία του πλοίου χρησιμοποιήθηκαν δύο συστήματα συντεταγμένων. Ένα τοπικό σύστημα, σταθερό σύστημα και ένα παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Ο άξονας X και ο άξονας Y του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων είναι το επίπεδο ήρεμου νερού, ενώ ο άξονας Z είναι κάθετος στο επίπεδο ήρεμου νερού, όπως φαίνεται στην **εικόνα 30**.



Εικόνα 30 – Απεικόνιση τοπικού και παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων. (SJULE, 2016)

Κατά την τοποθέτηση του πλοίου στα τοπικά συστήματα συντεταγμένων το κέντρο βάρους του πλοίου τοποθετείται στην προέλευση του τοπικού συστήματος συντεταγμένων. Ο άξονας **X** είναι παράλληλος με την καρίνα του πλοίου, ενώ ο άξονας **Y** είναι παράλληλος με τον εγκάρσιο άξονα του πλοίου και ο άξονας **Z** είναι παράλληλος με τον κατακόρυφο άξονα του πλοίου. Αυτή η μετατόπιση της θέσης (από τη θέση της Καρίνας στο **AP**) γίνεται μέσω προγράμματος:

- $x = x - LCG; LCG = 0$
- $y = y - TCG; TCG = 0$
- $z = z - KG; KG = 0$

Η προέλευση του τοπικού συστήματος συντεταγμένων τοποθετείται κατά μήκος του άξονα **z** του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων, στις ίδιες συντεταγμένες **x** και **y** με την προέλευση του επιπέδου **x-y**. Το επίπεδο **X-Y** στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων είναι η ήρεμη επιφάνεια νερού, έτσι το εγκάρσιο κέντρο βάρους του πλοίου (**VCG**), προέλευση του τοπικού συστήματος συντεταγμένων, αρχικά θα τοποθετηθεί υψηλότερα ή χαμηλότερα από την προέλευση του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων ανάλογα με το πλοίο και την κατάσταση φόρτωσης του.

Έχουν ληφθεί υπόψη τρεις βαθμοί ελευθερίας:

Κίνηση **heave**, **roll** και **pitch**.

Τρεις βαθμοί ελευθερίας έχουν μείνει έξω:

Κίνηση **yaw**, **sway** και **surge**.

Οι υδροστατικές ιδιότητες υπολογίζονται από τη γεωμετρία στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

- Ο όγκος εκτοπίσματος του πλοίου υπολογίζεται με την ολοκλήρωση κάθε υγρού τμήματος πάνω από το μήκος του πλοίου, δηλαδή:

$$V = \int_0^L A_s dx$$

- Το διάμηκες κέντρο άντωσης **LCB** υπολογίζεται ως εξής:

$$LCB = \frac{\int_0^L A_s * x_B * dx}{V}$$

- Το εγκάρσιο κέντρο άντωσης **TCB** υπολογίζεται ως εξής:

$$TCB = \frac{\int_0^L A_s * y_B * dx}{V}$$

- Το κάθετο κέντρο άντωσης V_{CB} υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{CB} = \frac{\int_0^L A_s * z_B * dx}{V}$$

- Η δύναμη ανύψωσης από το εκτοπισμένο νερό υπολογίζεται ως εξής:

$$F_B = \rho * V * g$$

- Η βαρυντική δύναμη υπολογίζεται ως εξής:

$$F_g = m * g$$

Αρχικά αφού υπολογιστεί το κέντρο άντωσης στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων, υπολογίζεται η θέση του κέντρου άντωσης στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων:

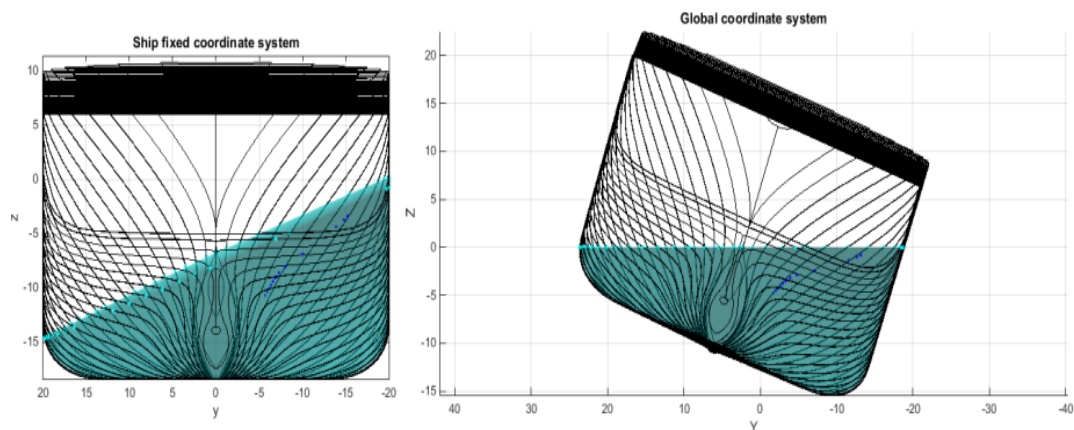
$$LCBo = \cos(\eta) * LCB + (-\sin(\eta) * KB)$$

$$TCBo = \sin(\eta) * \sin(\varphi) * LCB + \cos(\varphi) * TCB + \cos(\eta) * \sin(\varphi) * KB$$

$$KBo = \sin(\eta) * \cos(\varphi) * LCB - \sin(\varphi) * TCB + \cos(\eta) * \cos(\varphi) * KB * h$$

Όπου h = η κίνηση **heave** (m), φ = γωνία εγκάρσιας κλίσης(**roll**) (deg) και η = γωνία διαμήκης κλίσης (**pitch**) (deg)

Στην παρακάτω **εικόνα 31** απεικονίζεται η πρύμνη του πλοίου που φαίνεται στο τοπικό και το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων σε σύγκριση.

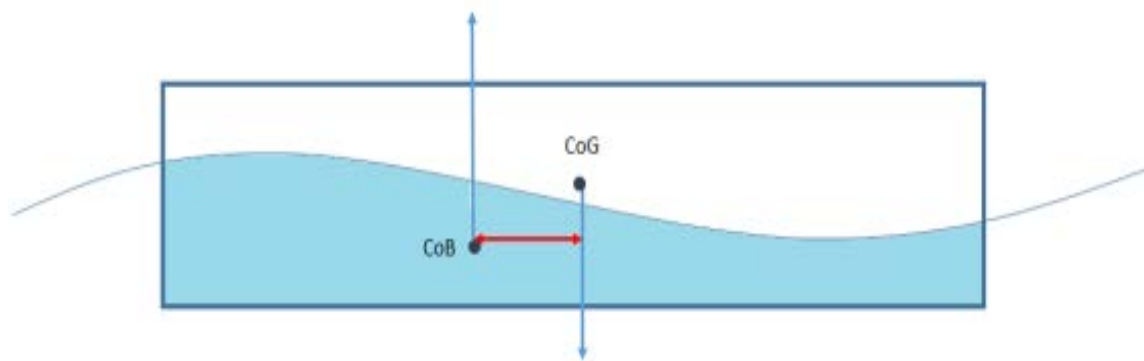


Εικόνα 31 - Απεικόνιση του πρυμναίου τμήματος του πλοίου στο τοπικό (σταθερό πλοίο) και παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων. Πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τύπου C11. (SJULE, 2016)

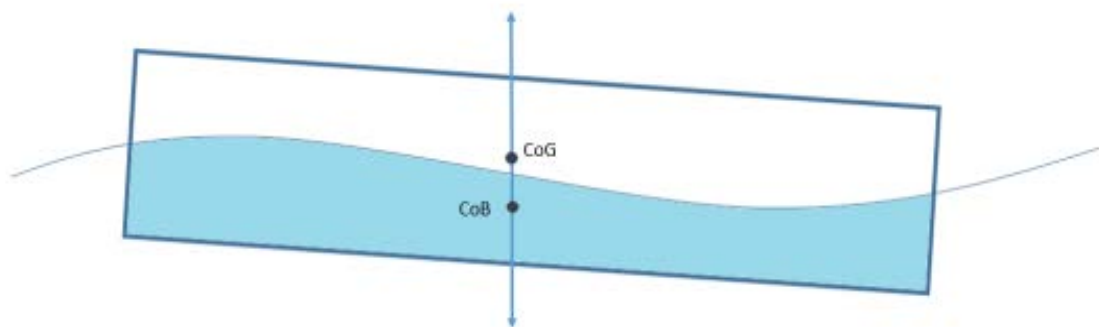
3.3 Υπολογισμός μογλοβραχίονα επαναφοράς GZ

Αρχικά κατά τον υπολογισμό του **GZ** σε κύματα, η ισορροπία κίνησης **heave** και **pitch** υπολογίζεται σε κάθε θέση κύματος καθώς περνάει το κύμα. Η πρώτη κίνηση **heave** ρυθμίζεται για να επιτευχθεί ισορροπία κατακόρυφης δύναμης όπως φαίνεται στην **εικόνα 32**. Στη συνέχεια, η κατακόρυφη δύναμη συγκρίνεται με το αποδεκτό κατακόρυφο όριο δύναμης.

Δεύτερον ρυθμίζεται μέχρι το κέντρο βάρους, ευθυγραμμίζεται με το κέντρο της άντωσης κάθετα όπως φαίνεται **εικόνα 33**. Στη συνέχεια, η κίνηση **pitch** συγκρίνεται με αποδεκτό όριο για την κίνηση **pitch**. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι τη στιγμή κίνησης **pitch** και το κατακόρυφο όριο δύναμης να είναι αποδεκτά χαμηλό.



Εικόνα 32 - Ρύθμιση ανύψωσης (heave) μέχρι την κατακόρυφη ισορροπία δύναμης. (SJULE, 2016)



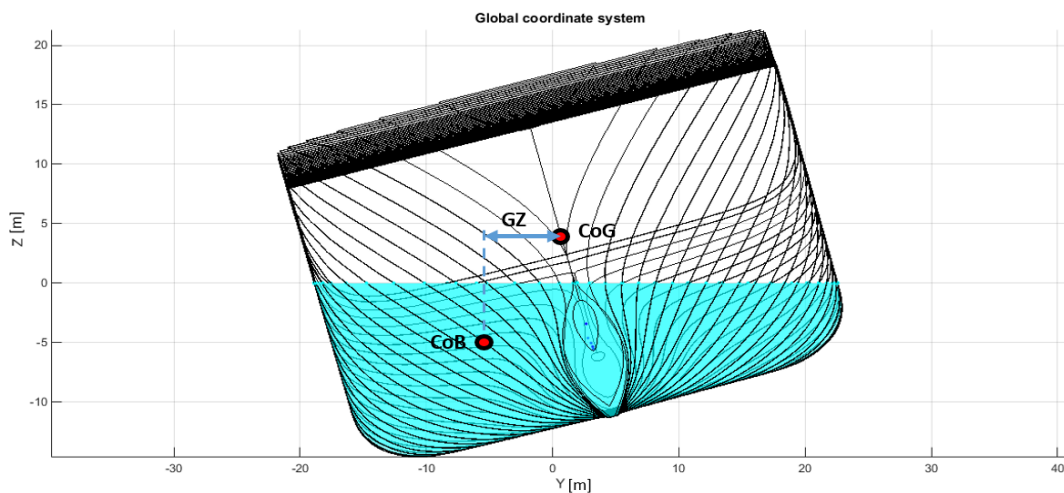
Εικόνα 33 – Ρύθμιση κίνησης pitch μέχρι την κατάσταση ισορροπίας. (SJULE, 2016)

Αφού γίνουν οι υπολογισμοί ισορροπίας κίνησης **heave** και **pitch**, μελετάται η εγκάρσια απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και της θέσης του κέντρου άντωσης στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, όπως φαίνεται στην **εικόνα 34**. **Αυτή η απόσταση είναι η τιμή του μογλοβραχίονα επαναφοράς GZ.** Καθώς το πλοίο θα περιστρέφεται γύρω από τον δικό του διαμήκη άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους (θα περιστρέφεται γύρω από τον άξονα x στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων). Στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων θα περιστρέφεται γύρω από τον τοπικό άξονα x τοποθετημένο μια απόσταση στον άξονα z πάνω, κάτω ή μέσω του επιπέδου x-y στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Ενώ κινείται κατά μήκος του άξονα z στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων (ενώ κάνει τις κινήσεις **heave**, **roll** και **pitch**), η προέλευση του τοπικού συστήματος συντεταγμένων θα παραμείνει σταθερή στις συντεταγμένες αξόνων x και y στην προέλευση του παγκόσμιου συστήματος συντεταγμένων. Εξαιτίας αυτού, η εγκάρσια απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων και του κέντρου άντωσης στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων είναι η ίδια με την εγκάρσια απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων και του κέντρου άντωσης στο παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων. Αυτό συμβαίνει επίσης κατά τον υπολογισμό της ροπής κίνησης **pitch** όταν υπολογίζεται η διαμήκης απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και του κέντρου άντωσης. Ο μοχλοβραχίονας υπολογίζεται ως εξής:

$$GZ = -TCBo$$

Κατά τον υπολογισμό μιας ολόκληρης καμπύλης **GZ** για μια συγκεκριμένη θέση κύματος και το ύψος κύματος **heave** και η ισορροπία κίνησης **pitch** επιτυγχάνεται για κάθε βαθμό στο διατοιχισμό (**rolling**), αυτό γίνεται με την αύξηση 5 βαθμών ελευθερίας.



Εικόνα 34 - Απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους και του κέντρου της άντωσης. Απεικόνιση γάστρας πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τύπου C11. (SJULE, 2016)



Εικόνα 35 – Απεικόνιση πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων container ship τύπου C11 (APL) στο λιμάνι Alameda California Η.Π.Α.⁸

3.4 Θέση κύματος σε σχέση με το πλοίο σε χρονικά διαστήματα

Πρέπει να επισημανθεί ότι η σχετική ταχύτητα του κύματος με την ταχύτητα του πλοίου μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$c - U \cos(\mu) = \frac{\lambda}{T_e} \quad (4,3)$$

όπου c είναι η ταχύτητα κύματος και U είναι η ταχύτητα του πλοίου, μ είναι η γωνία στην οποία το πλοίο συναντά τα κύματα. Δηλαδή εάν η γωνία είναι 180 μοίρες σε πλωραίους κυματισμούς (**heading seas**) το $\cos(\mu)$ θα είναι -1 και έτσι η σχετική ταχύτητα θα είναι μεγαλύτερη από ό, τι π.χ. σε $\mu = 0$ μοίρες προϋμναίους κυματισμούς (**following seas**) όπου η σχετική ταχύτητα θα είναι χαμηλότερη. Εάν $\mu = 90^\circ$ ο όρος με το συνημίτονο δεν θα έχει καμία επίδραση.

Από αυτή την εξίσωση (4,3) η περίοδος συνάντησης μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$T_e = \frac{\lambda}{c - U \cos(\mu)}$$

Η συχνότητα συνάντησης μπορεί συνεπώς να γραφτεί ως εξής:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e}$$

⁸ https://de.wikipedia.org/wiki/Typ_C11

Η έκφραση για τη σχέση μεταξύ της συχνότητας συνάντησης και της συχνότητας των παγκόσμιων κυμάτων ω είναι η εξής:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 * U}{g * \cos(\mu)}$$

Για κανονικά κύματα βαρύτητας η περίοδος κύματος είναι η εξής:

$$T = \sqrt{\frac{2 * \pi * \lambda}{g}}$$

Για την περίοδο συνάντησης κύματος είναι η εξής:

$$T_e = \frac{\lambda}{\sqrt{\frac{\lambda * g}{2\pi} - U \cos(\mu)}}$$

Όπου U είναι η ταχύτητα πλοίου σε m/s .

Η θέση του κύματος κατά μήκος του πλοίου είναι η εξής:

$$W_{position} = 2\pi \left(\frac{t}{T_e} - \text{floor} \left(\frac{t}{T_e} \right) \right) - \pi$$

Όπου **floor** δείχνει τον πλησιέστερο φυσικό αριθμό προς τα **κάτω**, δηλαδή το **2:67** έχει **floor (2:67) = 2**.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην απόσβεση κίνησης διατοιχισμού **rolling**. Όπως παρουσιάζεται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για κίνηση **rolling**, εξίσωση (4,1) περιλαμβάνει στιγμιαία απόσβεση (**damping**).

$$M_D = (I_{xx} + A_{44}) * (2a + \gamma\phi^2) * \dot{\phi} = B_{44} * (\phi_a) * \dot{\phi} \quad (4,4)$$

Ο συντελεστής B_{44} είναι ένας συντελεστής απόσβεσης ως συνάρτηση του εύρους κίνησης διατοιχισμού (**rolling**).

$$B_{44} = B_F + B_w + B_E + B_L + B_{BK} \quad (4,5)$$

Η απόσβεση κίνησης διατοιχισμού περιέχει τους εξής διαφορετικούς συντελεστές απόσβεσης:

Λόγω της τριβής B_F , απόσβεση λόγω του κύματος που κάνει B_w , απόσβεση λόγω στροβιλιστικών δινών B_E και απόσβεση λόγω των παρατροπιδίων (**bilge keels**) B_{BK} . Επιπλέον όταν το πλοίο κινείται σε ταχύτητα προς τα εμπρός, προστίθεται ένα ακόμη στοιχείο απόσβεσης λόγω ανύψωσης B_L .

Οι συντελεστές απόσβεσης α και γ μπορεί να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας την απλοποιημένη μέθοδο της σχέσης (4,2) όπου παρουσιάστηκε προηγουμένως.

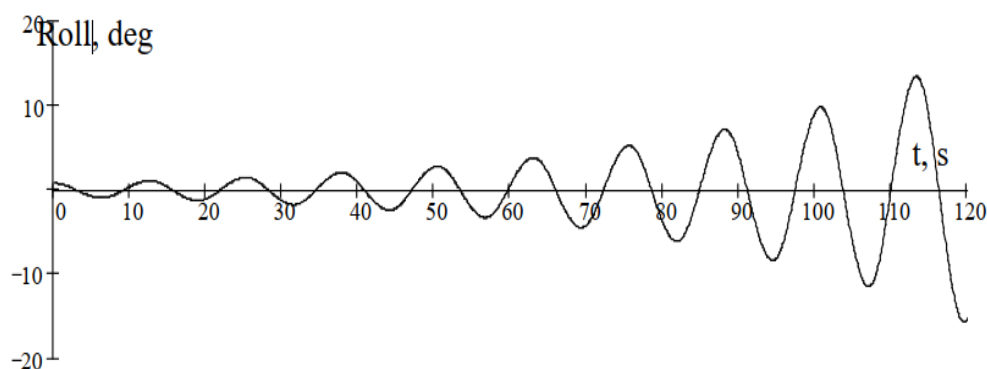
Επιπρόσθετα σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για την κίνηση διατοιχισμού **rolling**, σχέση (4,2) περιέχει μια αδρανειακή ροπή λόγω της μάζας του πλοίου και την προστιθέμενη μάζα λόγω του όγκου εκτοπίσματος νερού καθώς κάνει κίνηση **roll**.

$$M_{IN} = (I_X + A_{44}) * \ddot{\psi} \quad (4,6)$$

I_X είναι η ροπή στρέψης της αδράνειας και A_{44} η ροπή στρέψης της αδράνειας λόγω του εκτοπισμένου νερού σε κίνηση διατοιχισμού (**rolling**).

3.5 Φυσική σημασία του συντονισμού παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling resonance)

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, όταν ένα πλοίο πλέει σε διαμήκεις (πλωραίες ή πρυμναίες θάλασσες), η ευστάθεια του πλοίου αυξάνεται όταν οι κοιλάδα του κύματος βρίσκεται στο μέσο του πλοίου και μειώνεται όταν η κορυφή του κύματος βρίσκεται στο μέσο του πλοίου. Εάν αυτή η ταλαντωτική αλλαγή στην ευστάθεια εμφανίζεται περίπου στο διπλάσιο της φυσικής περιόδου διατοιχισμού (**rolling**), οι κινήσεις **rolling** μπορεί να αυξηθούν έως ένα σημαντικό μη αποδεκτό βαθμό, προκαλώντας έτσι φαινόμενα συντονισμού παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling resonance**). Ένα τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται στην παρακάτω **εικόνα 36**.

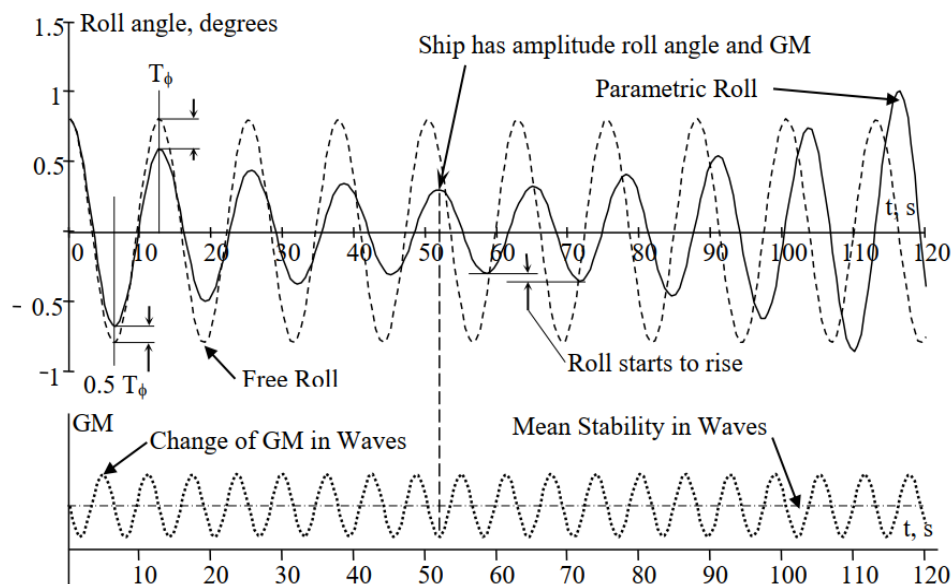


Εικόνα 36 – Απεικόνιση παραμετρικού συντονισμού **rolling** γωνίας (deg) εγκάρσιας κλίσης συναρτήσει με το χρόνο (t). (SJULE, 2016)

Η πιο ραγδαία αύξηση της παραμετρικής κίνησης διατοιχισμού θα μπορούσε να παρατηρηθεί όταν δοκιμάζεται ένα πλοίο από μια εξωτερική διαταραχή διατοιχισμού τη στιγμή που η κορυφή κυμάτων κινείται μακριά από τη μέση του πλοίου (**amidship**) δηλαδή, ο όρος της βελτίωσης ή της αυξανόμενης ευστάθειας πλοίου, σε σχέση με μια συχνότητα συναντήσεων είναι περίπου διπλάσια από τη φυσική συχνότητα **rolling**. Σε αυτή την περίπτωση, η στιγμή αποκατάστασης τείνει να επιταχύνει το πλοίο πίσω στη

θέση ισορροπίας με μια μεγαλύτερη από την ήρεμη κατάσταση του νερού, επειδή το πλοίο εισέρχεται σε κοιλάδες του κύματος όπου βελτιώνεται η ευστάθεια του.

Ως αποτέλεσμα, στο τέλος του πρώτου τετάρτου της περιόδου T , η γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από ότι θα ήταν σε ήρεμο νερό, όπως φαίνεται στην **εικόνα 37**.



Εικόνα 37 – Απεικόνιση γραφικής παράστασης κυμάτων παραμετρικού διατοιχισμού συναρτήσει ελεύθερης κίνησης roll με τον χρόνο (t). (SJULE, 2016)

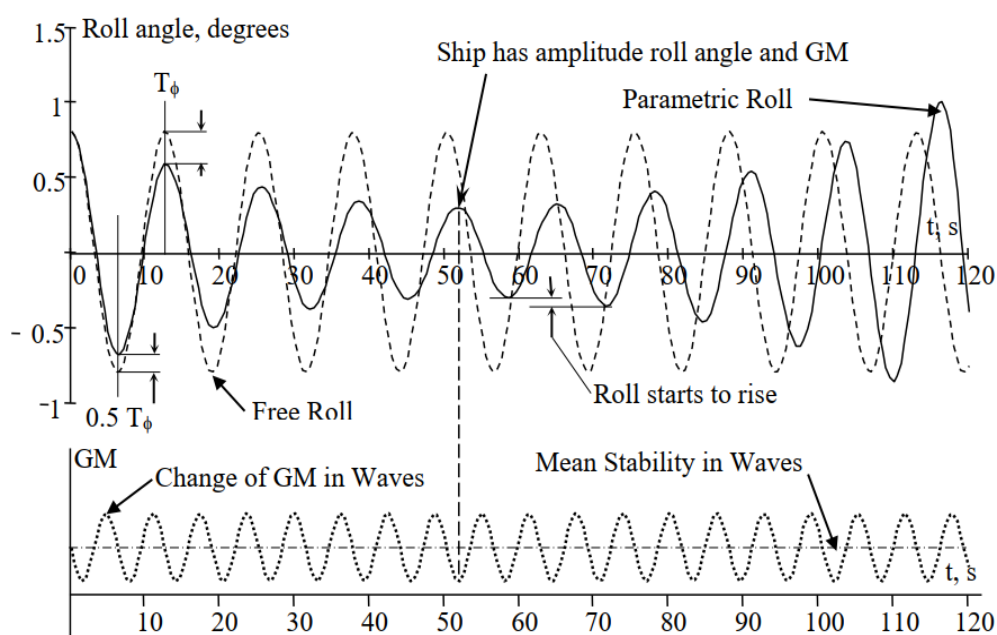
Στο τέλος του πρώτου τετάρτου της περιόδου ταλάντωσης διατοιχισμού, το πλοίο φθάνει σε μια μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης, η οποία βρίσκεται στην αρχική κατάσταση ισορροπίας, αλλά η κίνηση διατοιχισμού **rolling** δεν σταματά εκεί λόγω της ροπής αδράνειας διατοιχισμού.

Κατά τη διάρκεια του δεύτερου τετάρτου της περιόδου T , το πλοίο συναντά μια κορυφή κύματος στο μέσο της γάστρας του (**amidship**) και ως αναμενόμενο η ευστάθεια του μειώνεται σταδιακά. Εν τω μεταξύ, η αδράνεια κινήσεων διατοιχισμού δημιουργεί την τάση στο πλοίο να συνεχίσει να πράττει κίνηση διατοιχισμού **rolling**. Επομένως, η στιγμή αποκατάστασης αντιστέκεται τώρα στην περαιτέρω κίνηση, αλλά σε λιγότερο βαθμό από ότι ήταν σε φάση ήρεμου νερού, καθώς η ευστάθεια του πλοίου μειώνεται κατά πολύ στη κορυφή του κύματος.

Ως αποτέλεσμα, το πλοίο κυλά περισσότερο από ό,τι θα ήταν σε ήρεμο νερό με την ίδια διαταραχή διατοιχισμού (**rolling**) και κατά συνέπεια, μετά το δεύτερο τέταρτο της φυσικής περιόδου διατοιχισμού, να δημιουργηθεί αύξηση της γωνίας εγκάρσιας κλίσης (**roll angle**) διατοιχισμού σε βαθμό πολύ μεγαλύτερο από ότι ήταν στο πρώτο τέταρτο της περιόδου T . Απεικονίζεται στην **εικόνα 38**.

Στο τρίτο τέταρτο, το πλοίο εισέρχεται στο κοίλο του κύματος και μια αυξημένη ροπή επαναφοράς το ωθεί πίσω με αυξημένη δύναμη. Η κατάσταση αυτή είναι ανάλογη με αυτή που παρατηρήθηκε κατά το πρώτο τέταρτο της περιόδου T . Οι παρατηρήσεις κατά το τελευταίο τέταρτο είναι παρόμοιες με εκείνες του δεύτερου τετάρτου και η

γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού συνεχίζει να αυξάνεται, όπως φαίνεται στην **εικόνα 38**.

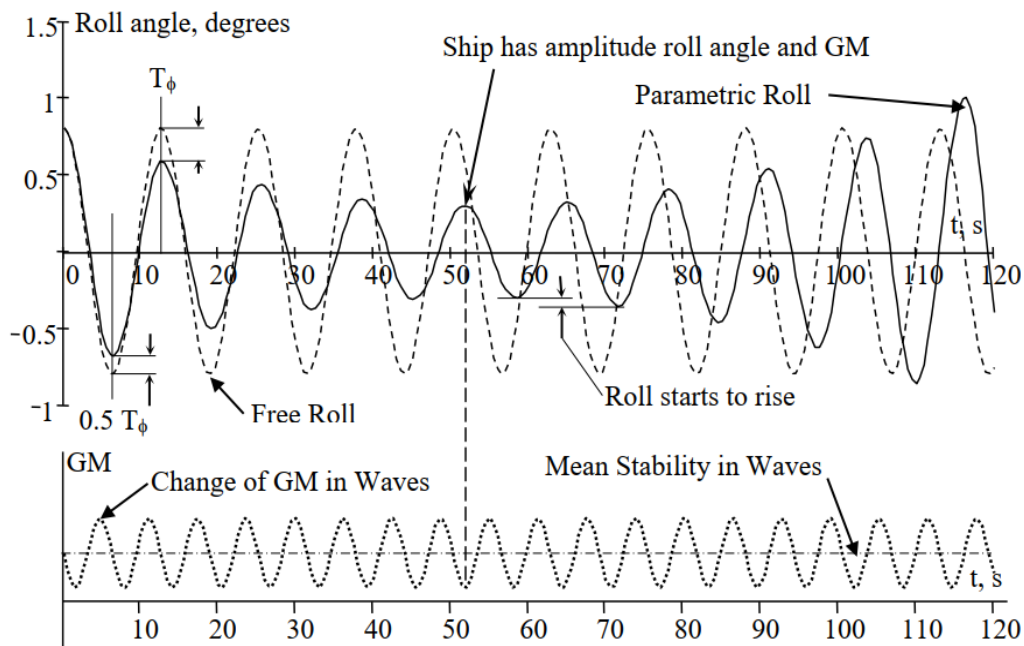


Εικόνα 38 – Απεικόνιση γραφικής παράστασης κυμάτων παραμετρικού διατοιχισμού συναρτήσει ελεύθερης κίνησης roll με το χρόνο t . (SJULE, 2016)

Χωρίς περαιτέρω αλλαγή στο πλάτος κύματος και την ταχύτητα του πλοίου, αυτός ο συνδυασμός αποκατάστασης (σε μεγαλύτερο βαθμό από το ήρεμο νερό) και αντίστασης στο διατοιχισμό (σε μικρότερο βαθμό από το ήρεμο νερό) μπορεί να προκαλέσει την προοδευτική αύξηση της γωνίας εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού (**roll angle**) σε ένα μεγάλο και ενδεχομένως επικίνδυνα ανεπιθύμητο επίπεδο. Αυτό ουσιαστικά δημιουργεί το συντονισμό παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling resonance**).

Εάν το πλοίο κατά τη διάρκεια της πορείας του βιώνει τη διαταραχή του ενώ πλησιάζει η κορυφή κύματος στο μέσο της γάστρας του (**amidship**), δηλαδή όταν η ευστάθεια του μειώνεται, τότε η εξέλιξη της παραμετρικής ανάπτυξης του διατοιχισμού (**rolling**) είναι διαφορετική.

Οι ίδιοι παράγοντες που αύξησαν το διατοιχισμό στην πρώτη περίπτωση τώρα μετριάζουν την κίνηση του. Όταν το πλοίο ξαφνικά διαταραχθεί, ουσιαστικά προσεγγίζει μια κορυφή κύματος με την ευστάθεια του μειωμένη και η ξαφνική ώθηση προς τα πίσω (**push back**) γίνεται με μικρότερη ροπή από ό,τι σε ήρεμο νερό. Μόλις το πλοίο φτάσει σε ισορροπία, η ευστάθεια του αρχίζει να βελτιώνεται και φτάνει σε μια γωνία εγκάρσιας κλίσης πολύ μικρότερη από τη φάση ήρεμου νερού στο τέλος της πρώτης περιόδου διατοιχισμού T , όπως παρατηρείται στην **εικόνα 39**.



Εικόνα 39 – Απεικόνιση ταλάντωσης όταν πλοίο αντιμετωπίζει διαταραχή από διατοιχισμό όταν μειώνεται σταδιακά η ευστάθεια του. (SJULE, 2016)

Εάν το πλοίο βιώσει διαταραχή από διατοιχισμό (**rolling**), ενώ πλησιάζει μια κορυφή κύματος, δηλαδή όταν η ευστάθεια μειώνεται, η εξέλιξη της παραμετρικής ανάπτυξης διατοιχισμού είναι διαφορετική. Οι ίδιοι παράγοντες που αύξησαν το διατοιχισμό (**rolling**) στην πρώτη περίπτωση τώρα μετριάζουν την κίνηση **rolling**. Όταν το πλοίο διαταραχθεί, προσεγγίζει μια κορυφή κύματος με την ευστάθεια του μειωμένη και η ώθηση προς τα πίσω (**push back**) γίνεται σε μικρότερο βαθμό από ότι ήταν σε ήρεμο νερό.

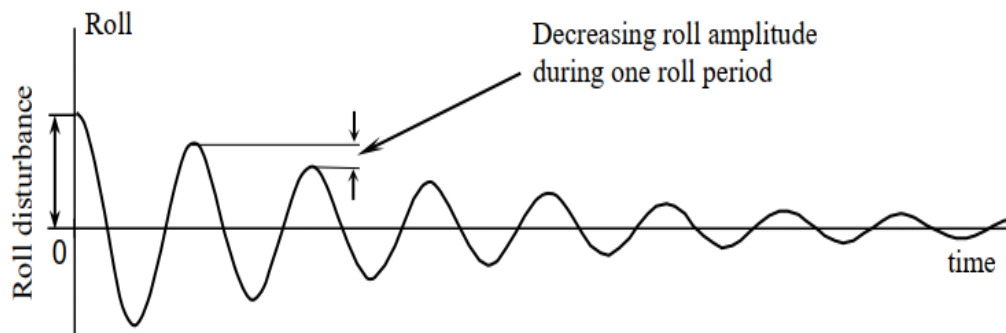
Έπειτα μόλις το πλοίο φτάσει σε ισορροπία, η ευστάθεια του αρχίζει να βελτιώνεται, όπου φτάνει σε μια γωνία εγκάρσιας κλίσης μικρότερη από ότι ήταν στο ήρεμο νερό στο τέλος της πρώτης περιόδου **T**. Όπως φαίνεται στην **εικόνα 39**.

Ένας τέτοιος συνδυασμός μειούμενων και αυξανόμενων ροπών επαναφοράς διατοιχισμού είναι ικανός να μειώσει σημαντικά το διατοιχισμό. Ωστόσο, αυτή η κατάσταση δεν διαρκεί πολύ. Η μεταβαλλόμενη ευστάθεια ουσιαστικά οδηγεί σε μια μικρή αλλαγή στη φυσική περίοδο **T**.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο διατοιχισμός σε διαταραγμένα νερά (κυματισμούς) να υστερεί σε σύγκριση με τη συμπεριφορά του πλοίου σε ήρεμο νερό. Όπως φαίνεται στην **εικόνα 39**, η φάση μετατόπισης οδηγεί σε μια κατάσταση όπου το πλοίο φτάνει σε μια μέγιστη τιμή γωνίας εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού καθώς το **GM** του πρόκειται να αρχίσει να αυξάνεται. Η κατάσταση αυτή είναι παρόμοια με τις συνθήκες που εξετάστηκαν στην προηγούμενη περίπτωση. Τα δύο εξεταζόμενα σενάρια δειγμάτων αντιπροσωπεύουν δύο ακραίες δυνατότητες με τις πλέον και λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**). Η πραγματική κατάσταση είναι συνήθως κάπου ενδιάμεσα.

3.6 Επίδραση της απόσβεσης παραμετρικού διατοιχισμού (roll damping)

(W. Peters (M), 2011) Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι όταν ένα πλοίο κάνει διατοιχισμό (**rolling**) σε ήρεμο νερό αφού έχει διαταραχθεί, τα πλάτη διατοιχισμού μειώνονται διαδοχικά λόγω της απόσβεσης διατοιχισμού, όπως παρατηρείται στην **εικόνα 40**. Πρακτικά ένα πλοίο το οποίο υφίσταται διατοιχισμό δημιουργεί κύματα και δίνες και βιώνει αντίσταση του ιξώδους. Όλες αυτές οι διαδικασίες συμβάλλουν στην απόσβεση διατοιχισμού (**rolling**).



Εικόνα 40 – Απεικόνιση επιτυχημένης μείωσης πλάτους παραμετρικού διατοιχισμού σε ήρεμο νερό. (W. Peters (M), 2011)

Η απόσβεση διατοιχισμού μπορεί να διαδραματίσει έναν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη του παραμετρικού συντονισμού διατοιχισμού (**rolling**). Εάν η απώλεια ενέργειας ανά περίοδο που προκαλείται από την απόσβεση είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό κέρδος που προκαλείται από την μεταβαλλόμενη ευστάθεια στις διαμήκεις θάλασσες, οι γωνίες εγκάρσιας κλίσης δεν θα αυξηθούν και ο παραμετρικός συντονισμός δεν θα αναπτυχθεί.

Από την άλλη πλευρά μόλις το ενεργειακό κέρδος ανά περίοδο είναι μεγαλύτερο από την ενεργειακή απώλεια λόγω απόσβεσης, το εύρος του παραμετρικού συντονισμού θα αρχίζει να αυξάνεται διαρκώς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει ένα κρίσιμο όριο απόσβεσης διατοιχισμού για παραμετρικό συντονισμό διατοιχισμού (**rolling**). Εάν η ροπή απόσβεσης του διατοιχισμού είναι υψηλότερη από αυτό το όριο, τότε δεν είναι δυνατή η παραμετρική εξέλιξη διατοιχισμού. Από την άλλη πλευρά εάν η ροπή απόσβεσης του διατοιχισμού είναι κάτω από αυτό το όριο, τότε μπορεί να λάβει χώρα ο παραμετρικός συντονισμός διατοιχισμού (**parametric rolling resonance**).

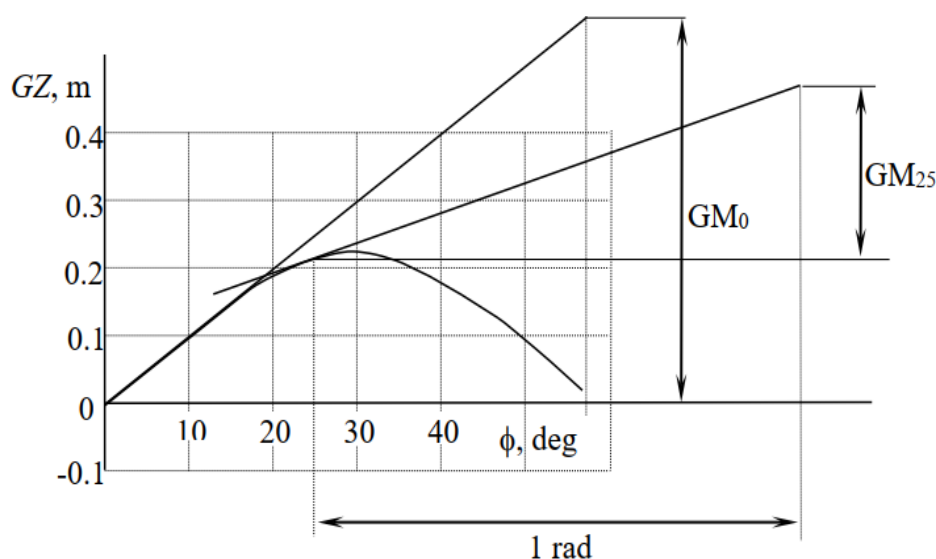
Κατά τη διάρκεια του διατοιχισμού ο συνδυασμός πιο δυναμικών ωθήσεων λόγω της αυξανόμενης ευστάθειας στα κοίλα των κυματισμών και αντίστοιχα των μεγαλύτερων δημιουργιών γωνιών εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού εξαιτίας της μειωμένης ευστάθειας στην κορυφή κυμάτων, που εμφανίζονται περίπου δύο φορές κατά τη διάρκεια της περιόδου διατοιχισμού, κάνει τη γωνία εγκάρσιας κλίση να αυξηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Η μόνη άλλη προϋπόθεση που πρέπει να πληρείται είναι ότι η απώλεια ενέργειας λόγω της απόσβεσης διατοιχισμού δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να καταναλώνει πλήρως την αύξηση της ενέργειας που προκαλείται από το φαινόμενο παραμετρικού συντονισμού. Η απόσβεση διατοιχισμού βρίσκεται κάτω δηλαδή από το κρίσιμο όριο.

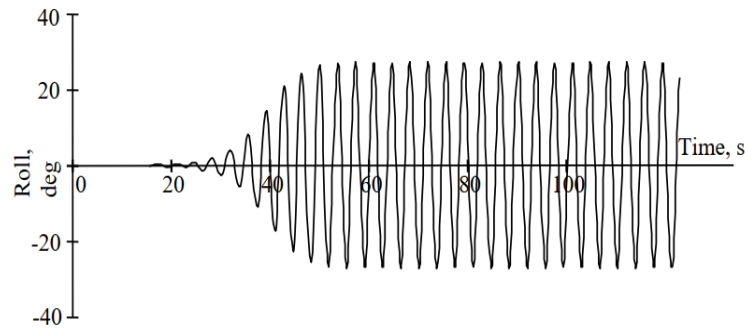
Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι το σχήμα της καμπύλης **GZ** είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν το πλάτος του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**). Όπως επισημάνθηκε στην αρχή του 4^{ου} κεφαλαίου, η ανάπτυξη του παραμετρικού διατοιχισμού απαιτεί, η συχνότητα κύματος συναντήσεως να είναι περίπου διπλάσια από τη φυσική συχνότητα του κίνησης **rolling**. Υπάρχει μια σειρά από συχνότητες κύματος συναντήσεων γύρω από αυτό τιμή που είναι ικανή να προκαλέσει παραμετρικό συντονισμό διατοιχισμού. Είναι γνωστό ότι η στιγμιαία τιμή του **GM** είναι συνάρτηση της γωνίας εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού, όπως φαίνεται στην **εικόνα 41**.

Είναι επίσης γνωστό ότι η φυσική περίοδος διατοιχισμού και η φυσική συχνότητα του εξαρτώνται από την τιμή του **GM**. Ενώ η καμπύλη **GZ** είναι συνήθως πρακτικά γραμμική στις πρώτες **10°** με **12°** μοίρες γωνίας εγκάρσιας κλίσης, το **GM** δεν αλλάζει, έτσι τόσο η φυσική περίοδος διατοιχισμού όσο και η συχνότητα παραμένουν σε σταθερά επίπεδα για μικρές τιμές γωνίας διατοιχισμού (μέχρι περίπου **10° - 12°** μοίρες).

Μόλις η γωνία εγκάρσιας κλίσης αυξηθεί πέρα από το γραμμικό τμήμα της καμπύλης **GZ**, η στιγμιαία τιμή του **GM** αλλάζει καθώς η καμπύλη **GZ** κάμπτεται. Αυτό αναγκάζει τη φυσική περίοδο διατοιχισμού και τη φυσική συχνότητα του να αλλάξει. Δεδομένου ότι η συχνότητα συναντήσεων κυμάτων παραμένει η ίδια, η φυσική συχνότητα διατοιχισμού μπορεί να μην είναι πλέον κοντά στο διπλάσιο της συχνότητας συναντήσεων. Ως αποτέλεσμα, οι συνθήκες παραμετρικού συντονισμού δεν υπάρχουν πλέον και οι κινήσεις διατοιχισμού **rolling** δεν λαμβάνουν πλέον πρόσθετη ενέργεια σε κάθε περίοδο που διανύει. Αυτό αναγκάζει τον υφιστάμενο παραμετρικό διατοιχισμό να σταματήσει να αυξάνεται και δημιουργείται ένα ορισμένο εύρος κίνησης **roll** **εικόνα 42**.



Εικόνα 41 – Απεικόνιση αλλαγής στιγμιαίας τιμής **GM** με αυξανόμενη γωνία εγκάρσιας κλίσης. (ABS, 2020)

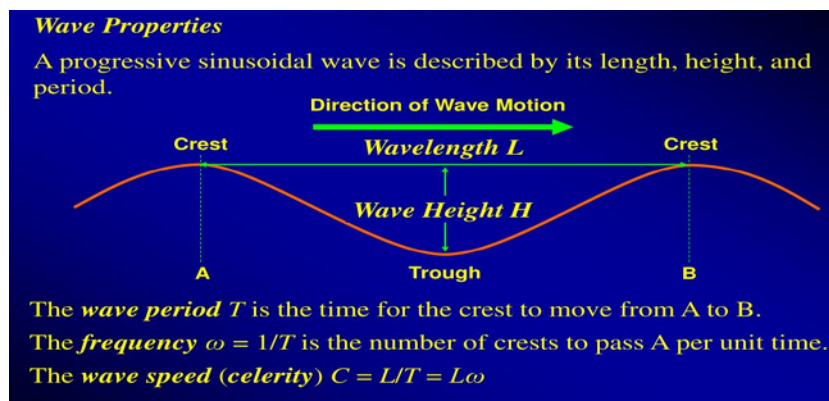


Εικόνα 42 – Απεικόνιση ανάπτυξης παραμετρικού συντονισμού συναρτήσει με το χρόνο (t). (ABS, 2020)

3.7 Επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης κύματος

Τα διαμήκη κύματα πλωραίας ή πρυμναίας κατεύθυνσης (**heading or following seas**) προκαλούν τη μεγαλύτερη αλλαγή στην άθικτη ευστάθεια του πλοίου και, ως εκ τούτου, δημιουργούν μέγιστη παραμετρική διέγερση. Σύμφωνα με τις πρόσφατες μελέτες του **I.M.O** θεωρεί μόνο τους πλωραίους και πρυμναίους κυματισμούς υπεύθυνους για δημιουργία παραμετρικού διατοιχισμού σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αλλά και αλιευτικών, καθώς αυτές οι καταστάσεις θέτουν ενδεχομένως τον μεγαλύτερο κίνδυνο ανάπτυξης συντονισμού παραμετρικού διατοιχισμού, σύμφωνα με τα κριτήρια που αναλύσαμε παραπάνω..

Όταν ένα πλοίο κινείται σε προσπίπτον κυματισμούς με τελείως διαφορετική συχνότητα από όταν δεν κινείται, αυτή η συχνότητα ονομάζεται **συχνότητα συνάντησης (encounter frequency)**. Είναι μικρότερη στους πρυμναίους κυματισμούς (η ταχύτητα του πλοίου μειώνεται από τα κύματα) και μεγαλύτερη στους πλωραίους κυματισμούς (εμφάνιση **celerity wave** = όταν ένα κύμα διαδίδεται μεμονωμένα με συγκεκριμένη ταχύτητα). Αναλυτικότερα παρουσιάζονται οι ιδιότητες κυμάτων στην παρακάτω **εικόνα 43**.



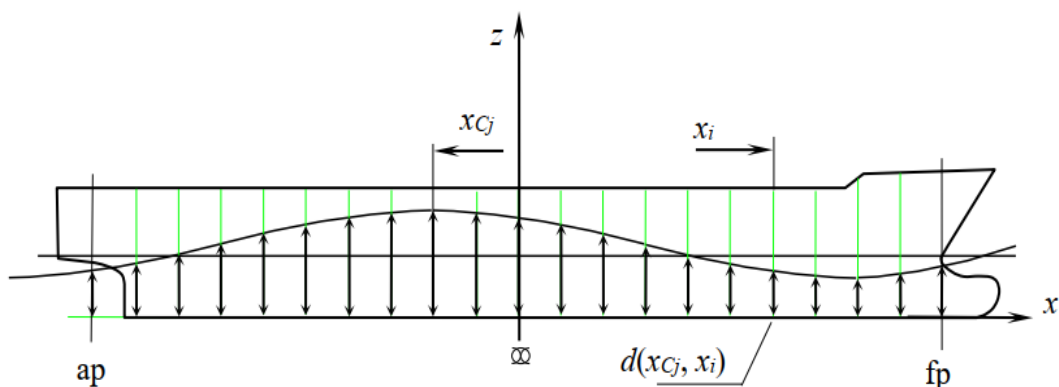
Εικόνα 43 – Περιγραφή ημιτονοειδούς συμπεριφοράς κυμάτων με κριτήριο το μήκος κύματος L , το ύψος H και τη περίοδο T . Απεικόνιση κορυφών και κοιλάδων κύματος βάσει κατεύθυνσης διάδοσης του.⁹

⁹ <https://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/geology/geologic-hazards/Tsunamis>

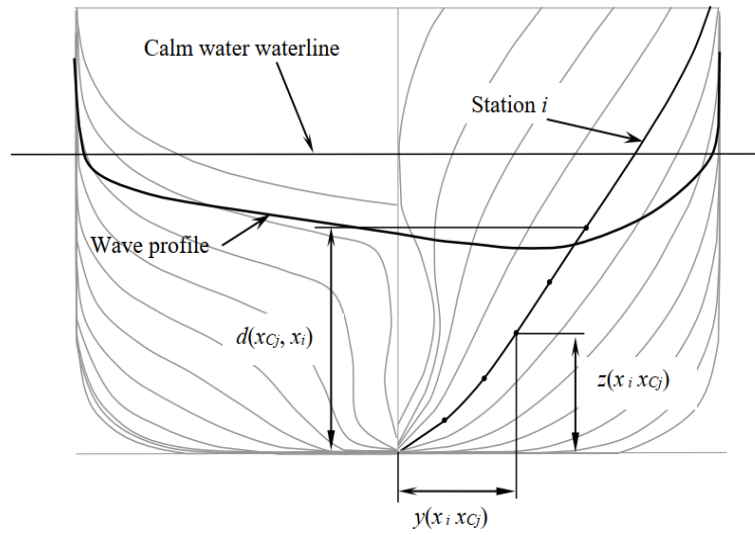
Η συχνότητα της συνάντησης (κύματος – πλοίου) είναι μια συχνότητα με την οποία ένα πλοίο περνά μέσα από κορυφές και κοιλάδες κύματος (**crests and troughs**). Η περίοδος συνάντησης **T** (περίοδος κύματος που αντιστοιχεί στη συχνότητα κύματος της συνάντησης) είναι ο χρόνος που περνάει ενώ ένα πλοίο συναντά δύο παρακείμενες κορυφές κύματος ή δύο παρακείμενες κοιλάδες κύματος. Αποτελεί ουσιαστικά μια συχνότητα αλλαγής της ευστάθειας του πλοίου.

Ο παραμετρικός διατοιχισμός (**parametric rolling**) αναπτύσσεται όταν η συχνότητα της αλλαγής ευστάθειας του πλοίου είναι σχεδόν διπλάσια αυτής της φυσικής συχνότητας διατοιχισμού ή όταν η συχνότητα της συνάντησης είναι σχεδόν διπλάσια αυτής της φυσικής συχνότητας διατοιχισμού. Η αξία της φυσικής συχνότητας διατοιχισμού (**rolling**) εξαρτάται συνήθως από το **GM** όπου η εγκάρσια κατανομή του βάρους μπορεί επίσης να έχει πολύ μεγάλη επιρροή. Επομένως, εάν ο παραμετρικός συντονισμός διατοιχισμού μπορεί να συμβεί σε πρυμναίες (**following seas**) ή πλωραίες (**heading seas**) θάλασσες εξαρτάται κυρίως από την τρέχουσα τιμή του **GM**. Το μήκος κύματος έχει επίσης επιρροή επειδή σχετίζεται με τη συχνότητα κύματος στην οποία εξαρτάται η συχνότητα της συνάντησης.

Παρά το φυσικό υπόβαθρο του παραμετρικού συντονισμού διατοιχισμού στους πρυμναίους και πλωραίους κυματισμούς το φαινόμενο αυτό είναι πανομοιότυπο, βέβαια το πλοίο σε πλωραίους κυματισμούς μπορεί να βιώσει την επίδραση των κινήσεων **heave** και **pitch**, οι οποίες είναι πιο έντονες σε αυτούς τους κυματισμούς. Στην παρακάτω **εικόνα 44** παρουσιάζεται γάστρα πλοίου σε κατάσταση κυματισμών, όπου ανιχνεύεται το κοίλο και η κορυφή τους κατά τη διάρκεια διατοιχισμού (**rolling**).



Εικόνα 44 – Απεικόνιση γάστρας πλοίου σε κυματισμούς ως προς τον διαμήκη άξονα, παρουσιάζοντας κοιλάδα και κορυφή κύματος από τη CL (Center Line). (ABS, 2020)



Εικόνα 45 – Απεικόνιση body plan γάστρας πλοίου σε κατάσταση κυματισμών σε (x,y,z) διαστάσεις. (ABS, 2020)

4. Μοντέλα αξιολόγησης για τον παραμετρικό διατοιχισμό σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

4.1 Πρόβλεψη εμφάνισης παραμετρικού διατοιχισμού σε κανονικά κύματα (susceptibility criteria)

Καταρχήν ορισμένα βασικά στοιχεία της κίνησης διατοιχισμού θα επανεξεταστούν σε αυτό το κεφάλαιο. Σε ένα θεμελιώδες επίπεδο, η εξίσωση της γραμμικής κίνησης διατοιχισμού είναι αυτή ενός διεγερμένου $\mathbf{Mx}(t)$ ή μη διεγερμένου περιστροφικού ταλαντωτή (ελεύθερη κίνηση **rolling**).

(SILVA), 2014) Λαμβάνοντας υπόψη έναν ενιαίο βαθμό εξίσωσης ελευθερίας για την κίνηση διατοιχισμού ενός πλοίου στους πλωραίους κυματισμούς, και λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή του \mathbf{GM} λόγω της συνάντησης κύματος που οδηγεί, έχουμε έναν συντελεστή η_4 που αντιπροσωπεύει το πλάτος στο διατοιχισμό, \mathbf{B}_{44} είναι ο συντελεστής απόσβεσης, Δ είναι το εκτόπισμα του πλοίου, \mathbf{I}_{xx} είναι η εγκάρσια ροπή αδράνειας, και \mathbf{A}_{44} είναι η προστιθέμενη μάζα ροπής αδράνειας στη κίνηση διατοιχισμού (**rolling**).

$$\ddot{\eta}_4 + \frac{\mathbf{B}_{44}}{\mathbf{I}_{xx} + \mathbf{A}_{44}} * \dot{\eta}_4 + \frac{\Delta * \mathbf{GM}t}{\mathbf{I}_{xx} + \mathbf{A}_{44}} * \eta_4 = 0 \quad (5, 1)$$

Ο παραμετρικός διατοιχισμός τυπικά συμβαίνει σε διάφορους συνδυασμούς ταχύτητας πλοίου και συχνότητας κύματος, υπό την προϋπόθεση ότι η προσκύπτουσα συχνότητα συνάντησης είναι κοντά σε $(2/n)$ φορές τη φυσική συχνότητα, όπου n είναι οποιοσδήποτε ακέραιος αριθμός. Θεωρητικά μπορεί να συμβεί σε περίπου $2/n$ αναλογίες μεταξύ αυτών των δύο συχνοτήτων, όπου ο ακέραιος $n = 1, 2, 3..$ Στην πράξη, οι περιπτώσεις για $n = 1$, όταν η συχνότητα συναντήσεων κυμάτων είναι περίπου διπλάσια από τη φυσική συχνότητα σε κατάσταση **rolling**, και $n=2$, όταν οι φυσικές συχνότητες συναντήσεων κυμάτων και διατοιχισμού είναι σχεδόν ίσες, είναι πολύ σημαντικές. Συνήθως η πρώτη περίπτωση για $(n > 1)$ συμβαίνει σε πλωραίους κυματισμούς (**head and bow seas**), αλλά μπορεί επίσης να συμβεί και σε πρυμναίους κυματισμούς (**following seas**). Στη τελευταία περίπτωση για $(n > 2)$ συνδέεται συνήθως με τους πρυμναίους κυματισμούς (**following and stern seas**).

Εκτός από τον ανωτέρω όρο των συχνοτήτων για τη δημιουργία **parametric rolling**, πρέπει να καθοριστεί ένα συγκεκριμένο όριο ύψους κύματος, κατά κύριο λόγο από δύο παράγοντες:

- Ο βαθμός διακύμανσης της κίνησης διατοιχισμού που αποκαθιστά λόγω της διάβασης κυμάτων.
- Η απόσβεση στη κίνηση διατοιχισμού του πλοίου που εξαρτάται από την ταχύτητα η οποία πρέπει να καθοριστεί.

Η απόσβεση είναι μία από τις βασικότερες παραμέτρους για την αποφυγή παραμετρικού διατοιχισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ακόλουθος απλός κανόνας μπορεί να εφαρμοστεί, μεταβάλλοντας τις τιμές του \mathbf{GM} στο κύμα μεταξύ \mathbf{GM}_{\min} και \mathbf{GM}_{\max} και το κλιμακωτό πλάτος της διακύμανσης του μετακεντρικού ύψους, που ορίζεται ως:

$$h = \frac{\mathbf{GM}_{MAX} - \mathbf{GM}_{MIN}}{2\mathbf{GM}} \quad (5, 2)$$

Όπου το \mathbf{GM} , που είναι το μέσο μετακεντρικό ύψος του πλοίου για το θεωρούμενο κανονικό κύμα, αν υπερβαίνει τον 4 φορές τον λόγο απόσβεσης στη κίνηση διατοιχισμού, τότε είναι πολύ πιθανή η εμφάνιση παραμετρικής διατοιχισμού (**parametric rolling**).

Για να γίνει αυτό, υποθέτοντας ότι το \mathbf{GM} αλλάζει ημιτονοειδή χρόνο σε κύματα όπου, το \mathbf{GM}_m είναι μια μέση τιμή του \mathbf{GM} και το \mathbf{GM}_a είναι το εύρος των μεταβολών του \mathbf{GM} στα κύματα. Επομένως θα ισχύει ότι:

$$\mathbf{GM}(t) = \mathbf{GM}_m + \mathbf{GM}_a * \cos(\omega t) \quad (5, 3)$$

Με την απόκτηση των λεγόμενων κριτηρίων ευαισθησίας (**susceptibility criteria**), αυτό το φαινόμενο που περιγράφεται ως παραμετρικός συντονισμός, μπορεί απλά να προσομοιωθεί από την εξίσωση **Mathieu** την οποία τη συναντάμε στην γενική της μορφή στη βιβλιογραφία ως εξής: (Σπύρου, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ, 2006)

$$\ddot{y} + (a - 2q\cos 2z)y = 0 \quad (5, 4)$$

Ενώ η ίδια εξίσωση με τον όρο της απόσβεσης διατοιχισμού μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\ddot{\varphi} + b_1\dot{\varphi} + \omega_0^2[1 + h\cos(\omega_e t)]\varphi = 0 \quad (5, 5)$$

Όπου $b_1 = \mathbf{B}_1/\mathbf{I} + \Delta\mathbf{I}$, άρα, ο συντελεστής h δείχνει το πλάτος της μεταβολής του \mathbf{GM} στο αρμονικό κύμα το οποίο έχουμε θεωρήσει. Η εξίσωση **Mathieu**, παρά την απλότητα της, δεν επιδέχεται ακριβή αναλυτική λύση αν και είναι, κατά βάση, μία γραμμική διαφορική εξίσωση.

Επιπλέον, το χαρακτηριστικό της εξίσωσης **Mathieu** είναι ότι, για $4\omega_0^2/\omega_e^2 = n^2$, όπου n οποιοσδήποτε φυσικός αριθμός.

Επιπλέον από την εξίσωση (5,1) προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\ddot{\eta}_4 + 2\delta\dot{\eta}_4 + (\omega_m^2 + \omega_a^2 \cos(\omega t))\eta_4 = 0 \quad (5, 6)$$

Μετά από τη μέση συχνότητα κίνησης διατοιχισμού, το εύρος διακύμανσής του και ο γραμμικοποιημένος συντελεστής απόσβεσης δ φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta * GM_m}{I_{xx} + A_{44}}}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{\Delta * GM_a}{I_{xx} + A_{44}}}$$

$$2\delta = \frac{B_{44}}{I_{xx} + A_{44}}$$

Πράττοντας αυτό και διαιρώντας και τα δύο μέρη με το τετράγωνο της συχνότητας κύματος ω^2 , λαμβάνονται οι αδιάστατες ποσότητες όπου ω_a είναι η συχνότητα μεταβολής διατοιχισμού και ω_m είναι η μέση τιμή της συχνότητας διατοιχισμού.

$$\mu = \frac{\delta}{\omega}; \quad \bar{\omega}_m = \frac{\omega_m}{\omega}; \quad \bar{\omega}_a = \frac{\omega_a}{\omega}; \quad (5, 7)$$

Αυτό τελικά εκφράζει την κίνηση διατοιχισμού (**rolling**) με τη μορφή μιας εξίσωσης **Mathieu** με τους εξής συντελεστές:

$$p = (\bar{\omega}_m^2 - \mu^2); \quad q = \bar{\omega}_a^2 \quad (5, 8)$$

Όπου p είναι συνάρτηση της αναλογίας εξαναγκασμού και φυσικής συχνότητας, q η παράμετρος που υποδεικνύει το πλάτος της παραμετρικής διέγερσης και το δ αντιπροσωπεύει την απόσβεση.

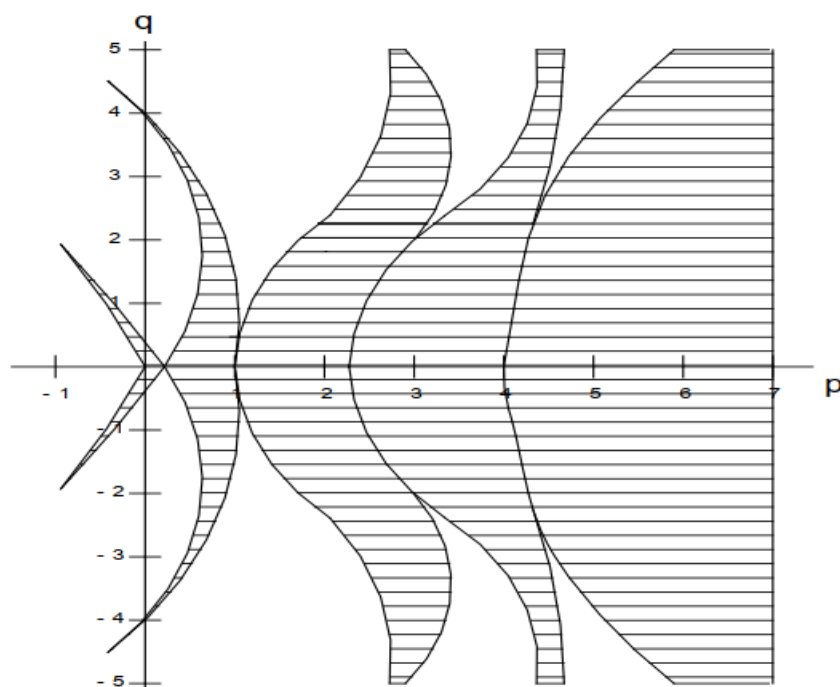
Η λύση της εξίσωσης **Mathieu** μπορεί να είναι περιοδική, αυξανόμενη ή μειούμενη, αλλά εξαρτάται αυστηρά από τις τιμές των p και q . Η εξίσωση **Mathieu** μπορεί να έχει δύο τύπους λύσεων:

- Οριοθετημένη, κοινώς αναφερόμενη ως (**ευσταθής**).
- Απεριόριστη, κοινώς αναφερόμενη ως (**ασταθής**).

Στην **εικόνα 46** παρουσιάζεται το διάγραμμα ευστάθειας για την εξίσωση (5,3). Οι σκιασμένες περιοχές είναι οι ευσταθείς που αντιστοιχούν σε (p,q) ζεύγη όπου η κίνηση διατοιχισμού δεν μπορεί να υφίσταται ενώ οι μη σκιασμένες περιοχές που είναι οι ασταθείς, δηλαδή η κίνηση διατοιχισμού μπορεί να υφίσταται.

Εάν (p, q) βρίσκονται σε μια ασταθή περιοχή, μια αυθαίρετα μικρή αρχική διαταραχή θα προκαλέσει μια ταλαντευτική κίνηση που τείνει να αυξάνεται επ' αόριστον με το χρόνο. Σε μια ευσταθή περιοχή, η αρχική διαταραχή θα σβήσει με το χρόνο.

Αυτό σημαίνει επίσης ότι υπάρχει μια τιμή κατωφλίου(όριο) για την απόσβεση της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) για κάθε ζεύγος παραμέτρων εξίσωσης **Mathieu p** και **q**. Για να υπολογίσουμε αυτό το όριο, είναι απαραίτητο να βρούμε έναν τρόπο να εκφράσουμε την αύξηση της απεριόριστης λύσης της εξίσωσης **Mathieu**.



Εικόνα 46 – Απεικόνιση διαγράμματος ευστάθειας από την εξίσωση **Mathieu**. (SILVA), 2014)

Ανάλογα με τις κρίσιμες τιμές της απόσβεσης διατοιχισμού (**rolling**), ο παραμετρικός συντονισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί ή να μην υφίσταται καθόλου. Το φυσικό φαινόμενο βασίζεται σε διαδοχικές μεταβολές του μοχλοβραχίονα επαναφοράς της εγκάρσιας ροπής διατοιχισμού μεταξύ κορυφών και κοιλάδων του κύματος, που εκτίθενται από πολλά πλοία σε απότομα διαμήκη κύματα με σαφή αναλογία με έναν απλό ταλαντωτή που διέπεται από την εξίσωση **Mathieu** με απόσβεση.

Συνεπώς, η πιο ολοκληρωμένη μαθηματική μέθοδος για την εκτίμηση της ευαισθησίας στον παραμετρικό διατοιχισμό είναι η λύση της εξίσωσης **Mathieu**. Προφανώς, ορισμένοι κώδικες προγραμμάτων διαφορετικών επιπέδων πολυπλοκότητας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν εάν συνέβη παραμετρικός διατοιχισμός στα αποτελέσματα προσομοίωσης τους.

Ουσιαστικά, για κάθε χρονικό βήμα η γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού (**rolling**) μπορεί να συγκριθεί με ένα επίπεδο κατωφλίου. Εάν τα δύο επόμενα πλάτη διατοιχισμού (**rolling**) (**αρνητικά ή θετικά**) είναι υψηλότερα από εκείνο το κατώτατο

όριο, το σύνολο κάθε γωνιών εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού, μπορεί να χαρακτηριστεί ως παραμετρικός διατοιχισμός.

Στη συνέχεια, ένα κρίσιμο θεμελιώδες συμπέρασμα που έχει διατυπωθεί και αποτελεί σημαντικό παράγοντα εμφάνισης παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) πρέπει να ικανοποιεί τα εξής κριτήρια:

- Όταν η φυσική περίοδος της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) είναι ίση με περίπου το διπλάσιο της περιόδου συναντήσεων κυμάτων.
- Όταν το μήκος κύματος καλύπτει το μήκος του πλοίου (μεταξύ **0.8** έως και **2** φορές του **L_{BP}**).
- Όταν το ύψος κύματος υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο.
- Όταν η απόσβεση της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα.

4.2 Πρόβλεψη εύρους παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling) σε κανονικά κύματα (severity criteria) από τον Αμερικανικό Νηογνώμονα (ABS).

Εάν έχει προσδιοριστεί η ευαισθησία (**vulnerability**) ενός πλοίου στον παραμετρικό διατοιχισμό, ο Αμερικανικός Νηογνώμονας (**ABS, 2020**) έχει συμβάλει θεμελιωδώς στην μελέτη του φαινομένου, καθώς απαιτεί μια πλήρη αριθμητική διαδικασία με διαφορετικές πιθανές αναλυτικές μεθόδους (θα αναπτυχθούν παρακάτω) που πρέπει να εφαρμοστούν, όσο το σύστημα αριθμητικής προσομοίωσης βασίζεται σε φόρμουλες ικανές να επιλύουν δυνάμεις προσπίπτοντος κύματος ή όπως αλλιώς περιγράφονται δυνάμεις (**Froude-Krylov**) πάνω σε ένα στιγμιαίο βυθισμένο σώμα.

Βέβαια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι δυνάμεις που οφείλονται στη διέγερση των κυμάτων (**δυνάμεις προσπίπτοντος κύματος και δυνάμεις περίθλασης**) και στις **δυνάμεις αντίδρασης (αποκατάσταση και ακτινοβολία)** λόγω κινήσεων των πλοίων που προκαλούνται από κύματα. Με το μοντέλο που υιοθετήθηκε για αυτή τη μελέτη περίπτωσης, οι δυνάμεις διέγερσης ακτινοβολίας και κύματος υπολογίζονται στην ίσαλο γραμμή ισορροπίας χρησιμοποιώντας μια τυποποιημένη γραμμική θεωρία, όπου οι δισδιάστατοι συντελεστές εξαρτώμενοι από τη συχνότητα της προστιθέμενης μάζας και της απόσβεσης υπολογίζονται με τη μέθοδο (**Frank**) και οι δυνάμεις διατομής διάθλασης αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (**Haskind-Newman**).

Οι μη γραμμικοί συντελεστές αποκατάστασης σε κινήσεις **heave, roll** και **pitch** σε κύματα υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μια οριοστατική (**quasi-static**) προσέγγιση. Οι προσομοιώσεις στον τομέα του χρόνου, πράγμα που σημαίνει ότι σε κάθε βήμα του

χρόνου τα ύφαλα του πλοίου μπορούν να υπολογιστούν, μαζί με τις γεωμετρικές, υδροστατικές και υδροδυναμικές ιδιότητές τους διατηρώντας την υπόθεση του γραμμικού υδροδυναμικού μοντέλου, που μπορεί να αντιπροσωπεύονται ως εξής:

$$\Phi = \Phi_U + \Phi_I + \Phi_D + \Phi_R \quad (6,3)$$

Όπου Φ_U υποδηλώνει το δυναμικό της σταθερής κίνησης σε νερό, Φ_I είναι το δυναμικό προσπίπτοντος κύματος, Φ_D είναι το δυναμικό περίθλασης και το Φ_R είναι το δυναμικό ακτινοβολίας.

Λόγω των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ της γάστρας και των κυμάτων που δημιουργούνται από το πλοίο, οι εξισώσεις που διέπουν μπορούν να γραφτούν με τη μορφή ολοκληρωτικών διαφορικών εξισώσεων. Συνδυάζοντας όλες τις υδροδυναμικές δυνάμεις με τις μαζικές δυνάμεις, χρησιμοποιώντας συμβολικούς δείκτες, μπορεί κανείς να αποκτήσει έξι γραμμικές συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις κίνησης, σε συντομευμένη μορφή, όπως:

$$\sum_{j=1}^6 \{(M_{kj} + A_{kj})\ddot{\xi}_j + B_{kj}\dot{\xi}_j + C_{kj}(t)\xi_j\} = F_k e^{i\omega_e t} \quad k, j = 1, \dots, 6 \quad (6,4)$$

Όπου οι δείκτες (k, j) συνδέονται με δυνάμεις στην κατεύθυνση k λόγω κινήσεων στη λειτουργία j ($k=1, 2, 3$) αντιπροσωπεύουν τις κατευθύνσεις **surge**, **sway** και **heave** και **4, 5, 6** αντιπροσωπεύουν τις κατευθύνσεις **roll**, **pitch** και **yaw**. Ο συντελεστής M_{kj} είναι τα συστατικά της κύριας μάζας για το πλοίο, A_{kj} και B_{kj} είναι η προστιθέμενη μάζα και οι συντελεστές απόσβεσης $C_{kj}(t)$ είναι οι υδροστατικά (εξαρτώμενοι από το χρόνο) συντελεστές αποκατάστασης, και F_k είναι τα πλάτη των δυνάμεων διέγερσης, όπου οι δυνάμεις δίδονται από το πραγματικό μέρος του μιγαδικού αριθμού $F_k e^{i\omega_e t}$.

Μια άλλη σημαντική πτυχή του παραμετρικού συντονισμού είναι το εύρος της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) που εξαρτάται από το χαρακτήρα της καμπύλης ευστάθειας (**καμπύλη GZ**). Σε διαμήκη κύματα, εκτός από τις μικρές τιμές **rolling (8-10 deg)**, το **GM** εξαρτάται από τις γωνίες εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού (**rolling**). Από την άλλη πλευρά, η περίοδος διατοιχισμού είναι επίσης σε συνάρτηση του **GM**.

Επομένως, μετά από ορισμένες γωνίες διατοιχισμού (**roll angle**), δεν μπορούν να καθοριστούν συνθήκες παραμετρικού συντονισμού και ουσιαστικά η ανάπτυξη του σταματά.

Η δυνατότητα εφαρμογής οποιασδήποτε λύσης που βασίζεται στην εξίσωση **Mathieu** είναι περιορισμένη επειδή είναι γραμμική, μπορεί να υποδεικνύει μόνο τις συνθήκες όταν μπορεί να δημιουργηθεί παραμετρικός διατοιχισμός (**parametric rolling**), αλλά δεν είναι σε θέση να προβλέψει το εύρος της κίνησης **rolling**. Μια τέτοια απάντηση δεν αρκεί για την πρακτική της μηχανικής. Η λύση πρέπει να καθορίζει το πόσο πολύ μπορεί να αναπτυχθεί ο παραμετρικός διατοιχισμός εάν οι συνθήκες ικανοποιούν τα κριτήρια ευαισθησίας (**susceptibility criteria**).

Μέχρι στιγμής μπορεί να ειπωθεί ότι η πιθανότητα παραμετρικού διατοιχισμού δεν έχει ακόμη **ελεγχθεί** πλήρως και έχει εξαλειφθεί στο σχεδιασμό. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι το εύρος της παραμετρικής ταλάντωσης κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) **A**, το οποίο μπορεί να δημιουργηθεί σε μια ακραία θαλάσσια κατάσταση, διατηρείται μικρό. Το εύρος **A** μπορεί να εκφραστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$A^2 = \frac{4}{3c_3} \left(\left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) \pm \sqrt{\frac{h^2}{4} - \sqrt{\frac{4\zeta^2}{\alpha}}} \right) \quad (6,5)$$

Όπου $\alpha = 4\omega^2_{\eta 4} / \omega^2_e$. Εάν το εύρος του παραμετρικού διατοιχισμού είναι μέτριο έως μεγάλο, είναι πιθανό να χρειαστεί ένα πολυώνυμο πέμπτης τάξης για τη μοντελοποίηση της αποκατάστασης της. Η λύση της εξίσωσης **Mathieu** σε αυτή την περίπτωση είναι απεριόριστη και αυξάνεται επ' άοριστον, ωστόσο, στον πραγματικό κόσμο, το φαινόμενο **parametric rolling** περιορίζεται σε πεπερασμένη λύση, αν και μερικές φορές με μεγάλο εύρος.

Είναι γνωστό ότι οι μη γραμμικοί όροι στην εξίσωση διατοιχισμού (**rolling**) σταθεροποιούν τον παραμετρικό διατοιχισμό. Η μη γραμμική εξίσωση σε μια διαμήκη θάλασσα που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη του σταθερού πλάτους της κίνησης **rolling** στην περιοχή του κύριου συντονισμού θα ήταν η εξής:

$$\ddot{\eta}_4 + 2\zeta\omega_{\eta 4} * \dot{\eta}_4 + \omega^2_{\eta 4}(1 - h\cos(\omega_c t - \varepsilon))\eta_4 - c_3\omega^2_0\eta^3_4 = 0 \quad (6,6)$$

Βέβαια η σχέση (6,6) στη συνέχεια συνεπάγεται με την παρακάτω σχέση:

$$\ddot{\eta}_4 + 2\zeta\omega_{\eta t} * \dot{\eta}_4 + \omega^2_{\eta t}(1 - h\cos(\omega_e t - \varepsilon))\eta_4 - c_3\omega^2_{\eta t}\eta^5_4 = 0 \quad (6,7)$$

Όπου c_3 και c_5 είναι μη γραμμικοί συντελεστές ακαμψίας, που αντιστοιχούν αντίστοιχα στους όρους αποκατάστασης τρίτης και πέμπτης τάξης. Η μη γραμμική απόσβεση έχει την τάση να αυξάνεται με την ταχύτητα διατοιχισμού, οπότε αργά ή γρήγορα θα αυξηθεί πάνω από το όριο απόσβεσης.

Πρέπει να τονιστεί ότι ο Αμερικανικός Νηογνώμονας (**ABS**) αντιμετωπίζει το ακόλουθο πρόβλημα ελέγχου σοβαρότητας (**severity criteria**) με τη διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης για μη γραμμική απόσβεση, η οποία είναι η τροποποίηση της σχέσης (6,6).

$$\ddot{\eta}_4 + 2\zeta\dot{\eta}_4 + \omega^2_m f(\eta_4, t) = 0 \quad (6,8)$$

Η εξίσωση (6,8) μπορεί να μετατραπεί σε ένα σύνολο εξισώσεων πρώτης τάξης με μια κατάλληλη αλλαγή μεταβλητών. Το σύνολο των εξισώσεων δίνεται ως εξής:

$$\dot{\eta}_4 + 2\zeta\eta_4 + f(\eta_4, t) = 0 \quad (6,9)$$

$$\dot{\eta}_4 - \eta_4 = 0$$

Επιπλέον ο χρόνο-εξαρτώμενος όρος αποκατάστασης της εξίσωσης διατοιχισμού (**rolling**) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της καμπύλης **GZ**:

$$f(\eta_4, t) = \frac{\pm(\eta_4)}{GM_o} GZ(\eta_4|, t) \quad (7)$$

Έτσι, μπορεί να χειριστεί με μια λύση βήμα προς βήμα που καλύπτει όλες τις τιμές στις καμπύλες **3-D GZ** που προσεγγίζονται από ένα τρίτο ή μεγαλύτερο πολυώνυμο τάξης για να απλοποιηθεί η συγκεκριμένη περίπτωση. Η προαναφερθείσα εξίσωση της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) μπορεί να λυθεί με έναν αλγόριθμο του **Runge-Kutta** τέταρτης τάξης για τιμές απόσβεσης $\mu = 0,03, 0,05, 0,075$ και $0,10$.

Ένας άλλος τρόπος για να γίνει αυτό, είναι να ξαναγράψουμε την εξίσωση κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) μόνο με την αποκατάσταση της μη γραμμικότητας, διατηρώντας εν τω μεταξύ μόνο τον γραμμικοποιημένο συντελεστή απόσβεσης δ .

$$\ddot{\eta}_4 + 2\delta\dot{\eta}_4 + \omega_m^2(1 + a_p \cos(\omega_e t))\eta_4 - \alpha_3\eta_4^3 = 0; \quad \alpha_p = \frac{\omega_e^2 a}{\omega_m^2} \quad (7, 1)$$

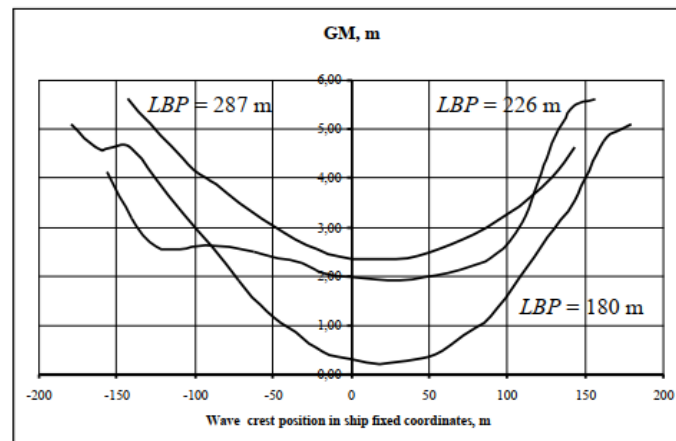
Όπου α_3 είναι ένας τρίτος συντελεστής ισχύος που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση της μη γραμμικής καμπύλης **GZ** και έτσι με την εφαρμογή της μεθόδου πολλαπλών κλιμάκων το εύρος σταθερής κατάστασης μπορεί να ληφθεί και να εκφραστεί όπως η σχέση (5,7):

$$A = \frac{\sqrt{\omega_e - 4\omega_m^2 - 0,5\omega_e \sqrt{\omega_e^2 a^2 p - 64\delta^2}}}{\sqrt{3\alpha_3}} \quad (7, 2)$$

4.3 Παραδείγματα κριτηρίων ευαισθησίας (susceptibility criteria) από το μοντέλο αξιολόγησης του Αμερικανικού Νηογνώμονα (ABS)

Σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα (ABS, 2020), η ευστάθεια πλοίου σε διαμήκεις θάλασσες και τα παραμετρικά κριτήρια ευαισθησίας σε κίνηση διατοιχισμού (**rolling**) πρέπει να υπολογίζονται για το κύμα σχεδιασμού. Το μήκος κύματος λ πρέπει να είναι ίσο με το μήκος μεταξύ των κάθετων, (**perpendiculars L_{BP}**).

Ακολουθώντας τις συστάσεις του (ABS) που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.2, δοκιμάστηκε μια σειρά από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ships**). Αναγνωρίζεται πρακτικά ότι ο παραμετρικός διατοιχισμός (**parametric rolling**) επανεμφανίστηκε με την έλευση της τελευταίας γενιάς σκαφών (**Post Panamax**). Δεδομένου ότι τα γεγονότα αυτά είναι αρκετά σπάνια φαινόμενα που συμβαίνουν στους πλωραίους και πρυμναίους κυματισμούς (**heading** και **following seas**) και μόνο τώρα μελετάται με αυστηρό τρόπο, ήταν δύσκολο να βρεθεί ένα πλοίο αρκετά γρήγορο με μεγάλη έντονη κλίση της πλώρης (**flared bow**) και επίπεδη (**flat transom**) πρύμνη που θα μπορούσαν να είναι επιρρεπείς σε ταχεία ανάπτυξη μεγάλων, ασταθών και βίαιων κινήσεων διατοιχισμού (**rolling**). Τα αποτελέσματα αναφέρθηκαν για πλοίο **container ship** μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων **6.586 TEU NYK PEGASUS (LBP = 287.0 m)**, το οποίο μεταξύ άλλων παρόμοιων πλοίων δεν εμφάνισε ευαισθησία στο φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**).



Εικόνα 47 – Εκτίμηση του μετακεντρικού ύψους GM σε 3 διαφορετικά πλοία για διαφορετικές θέσεις κορυφής κύματος κατά μήκος της γάστρας τους. (SILVA), 2014)



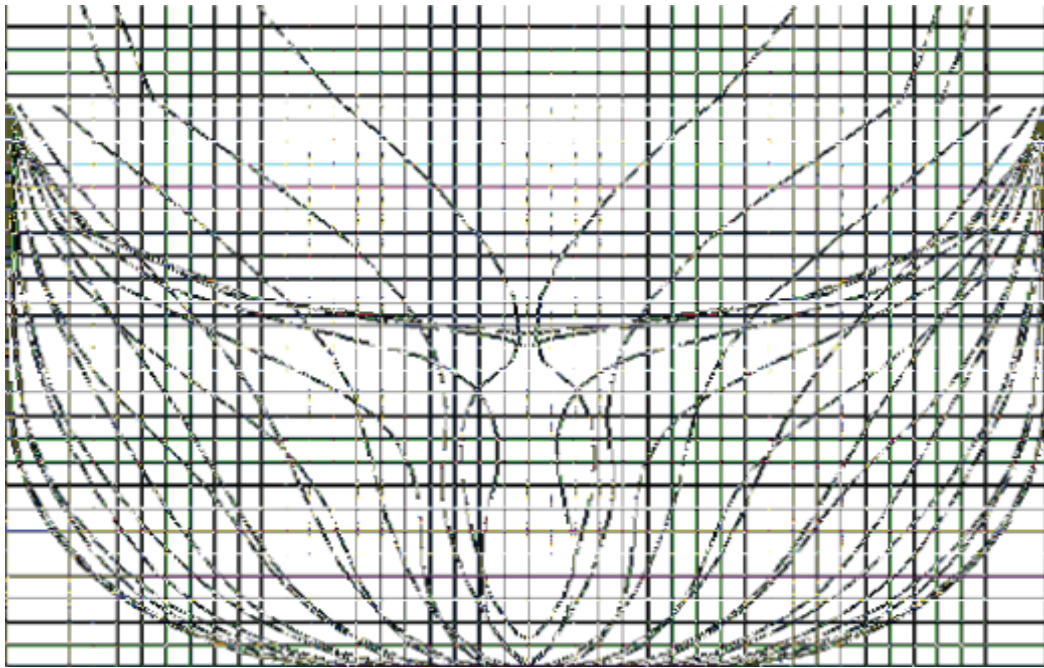
Εικόνα 48 – Απεικόνιση γάστρας πλοίου Container ship με έντονη κλίση βολβού - πλώρης (Bow flare).¹⁰

Ωστόσο, δύο από τα αναλυθέντα παραδείγματα επιλέχθηκαν και παρουσιάστηκαν, καθώς δείχνουν να είναι κάπως εκπληκτικά σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του

¹⁰ <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/types-of-bow-designs-used-for-ships/>

αριθμητικού υπολογισμού των κριτηρίων σοβαρότητας που ήταν γνωστά από προηγούμενες έρευνες. Είναι κοινώς αντιληπτό ότι ως επί το πλείστον τα μεγαλύτερα πλοία, όπως η σειρά (**container ship**) **Post-Panamax**, μπορεί να είναι επιρρεπή σε παραμετρικό διατοιχισμό, αλλά υπήρξαν κάποιες περιπτώσεις όπου αυτό το τεκμήριο δεν ισχύει.

Συγκεκριμένα, ένα σχετικά μικρό **containership** με σχέδιο γραμμών **εικόνα 49** και με κύρια στοιχεία λαμβάνεται ως παράδειγμα για την ανάλυση της ευστάθειας του σε διαμήκη κύματα ενώ πλέει σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες όπως σε σκληρούς πλωραίους κυματισμούς (**rough heading seas**). Έχει αποδειχθεί ότι είναι ευάλωτο σε παραμετρικό συντονισμό κίνησης **rolling** καθώς το κριτήριο ευαισθησίας δεν είναι ικανοποιητικό.



Εικόνα 49 – Σχέδιο γραμμών μικρού container ship A (Body plan). (SILVA), 2014)

Main particulars of midsize container ship (A):

Length LBP = 168.0 m

Breadth B = 28.0 m

Depth D = 16.0 m

Design draught d = 10.0 m

Vertical center of gravity VCG = 12.0 m

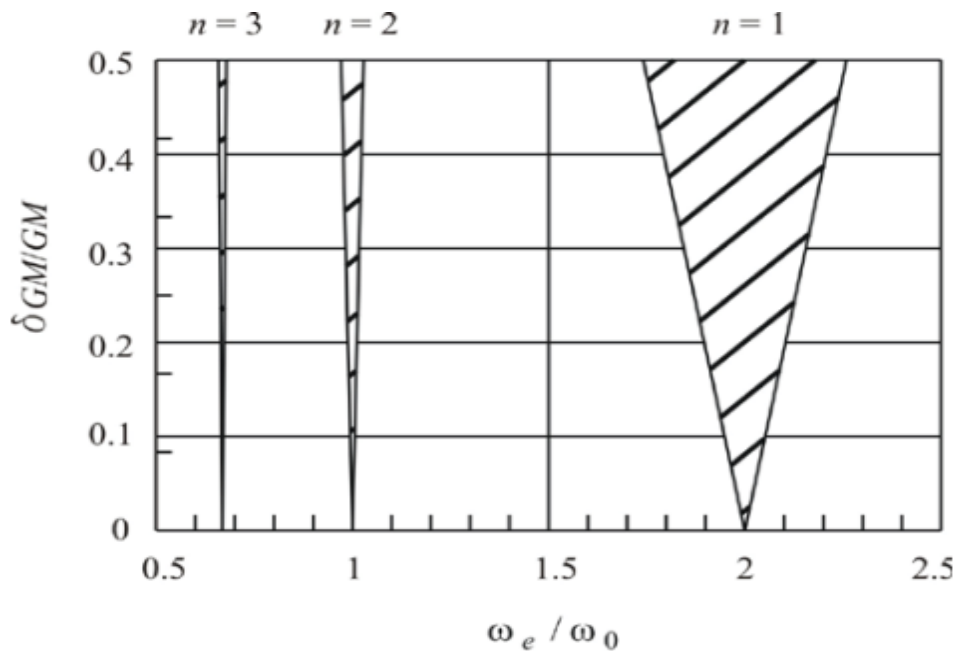
Metacentric height GM = 0.596 m

Speed VS = 20 kn

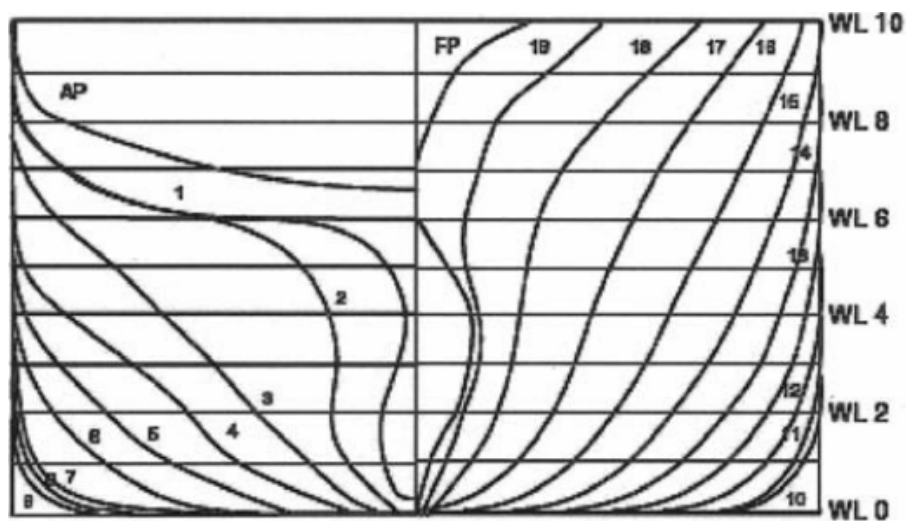
Μία από τις δυνατότητες για αυτό το αποτέλεσμα είναι ότι παρά το γεγονός ότι οι ζώνες αστάθειας για μικρότερα πλοία που προέρχονται από τη γραμμική εξίσωση **Mathieu**

είναι μικρές (εικόνα 50), είναι ακόμα πιθανό ότι με ένα συνδυασμό επιλεγμένου μήκους κύματος, ταχύτητας πλοίου και κατεύθυνσης, μπορεί να συμβεί ένα αποτέλεσμα παραμετρικής κίνησης διατοιχισμού (**rolling**).

Περαιτέρω αριθμητική διαδικασία για τη διερεύνηση των συνδυασμών κλάσης, ταχύτητας και απόσβεσης που οδηγούν στην άνοδο του εύρους φαινομένου **parametric rolling (severity criteria)** πρέπει να καθοριστεί και να ρυθμιστεί, ώστε να είναι σε θέση να τις αποφύγει. Αυτό ουσιαστικά αποτελεί το βασικό μέρος της εργασίας οπού θα αναπτυχθεί στα κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 50 - Όρια κατωφλίου των τριών πρώτων ζωνών αστάθειας για τη γραμμική εξίσωση Mathieu χωρίς απόσβεση. (SILVA), 2014)



Εικόνα 51 - Σχέδιο γραμμών πλοίου τύπου Post-Panamax container ship B (Body plan). (SILVA), 2014)

Main particulars of post-Panamax containership (B):

Length LBP = 307.0 m

Breadth B = 42.8 m

Depth D = 24.5 m

Draught T = 13.0 m

Design draught d = 10.0 m

Vertical center of gravity VCG = 12.0 m

Metacentric height GM = 0.596 m

Speed VS = 20 kn

Η πλήρης αριθμητική διαδικασία για ένα **container ship type Post-Panamax (Εικόνα 51)** με βάση τη μέθοδο **Duffing σχέση (7,3)** με διέγερση που λαμβάνεται από τη διαφορά στην αποκατάσταση δύναμης των κυματισμών που έρχονται σε κατάσταση κορυφογραμμής όταν το πλοίο συναντά πλωραίους κυματισμούς (**heading seas**) απέδειξε ότι μπορεί να ωθήσει το πλοίο σε μια τροχιά παραμετρικής κίνησης.

Η εξίσωση **Duffing** (ή ο **ταλαντωτής Duffing**), που ονομάστηκε από τον **George Duffing (1861-1944)**, είναι μια μη γραμμική διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση ορισμένων αποσβεσμένων και κινούμενων ταλαντωτών. Η εξίσωση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = \gamma \cos(\omega t) \quad (7,3)$$

Όπου ο άγνωστος x της συνάρτησης $x = x(t)$ εκφράζει τη μετατόπιση στο χρόνο (t), \dot{x} η πρώτη παράγωγος του χρόνου (**ταχύτητα**), \ddot{x} η δεύτερη παράγωγος του χρόνου (**επιτάχυνση**). Τα α , β , γ , δ , ω δίνονται ως σταθερές τις εξίσωσης. Η εξίσωση περιγράφει την κίνηση ενός αποσβεστήρα ταλαντωτών με ένα πιο σύνθετο δυναμικό τρόπο από ότι στην απλή αρμονική κίνηση. Η εξίσωση **Duffing** αποτελεί ένα παράδειγμα ενός δυναμικού συστήματος που παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά στο άπειρο. Στη δικιά μας περίπτωση, το σύστημα **Duffing** παρουσιάζει στην απόκριση συχνότητας το φαινόμενο συντονισμού (**παραμετρικού συντονισμού**) που είναι ένα είδος συμπεριφοράς υστέρησης συχνότητας.

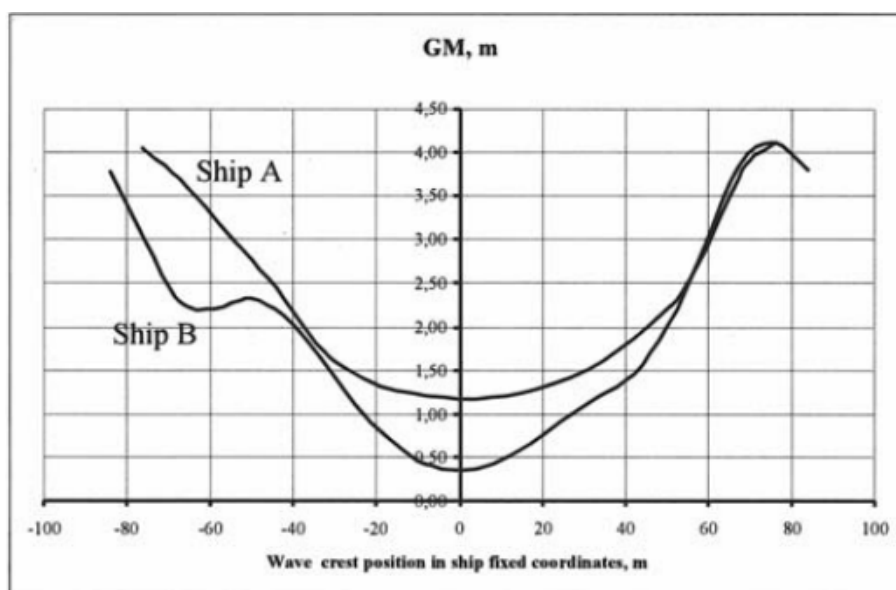
Ωστόσο, μετά την εφαρμογή της διαδικασίας το αποτέλεσμα δεν έδειξε ευαισθησία σε παραμετρικό διατοιχισμό. Αυτό οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, ενώ υπάρχει μια ανάγκη για τυποποιημένη διαδικασία όπως αυτή, ουσιαστικά δεν αποτελεί κάθε μέσο πλήρη απόδειξη.

Σίγουρα για τα πλοία αυτής της διάστασης είναι σκόπιμο να διεξαχθεί πλήρης αριθμητική διαδικασία για τη πρόβλεψη εύρους παραμετρικού διατοιχισμού σε ακανόνιστα κύματα. Είναι πολύ πιθανό ότι, λόγω του απλοποιημένου αναλυτικού μοντέλου που παρουσιάζεται από τον (**ABS**), ένα τέτοιο πλοίο μπορεί να μην φαίνεται ευαίσθητο στον παραμετρικό διατοιχισμό, δεδομένου ότι διαπιστώθηκε ότι αποτελεί ένα πρόβλημα για τα λεπτόγραμμα πλοία τύπου **Panamax**. Υπάρχουν παραδείγματα όπου μεγάλος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων χάθηκαν στη θάλασσα από πλοία **type**

Panamax και σχετικά μικρότερα **Post-Panamax** λόγω ξαφνικής υπερβολικής κίνησης διατοιχισμού (**rolling**).

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς τα πλοία τύπου **Panamax** έγιναν όλο και μεγαλύτερα τα τελευταία χρόνια, εκφράστηκε η ανησυχία ότι ο παραμετρικός διατοιχισμός μπορεί να γίνει ακόμη πιο απειλητικός για αυτά τα πλοία. Όμως αυτό μπορεί να μην αποτελεί μια κατασταλτική περίπτωση, λόγω της μεγάλης ευστάθειας που έχουν, καθώς το φαινόμενο (**parametric rolling**) γενικά φαίνεται να αποτελεί λιγότερο πρόβλημα για τα πολύ μεγάλα πλοία τύπου **Panamax**.

Στη συνέχεια παρατηρούμε στο παράδειγμα των δύο τύπων πλοίου **type A** και **type B** την εκτίμηση του **GM** για τις διάφορες θέσεις των κορυφογραμμών των κυμάτων κατά μήκος της γάστρας τους, όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 52**.



Εικόνα 52 – Εκτίμηση του **GM** για διάφορες κορυφογραμμές κυματισμών κατά το διάμηκες άξονα των 2 πλοίων A και B. (SILVA), 2014)

5. Κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (S.G.I.S.c.) – Second Generation of Intact Stability criteria

5.1 Εισαγωγή στα κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (S.G.I.S.c.)

Η ανάπτυξη των κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (**S.G.I.S.c**) ξεκίνησε το 2002 με την αποκατάσταση της ομάδας εργασίας για την ακεραιότητα της ευστάθειας από την υποεπιτροπή του **IMO** για την ευστάθεια, τις γραμμές φόρτωσης και για την ασφάλεια των αλιευτικών σκαφών (**SLF - Fishing vessels safety**), (**Francescutto, 2004, 2007**). Ωστόσο, λόγω κυρίως της προτεραιότητας του, αναθεωρώντας τον **IS code** για έγκριση, οι πραγματικές εργασίες σχετικά με τα κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς δεν είχαν ξεκινήσει να μελετώνται σοβαρά μέχρι την **48η** σύνοδο του (**SLF**) τον Σεπτέμβριο του 2005. Η ομάδα εργασίας αποφάσισε ότι τα κριτήρια άθικτης ευστάθειας 2^{ης} γενιάς θα πρέπει να βασίζονται στην απόδοση και την αντιμετώπιση τριών τρόπων αστοχιών ευστάθειας (**SLF 48/21, παράγραφος 4.18**):

- Αποκατάσταση προβλημάτων του μοχλοβραχίονα επαναφοράς (**καμπύλη ευστάθειας GZ**), όπως παραμετρική διέγερση και καθαρή απώλεια ευστάθειας.
- Ευστάθεια υπό κατάσταση νεκρού πλοίου (**dead ship condition**), όπως ορίζεται από την **SOLAS** κανονισμός **II-1/3-8**.
- Ελιγμούς που σχετίζονται με προβλήματα σε κύματα, όπως τα φαινόμενα (**Surf-riding, Broaching to, parametric rolling**).

Μια παρόμοια διατύπωση συμπεριλήφθηκε στο προοίμιο του **IS code** του **2008**, υποδεικνύοντας την κατεύθυνση της μακροπρόθεσμης ανάπτυξης. Ωστόσο, το πρόβλημα παραλλαγής μοχλοβραχίονα επαναφοράς θεωρήθηκε ως παράγοντας δύο προβλημάτων:

- Τρόποι παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**).
- Καθαρή απώλεια ευστάθειας (**Pure loss stability**).

Κατά τη διάρκεια αυτής της αρχικής εξέλιξης, υπήρξε μια γενική συμφωνία ότι τα κριτήρια 2^{ης} γενιάς πρέπει να βασίζονται στη φυσική των συγκεκριμένων φαινομένων που οδηγούν στην αποτυχία ευστάθειας πλοίου.

Ο σχεδιασμός και οι τρόποι λειτουργίας των νέων πλοίων λαμβάνουν χαρακτηριστικά που δεν μπορούν με σιγουριά να βασίζονται αποκλειστικά στα στατιστικά στοιχεία των αποτυχιών και των μεθόδων που βασίζονται στην παλινδρόμηση. Επίσης, υπήρξε γενική συμφωνία σχετικά με τη σκοπιμότητα της συσχέτισης των νέων κριτηρίων με την πιθανότητα, ή κάποια άλλα μέτρα της πιθανότητας αποτυχίας ευστάθειας, καθώς οι μέθοδοι ανάλυσης κινδύνου έχουν αποκτήσει μεγαλύτερη αποδοχή και έχουν γίνει τυποποιημένα εργαλεία σε άλλες βιομηχανίες (π.χ. **SLF 48/4/12**).

Επομένως αυτές οι σκέψεις οδήγησαν στη διαμόρφωση του πλαισίου για τα κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς, που περιγράφονται στο (SLF 50/4/4) και συζητήθηκαν στην 50^η σύνοδο του SLF (Μάιος 2007). Τα βασικά στοιχεία αυτού του πλαισίου ήταν η διάκριση μεταξύ κριτηρίων που βασίζονται στην απόδοση και μεταξύ πιθανοτικών και καθοριστικών κριτηρίων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στα πιθανοτικά κριτήρια, όπου η ύπαρξη του προβλήματος της σπανιότητας αναγνωρίστηκε για πρώτη φορά και προσφέρθηκε ένας γενικός ορισμός. Επίσης, λόγω της σπανιότητας των αποτυχιών ευστάθειας, η αξιολόγηση της πιθανότητας αποτυχίας με αριθμητικά μοντέλα αναγνωρίστηκε ως μια ιδιαίτερα σημαντική πρόκληση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι (2007), υπήρχε ήδη κάποια εμπειρία στη ναυτιλιακή βιομηχανία σχετικά με τον τρόπο χειρισμού ορισμένων ζητημάτων που σχετίζονται με τη δυναμική ευστάθεια πλοίου. Μετά από ένα παραμετρικό τροχαίο ατύχημα στο APL China (France, et al. 2003), ο Αμερικανικός Νηογνώμονας (ABS) εξέδωσε έναν οδηγό για την αξιολόγηση του παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling) για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (ABS, 2004).



Εικόνα 53 – Αποτέλεσμα παραμετρικού διατοιχισμού σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (APL China).¹¹

Ο οδηγός βασίστηκε σε μια διαδικασία αξιολόγησης πολλαπλών επιπέδων. Στο πρώτο επίπεδο είναι τα κριτήρια ευαισθησίας, βασίστηκε στην αξιολόγηση της αλλαγής του GM σε κανονικά κύματα και στην εξίσωση Mathieu όπου αναφερθήκαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εάν το πλοίο βρεθεί να είναι επιρρεπές σε παραμετρικό διατοιχισμό, τότε εφαρμόζεται ένα πιο περίπλοκο κριτήριο αξιολόγησης. Αυτό το κριτήριο σοβαρότητας (severity criteria) περιλάμβανε τον υπολογισμό της πλήρους καμπύλης GZ σε κύματα και την αριθμητική ολοκλήρωση της εξίσωσης διατοιχισμού

¹¹ https://www.researchgate.net/figure/Devastation-of-on-deck-containers-after-the-APL-China-underwent-parametric-roll_fig1_236590089

(**rolling**). Εάν η απόκριση του διατοιχισμού ήταν αρκετά σοβαρή, τότε εφαρμόστηκαν προηγμένες αριθμητικές προσομοιώσεις και αναπτύχθηκε επιχειρησιακή καθοδήγηση ειδικά για το πλοίο χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα όπως το πρόγραμμα κίνησης μεγάλου εύρους (**LAMP**)(**Lin & Yue, 1990**). Όμως ενώ ήταν αρκετά αυστηρά, τα κριτήρια ευαισθησίας και σοβαρότητας ήταν ακόμα ικανά να εντοπίσουν πλοία για τα οποία δεν ήταν δυνατός ο παραμετρικός διατοιχισμός.

Επίσης εκείνη την εποχή, το έργο του Γερμανικού Νηογνώμονα (**Germanischer Lloyd**) επικεντρώθηκε στις διαδικασίες αριθμητικής αξιολόγησης χρησιμοποιώντας τον προηγμένο αριθμητικό κώδικα, **GL Simbel** (**Brunswig & Pereira, 2006 Shigunov & Pereira, 2009**). Επιπλέον, η ανάπτυξη του **Germanischer Lloyd** επικεντρώθηκε στην προετοιμασία της επιχειρησιακής καθοδήγησης για την αποφυγή παραμετρικού διατοιχισμού (**Shigunov, 2009**). Βέβαια, εκτός από τις προσπάθειες των νηογνωμόνων, σημειώθηκε μεγάλη πρόοδος στην ανάπτυξη προγραμμάτων κατάρτισης προκειμένου να αυξηθεί με τον καλύτερο τρόπο η ευαισθητοποίηση του πληρώματος σχετικά με τον παραμετρικό διατοιχισμό.

Η ανάλυση αυτών των εμπειριών οδήγησε στην κατανόηση ότι πρέπει να εφαρμοστεί μια πολυεπίπεδη προσέγγιση για την ανάπτυξη των κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς ως τρόπο αποφυγής περιττής εργασίας. Ενόψει αυτού, η ιδέα των κριτηρίων ευπάθειας (**vulnerability criteria**) διατυπώθηκε για πρώτη φορά στο έγγραφο από τους **Belenky, et.al.(2008)**.

Το έγγραφο έδωσε επίσης μια ευρεία ανασκόπηση του φυσικού υποβάθρου των τρόπων δυναμική ευστάθειας. Λόγω της μεγαλύτερης λεπτομέρειάς του, το παρόν έγγραφο παρείχε επεξηγηματικές σημειώσεις στο **SLF 50/4/4** και υποβλήθηκε στην **51^η** σύνοδο του **SLF (SLF 51/INF.4)**.

Το 2005, η Ιαπωνική εταιρεία Ναυπηγών Μηχανικών και Μηχανικών Ωκεανών (**JASNAOE - Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers**) ίδρυσε μια επιτροπή στρατηγικής έρευνας σχετικά με τις μεθόδους εκτίμησης για την ανατροπή του κινδύνου για τα κριτήρια ευστάθειας νέας γενιάς του **IMO** (Επιτροπή **SCAPE**). Το αποτέλεσμα αυτού του προγράμματος αναφέρθηκε σε πέντε συνεδρίες του **JASNAOE**. Κάποια άλλα αποτελέσματα αναφέρθηκαν στα αγγλικά στο συνέδριο της Οσάκα (**Ikeda, et al., 2008**). Μια επισκόπηση αυτής της εργασίας είναι διαθέσιμη από το **SLF 51/INF.6**. Εν τω μεταξύ, ορισμένες εξελίξεις στον τομέα επηρεάστηκαν από την αυξανόμενη εξέταση και πρακτική διατύπωση του λεγόμενου (**critical wave groups**).

Αυτό χρησιμοποιήθηκε για την πιθανοτική αξιολόγηση της ευστάθειας πλοίου κατά τη διάρκεια του Ευρωπαϊκού έργου **SAFEDOR** (π.χ. **Themelis & Spyrou, 2007**), η οποία επέτρεψε μια πρακτική διεπαφή μεταξύ των καθοριστικών και πιθανολογικών απόψεων. Η **SNAME** ίδρυσε μια ομάδα εργασίας δυναμικής ευστάθειας, σκοπός της οποίας είναι να παρέχει μια λεπτομερή ανασκόπηση των εξελίξεων στο πεδίο δυναμικής ευστάθειας (**SLF 53/3/3**).

Η ανάπτυξη των κριτηρίων άθικτης ευστάθειας 2^{ης} γενιάς συζητήθηκε εντατικά κατά τη διάρκεια του **10^{ου}** Διεθνούς Συνεδρίου για την ευστάθεια των πλοίων και των ωκεάνιων οχημάτων και στο επόμενο **11^ο** και **12^ο** διεθνές εργαστήριο ευστάθειας πλοίων (**International Ship Stability Workshops**). Συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε

μα ανασκόπηση που εξέτασε την καταλληλότητα των μεθόδων για τα κριτήρια ευπάθειας πλοίων στον παραμετρικό διατοιχισμό (**vulnerability criteria**).

Η εξέταση των υπερβολικών επιταχύνσεων προστέθηκε επίσης πρόσφατα στον κατάλογο των τρόπων αστοχίας ευστάθειας (**SLF 53/19, παράγραφος 3.28**) μετά τη μερική αποτυχία ευστάθειας του **Chicago Express**, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τραυματισμούς του πληρώματος και απώλεια ζωής (**BSU, 2009**). Ενώ, από τεχνική άποψη, το ζήτημα αυτό είναι γνωστό, δεν έχει ακόμη συμπεριληφθεί σε κάποιο κανονικό πλαίσιο. Σε πρόσφατη μελέτη, οι **Shigunov et (2011)** εξέτασε έναν έλεγχο ευπάθειας για υπερβολικές επιταχύνσεις με βάση το αρχικό **GM** και την απόσβεση διατοιχισμού (**rolling**).



Εικόνα 54 – Container ship Chicago Express όπου υπέστη σοβαρές ζημιές από παραμετρικό διατοιχισμό το 2009.¹²

5.2 Η έννοια των κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς

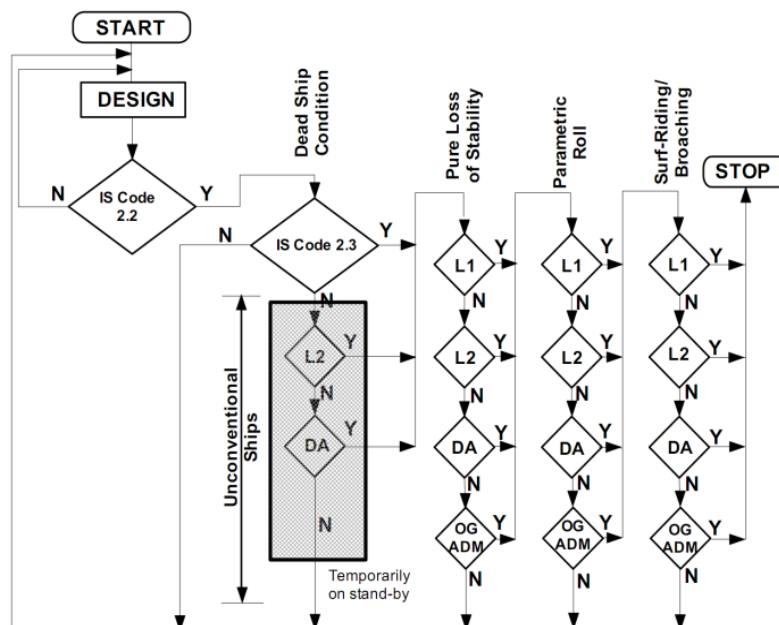
Είναι γεγονός ότι η ασφάλεια ενός πλοίου σε μια θαλάσσια οδό περιλαμβάνει πολύπλοκα υδροδυναμικά φαινόμενα τα οποία μέχρι τώρα δεν έχουν διερευνηθεί πλήρως και κατανοηθεί. Η κίνηση των πλοίων σε μια θαλάσσια οδό πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ένα δυναμικό σύστημα και οι σχέσεις μεταξύ των πλοίων και των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως οι διεγέρσεις λόγω κυματισμών και ανέμων αναγνωρίζονται ως εξαιρετικά σημαντικά στοιχεία. Με βάση τις υδροδυναμικές πτυχές και την ανάλυση ευστάθειας ενός πλοίου σε μια θαλάσσια οδό, η ανάπτυξη κριτηρίων ευστάθειας πλοίου δημιουργούν σύνθετα προβλήματα που απαιτούν περαιτέρω έρευνα στις μέρες μας.

¹² <https://www.vesselfinder.com/vessels/CHICAGO-EXPRESS-IMO-9295268-MMSI-211839000>

Με λίγα λόγια η ύπαρξη του προβλήματος καθιστά την άμεση αριθμητική προσομοίωση μη πρακτική για την αξιολόγηση της ενδεχόμενης αποτυχίας της δυναμικής ευστάθειας πλοίου. Βέβαια υπάρχουν ειδικές διαδικασίες που επιτρέπουν την αντιμετώπιση του προβλήματος της σπανιότητας αυτού το φαινομένου που μπορεί να περιλαμβάνουν αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας υδροδυναμικούς κώδικες (**hydrodynamic codes**) όπως (**LAMP 1, FREDYN 2, GL-SIMBEL 3, ΤΡΙΚΥΜΙΑ 4**, και άλλοι), τους υβριδικούς κώδικες (**hybrid codes**) όπως (**CAPSIM 5, LAIDYN 6, SHIXDOF 7, SIMCAP 8**) ή πιο απλή συνήθη διαφορική εξίσωση όπως (**BROACH 9, ROLLS 10**).

(Japan), 2020) Η προετοιμασία των δεδομένων εισόδου για αυτά τα εργαλεία μπορεί να περιλαμβάνει δοκιμές μοντέλου, καθώς αυτά τα εργαλεία αντιπροσωπεύουν ότι πιο προηγμένο υπάρχει στις μέρες μας. Όμως πρέπει να τονιστεί ότι εφαρμογή τους είναι δαπανηρή και απαιτεί την κατάλληλη αιτιολόγηση της αναγκαιότητας της εφαρμογής τους, επειδή δεν είναι όλα τα πλοία ευάλωτα σε αυτές τις αποτυχίες ευστάθειας πλοίου.

Η αιτιολόγηση αυτή μπορεί να συμπληρωθεί με τη μορφή μιας πολυδιάστατης προσέγγισης όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 55**, σύμφωνα με την οποία ένα πλοίο θα ελέγχεται για το πόσο ευάλωτο είναι στις πρώτες βαθμίδες, έτσι ώστε αν βρεθεί ευάλωτο, τότε το πλοίο θα αξιολογείται χρησιμοποιώντας υπερσύγχρονες μεθόδους άμεσης αξιολόγησης της ευστάθειας του. Λαμβάνοντας υπόψη τους προβλεπόμενους κανόνες εφαρμογής, θα εφαρμοστούν δύο επίπεδα κριτηρίων ευπάθειας (**vulnerability criteria**). Το πρώτο επίπεδο προορίζεται να είναι πολύ απλό και συντηρητικό. Ο κύριος σκοπός του είναι να διακρίνει τα πλοία (και σε συνθήκες φόρτωσης) που σαφώς δεν είναι ευάλωτα σε μια δεδομένη κατάσταση αστοχίας ευστάθειας από εκείνα που αρχικά θα μπορούσαν να ήταν. Όμως επειδή η περαιτέρω ανάλυση των πλοίων που δεν είναι ευάλωτα θα ήταν περιττή, θα πρέπει να αποφεύγεται το κόστος της διενέργειας αυτής της περαιτέρω ανάλυσης.



Εικόνα 55 - Πολυεπίπεδη προσέγγιση για τα κριτήρια άθικτης ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (SLF53 / WP.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3).

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι, τα πολύ μεγάλα πλοία μεταφοράς αργού πετρελαίου (**crude oil tankers**) είναι καλά μελετημένα για το μεγαλύτερο μέρος του μήκους της γάστρας και ως εκ τούτου, δεν μπορούν να βιώσουν σημαντικές αλλαγές ευστάθειας στα κύματα.

Επομένως, αυτός ο τύπος πλοίου δεν αναμένεται να είναι ευάλωτος στα προβλήματα γωνίας εγκάρσιας κλίσης, είτε του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) είτε της καθαρής απώλειας ευστάθειας (**pure loss stability**). Βασίζοντας τα κριτήρια ευπάθειας πρώτου επιπέδου στα χαρακτηριστικά γεωμετρίας της γάστρας και της ταχύτητας και όχι στον τύπο του πλοίου καθ' αυτό, μπορεί να γίνει μια εύκολη πρώτη εκτίμηση της ευπάθειας. Ως εκ τούτου, τα κριτήρια θα παραμείνουν έγκυρα για κάθε τύπο σχεδίασης πλοίου.

Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι, τα κριτήρια του πρώτου επιπέδου (**level 1**) πρέπει να είναι απλά και συντηρητικά, καθώς μπορεί να αναμένονται κάποια περιστατικά ψευδώς θετικά. Και πάλι όμως, για να μειωθεί ο χρόνος και το κόστος αξιολόγησης της ευστάθειας πλοίου, εισάγεται ένα δεύτερο επίπεδο κριτηρίων ευπάθειας (**level 2**). Το δεύτερο επίπεδο προορίζεται να είναι λιγότερο συντηρητικό από το πρώτο, βασισμένο σε απλοποιημένη φυσική και περιλαμβάνει υπολογισμούς με μειωμένες υπολογιστικές προσπάθειες και απλές εφαρμογές ακολουθώντας κατάλληλες οδηγίες.

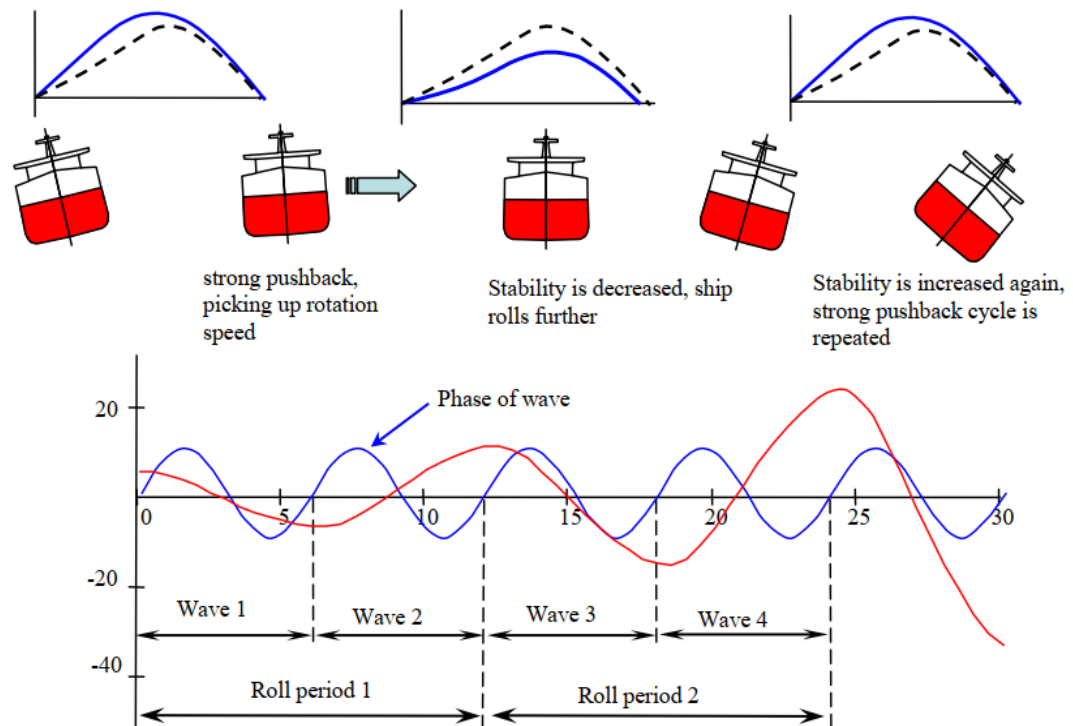
5.3 Κριτήρια ευπάθειας 1^{ου} επιπέδου για παραμετρικό διατοιχισμό (Level 1 Vulnerability Criteria for parametric rolling).

Κάνοντας μια μικρή συνοπτική αναφορά στο φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού, δεν πρέπει να λησμονούμε ότι η εμφάνιση παραμετρικού διατοιχισμού προκαλείται από αλλαγές ευστάθειας που εξαρτώνται από το χρόνο. Τυπικά, αν και όχι απαραίτητα, η χειρότερη περίπτωση συμβαίνει όταν η συχνότητα συνάντησης μεταξύ του πλοίου και του κύματος είναι περίπου διπλάσια από τη φυσική συχνότητα διατοιχισμού (**rolling**). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η κατάσταση όταν η συχνότητα συνάντησης είναι κοντά στη φυσική συχνότητα διατοιχισμού (**rolling**) μπορεί επίσης να είναι επικίνδυνη.

Εάν το πλοίο έχει μη μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης, ενώ βρίσκεται στο κύμα, η αυξημένη ευστάθεια του παρέχει ισχυρή δύναμη αποκατάστασης (δηλαδή, καθώς το πλοίο επιστρέφει στην όρθια θέση, ο ρυθμός διατοιχισμού (**rolling**) του είναι μεγαλύτερος, καθώς υπήρξε πρόσθετη ώθηση λόγω της αυξημένης ευστάθειας. Εάν εκείνη τη στιγμή, το πλοίο έχει την κορυφή κύματος στο μέσο του, η ευστάθεια μειώνεται και το πλοίο θα κυλήσει περαιτέρω στην αντίθετη πλευρά λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας (δηλαδή αδράνειας) κίνησης διατοιχισμού και της μικρότερης αντίστασης στην κλίση.

Στη συνέχεια, αν το κύμα φτάσει στο μεσαίο τμήμα του πλοίου όταν το πλοίο φτάσει στο μέγιστο πλάτος του διατοιχισμού, η ευστάθεια αυξάνεται και ο κύκλος ξεκινά ξανά. Ένα σημαντικό σημείο είναι ότι υπήρχε κατά το ήμισυ του κύκλου διατοιχισμού (**rolling**) που σχετίζεται με το πέρασμα ενός ολόκληρου κύματος. Έτσι, υπάρχουν δύο

κύματα που περνούν ανά κάθε περίοδο διατοιχισμού. Αυτό σημαίνει ότι η περίοδος διατοιχισμού (**rolling**) είναι περίπου διπλάσια από αυτή της περιόδου κύματος όπως φαίνεται στην **εικόνα 56**.



Εικόνα – 56 Απεικόνιση ανάπτυξης φαινομένου παραμετρικού διατοιχισμού parametric rolling. (Japan, 2020)

Ακόμη και από αυτή τη σύντομη περιγραφή, είναι σαφές ότι για την ανάπτυξη του παραμετρικού διατοιχισμού απαιτούνται δύο προϋποθέσεις:

- Μια παραλλαγή της ευστάθειας στα κύματα.
- Μια ορισμένη αναλογία συνάντησης και φυσικής συχνότητας.

Καθώς τα κριτήρια ευπάθειας **1^ο** επιπέδου για παραμετρικό διατοιχισμό αναμένεται να είναι απλά, είναι λογικό να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση **Mathieu** (το απλούστερο μοντέλο παραμετρικού συντονισμού) ως βάση για τα κριτήρια. Η γραμμική εξίσωση κίνησης διατοιχισμού με περιοδική αλλαγή του **GM** μπορεί να μετατραπεί στην εξίσωση **Mathieu** ως εξής:

$$(I_{\chi} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + W * GM(t)\phi = 0 \quad (7,4)$$

Όπου **I_χ** είναι η εγκάρσια ροπή αδράνειας, **A₄₄** είναι η προστιθέμενη μάζα σε κίνηση διατοιχισμού, **B₄₄** είναι ο γραμμικός (ή γραμμικοποιημένος) συντελεστής απόσβεσης και **W** είναι το βάρος εκτοπίσματος ενός πλοίου.

Η διακύμανση του \mathbf{GM} με το χρόνο είναι το βασικό χαρακτηριστικό για το μοντέλο παραμετρικού διατοιχισμού. Στην περίπτωση των κανονικών κυμάτων, όταν η διακύμανση του μετακεντρικού ύψους δεν είναι πολύ μεγάλη, η εξάρτηση του \mathbf{GM} από το χρόνο μπορεί να προσεγγιστεί από μια ημιτονοειδή λειτουργία η οποία είναι η εξής:

$$\mathbf{GM}(t) = \mathbf{GM}_m + \mathbf{GM}_a \cos(\omega_e t) \quad (7,5)$$

Όπου \mathbf{GM}_m είναι η μέση τιμή του \mathbf{GM} , \mathbf{GM}_a είναι το πλάτος από τις αλλαγές του \mathbf{GM} στα κύματα και το ω_e είναι η συχνότητα κύματος συνάντησης. Βέβαια σε μια πρώτη προσέγγιση, τα \mathbf{GM}_m και \mathbf{GM}_a μπορούν να προσδιοριστούν ως:

$$\begin{aligned} \mathbf{GM}_a &= 0,5(\mathbf{GM}_{max} - \mathbf{GM}_{min}) \\ \mathbf{GM}_m &= 0,5(\mathbf{GM}_{max} + \mathbf{GM}_{min}) \end{aligned} \quad (7,6)$$

όπου \mathbf{GM}_{max} και \mathbf{GM}_{min} είναι οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές της τιμής του \mathbf{GM} για ένα πέρασμα της κορυφής κύματος κατά μήκος της γάστρας του πλοίου. Εναλλακτικά, ο πραγματικός μέσος όρος του \mathbf{GM} σε κύματα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με την εξίσωση **Mathieu** που προέρχεται από τη μετατροπή της εξίσωσης (7,4) στην κανονική μορφή:

$$\ddot{\varphi} + 2\delta\dot{\varphi} + \omega_m^2(1 + h\cos(\omega_e t))\varphi = 0 \quad (7,7)$$

Όπου η συγκεκριμένη σχέση είναι ακριβώς η ίδια με τη σχέση (5,6) που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.

Επιπλέον αξίζει να τονίσουμε ότι:

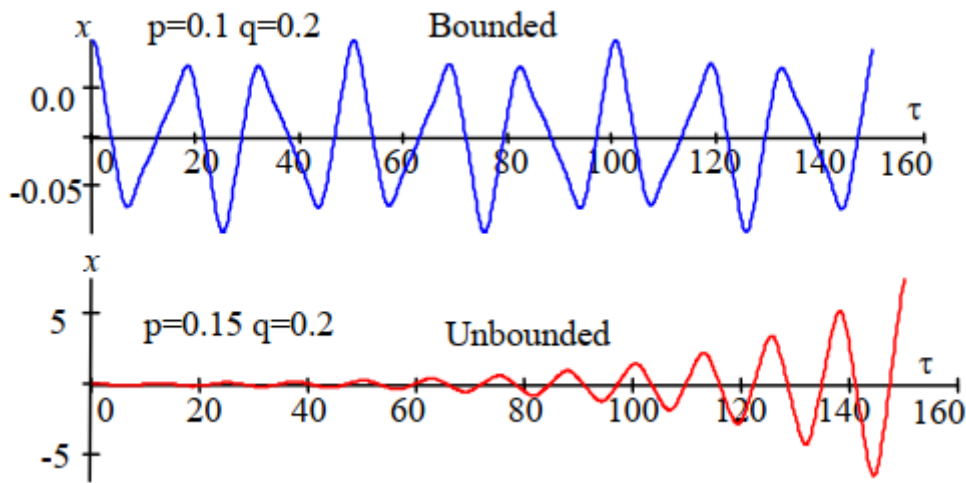
$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta * \mathbf{GM}_m}{I_{xx} + A_{44}}}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{\Delta * \mathbf{GM}_a}{I_{xx} + A_{44}}}$$

$$2\delta = \frac{B_{44}}{I_{xx} + A_{44}}$$

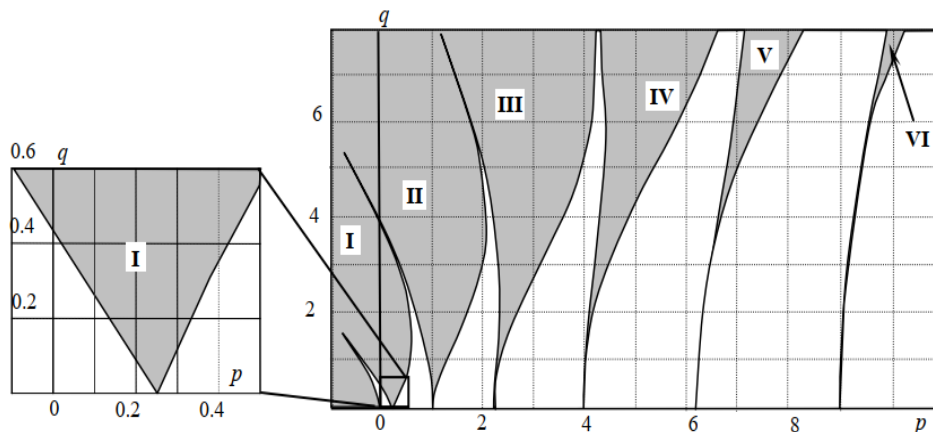
$$h = \frac{\omega_a^2}{\omega_m^2}$$

Η λύση της εξίσωσης **Mathieu** δεν μπορεί να εκφραστεί σε στοιχειώδεις λειτουργίες. Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό της είναι η λύση της εξίσωσης σε περίπτωση που είναι οριοθετημένη ή όχι (όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 57**).



Εικόνα 57 – Απεικόνιση οριοθετημένης (bounded) και απεριόριστης (unbounded) λύσης της εξίσωσης Mathieu. (Japan), 2020)

Όπως φαίνεται στην **εικόνα 57**, διαφορετικοί συνδυασμοί των χαρακτηριστικών των συντελεστών **p** και **q** οδηγούν είτε σε οριοθετημένο είτε σε απεριόριστο διάστημα λύσεων. Το διάγραμμα **Ince-Srutt**, που φαίνεται στην **εικόνα 58**, χαρτογραφεί τις οριοθετημένες και απεριόριστες λύσεις, ανάλογα με τους συντελεστές, **p** και **q**. Οι σκιασμένες περιοχές, που προσδιορίζονται με λατινικούς αριθμούς στην **εικόνα 58**, αντιστοιχούν στην απεριόριστη λύση.

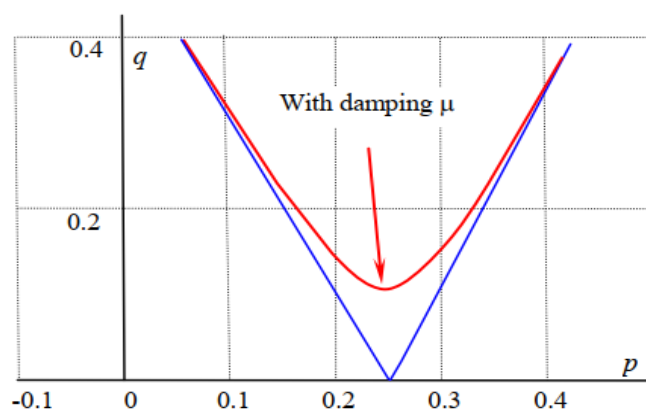


Εικόνα 58 – Απεικόνιση διαγράμματος Ince-Srutt. (Japan), 2020)

Η πρώτη ζώνη αστάθειας τέμνει τον άξονα ακριβώς σε **p = 0,25**, που αντιστοιχεί στον λόγο συχνότητας **2**. Έτσι η συχνότητα διέγερσης είναι διπλάσια από τη φυσική συχνότητα διατοιχισμού σε αυτό το σημείο. Η απεριόριστη κίνηση που ανήκει σε αυτή τη ζώνη αναφέρεται συνήθως ως ο κύριος παραμετρικός συντονισμός. Η μεγεθυμένη όψη αυτής της ζώνης φαίνεται στο ένθετο της **εικόνας 58**.

Εάν η απόσβεση κίνησης διατοιχισμού είναι μικρότερη από την τιμή κατωφλίου, ο διατοιχισμός θα είναι απεριόριστος ως λύση της εξίσωσης **Mathieu**. Εάν η απόσβεση διατοιχισμού είναι μεγαλύτερη από το κατώτατο όριο, ο διατοιχισμός είναι οριοθετημένος, ακόμη και αν η λύση της εξίσωσης **Mathieu** είναι απεριόριστη.

Η αύξηση της λύσης **Mathieu** δεν αρκεί για να ξεπεραστεί η μείωση της απόσβεσης διατοιχισμού. Σημαίνει επίσης ότι με γραμμική απόσβεση, η ζώνη αστάθειας είναι στενότερη και απαιτεί κάποια πεπερασμένη τιμή των παραλλαγών του **GM** ακόμη και για $p = 1/4$, δηλαδή, δεν αγγίζει τον άξονα (όπως φαίνεται στην **εικόνα 59**).



Εικόνα 59 – Απεικόνιση της επίδραση της απόσβεσης στην 1η ζώνη αστάθειας. (Japan), 2020)

Τα όρια στην ένδειξη όπου είναι δυνατός ο παραμετρικός συντονισμός, αποκαλύπτουν δύο αλληλεξαρτώμενες συνθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διατύπωση των ακόλουθων κριτηρίων:

- Την κατάσταση συχνότητας.
- Την παραμετρική κατάσταση διέγερσης.

Η κατάσταση συχνότητας εξαρτάται από τις φυσική συχνότητα και συχνότητα συνάντησης. Η φυσική συχνότητα εξαρτάται από τον όρο φόρτωσης, ενώ η συχνότητα συναντήσεων εξαρτάται από τις παραμέτρους κυμάτων, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του πλοίου. Η κατάσταση παραμετρικής διέγερσης απαιτεί την αλλαγή της ευστάθειας να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να προκαλεί αστάθεια, στο αν πληρούνται αυτή η προϋπόθεση εξαρτάται από τη γεωμετρία της γάστρας και από τις παραμέτρους του κύματος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση.

Για να αντλήσουμε ένα κριτήριο για την κρίσιμη παραμετρική διέγερση που δημιουργεί ανάπτυξη διατοιχισμού, έχει εξεταστεί μια κατά προσέγγιση λύση της εξίσωσης **Mathieu** για ακριβή κύριο συντονισμό $\omega_e = 2\omega_m$, όπως παρουσιάστηκε από τον **Hayashi (1985)** και χρησιμοποιήθηκε για να αντλήσει ένα κριτήριο **transient stage** για παραμετρικό διατοιχισμό από τον **Σπύρου (2006)** ως εξής:

$$\varphi(t) = e^{-\delta t} [C_1 e^{k\omega_m t} \sin(\omega_m t - \varepsilon)] + C_2 e^{-k\omega_m t} \sin(\omega_m t + \varepsilon) \quad (7, 8)$$

Όπου C_1 και C_2 είναι αυθαίρετες σταθερές οι οποίες καθορίζονται από τις αρχικές συνθήκες και το κ είναι μια παράμετρος που ελέγχει την ανάπτυξη ή την αποσύνθεση των ταλαντώσεων όπου ορίζεται ως:

$$\kappa = -\frac{1}{4}\sqrt{\alpha^2 h^2 - 4(a-1)^2}$$

Όπου α είναι η μεταβλητή που εκφράζει την αναλογία συχνότητας:

$$\alpha = 4 \frac{\omega_m^2}{\omega_e^2}$$

Προφανώς, $\alpha = 1$ όταν $\omega_e = 2\omega_m$, το οποίο είναι ακριβώς το μέσο του η πρώτη ζώνη αστάθειας (κύριος παραμετρικός συντονισμός) του Διαγράμματος **Ince-Strutt**.

Η φάση προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\cos(2\varepsilon) = \frac{2(\alpha-1)}{\alpha * h}, \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \varepsilon \leq 0\right)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι η συχνότητα των επικίνδυνων κυμάτων (**dangerous waves**) θεωρείται ότι αντιστοιχεί ακριβώς στη συχνότητα του κύριου παραμετρικού συντονισμού.

$$a = 1, \quad k = -\frac{\pi}{4}, \quad \varepsilon = -\frac{\pi}{4}$$

Εξετάζοντας την αρχική κατάσταση όταν ο αρχικός ρυθμός κίνησης διατοιχισμού έχει μηδέν τιμή, οι σταθερές βρίσκονται ίσες με:

$$C_1 = -C_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} \varphi_o, \quad \dot{\varphi}_o = 0$$

Στη συνέχεια η εξίσωση (7,8) θα μας δώσει την εξής μορφή:

$$\varphi(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} \varphi_o e^{-\delta t} \left[e^{-\frac{h}{4} \omega_m t} \sin\left(\omega_m t + \frac{\pi}{4}\right) - e^{\frac{h\omega_m t}{4}} \sin\left(\omega_m t - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (7,9)$$

Δεδομένου του συντελεστή ενίσχυσης και του αριθμού των ταλαντώσεων, συνεπάγεται το ακόλουθο κριτήριο, υποθέτοντας ότι οι μεταβολές ευστάθειας στα κύματα είναι συμμετρικές σε σχέση με τις τιμές ήρεμου νερού.

$$\frac{GM_a}{GM_o} \geq 2 \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4\delta}{\omega_o} \quad (7,10)$$

Οι παράμετροι δ και ω_o στην εξίσωση (7,13) πρέπει να επιλεγθούν. Εάν δεν υπάρχουν άλλα στοιχεία, σύμφωνα με τον Αμερικανικό Νηογνώμονα ABS (2004) συνιστάται, ως μια συντηρητική εκτίμηση:

$$\frac{\delta}{\omega_o} = 0,03$$

Αξίζει να τονίσουμε ότι η μεγαλύτερη ενίσχυση του αρχικού υφιστάμενου διατοιχισμού μπορεί να αναμένεται για περισσότερους κύκλους. Αυτές οι παράμετροι είναι πολύ σημαντικές για την τελειοποίηση των κριτηρίων και πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια ενός μεταγενέστερου σταδίου ανάπτυξης κριτηρίων. Ως προκαταρκτική εικασία για $f = 5$ και $n = 4$ οδηγούμαστε στο εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{GM_a}{GM_o} \geq 0,5 \quad (7,11)$$

Η εξίσωση (7,13) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή ενός κριτηρίου χωρίς παροδικά αποτελέσματα. Ένα τέτοιο κριτήριο προσδιορίζει την ύπαρξη μιας απεριόριστης λύσης, καθώς η λύση τείνει να φτάσει στο άπειρο με αύξηση του αριθμού των κύκλων όπως την παρακάτω σχέση:

$$\lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ f \rightarrow \infty}} \left(2 \frac{\ln f + \ln 2}{\pi n} + \frac{4\delta}{\omega_o} \right) = \frac{4\delta}{\omega_o} \Rightarrow \frac{GM_a}{GM_o} \geq \frac{4\delta}{\omega_o} \quad (7,12)$$

Επιπλέον χρησιμοποιώντας μια πιο συντηρητική υπόθεση σχετικά με την απόσβεση παραμετρικού διατοιχισμού η εξίσωση (7,12) θα μας οδηγήσει στην εξής υπόθεση:

$$\frac{GM_a}{GM_o} \geq 0,12 \quad (7,13)$$

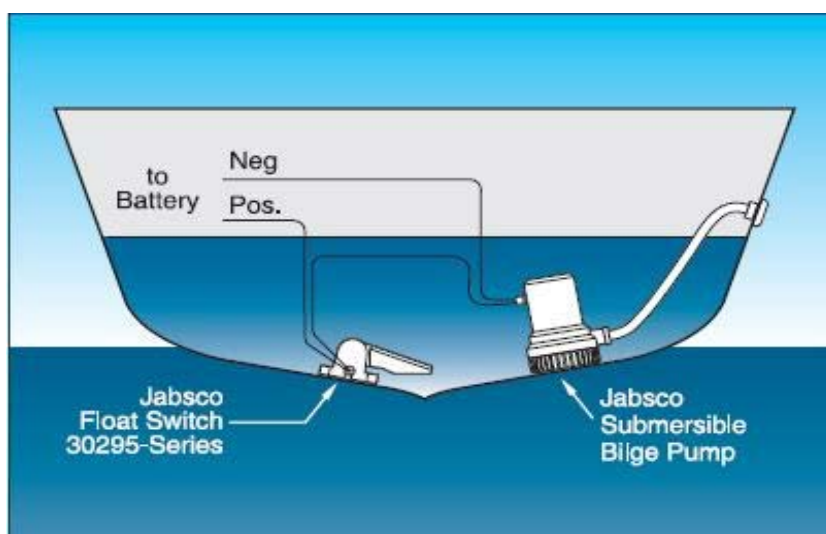
Όπως μπορεί να αναμένεται, ο αποκλεισμός των παροδικών επιδράσεων οδηγεί σε ένα πολύ πιο συντηρητικό πρότυπο. Η σημασία της εξίσωσης (7,12) είναι ότι θέτει ένα πρακτικό όριο για τη συντηρητικότητα (**conservativeness**) του προτύπου, καθώς η παραδοχή απόσβεσης στην εξίσωση είναι εξαιρετικά συντηρητική.

Αυτά τα κριτήρια απαιτούν γνώση του μεγέθους της παραμετρικής διέγερσης στην εξίσωση (7,9), η οποία βασίζεται σε υπολογισμούς του στιγμιαίου **GM** σε κύματα. Ενώ αυτοί οι υπολογισμοί είναι απλοί, περιλαμβάνουν λογισμικό υπολογιστή και πρόσθετο χρόνο που απαιτείται για την προετοιμασία της γεωμετρικής εισόδου. Όπως, είχαμε αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια, οι περισσότερες από τις αλλαγές της ίσαλου γραμμής για τα πλοία προέρχονται από την πλώρη και την πρύμνη της γάστρας όπου αυτές οι αλλαγές μπορεί να αποκαλυφθούν απλά αλλάζοντας το σχέδιο γραμμών.

Παρακάτω μας παρουσιάζεται η τροποποίηση του σχεδίου που χρησιμοποιήθηκε για το κριτήριο ευπάθειας επιπέδου 1 (**level 1 vulnerability criteria**) για καθαρή απώλεια ευστάθειας (**pure loss stability**):

$$GM_a = \frac{I_{up} - I_{low}}{2V} \quad (7,14)$$

Όπου I_{up} και I_{low} δείχνουν τις στιγμές αδράνειας της βρεχόμενης επιφάνειας για ανώτερα και κατώτερα ρεύματα, αντίστοιχα, και V είναι ο όγκος εκτοπίσματος του πλοίου για ένα συγκεκριμένο βύθισμα. Μπορεί να υποθεθεί ότι το ανώτερο βύθισμα είναι χαμηλότερο από το **freeboard deck** του πλοίου κατά **5%** και το κατώτερο βύθισμα είναι το ήμισυ του μέσου βυθίσματος ή της τομής μεταξύ των **bilge circles pump** και του μεσαίου τοιχώματος της πλευρικής γάστρας.



Εικόνα 60 - Μια απλή υποβρύχια εγκατάσταση αντλίας υδροσυλλεκτών (bilge circles pump).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα προφανές πλεονέκτημα του κριτηρίου που εκφράζεται στις εξισώσεις (7,11) και (7,13) είναι η απλότητα του. Το κριτήριο μπορεί να αξιολογηθεί χωρίς επιπλέον υπολογισμούς, καθώς όλες οι τιμές μπορούν να ληφθούν απευθείας από τις υδροστατικές καμπύλες του πλοίου.

Ταυτόχρονα, το κριτήριο αυτό δεν αντιπροσωπεύει ούτε την ταχύτητα του πλοίου προς τα εμπρός ούτε την πιθανότητα να αντιμετωπίσει επικίνδυνες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτοί οι παράγοντες μπορούν να προσδιοριστούν χρησιμοποιώντας τη συχνότητα συνάντησης για την κατάσταση του παραμετρικού διατοιχισμού και καθορίζοντας τα κύματα για τον υπολογισμό αναφοράς.

Στη συνέχεια η συχνότητα της συνάντησης μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τα όρια της πρώτης ζώνης αστάθειας του διαγράμματος **Ince-Strutt**. Επειδή οι ταλαντώσεις αναπτύσσονται μέσα στη ζώνη αστάθειας και αποσυντίθενται έξω από τη ζώνη αστάθειας, η λύση πρέπει να είναι περιοδική στα όρια. Για να ληφθεί υπόψη η

απόσβεση που περιλαμβάνεται ήδη στην εξίσωση (7,9), αρκεί να ικανοποιηθεί η παρακάτω σχέση:

$$\delta = \frac{h}{4} \omega_m$$

Για να αποκτηθεί η γνωστή προσέγγιση για το όριο της πρώτης ζώνης αστάθειας του διαγράμματος **Ince-Strutt**:

$$h = 2\sqrt{\left(1 - \frac{1}{4} \frac{\omega_e^2}{\omega_m^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega_e \delta}{\omega_m^2}\right)^2} \quad (7, 15)$$

Αυτή η προσέγγιση καθορίζει τη σχέση μεταξύ του συντελεστή **q** που σχετίζεται με το μέγεθος της παραμετρικής διέγερσης και του συντελεστή **p**, ο λόγος της φυσικής συχνότητας προς τη συχνότητα της συνάντησης.

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V_m \cos\beta = \frac{\sqrt{2\pi}}{\lambda} (\sqrt{\lambda g} - V_m \sqrt{2\pi} * \cos\beta) \quad (7, 16)$$

Όπου το **V_m** είναι η ταχύτητα προς τα εμπρός σε **m/s**, το **β** είναι η γωνία εγκάρσιας κλίσης σε σχέση με τα κύματα (**0°** ακολουθεί τις θάλασσες), το **g** είναι η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας, το **ω** είναι η πραγματική συχνότητα του κύματος και το **λ** είναι το μήκος κύματος. Δεδομένου ότι η συχνότητα της συνάντησης εξαρτάται από την ταχύτητα, η εξίσωση (7,16) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί εάν η ταχύτητα σχεδιασμού ενός πλοίου εμπίπτει σε μια περιοχή συχνοτήτων όπου είναι δυνατός ο παραμετρικός διατοιχισμός.

$$V_m = \frac{\sqrt{g\lambda}}{\sqrt{2\pi}} - \frac{\lambda\sqrt{2(2 \pm h)}}{T_\phi} \quad (7, 17)$$

Όπου **T_φ** είναι η περίοδος διατοιχισμού.

Ένα πιο εξελιγμένο κριτήριο μπορεί να προταθεί εάν ληφθούν υπόψη οι πραγματικές παράμετροι κύματος. Για να ληφθεί υπόψη η πιθανότητα εμφάνισης διαφορετικών κυμάτων, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια σειρά περιπτώσεων κύματος όπως προτείνεται στο (**Παράρτημα 1 SLF 53/INF.10 (βλ. επίσης Bulian & Francescutto, 2010)**). Η τελική μορφή του κριτηρίου είναι παρόμοια με:

$$C_{PR1} = \sum_i W_i C(H_i, \lambda_i) \quad (7, 18)$$

Επιπλέον κάθε περίπτωση κύματος ορίζεται από το ύψος κύματος **H_i**, και το μήκος κύματος **λ_i** και **W_i** είναι το στατιστικό βάρος μιας δεδομένης περίπτωσης κύματος. Για κάθε περίπτωση κύματος το κριτήριο είναι:

$$C_i = 1 \quad \text{άν} \quad \frac{GM_a(H_i, \lambda_i)}{GM_m(H_i, \lambda_i)} \geq r \quad \text{και} \quad V_{PR} \leq V_D \quad (7, 19)$$

Αλλιώς αν:

$$C_i = 0 \quad \text{όπου} \quad V_{PR} = \left| \frac{2\lambda}{T_\phi} - \sqrt{\frac{g * \lambda}{2\pi}} \right| \quad (7, 20)$$

Το r είναι ο λόγος μεταξύ του μεγέθους των αλλαγών GM και της μέσης τιμής μεγέθους που παρέχει την καθορισμένη αύξηση **f-fold** μετά από κύκλους διατοιχισμού (**rolling**) n , (η προκαταρκτική τιμή είναι **0,5**).

Επιπλέον V_D είναι η ταχύτητα σχεδιασμού και V_{PR} είναι η ταχύτητα όπου αναμένεται παραμετρικός διατοιχισμός (η συχνότητα συνάντησης κυμάτων είναι διπλάσια από τη φυσική συχνότητα διατοιχισμού). Σε περίπτωση που έχουμε αρνητικό GM_m οι κανονισμοί απαιτούν ειδικό χειρισμό. Η εφαρμογή του κριτηρίου για τον παραμετρικό διατοιχισμό στην εξίσωση (7,18) προφανώς απαιτεί περισσότερη υπολογιστική εργασία από την αξιολόγηση της εξίσωσης (7,14). Ωστόσο, αυτές οι προσπάθειες μπορεί να αποδώσουν πολύ καλά εάν η εφαρμογή της εξίσωσης (7,18) υποδηλώνει την απουσία ευπάθειας στον παραμετρικό διατοιχισμό, όταν το κριτήριο στην εξίσωση (7,14) μπορεί να είναι πολύ συντηρητικό.

Οι υπολογισμοί δειγμάτων για τα κριτήρια ευπάθειας παραμετρικού διατοιχισμού **επιπέδου 1** παρουσιάζονται στους **πίνακες 1** και **2**. Μετά την πρόταση του **SLF (Fishing vessels safety) 53/3/7**, το κριτήριο εύρους ταχύτητας στην εξίσωση (7,17) εφαρμόστηκε στον πληθυσμό δειγμάτων πλοίων από το **SLF 53/INF.10 Παράρτημα 5**, ενώ χρησιμοποιήθηκε μια πολύ συντηρητική υπόθεση για το μέγεθος της παραμετρικής διέγερσης (για $\eta = 1$) (**πίνακας 1**). Ως αποτέλεσμα της χρήσης της συντηρητικής υπόθεσης, μόνο το δεξαμενόπλοιο δεν βρέθηκε ευάλωτο σε παραμετρικό διατοιχισμό.

Πίνακας 1 (υπολογισμοί δειγμάτων σε παραμετρικό διατοιχισμό, Level 1, με βάση δεδομένων τα πλοία από SLF 53 / INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5)

							Criterion and Standard (7,14)			
							Criterion (7,19)		Equation (7,16)	
Type of ship	L(m)	GM(m)	Vs(kn)	Vs1 (kn)	Vs2 (kn)	Y/N	Value	Y/N	Value	Y/N
Bulk Carrier	275	3,46	15	2,9	-24,48	Y	0,09	N	0,36	N
Bulk Carrier 2	145	0,56	15	12,96	1,02	Y	0,4	N	1,43	Y
Containership 1	322,6	1,27	25	16,22	-3,85	Y	1,42	Y	4,56	Y
Containership 2	376	1,79	25	17,05	-4,95	Y	0,9	Y	4,44	Y
Containership 3	330	1,85	25	10,31	-14,45	Y	0,58	Y	2,4	Y
Containership 4	283,2	1,15	25	8,43	-15,33	Y	0,75	Y	2,6	Y
Containership 5	262	2	25	7,45	-15,89	Y	0,77	Y	3,32	Y
Fishing Vessel 1	34,5	1,7	18	-6,08	-20,98	Y	0,16	N	0,47	N
Fishing Vessel 2	21,56	0,8	15	1,74	-5,24	Y	0,09	N	0,77	Y
General Cargo 1	121,9	0,67	18	14,4	5,29	Y	1,03	Y	1,03	Y
General Cargo 2	161,2	0,9	16	7,85	-8,99	Y	0,57	Y	1,54	Y
LNG Carrier	267,8	3,42	18	-1,16	-31,11	Y	0,18	N	0,62	Y
Naval Combatant 1	150	1,04	30	1,73	-18,79	Y	0,58	Y	5,25	Y
Naval Combatant 2	150	2,06	30	-18	-52,94	Y	0,6	Y	0,89	Y
Passenger Ship	276,4	3,75	25	-16,75	-58,59	Y	0,57	Y	0,97	Y
RoPax	137	1,79	18	-2,65	-25,41	Y	0,82	Y	1,4	Y
Tanker	320	9,95	14	-16,36	-60,16	N	0,03	N	0,21	N

Σε αυτό το κριτήριο και με πρότυπο την εξίσωση (7,14) όπου πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ένα κύμα με μήκος ίσο με το μήκος του πλοίου και με την απότομη εγκάρσια κλίση που ελήφθη από το **SLF 53/3/7**, ως επίλυση αυτού του κριτηρίου φαίνεται να είναι καλύτερη, καθώς αποκλείει τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και **LNG** και τα δύο αλιευτικά σκάφη εκτός από το δεξαμενόπλοιο. Αυτά τα πλοία δεν έχουν γνωστή ευπάθεια στον παραμετρικό διατοιχισμό (**SLF 53/INF.10 Παράρτημα 5**).

Η εφαρμογή της προσέγγισης που δίνεται στην εξίσωση (7,19) για το μέγεθος της παραμετρικής διέγερσης παρέχει αποτελέσματα που είναι παρόμοια όσον αφορά την ανάλυση. Οι υπολογισμοί δειγμάτων για το κριτήριο στις εξισώσεις (7,21) και (7,22) είναι διαθέσιμοι από την **Bulian & Francescutto (2011)**.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο (πίνακας 2) όπου περιέχει τα αποτελέσματα των υπολογισμών για ένα πλήθος δειγμάτων πλοίων από το **SLF53/INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10**. Τα αποτελέσματα στον πίνακα 2 (που παρουσιάζονται για δύο συνθήκες φόρτωσης) είναι ποιοτικά παρόμοια με εκείνα του **SLF 53/INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10**. Σε όλα τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και στο κρουαζιερόπλοιο βρέθηκαν να είναι επιρρεπείς σε παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**), ενώ τα ρυμουλκά, τα δεξαμενόπλοια και τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου δεν είναι.

Πίνακας 2 (υπολογισμοί δειγμάτων σε παραμετρικό διατοιχισμό, επίπεδο 1, με βάση πλοία από SLF 53 / INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10).

Ship	Description	L(m)	d(m)	GMI	Eq (7,19)	Y/N	GM2	Eq (24)	Y/N
Bulk Carrier	5500 DWT	190	12,8	2,84	0,2	N	3,34	0,17	N
Bulk Carrier	180	0,75	2,1	0,33	N	2,6	0,26	N	
Containership	> 10000 TEU	360	16	0,8	3,76	Y	1,3	2,31	Y
Containership	> 10000 TEU	360	15,5	0,7	3,87	Y	1,2	2,26	Y
Containership	> 6000 TEU	320	14,6	0,7	4,28	Y	1,2	2,5	Y
Containership	> 6000 TEU	320	14,5	0,8	3,18	Y	1,3	1,96	Y
Containership	> 4000 TEU	250	13,5	0,5	3,03	Y	1	1,52	Y
Containership	> 4000 TEU	250	12,5	0,6	2,96	Y	1,1	1,62	Y
Containership	> 1000 TEU	210	12	0,6	2,71	Y	1,1	1,48	Y
Containership	> 1000 TEU	200	11,4	0,6	3,19	Y	1,1	1,74	Y
Containership	> 1000 TEU	170	10,9	0,5	3,6	Y	1	1,8	Y
Containership	> 1000 TEU	160	10,5	0,16	7,88	Y	0,66	1,91	Y
Containership	> 500 TEU	135	7,75	0,58	1,77	Y	1,08	0,95	Y
Containership	> 500 TEU	125	7,4	0,7	1,96	Y	1,2	1,14	Y
Cruise Vessel	240	7,2	2,71	0,86	Y	3,21	0,73	Y	
LNG Carrier	1000 cbm	110	8,48	1,06	0,69	Y	1,56	0,47	N
MPV	135	8	0,65	0,91	Y	1,15	0,51	Y	
MPV	125	7	0,17	3,23	Y	0,67	0,82	Y	
MPV	120	7,08	1	0,98	Y	1,5	0,65	Y	
MPV	7500 DWT	105	7,06	0,7	0,64	Y	1,2	0,37	N
Tanker	30000 DWT	320	22,6	6,35	0,08	N	6,85	0,08	N
Tanker	110	7,41	1,31	0,32	N	1,81	0,23	N	
Tug	30	3,5	2,23	0,4	N	2,73	0,33	N	
Tug	25	2,43	3,6	0,2	N	4,1	0,18	N	

Γενικά, αυτό είναι σύμφωνο με την υπάρχουσα επιχειρησιακή εμπειρία. Τα πλοία πολλαπλών χρήσεων και πλοία μεταφοράς LNG παρουσιάζουν ευπάθεια σε ορισμένες συνθήκες φόρτωσης, επομένως, η ευπάθειά τους πρέπει να καθορίζεται από τα κριτήρια επιπέδου 2 (**Level 2 criteria**). Τα αποτελέσματα για περισσότερες περιπτώσεις φόρτωσης είναι διαθέσιμα για αυτά τα πλοία στο **SLF 53/INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10**.

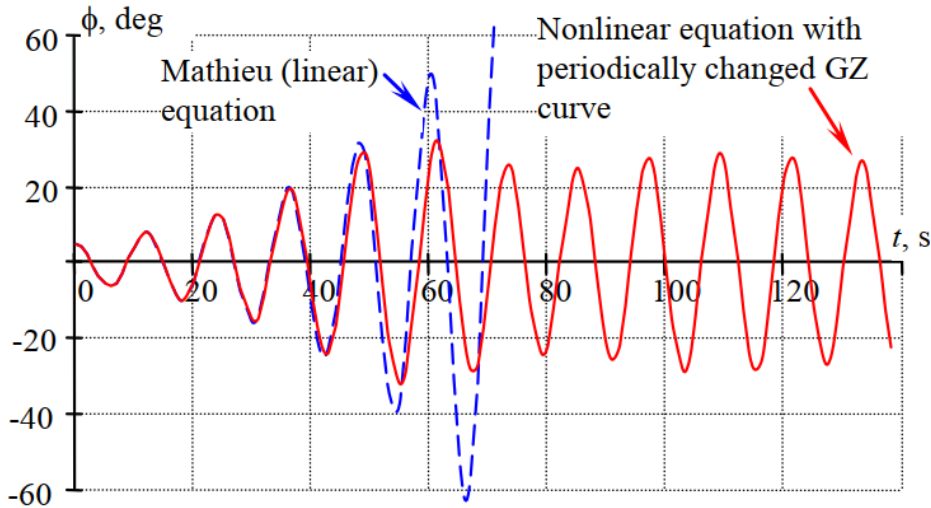
5.4 Κριτήρια ευπάθειας 2^{ου} επιπέδου για παραμετρικό διατοιχισμό (Level 2 Vulnerability Criteria for parametric rolling).

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι η γραμμική εξίσωση της κίνησης διατοιχισμού, η εξίσωση (7,4), καθώς και η ιδιαίτερη περίπτωση της στην εξίσωση (7,7), είναι ένα καλό μοντέλο για να υποδείξει την έναρξη του παραμετρικού διατοιχισμού.

$$(I_{\chi} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + W * GM(t)\phi = 0 \quad (7,4)$$

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + \omega_m^2(1 + h\cos(\omega_e t))\phi = 0 \quad (7,7)$$

Ωστόσο, δεν είναι σε θέση να εκτιμήσει το πλάτος του παραμετρικού διατοιχισμού. Ο συντονισμός σε ένα γραμμικό σύστημα έχει ξεκινήσει και το πλάτος του αυξάνεται χωρίς κανένα όριο. Η μη γραμμικότητα σταθεροποιεί τον παραμετρικό συντονισμό σε ορισμένο πλάτος (όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 61**).



Εικόνα 61 - Μοντελοποίηση παραμετρικού διατοιχισμού με γραμμική εξίσωση Mathieu και με μη γραμμική εξίσωση. (W. Peters (M), 2011)

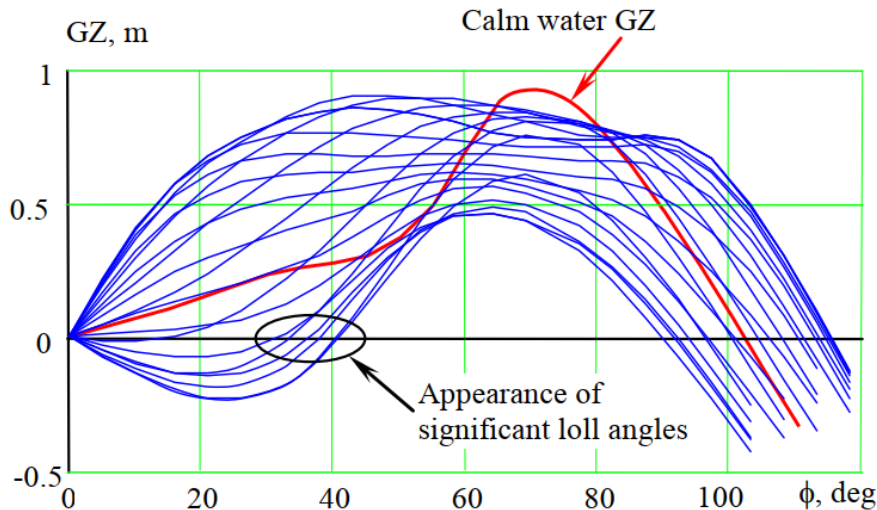
Ο μηχανισμός σταθεροποίησης του φαινομένου παραμετρικού διατοιχισμού σχετίζεται κυρίως με τη μη γραμμικότητα της καμπύλης **GZ**. Μόλις το εύρος της ταλάντωσης του διατοιχισμού γίνει αρκετά μεγάλο, η συνθήκη συχνότητας για τον παραμετρικό συντονισμό δεν ικανοποιείται πλέον, καθώς η μεταβολή του στιγμιαίου **GM** οδηγεί σε αλλαγή της στιγμιαίας φυσικής συχνότητας. **(Είναι ένα πολύ γνωστό φαινόμενο μη γραμμικού διατοιχισμού (rolling) - η εξάρτηση της φυσικής συχνότητας από το πλάτος είναι επίσης γνωστή ως απώλεια ισοχρονικών ιδιοτήτων.)**

Αυτό σημαίνει ότι μόλις ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο εύρος κίνησης διατοιχισμού, σταματά η περαιτέρω ροή ενέργειας στο δυναμικό σύστημα. **Η πρόσθετη ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο κάτω από αυτό το εύρος, γεγονός που οδηγεί στην καθιέρωση της ισορροπίας ενέργειας/εργασίας και στη σταθεροποίηση του εύρους και τελικά οδηγεί σε έναν κύκλο ορίου.**

Ως εκ τούτου, το απλούστερο μαθηματικό μοντέλο είναι ικανό να αναπαράγει σταθεροποιητική τάση στο φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού που πρέπει να περιλαμβάνει τη μη γραμμική καμπύλη **GZ**:

$$(I_{\chi} + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + W * GM(t)\phi = 0 \quad (7,4)$$

Όπου **GZ (t)** σημαίνει μια πλήρη καμπύλη **GZ** που αλλάζει κατά το πέρασμα του κύματος (όπως φαίνεται στην **εικόνα 62**)



Εικόνα 62 - Επίδραση διέλευσης κύματος στην καμπύλη GZ ενός πλοίου Post Panamax σε κρίσιμες συνθήκες φόρτωσης κατά τον IMO. (W. Peters (M), 2011)

Η μη γραμμική απόσβεση διατοιχισμού μπορεί επίσης να αποτελέσει παράγοντα σταθεροποίησης. Ο μηχανισμός του είναι ελαφρώς διαφορετικός από αυτόν με την καμπύλη **GZ**. Η αύξηση του εύρους των κινήσεων διατοιχισμού οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού κύλισης όταν το πλοίο διασχίζει το σημείο ισορροπίας. Η αύξηση του ρυθμού κύλισης καθιστά τη μη γραμμική απόσβεση αρκετά μεγάλη ώστε να ανυψώνει το όριο πάνω από το τρέχον επίπεδο παραμετρικής διέγερσης. Αυτό επίσης σταματά τη ροή ενέργειας στο δυναμικό σύστημα και σταθεροποιεί τον παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**).

Ωστόσο, η μη γραμμικότητα απόσβεσης διατοιχισμού είναι σχετικά αδύναμη σε σύγκριση με τα αποτελέσματα καμπύλης **GZ** και θα πρέπει να θεωρείται ως δευτερεύων παράγοντας σταθεροποίησης σε κανονικούς κυματισμούς. **(Σε ακανόνιστα κύματα, η συμβολή από τη μη γραμμική απόσβεση διατοιχισμού μπορεί να είναι διαφορετική.)**

Επίσης, εάν το εύρος διατοιχισμού είναι αρκετά μεγάλο, η απόσβεση εξαρτάται από τη γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού (**roll angle**). Αυτή η εξάρτηση μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της απόσβεσης (όταν τα παρατροπίδια (**bilge keels**) εξέρχονται από το νερό), καθώς και σε αύξηση της απόσβεσης (όταν η άκρη του καταστρώματος βυθίζεται στο νερό).

Ως εκ τούτου, αυτό εξαρτάται από τα γεωμετρικά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου. Αυτές οι εκτιμήσεις, ωστόσο, καθιστούν το μαθηματικό μοντέλο πολύ περίπλοκο για τον έλεγχο ευπάθειας δεύτερου επιπέδου (**level 2 vulnerability criteria**), οπότε είναι λογικό να περιοριστεί η περιγραφή της απόσβεσης σε κυβική ή τετραγωνική προσέγγιση όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\ddot{\psi} + f_d(\dot{\psi}) + \omega_{\psi}^2 * \psi = 0 \quad (7, 23)$$

Όπου:

$$f_d(\dot{\varphi}) = 2\delta\dot{\varphi} + \text{sign}(\dot{\varphi})\delta_2\dot{\varphi}^2 \text{ ή } f_d(\dot{\varphi}) = 2\delta\dot{\varphi} + \delta_3\dot{\varphi}^3$$

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι οι συντελεστές δ , δ_2 και δ_3 αποτελούν το γραμμικό, τετραγωνικό και κυβικό συντελεστή απόσβεσης αντίστοιχα. Επιπλέον και η $\mathbf{f}(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{t})$ είναι αποτελεί έναν χρονικά εξαρτώμενο όρο ακαμψίας που σχετίζεται με την στιγμιαία καμπύλη \mathbf{GZ} σε κύματα. Οι συντελεστές απόσβεσης μπορούν να βρεθούν είτε από μια δοκιμή αποσύνθεσης διατοιχισμού είτε με μεθόδους όπως ο ημιεμπειρικός τύπος του **Ikeda**.

Όπως αναφέρθηκε στα παραπάνω, είναι γεγονός ότι ο υπολογισμός της στιγμιαίας καμπύλης \mathbf{GZ} σε κανονικά κύματα είναι σχετικά απλός. Ωστόσο, η παραδοχή της χαμηλής συχνότητας συναντήσεων δεν ισχύει πάντοτε για το φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού όπως ισχύει για την καθαρή απώλεια ευστάθειας (**pure loss stability**), καθώς η πρώτη μπορεί να συμβεί σε πλωραίους πλευρικούς κυματισμούς (**head and bow-quartering seas**) καθώς και στους πρυμναίους πλευρικούς κυματισμούς (**stern quartering seas**).

Ουσιαστικά η στάση ενός πλοίου υπολογίζεται με βάση την κίνηση **heave** και **pitch** σε κανονικούς κυματισμούς.

$$\begin{cases} (M + A_{33})\ddot{\zeta}_G + B_{33}\dot{\zeta}_G + A_{35} * \ddot{\theta} + B_{35}\dot{\theta} + F_\zeta(\zeta_G, \theta, t) = F_H(t) \\ (I_Y + A_{55})\ddot{\theta} + B_{55}\dot{\theta} + A_{53}\ddot{\zeta}_G + B_{53}\dot{\zeta}_G + M_\theta(\zeta_G, \theta, t) = M_H(t) \end{cases} \quad (7, 24)$$

Όπου \mathbf{M} είναι η μάζα του πλοίου, \mathbf{I}_Y είναι η ροπή μάζας αδράνειας σε σχέση με τους εγκάρσιους άξονες, τα \mathbf{A}_{33} και \mathbf{A}_{55} είναι μάζα και ροπή αδράνειας κίνησης **pitch** και **heave** (υποτίθεται ότι είναι ίση με την αντίστοιχη μάζα και ροπή αδράνειας), αντίστοιχα και τα \mathbf{B}_{33} και \mathbf{B}_{55} είναι οι συντελεστές απόσβεσης για την κίνηση **heave** και **pitch**. Οι συντελεστές \mathbf{F}_H και τα \mathbf{M}_H είναι τα υδροδυναμικά συστατικά της διέγερσης κύματος. Οι εξισώσεις \mathbf{F}_ζ και \mathbf{M}_θ είναι η διαφορά μεταξύ υδροστατικών ροπών και δυνάμεων **Froude-Krylov**, αντίστοιχα, τη στιγμή του χρόνου \mathbf{t} όπου αυτές οι τιμές εκφράζονται ως εξής:

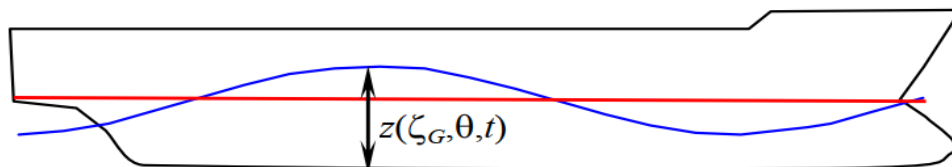
$$F_\zeta(\zeta_G, \theta, t) = \rho g (V_o - \int_{-0,5L}^{0,5L} \Omega(x, z(\zeta_G, \theta, t)) dx)$$

$$M_\theta(\zeta_G, \theta, t) = \rho g (LCB_o - \int_{-0,5L}^{0,5L} M_\Omega(x, z(\zeta_G, \theta, t)) dx)$$

Όπου το ρ είναι πυκνότητα μάζας νερού, το V_o είναι ογκομετρική μετατόπιση σε ήρεμο νερό και το LCB_o είναι η διαμήκης θέση του κέντρου πλευστότητας σε ήρεμο νερό. Οι συναρτήσεις Ω και M_Ω υπολογίζουν μια περιοχή και μια στατική στιγμή κατά τον

άξονα y σε σχέση με το σημείο που βρίσκεται στη διαμήκη θέση κατά μήκος της γάστρας κατά τον άξονα x .

Το δεύτερο πόρισμα της συνάρτησης αυτής δείχνει την καταβύθιση του σε αυτή τη θέση κατά μήκος της γάστρας, όπως εκφράζεται από τη συνάρτηση της στιγμιαίας ίσαλου γραμμής άξονας $z(\zeta_G, \theta, t)$ όπως παρουσιάζεται στην **εικόνα 63**.



Εικόνα 63 – Απεικόνιση δειγμάτων στιγμιαίων ίσαλων γραμμών (waterlines) που αξιολογούνται από την ανταπόκριση των κινήσεων Heave και Pitch του πλοίου. (W. Peters (M), 2011)

Μόλις οριστούν οι όροι της δύναμης **Froude-Krylov**, το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (7,24) μπορεί να ενσωματωθεί με ένα πρότυπο λύσης του **Runge-Kutta**. Μόλις επιτευχθεί η σταθερή κατάσταση της απόκρισης, η στιγμιαία στάση του πλοίου για κάθε θέση από την κορυφή κύματος κατά μήκος της γάστρας μπορεί να προσδιοριστεί σε πολύ καλύτερο βαθμό.

Πρέπει να τονίσουμε ότι, ενώ αυτή η μέθοδος για την αξιολόγηση της κίνησης **heave** και **pitch** για την ευστάθεια στα κύματα φαίνεται να είναι η πιο φυσική και πρέπει να γίνουν αρκετές υποθέσεις σχετικά με τους υδροδυναμικούς συντελεστές κινήσεων **heave** και **pitch**. Εάν σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας σχεδιασμού έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση (**Seakeeping**), η προστιθέμενη η μάζα και η απόσβεση θα είναι ήδη διαθέσιμες. Όμως εάν ένα πλοίο παρουσιάζει ευπάθεια στο παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**) πρέπει να αντιμετωπιστεί νωρίτερα στη διαδικασία σχεδιασμού, καθώς οι πρόσθετες υποθέσεις θα είναι αναπόφευκτες. Η προστιθέμενη μάζα κίνησης **heave** και η προστιθέμενη ροπή αδράνειας μπορεί να θεωρηθεί ίση με την αντίστοιχη μάζα και ροπή αδράνειας του πλοίου. Απλές υποθέσεις (που υπόκεινται σε περαιτέρω επαλήθευση) μπορούν επίσης να γίνουν για την απόσβεση της κίνησης **Heave** και **Pitch**, με βάση τις τυπικές τιμές ως ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης (**40-50%**).

Τέλος, οι συντελεστές διέγερσης περίθλασης (**diffraction**) και υδροδυναμικής (**hydrodynamic**) σύζευξης μπορούν να παραμεληθούν σε αυτό το στάδιο. Είναι πολύ απλό να τα δοκιμάσετε παραδοχές με άμεση σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των απλοποιημένων υπολογισμών και των ολοκληρωμένων λύσεων δυνητικής ροής. Τέτοιες δοκιμές παραμένουν στην ημερήσια διάταξη για τις μελλοντικές εργασίες.

Μόλις προσδιοριστεί η στάση του πλοίου για κάθε θέση της κορυφής κύματος (**wave crest**), μπορεί να αξιολογηθεί η καμπύλη **GZ** στους υφιστάμενους κυματισμούς. Για τον υπολογισμό της καμπύλης **GZ** σε κύματα, η τρέχουσα στάση του πλοίου στο κύμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε ισορροπία ακολουθώντας την αρχή του **d'Alembert's**, όπου το δυναμικό πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ως στατικό πρόβλημα εάν προστεθούν οι αδρανειακές δυνάμεις. Αυτές οι αδρανειακές δυνάμεις εμφανίζονται ως η διαφορά μεταξύ της τρέχουσας στάσης και της στάσης ισορροπίας στο κύμα για την ίδια θέση της κορυφής κύματος. Περαιτέρω υπολογισμοί της καμπύλης **GZ** σε κύματα γίνονται

με τον συνήθη τρόπο, χρησιμοποιώντας την εξισορρόπηση της διαγωγής του πλοίου (**trim**) και του βυθίσματος για κάθε πιθανή γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού (**roll angle**).

Λογιστικά μοντέλα για τη δυναμική κίνηση **heave** έχει επίσης αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί από τους **Kroeger (1986)**, **Jensen (2007)** και άλλους. Θεωρητικά μόλις είναι διαθέσιμη η καμπύλη **GZ** σε κύματα, επιλύεται η εξίσωση διατοιχισμού (7,23). Είναι μια μη γραμμική συνηθισμένη, διαφορική εξίσωση και δεν έχει μια γνωστή ακριβή λύση, αφήνοντας δύο επιλογές:

Μια κατά προσέγγιση αναλυτική ή μια άμεση αριθμητική λύση. Και οι δύο επιλογές που επιτρέπουν την εξέταση της μη γραμμικής απόσβεσης μαζί με τη μη γραμμική αποκατάσταση.

Οι κατά προσέγγιση αναλυτικές μέθοδοι για τη λύση της εξίσωσης διατοιχισμού έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν (**Sanchez & Nayfeh 1990, 2000 Bulian, 2004, Σπύρου, 2005**) και έχουν αποδειχθεί αρκετά αποδοτικές για σχετικά απλά μοντέλα. Για παράδειγμα, η λειτουργία αποκατάστασης εξετάζεται με την ακόλουθη μορφή:

$$f(\varphi, t) = \varphi + \lambda = I_3 \varphi^3 + I_5 \varphi^5 + \frac{1}{GM} (GM_m - GM + GM_a \cos \omega_e t) \varphi \left(1 - \frac{\varphi^2}{\pi} \right) \quad (7, 25)$$

Όπου I_3 και I_5 είναι πολυωνυμικοί συντελεστές για την καμπύλη **GZ** σε ήρεμο νερό. Μια κατά προσέγγιση λύση που βασίζεται στην πρώτη αρμονική μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας μια γνωστή μέθοδο όπως μέσος όρος (**averaging**) ή αρμονική ισορροπία, όπως φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varphi = \varphi_\alpha \cos(\omega t - \varepsilon), \quad \omega = \frac{\omega_e}{2}$$

Στη συνέχεια, η ακόλουθη αλγεβρική εξίσωση μπορεί να ληφθεί αντλώντας το εύρος σταθερής κατάστασης, φ_α της περιοδικής λύσης.

$$\begin{aligned} & \pi^4 \omega^2 \left(\frac{3\varphi_\alpha^2 \omega^2 \delta_3 + 8\delta}{2\pi^2 - \varphi_\alpha^2} \right) \\ & + \frac{1}{16} \left(\frac{6\varphi_\alpha^2 \omega_\varphi^2 - 8\pi^2 \omega_\varphi^2}{\pi^2 - \varphi_\alpha^2} * \frac{(GM_m - GM)}{GM} \right. \\ & \left. - \pi^2 \frac{5\varphi_\alpha^4 I_5 \omega_\varphi^2 + 6\varphi_\alpha^2 I_3 \omega_\varphi^2 + 8(\omega_\varphi^2 - \omega^2)}{\pi^2 - \varphi_\alpha^2} \right)^2 \\ & = \omega_\varphi^4 \left(\frac{GM_a}{GM} \right)^2 \quad (7, 26) \end{aligned}$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η εξίσωση (7,26) αποδίδει μια γραμμική λύση αν και μόνο αν:

$$l_3 = l_5 = GM_m = 0, \quad \omega = \omega_o \quad (7,27)$$

Ως υποκατάσταση των παραπάνω εκφράσεων στην εξίσωση (7,27) η εξίσωση (7,26) μειώνει την τελευταία εξίσωση στην παρακάτω:

$$\frac{8\pi^2 \delta_E}{(2\pi^2 - \varphi_a^2) * \omega_o} = \frac{GM_a}{GM} \quad (7,28)$$

Όπου στο σημείο δ_E είναι η ισοδύναμη γραμμική απόσβεση. Η εξίσωση (7,28) είναι σύμφωνη με το κριτήριο επιπέδου 1 (**Level 1 vulnerability criteria**). Αυτό μπορεί να αποδειχθεί αφήνοντας το πλάτος, για το φ_a , να είναι μικρό.

Στη συνέχεια, η ισοδύναμη γραμμική απόσβεση, το δ_E , γίνεται γραμμική απόσβεση και με το τετράγωνο του πλάτους του διατοιχισμού να είναι μικρό σε σχέση με το $2\pi^2$.

Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι η αριθμητική λύση της εξίσωσης (7,23) μπορεί να χρησιμοποιήσει άμεσα τα αποτελέσματα του υπολογισμού της καμπύλης **GZ** σε κύματα. Ένα άλλο πλεονέκτημα της αριθμητικής προσέγγισης είναι η δυνατότητα απόκτησης μιας παροδικής λύσης, η οποία αποφεύγει περιττό συντηρητισμό σε περιπτώσεις όπου του φαινομένου παραμετρικού διατοιχισμού όπου αναπτύσσεται τόσο αργά, ώστε το πλοίο να μην φτάνει σε μεγάλη γωνία εγκάρσιας κλίσης σε ακανόνιστους δυσμενείς κυματισμούς.

Επιπρόσθετα από το παράρτημα 5 του (**SLF 53 / INF.10**), η εφαρμογή μιας ομάδας κυμάτων, που αποτελείται από περιορισμένο αριθμό κυμάτων με το ίδιο μήκος και ύψος, οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα με την ίδια τυπική ομάδα κυματισμών (**typical wave group**).

Η χρήση τέτοιων ομάδων κυμάτων, περιορίζει τον υπολογισμό της ευστάθειας στα κύματα σε ένα μόνο τύπο κύματος. Αυτό μειώνει σημαντικά τον κατά τα άλλα σημαντικό αριθμό υπολογισμών που μπορεί να απαιτηθεί στην αριθμητική προσέγγιση παράρτημα 9 του (**SLF 53/INF.10**).

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι, οι υπολογισμοί δειγμάτων χρησιμοποιώντας μια άμεση αριθμητική λύση παρουσιάζονται στους πίνακες 3 και 4. Οι υπολογισμοί αυτοί βασίζονται στο δείγμα πληθυσμού πλοίων από τα παραρτήματα 5 και 10 του (**SLF 53 /INF.10**), αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι προκαταρκτικής φύσης, καθώς η διαδικασία υπολογισμού δεν έχει ακόμη καθοριστεί. Η αρχική γωνία εγκάρσιας κλίσης που χρησιμοποιήθηκε στον **πίνακα 3** ήταν **10° μοίρες**, ενώ **5° μοίρες** χρησιμοποιήθηκαν στον **πίνακα 4**. Ο αρχικός ρυθμός κίνησης διατοιχισμού ήταν μηδενικός και στις δύο περιπτώσεις. Οι υπολογισμοί δειγμάτων που χρησιμοποιούν κατά προσέγγιση αναλυτικό διάλυμα στην εξίσωση (7,26) μπορούν να βρεθούν στο παράρτημα 2 του (**SLF 53/INF.10**).

Πίνακας 3 (υπολογισμοί δειγμάτων σε παραμετρικό διατοιχισμό (parametric rolling), επίπεδο 2 (Level 2 Vulnerability criteria), με βάση πλοία από SLF 53/INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5).

Ship	Description	L(m)	GM(m)	□□□□	Roll	Y/N
Bulk Carrier	275	9,4	0,05	10	N	
Bulk Carrier 2	145	0,53	0,05	10	N	
Containership 1	Post-panamax	322,6	1,11	0,05	>25	Y
Containership 2	Post-panamax	376	1,84	0,05	>25	Y
Containership 3	Post-panamax	330	1,64	0,05	>25	Y
Containership 4	Panamax	283,2	1,06	0,05	>25	Y
Containership 5	C11 Class	262	1,91	0,05	>25	Y
Fishing Vessel 1	Japanese Purse Seiner	34,5	1,69	0,05	10	N
Fishing Vessel 2	21,56	0,73	0,05	10	N	
General Cargo 1	Series 60 CB = 0.7	121,9	0,24	0,05	10	N
General Cargo 2	C4 Class	161,2	1,1	0,05	14,9	N
LNG Carrier	267,8	3,4	0,05	10	N	
Naval Combatant 1	ONR Tumblehome	150	1,03	0,15	10	N
Naval Combatant 2	ONR Flared	150	3,01	0,15	10	N
Passenger Ship	276,4	3,7	0,05	>25	Y	
RoPax	137	1,77	0,05	>25	Y	
Tanker	320	9,76	0,05	10	10	

Πίνακας 4 (υπολογισμοί δειγμάτων σε παραμετρικό διατοιχισμό, Επίπεδο 2 (Level 2 Vulnerability Criteria), με βάση πλοία από SLF 53/INF.10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10).

Ship	Description	L (m)	d (m)	GM1	Roll	Y/N	GM2	Roll	Y/N
Bulk Carrier	5500 DWT	190	12,8	2,84	5	N	3,34	5	N
Bulk Carrier	180	0,75	2,1	5	N	2,6	5	N	
Containership	> 10000 TEU	360	16	0,8	32	Y	1,3	32	Y
Containership	> 10000 TEU	360	15,5	0,7	>35	Y	1,2	>35	Y
Containership	> 6000 TEU	320	14,6	0,7	32	Y	1,2	32	Y
Containership	> 6000 TEU	320	14,5	0,8	32	Y	1,3	32	Y
Containership	> 4000 TEU	250	13,5	0,5	31	Y	1	31	Y
Containership	> 4000 TEU	250	12,5	0,6	32	Y	1,1	32	Y
Containership	> 1000 TEU	210	12	0,6	32	Y	1,1	31	Y
Containership	> 1000 TEU	200	11,4	0,6	32	Y	1,1	31	Y
Containership	> 1000 TEU	170	10,9	0,5	32	Y	1	32	Y
Containership	> 1000 TEU	160	10,5	0,16	32	Y	0,66	30	Y
Containership	> 500 TEU	135	7,75	0,58	32	Y	1,08	31	Y
Containership	> 500 TEU	125	7,4	0,7	31	Y	1,2	30	Y
Cruise Vessel	240	7,2	2,71	31	N	3,21	30	N	
LNG Carrier	1000 cbm	110	8,48	1,06	10	Y	1,56	5	N
MPV	135	8	0,65	23	Y	1,15	9	N	
MPV	125	7	0,17	30	Y	0,67	13	N	
MPV	120	7,08	1	30	Y	1,5	22	Y	
MPV	7500 DWT	105	7,06	0,7	16	N	1,2	7	N
Tanker	30000 DWT	320	22,6	6,35	5	N	6,85	5	N
Tanker	110	7,41	1,31	5	N	1,81	5	N	

Το κύριο αποτέλεσμα των υπολογισμών είναι μια παρατηρούμενη μέγιστη γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού. Σε περίπτωση μη παραμετρικού συντονισμού, οι κινήσεις διατοιχισμού θα αποσυντεθούν και η μέγιστη γωνία διατοιχισμού θα είναι η αρχική γωνία. Αυτό θα ισχύει για τα δεξαμενόπλοια (**tankers**), τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (**bulk carriers**) και πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου (**LNG**) και τους πολεμικά καταδρομικά (**naval combatants**).

Από την άλλη πλευρά η ταχεία ανάπτυξη του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**), παρατηρείται για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**Container ship**), σε **RoPax (roll-on/roll-off passenger ship)** και τα κρουαζιερόπλοια (**cruise ship**).

Πρέπει να τονίσουμε ότι τα πλοία γενικού φορτίου (**general cargo**) και πολλαπλών χρήσεων πλοία (**MPV – Multipurpose Vessel**) καθώς και τα αλιευτικά σκάφη (**fishing vessels**) βρίσκονται σε γκρίζα περιοχή. Ενώ τα δύο δείγματα αλιευτικών πλοίων στον παραπάνω **πίνακα 3** δεν έδειξαν κάποια ευπάθεια σε παραμετρικό διατοιχισμό, τα αλιευτικά σκάφη, καταρχήν, είναι γνωστό ότι είναι ευαίσθητα στο φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού (**Neves, et al., 2009**).

Καταρχήν, τα πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου (**general cargo ships**) μπορούν να παρουσιάσουν παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**) στις ακόλουθες θάλασσες υπό την προϋπόθεση ανεπαρκούς ευστάθειας (**Paulling, et al., 1972, 1974, 1975**).

Ορισμένες διαφορές στη σοβαρότητα της παραμετρικής απόκρισης διατοιχισμού παρατηρήθηκαν στην περίπτωση των πλοίων **MPV (Multipurpose Vessel)**, ανάλογα με τις συνθήκες φόρτωσης τους όπως φαίνεται στον **πίνακα 4**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, το ερώτημα παραμένει σημαντικά στο επίκεντρο της έρευνας σχετικά με το ποια γωνία διατοιχισμού πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο. Ο Αμερικανικός Νηογνώμονας **ABS (2004)** όπως αναφέρθηκε στο **κεφάλαιο 5** χρησιμοποίησε **22,5°** μοίρες, όπου αυτή η τιμή προήλθε από ένα όριο στην κύρια λειτουργικότητα της κύριας μηχανής για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**Container ships**). Ουσιαστικά, βασίζεται κυρίως στις απαιτήσεις λίπανσης σε στατικές γωνίες κλίσης.

Επιπλέον, ένα άλλο πρότυπο μπορεί να προταθεί με βάση τις απαιτήσεις πρόσδεσης εμπορευματοκιβωτίων (**container-lashing requirements**). Αυτό φαίνεται λογικό, αλλά μπορεί να μην αποτελεί κατάλληλη βάση κριτηρίων για άλλους τους τύπους πλοίων.

Βέβαια, ενώ το ζήτημα της επιτρεπόμενης γωνίας εγκάρσιας κλίσης (**roll angle**) διατοιχισμού (**rolling**) χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν **20° μοίρες** για να υποδείξουν την ευπάθεια στον παραμετρικό συντονισμό. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι το αποτέλεσμα του δείγματος και οι υπολογισμοί για τα **κριτήρια ευπάθειας επιπέδου 2 (Level 2 vulnerability criteria)** είναι γενικά, λιγότερο συντηρητικά από τα κριτήρια **ευπάθειας επιπέδου 1 (Level 1 vulnerability criteria)**. Τα αποτελέσματα βρέθηκαν να έχουν σταθερά τον ίδιο ρυθμό, διότι όλα τα πλοία που βρέθηκαν να είναι μη εύαλωτα από τα κριτήρια επιπέδου 1 έχουν βρεθεί και από το επίπεδο 2.

5.5 Συμπεράσματα και αποτελέσματα κριτηρίων ευστάθειας 2^{ης} γενιάς.

Συνοψίζοντας, η βασική έννοια των κριτηρίων ευστάθειας της δεύτερης γενιάς βασίζεται σε μια πολυεπίπεδη διαδικασία αξιολόγησης. Επειδή η άμεση εκτίμηση ευστάθειας των επιδόσεων ευστάθειας πλοίου μπορεί να συνεπάγεται σημαντική πρόσθετη δαπάνη ανάλυσης σχεδιασμού, πρέπει πρώτα να διενεργηθεί έλεγχος ευπάθειας, ώστε να αποκλειστούν περιπτώσεις όπου οι τρόποι αστοχίας ευστάθειας δεν αποτελούν πρόβλημα.

Για το φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού, τα κριτήρια ευπάθειας επιπέδου 1 (**level 1 vulnerability criteria**) βασίζονται στο απλούστερο μοντέλο παραμετρικού συντονισμού – με την εφαρμογή της εξίσωσης **Mathieu**. Αρχικά χρησιμοποιούνται δύο συνθήκες:

Το μέγεθος των αλλαγών ευστάθειας στα κύματα και η κατάσταση της συχνότητας συνάντησης με βάση την ταχύτητα εξυπηρέτησης του πλοίου.

Το κριτήριο ευπάθειας επιπέδου 2 (**Level 2 vulnerability criteria**) βασίζεται στην απόκριση κίνησης διατοιχισμού υπό συνθήκες παραμετρικού συντονισμού.

Ο επόμενος στόχος για την ανάπτυξη των κριτηρίων **ευστάθειας 2^{ης} γενιάς** είναι ο καθορισμός των απαιτήσεων και των διαδικασιών που απαιτούνται για την άμεση αξιολόγηση. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο εργασίας στην ναυπηγική τεχνολογία που όχι μόνο πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι πιο προηγμένες διαθέσιμες τεχνολογίες, αλλά πρέπει επίσης να είναι διαθέσιμες παγκοσμίως.

Πολύ σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει στο γεγονός ότι η ανάπτυξη διαδικασιών επικύρωσης για εργαλεία προσομοίωσης χρονικού τομέα είναι ένα άλλο δύσκολο, αλλά απολύτως απαραίτητο έργο που πρέπει να αναλυθεί. Δεδομένου ότι η άμεση εκτίμηση ευστάθειας πρέπει να γίνει υπό ρεαλιστικές συνθήκες, ο στοχαστικός χαρακτήρας του περιβάλλοντος πρέπει να εξεταστεί πλήρως αναλυτικά. Αυτό σημαίνει ότι οι αποτυχίες ευστάθειας πρέπει να θεωρούνται τυχαία γεγονότα και, δεδομένου ότι είναι σπάνιες, το πρόβλημα της σπανιότητας πρέπει να αντιμετωπιστεί με ένα σύνολο κατάλληλων πιθανολογικών διαδικασιών. Η ανάπτυξη και η επαλήθευση αυτών των διαδικασιών είναι εξίσου σημαντική με την ανάπτυξη και επικύρωση αριθμητικών εργαλείων.

Μόλις ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των κριτηρίων, θα χρειαστούν δύο ακόμη στάδια. Πρώτον, πρέπει να καθοριστούν πρότυπα ή όρια αποδοχής για τα διάφορα κριτήρια. Αυτό το καθήκον θα συνεπάγεται συμφωνία σχετικά με τους κοινωνικά αποδεκτούς κινδύνους της θαλάσσιας δραστηριότητας. Ενώ το πρόβλημα αυτό έχει αντιμετωπιστεί σε άλλους τομείς της μηχανικής, δεν έχει ακόμη αντιμετωπιστεί επαρκώς όσον αφορά την άθικτη ευστάθεια (**intact stability criteria**).

Δεύτερον, θα πρέπει να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα εφαρμογής των κανονισμών ευστάθειας 2^{ης} γενιάς. Η εφαρμογή θα βασίζεται σε προσεκτικό έλεγχο των νέων κριτηρίων και σε μια ολοκληρωμένη ανάλυση των επιπτώσεων των νέων κανονισμών σε υφιστάμενους και μελλοντικούς στόλους της παγκόσμιας εμπορικής ναυτιλίας.

6. Εκτίμηση – αξιολόγηση υπολογιστικού μοντέλου πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ships) σε σχέση με τα κριτήρια ευστάθειας 1^{ης} και 2^{ης} γενιάς.

6.1 Εισαγωγή σχεδίου γραμμών (Lines plan) πραγματικού πλοίου (container ship) σε σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhino 3d για τη δημιουργία γάστρας.

Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι το πιο σημαντικό μέρος της διπλωματικής εργασίας είναι το υπολογιστικό μέρος, όπου ουσιαστικά θα εισαχθεί ένα σχέδιο γραμμών (**lines plan**) ενός πραγματικού πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ship**) καθώς μέσω κατάλληλων εντολών και διεργασιών του προγράμματος (**rhino 3d**) θα δημιουργηθεί και θα μετατραπεί η γάστρα (**hull**) του πλοίου από τις 2 διαστάσεις σε τρεις διαστάσεις (στο χώρο δηλαδή).

Αρχικά θα πρέπει να υπογραμμιστεί ότι το σχεδιαστικό πρόγραμμα (**Rhino 3d**) αποτελεί ένα πρόγραμμα (**modeler**) επιφάνειας ελεύθερης μορφής που χρησιμοποιεί την τεχνική μοντελοποίησης με καμπύλες (**NURBS ή με ανομοιόμορφη ορθολογική βάση**).

Τα **NURBS** είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που καθιστά καμπύλες και επιφάνειες σε γραφικά υπολογιστών. Αυτό το μαθηματικό μοντέλο προσφέρει μεγάλη ευελιξία και ακρίβεια κατά τη διάρκεια ολόκληρης της διαδικασίας μοντελοποίησης ενός σχεδίου σε **3d**. Με αυτή την τεχνική, μπορεί ο σχεδιαστής να εργαστεί με καμπύλες κατά τη μοντελοποίηση και όχι με τη σύνδεση πολυγώνων. Δημιουργείτε μια τρισδιάστατη επιφάνεια μέσω ενός πλέγματος καμπύλων.

Αυτό το είδος μοντελοποίησης χρησιμοποιεί ένα προσαρμοστικό πλέγμα, το οποίο μπορεί να επιτρέψει να βελτιστοποιήσει τον αριθμό των καμπυλών που σχηματίζουν την επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική μοντελοποίησης είναι η πιο ακριβής που υπάρχει αυτή τη στιγμή στα περισσότερα σχεδιαστικά προγράμματα που κυκλοφορούν σε παγκόσμιο εύρος.

Είναι γεγονός ότι το (**rhino_3d**) περιλαμβάνει ένα πραγματικά πλήρες σύνολο εργαλείων και εντολών, ώστε να μπορέσει να βοηθήσει να αναπτύξει ο σχεδιαστής όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για να μπορέσει να έχει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το πρόγραμμα δεν είναι χρήσιμο μόνο για **3d** δημιουργίες, αλλά είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κατασκευή προσθέτων λειτουργιών, αλλά αυτό το πρόγραμμα μπορεί πραγματικά να χρησιμοποιηθεί για πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Πρόκειται για ένα ακριβές λογισμικό **3d** μοντελοποίησης, ιδανικό για σχεδιασμό ή για μηχανική ανάλυση και παρέχει επίσης βαθιά χαρακτηριστικά ανάλυσης και απεικόνισης. Το **rhino_3d** λογισμικό μοντελοποίησης μπορεί επίσης να

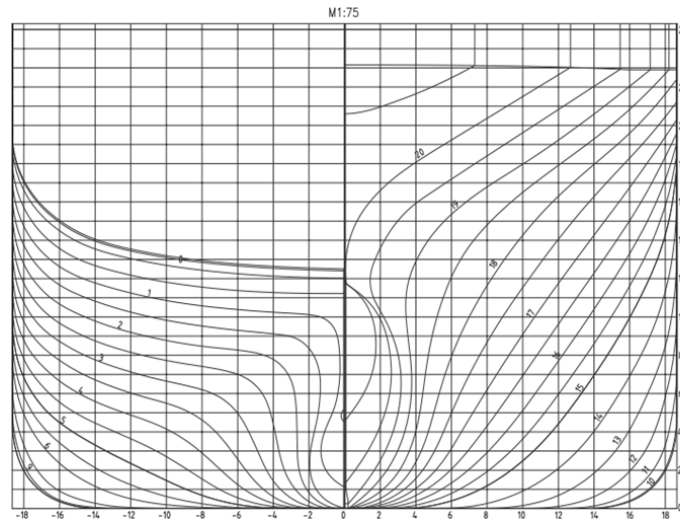
σας βοηθήσει να δημιουργήσετε μεγάλη φωτορεαλιστική απόδοση δημιουργώντας κινούμενα σχέδια ή εικόνες.

Η ανάπτυξη αυτού του λογισμικού ξεκίνησε πριν από 20 χρόνια με την ιδέα να δώσει ιδανικά εργαλεία για να σχεδιαστές κυρίως στη Ναυπηγική βιομηχανία, για την κατασκευή μοντέλων - πλοίων (**πολύπλοκη γεωμετρία**) που θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν για τον έλεγχο της διαδικασίας κατασκευής του εξοπλισμού τους.

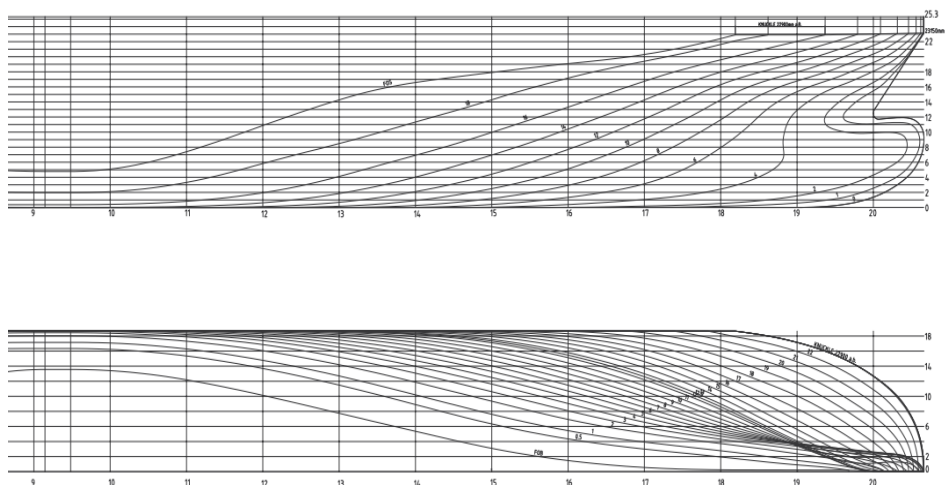
Κάτι αντίστοιχο θα υλοποιηθεί στην τρέχον εργασία, δημιουργώντας τη γάστρα του πλοίου (**hull**) μέσω διάφορων εργασιών και εντολών **βήμα – βήμα**, όπου θα παρουσιαστούν στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου.

1^ο Βήμα:

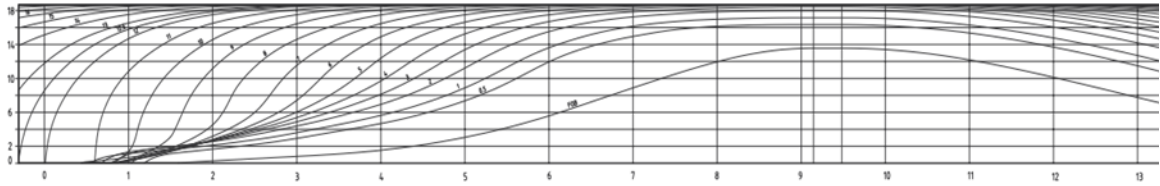
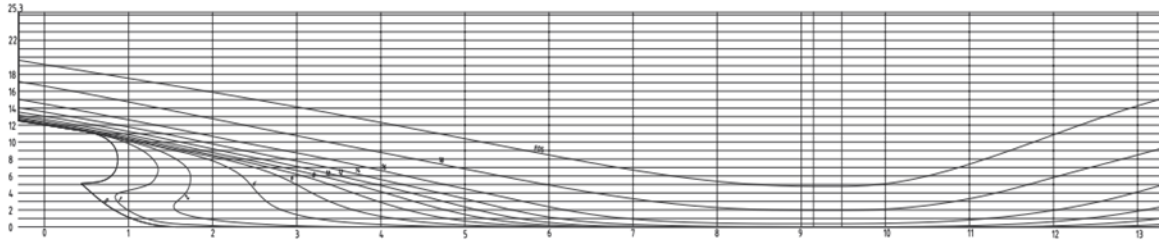
Αρχικά θα πρέπει να εισαχθεί το αρχείο (**Lines plan**) το οποίο είναι σε **pdf** μορφή στο σχεδιαστικό πρόγραμμα **rhino 3d**. Το αρχείο που περιλαμβάνει το σχέδιο γραμμών του πλοίου που θα μελετηθεί παρουσιάζεται παρακάτω:



Εικόνα 64 – Απεικόνιση body-plan του πλοίου ως προς τον εγκάρσιο άξονα.



Εικόνα 65 – Απεικόνιση νομέων (frames), ισάλων (waterlines) και των buttocks (profile) του πλοίου ως προς το διαμήκη άξονα (πλώρα).



Εικόνα 65 – Απεικόνιση νομέων (frames), ισάλων (waterlines) και των buttocks (profile) του πλοίου ως προς το διαμήκη άξονα (πρύμα).

Οι διαστάσεις του πλοίου που θα μελετηθεί στην εργασία μας είναι οι εξής:

Main particulars of Suez - max containership

Length Over All = 250.0 m

Length L_{BP} = 238,35 m

Breadth Moulded = 37,30 m

Depth to Main Deck = 19,60 m

Freeboard Draught T = 12,50 m

Design draught d = 11,50 m

Service Speed at NCR with 15% S.M. VS = 21 kn

Main Engine = Man 6S80ME – C9.2 Tier II

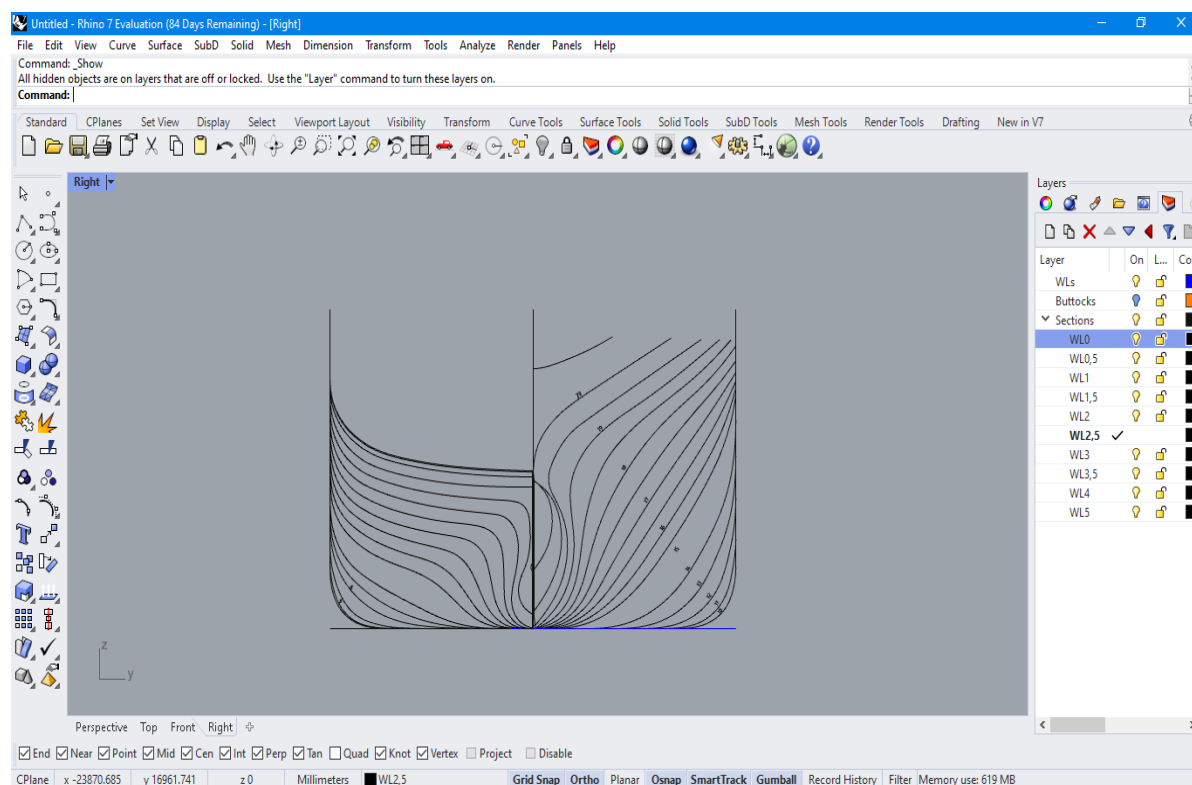
Επομένως θα ξεκινήσουμε εισάγοντας το αρχείο **lines plan.pdf**, πηγαίνοντας στην εντολή **import – options**. Σε εκείνο το σημείο θα μας εμφανιστεί ένα παράθυρο το οποίο θα πρέπει να επιλέξουμε τη διαστασιολόγηση της κλίμακας (**scale**) που μας απεικονίζει το σχέδιο γραμμών του πλοίου. Στην προκειμένη περίπτωση, επιλέγουμε κλίμακα **1:75** σε **mm**.

2^ο Βήμα:

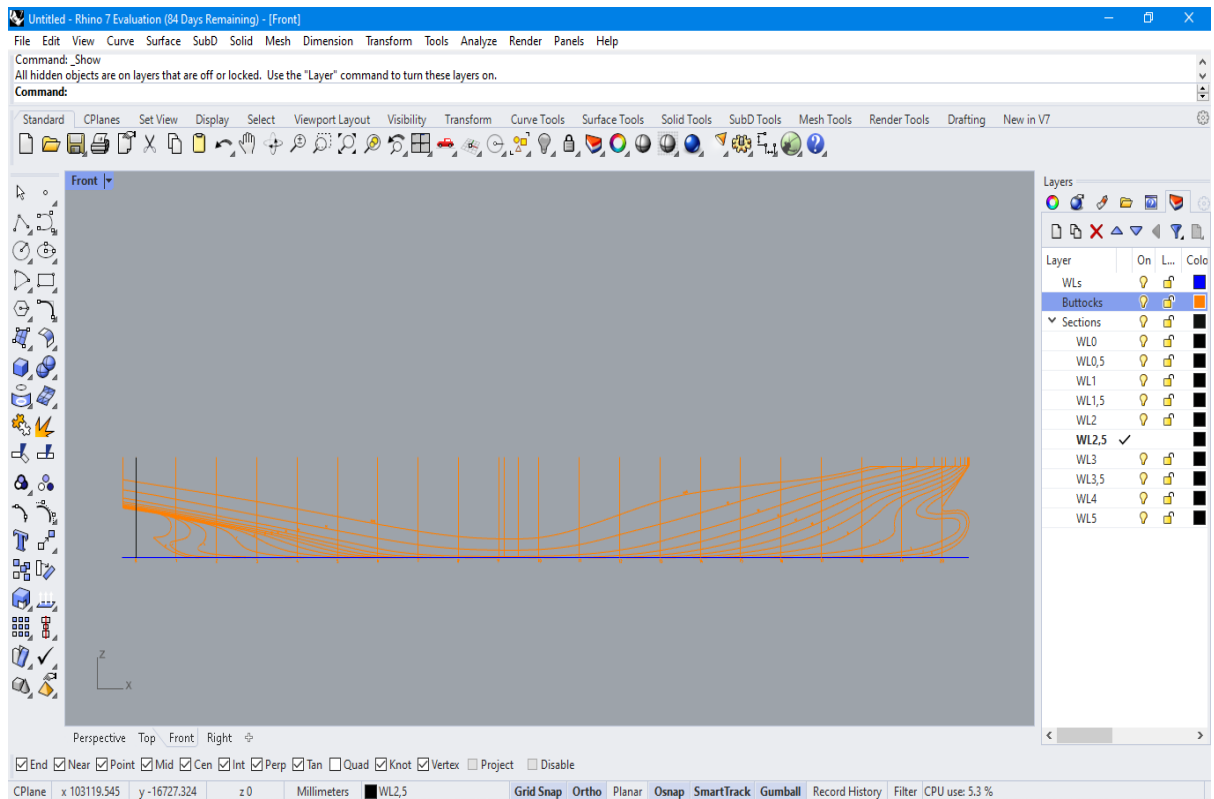
Αφού έχουμε εισάγει το αρχείο μας με τη σωστή κλίμακα, θα πρέπει να μεταφέρουμε την κάθε όψη του σχεδίου στην κατάλληλη θέση απεικόνισης του προγράμματος, όπως (**front, top, right, perspective**). Αυτό γίνεται με την εντολή **remap cplane**, όπου μεταφέρουμε την κάθε όψη (**front, top, right, perspective**) στην κατάλληλη θέση της επιλέγοντας τα. Με αυτό τον τρόπο έχουμε δημιουργήσει και τις τρεις όψεις του πλοίου στο πρόγραμμα ως reference plan, καθώς μη ξεχνάμε ότι έχουμε εισάγει ένα **2d** αρχείο το οποίο θέλουμε να το μετατρέψουμε σε ένα πραγματικό **3d plan**.

Στη συνέχεια εισάγουμε την εντολή **scale**, για να έχουμε την ίδια κλίμακα σε όλες τις όψεις, καθώς το **body plan (right)** είναι **1:75**, ενώ το **top** και **front** είναι **1:150**. Μετατρέποντας όλες τις όψεις σε σωστή κοινή κλίμακα, δημιουργούμε κάποια **layers** τα οποία είναι παρα πολύ σημαντικά για το σωστό και οργανωτικό σχεδιασμό της γάστρας του πλοίου όπως θα δούμε στη συνέχεια.

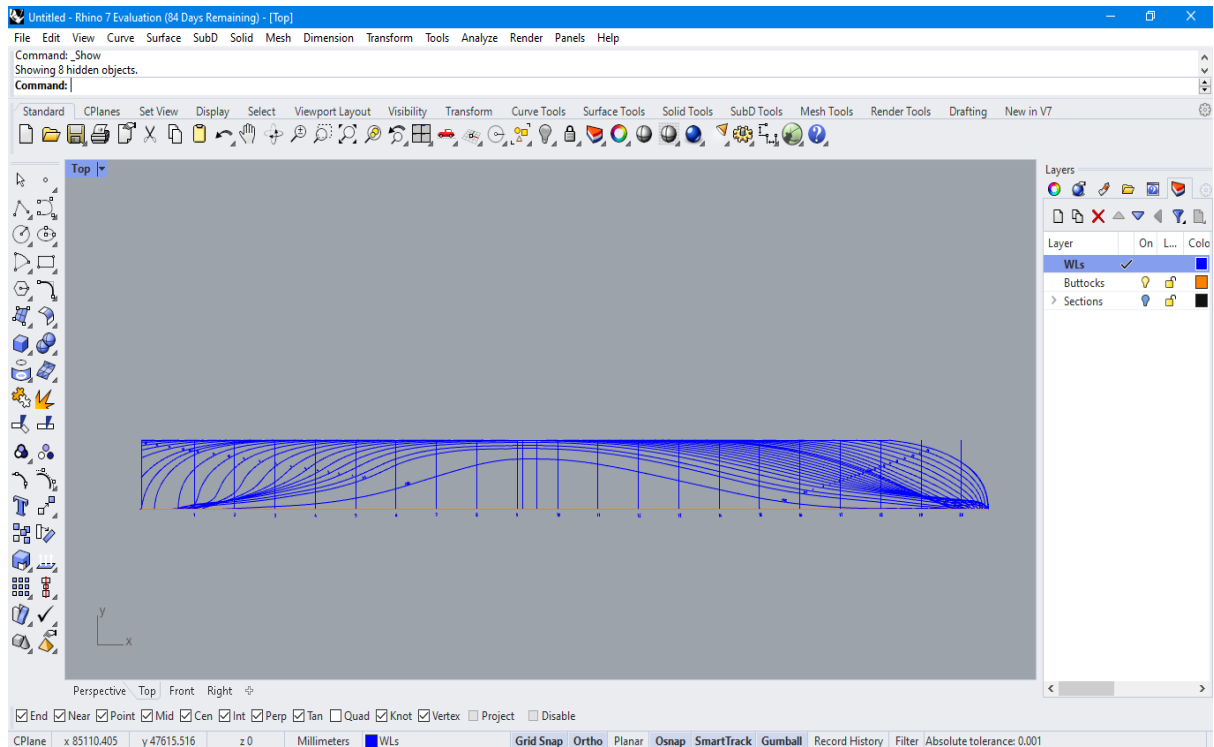
Αρχικά διαχωρίζουμε την κάθε όψη σε ξεχωριστό **layer** – (**Waterlines, Buttocks, Sections**) διαχωρίζοντας τα σε διαφορετικό χρώμα) όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 66 – Απεικόνιση των νομέων από την **Right** όψη της γάστρας του πλοίου (άξονας Z-Y).



Εικόνα 67 – Απεικόνιση των Buttocks πλάγια όψη του πλοίου (front άξονας Z-X).

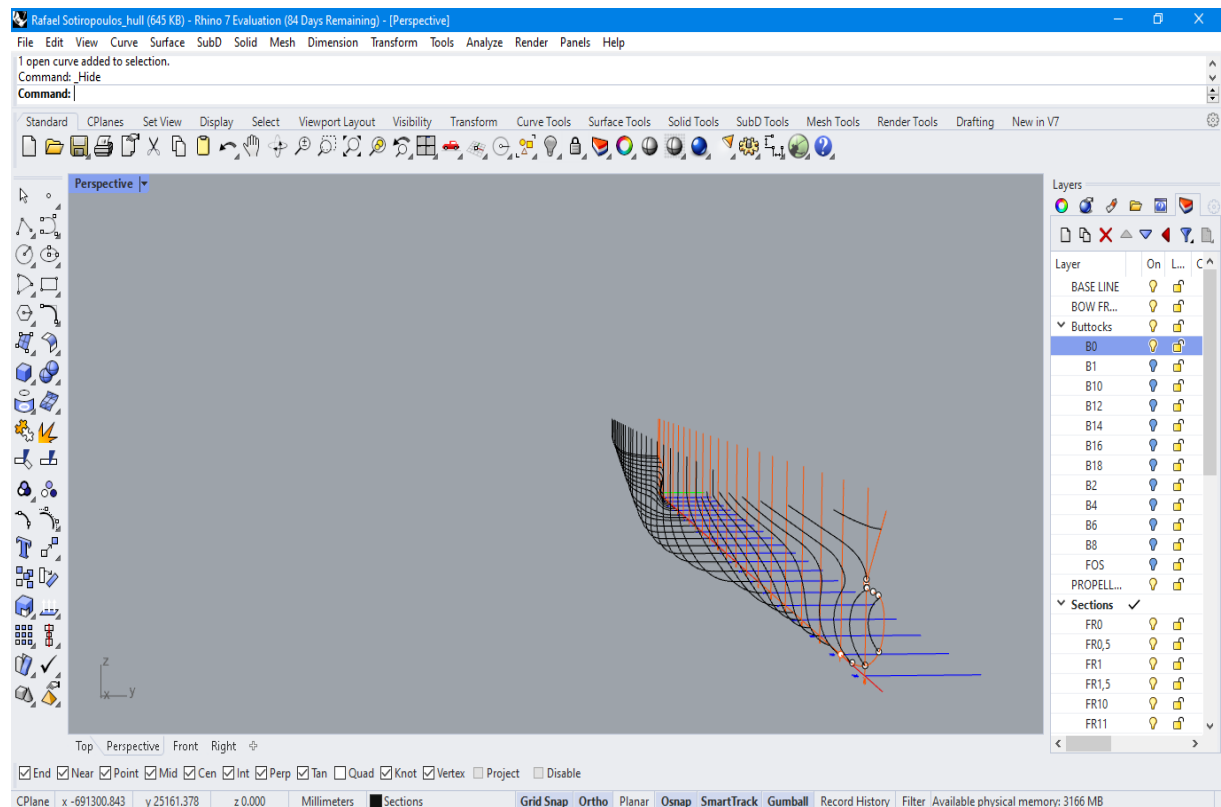


Εικόνα 68 – Απεικόνιση των ισάλων (water lines) κάτοψη πλοίου (top side) άξονας (Y-X).

3^ο Βήμα:

Στη συνέχεια, είναι πάρα πολύ σημαντικό να δημιουργήσουμε (**water line reference**) και (**frame reference**). Δηλαδή χρησιμοποιούμε ίσαλους και νομείς αναφοράς έτσι ώστε με την σωστή διάσταση και απόσταση των νομέων να τους δημιουργήσουμε στο χώρο με την εντολή (**move**). Πολύ σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι πρέπει να υπάρχει το **profile** του πλοίου μέσω των (**upper deck, main deck, Bottom**).

Ουσιαστικά, έχοντας δημιουργήσει κατάλληλα **layers** για κάθε τομέα (**sections**) του πλοίου μπορούμε να εργαστούμε στο πρόγραμμα **rhino** ξεκάθαρα και αναλυτικά χωρίς κανένα εμπόδιο.



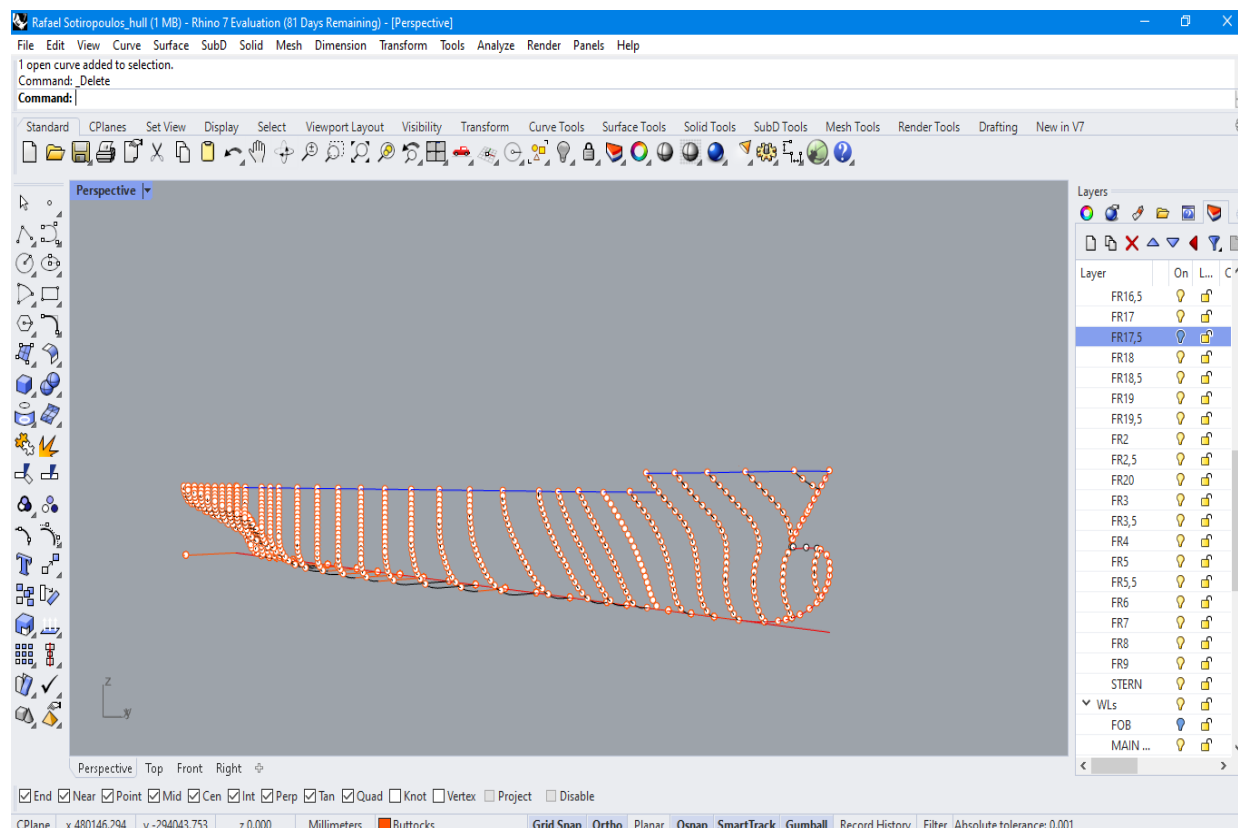
Εικόνα 69 – Απεικόνιση των reference lines και των νομέων στο Perspective(X-Y-Z) δημιουργώντας μια πρώτη όψη της μορφής της γάστρας (hull).

4^ο Βήμα:

Αξίζει να σημειωθεί ότι για να δημιουργηθεί περισσότερη λεπτομέρεια στην περίπλοκη γεωμετρία του πλοίου που παρουσιάζεται στην πρύμνη (**Stern**) και πλώρη (**Bow**), θα δημιουργήσουμε επιπλέον **water lines** στο σχέδιο μας για να αποκτήσουμε περισσότερες τομές (**intersections**) με τους νομείς μας, άρα περισσότερες επιφάνειες σε αυτά τα σημεία του πλοίου που, αυτό συνεπάγεται περισσότερη ακρίβεια στην ομαλότητα των καμπυλών των επιφανειών που θα δημιουργηθούν.

Με την εντολή **cplane** δημιουργείται ένα πλέγμα ως προς τον άξονα **Z** που θέλουμε για να δώσουμε ανά **1m** ισαπόσταση ισάλων (**waterlines**) μέχρι το **upper deck** του πλοίου.

Στη συνέχεια, αφού έχουμε επιλέξει όλο το πλοίο με τα c planes που έχουμε δημιουργήσει, με την εντολή **intersect** δημιουργούμε τις τομές των ισάλων με τους νομείς της γάστρας όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 70**.

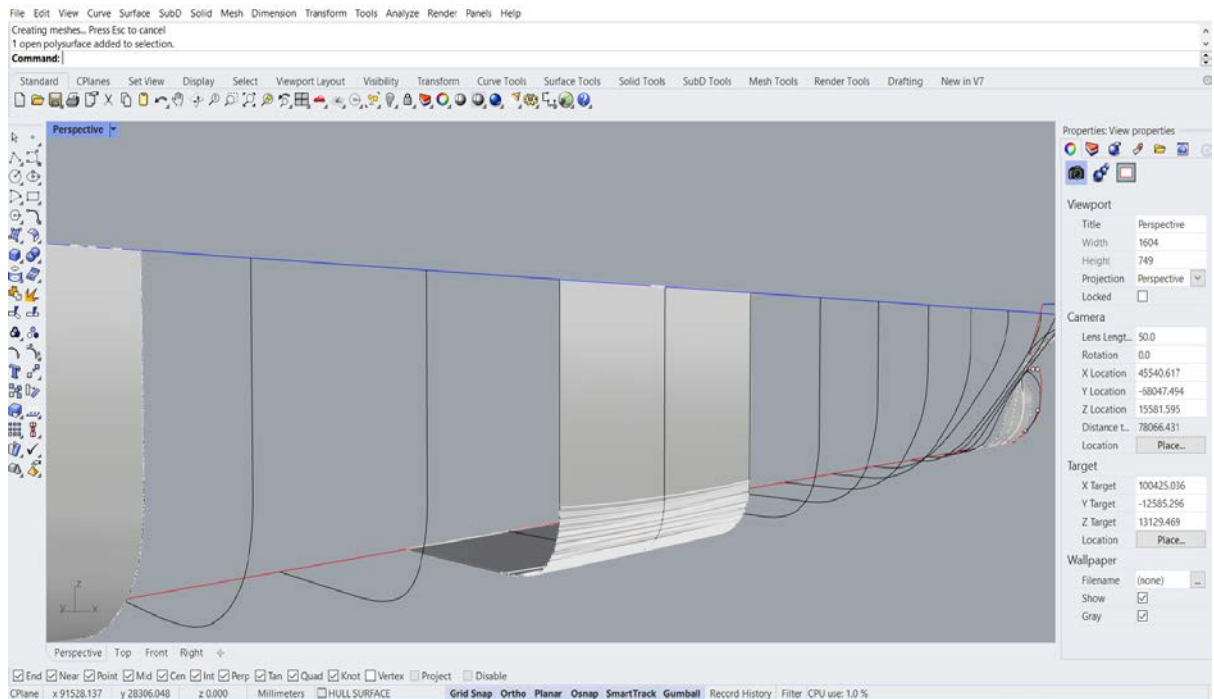


Εικόνα 70 – Δεικνόνιση της γάστρας του πλοίου μέσω των νομέων και των ισάλων από τα σημεία τομής που έχουν δημιουργηθεί.

5^ο Βήμα:

Σε αυτό το σημείο που βρισκόμαστε, μας έχει απομείνει το κομμάτι των επιφανειών που θέλουμε να δημιουργήσουμε, έτσι ώστε να πάρει την τελική της μορφή η γάστρα του πλοίου.

Αρχικά θα επιλέξουμε με την εντολή (**loft**) τους νομείς που βρίσκονται στο παράλληλο τμήμα του πλοίου, διότι σε εκείνο το σημείο η γεωμετρία του πλοίου είναι πολύ πιο τετραγωνισμένη πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δε θα χρειαστεί η δημιουργία επιφάνειας με μεγαλύτερη ακρίβεια και συνέχεια όπως η (**curve network**). Στην παρακάτω **εικόνα 71** παρατηρούμε την δημιουργία επιφανειών (**surfaces**) μέσω της εντολής **loft**.

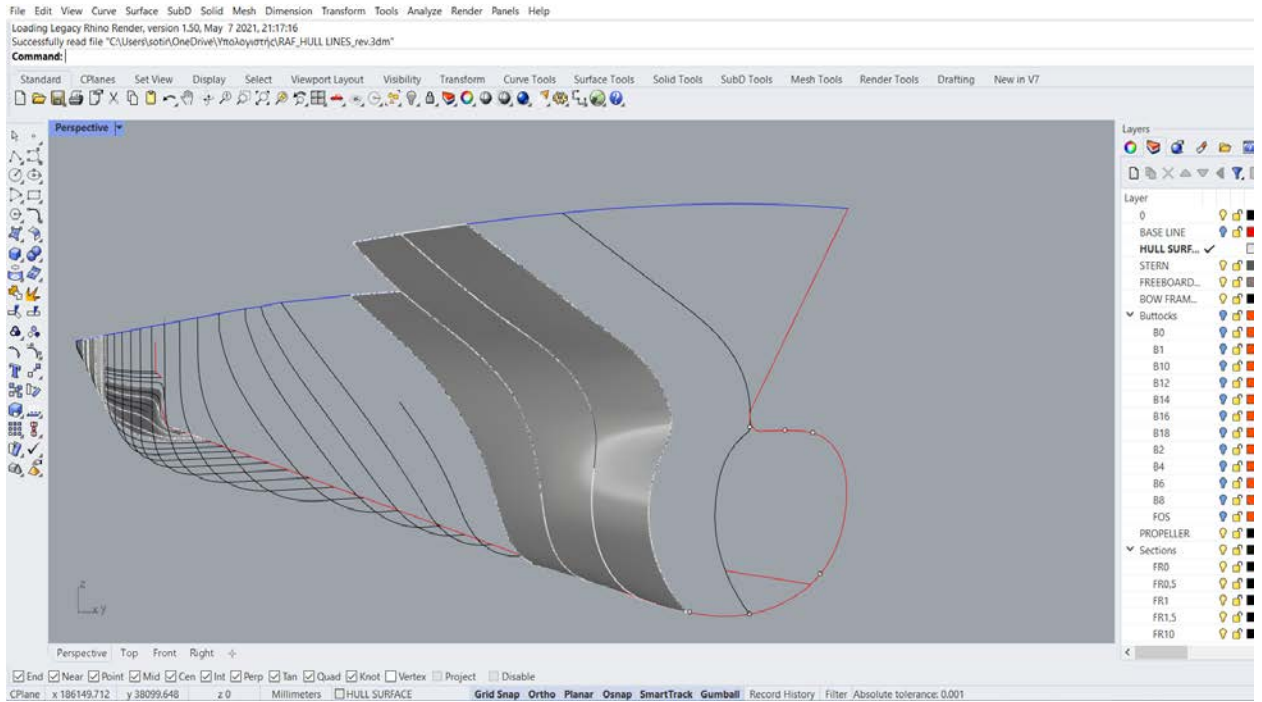


Εικόνα 71 – Απεικόνιση επιφανειών (surfaces) της γάστρας του πλοίου στο παράλληλο τμήμα (μέσοι νομείς).

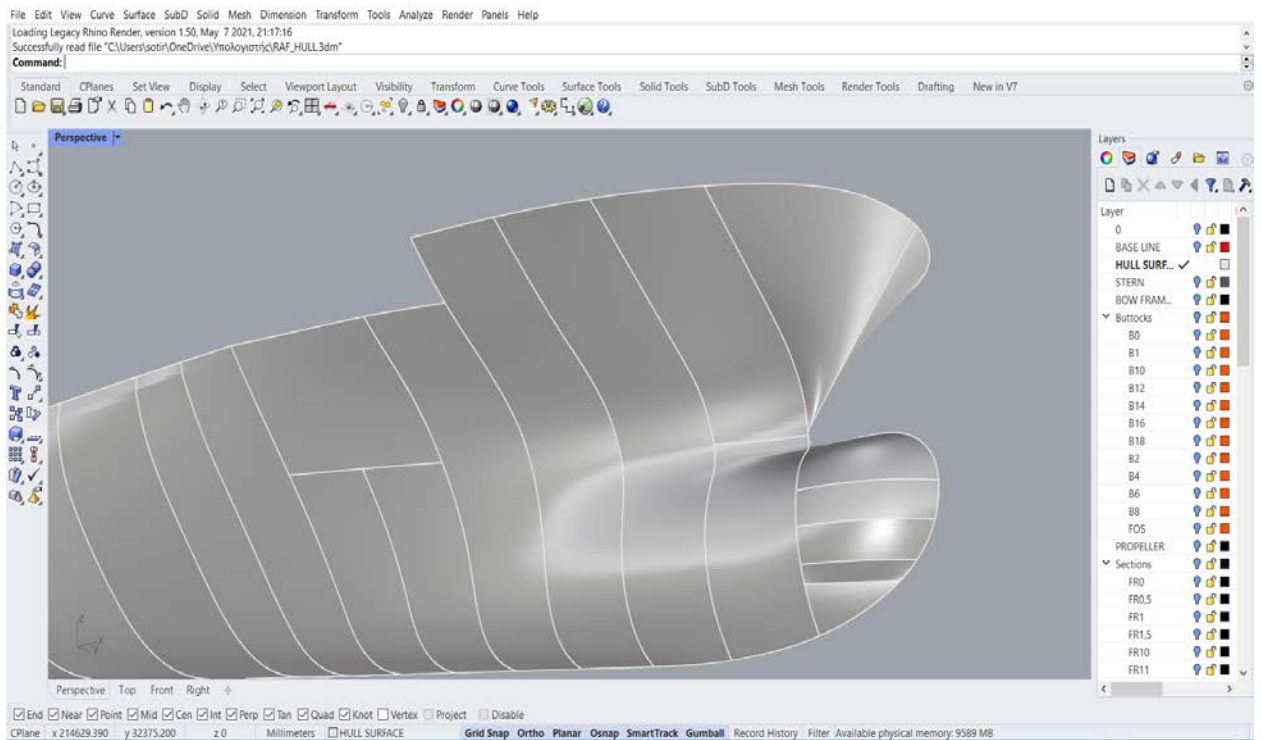
Από την άλλη πλευρά, μέσω της εντολής **curve network** παρατηρούμε ότι στο πρυμναίο και στο πλωραίο τμήμα της γάστρας, τα οποία έχουν χωριστεί σε περισσότερα τμήματα επιφανειών (για καλύτερη συνέχεια καμπυλότητας), δημιουργούμε επιφάνειες επιλέγοντας ανά 4 τμήματα καμπυλών (νομείς με τις τομές των ισάλων).

Η εντολή **curve network** κατασκευάζει ένα ή περισσότερα επιφανειακά τμήματα παρεμβάλλοντας καμπύλες σε 2 διευθύνσεις. Πρέπει όλες οι καμπύλες της μίας κατεύθυνσης να τέμνονται με τις καμπύλες της άλλης κατεύθυνσης και δεν μπορούν καμπύλες στην ίδια κατεύθυνση να έχουν σημείο τομής.

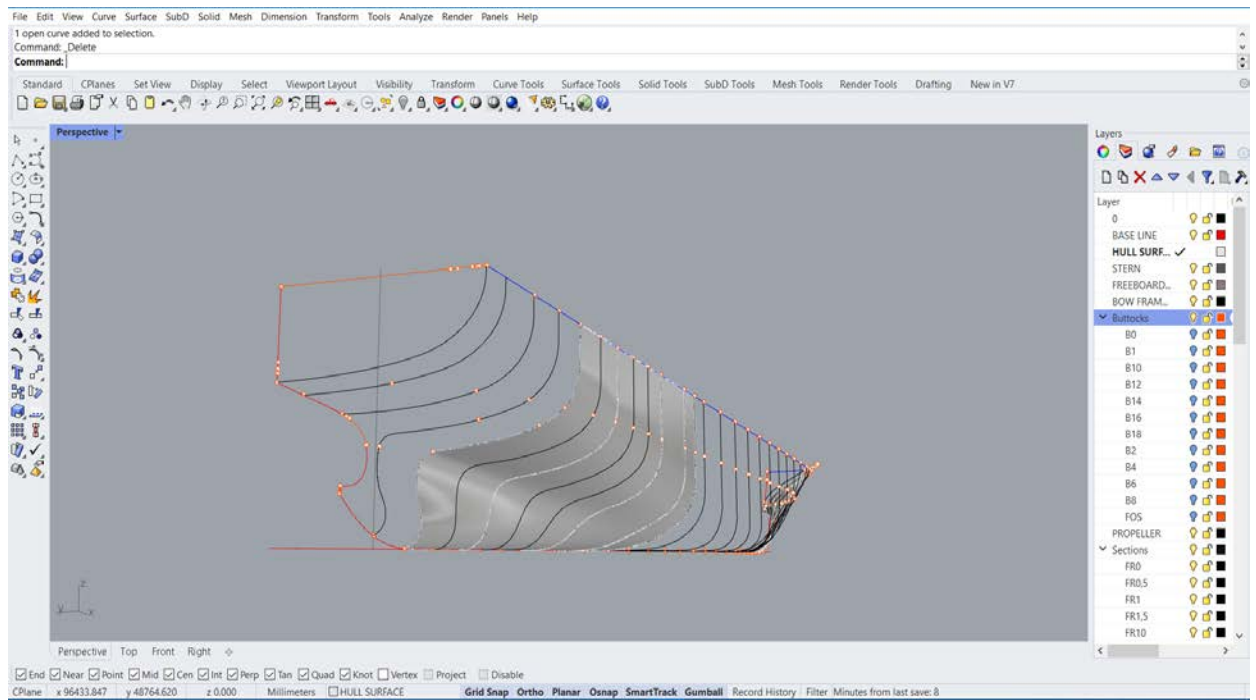
Αυτό δημιουργείται με την εντολή **curve network**, η οποία μπορεί να μας προσδώσει πολύ μεγαλύτερη λεπτομέρεια και ακρίβεια σε σχέση με την εντολή **Loft**. Στις παρακάτω εικόνες παρατηρούμε τη δημιουργία επιφανειών στο πλωραίο (**bow**) και πρυμναίο (**stern**) τμήμα.



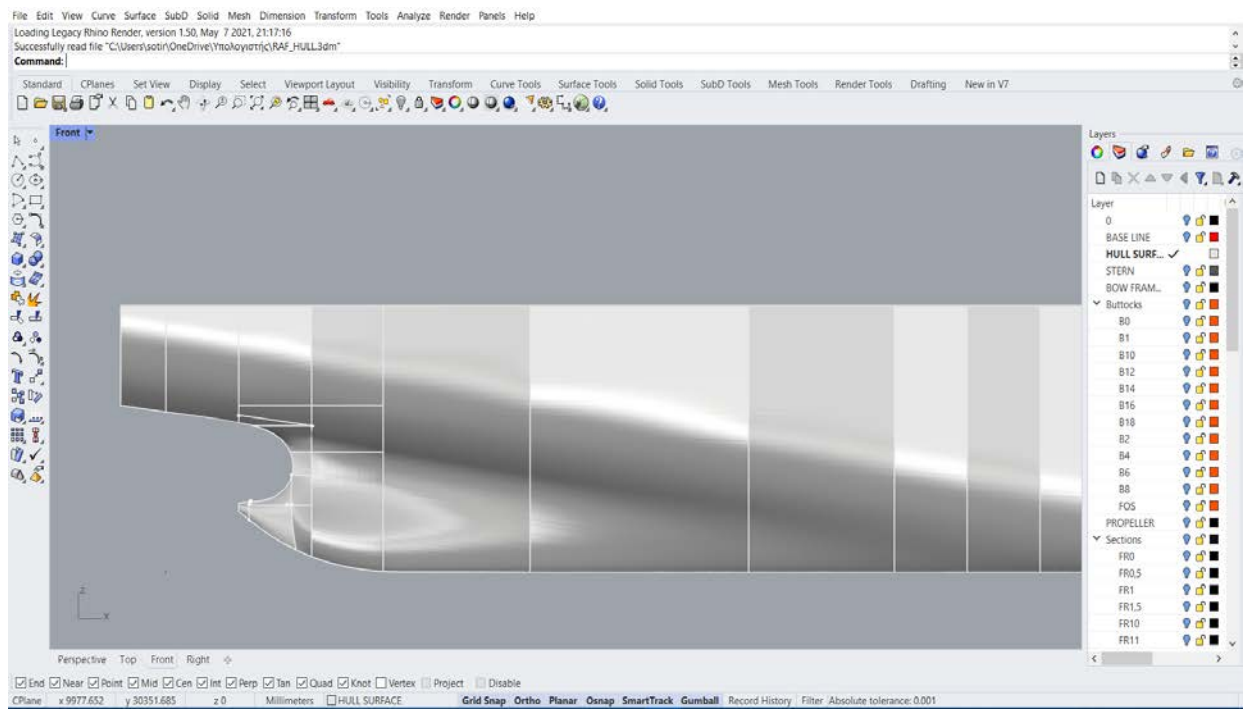
Εικόνα 72 – Απεικόνιση δημιουργίας πλωραίου τμήματος ου πλοίου μέσω της εντολής curve network.



Εικόνα 73 – Απεικόνιση δημιουργίας επιφανειών πλωραίου τμήματος.



Εικόνα 74 – Απεικόνιση δημιουργίας πρυμναίου τμήματος μέσω της εντολής curve network.

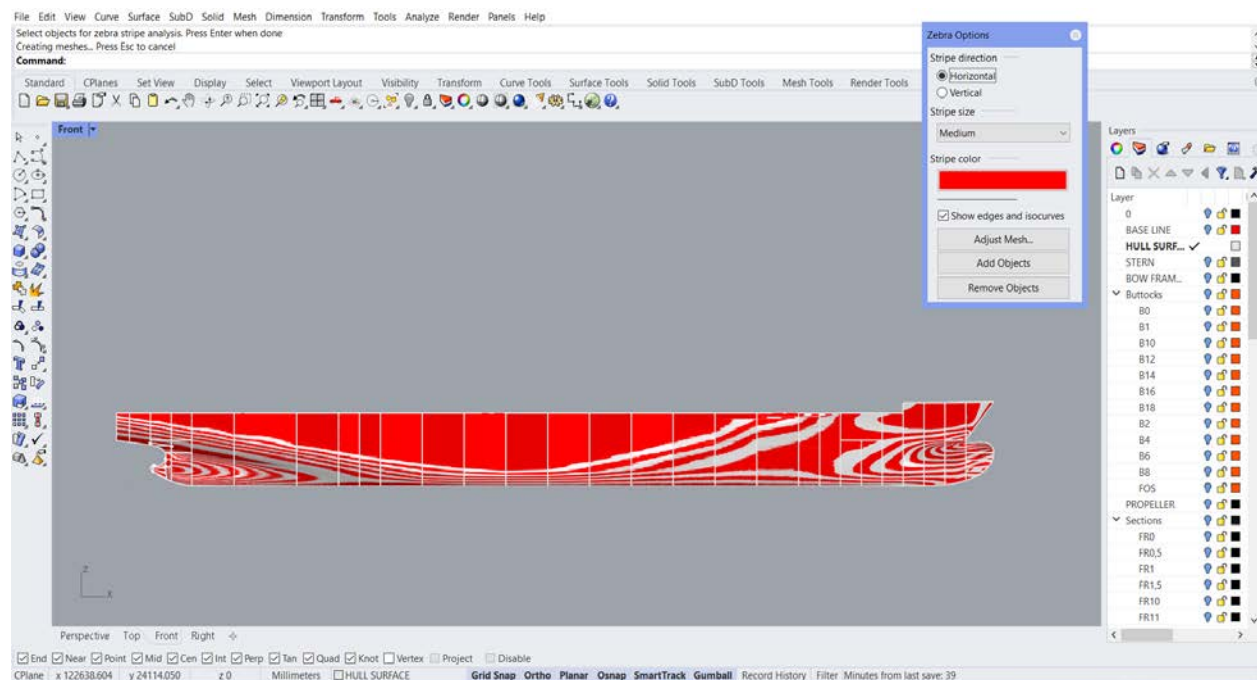


Εικόνα 75 – Απεικόνιση δημιουργίας πρυμναίου τμήματος του πλοίου (από την front side).

6^ο Βήμα:

Επιπλέον αφού έχουμε δημιουργήσει τη γάστρα του πλοίου από τη μία πλευρά, επιλέγοντας την εντολή **zebra** θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε τη συνέχεια του εφαπτομένου επιπέδου της γάστρας.

Στην περίπτωση μας, η γάστρα του πλοίου έχει εφαπτομενική συνέχεια των επιφανειών της, πράγμα το οποίο φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 76**.

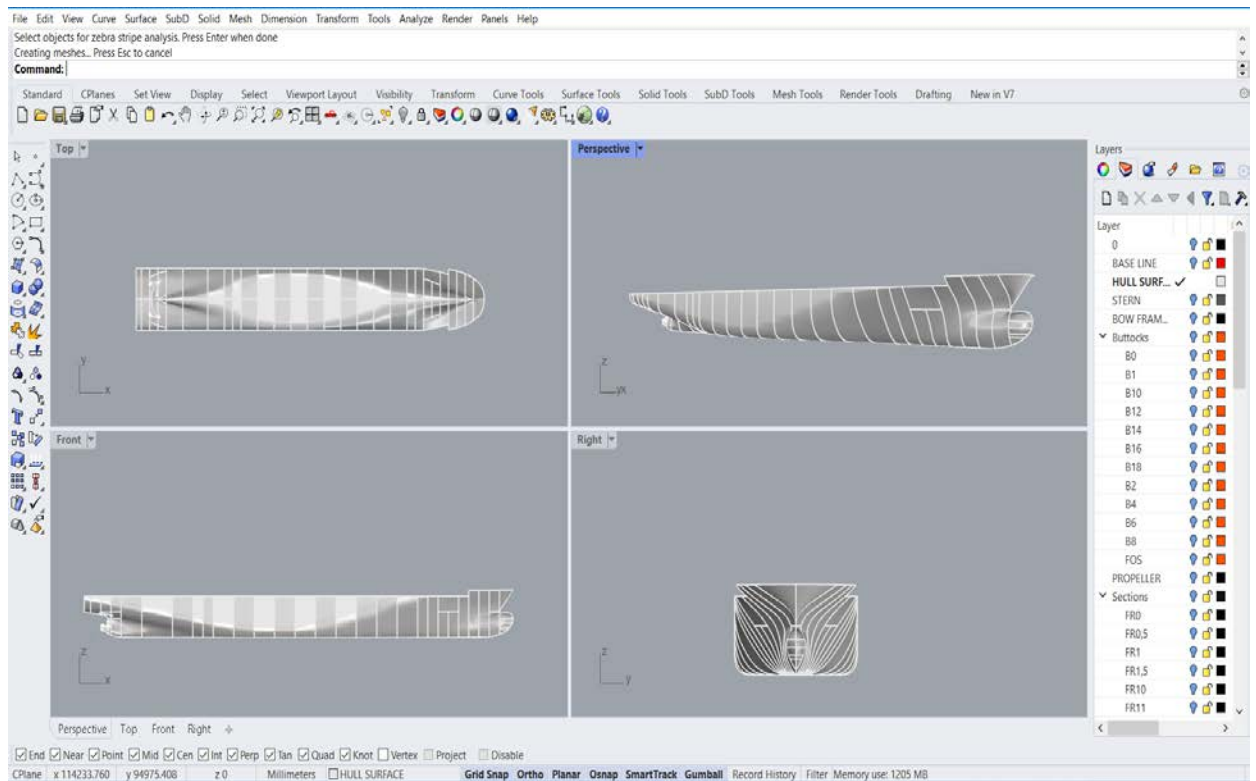


Εικόνα 76 – Απεικόνιση συνέχεια επιφανειών του πλοίου, μέσω της εντολής zebra, στο οποίο το αποτέλεσμα φαίνεται αρκετά ικανοποιητικό.

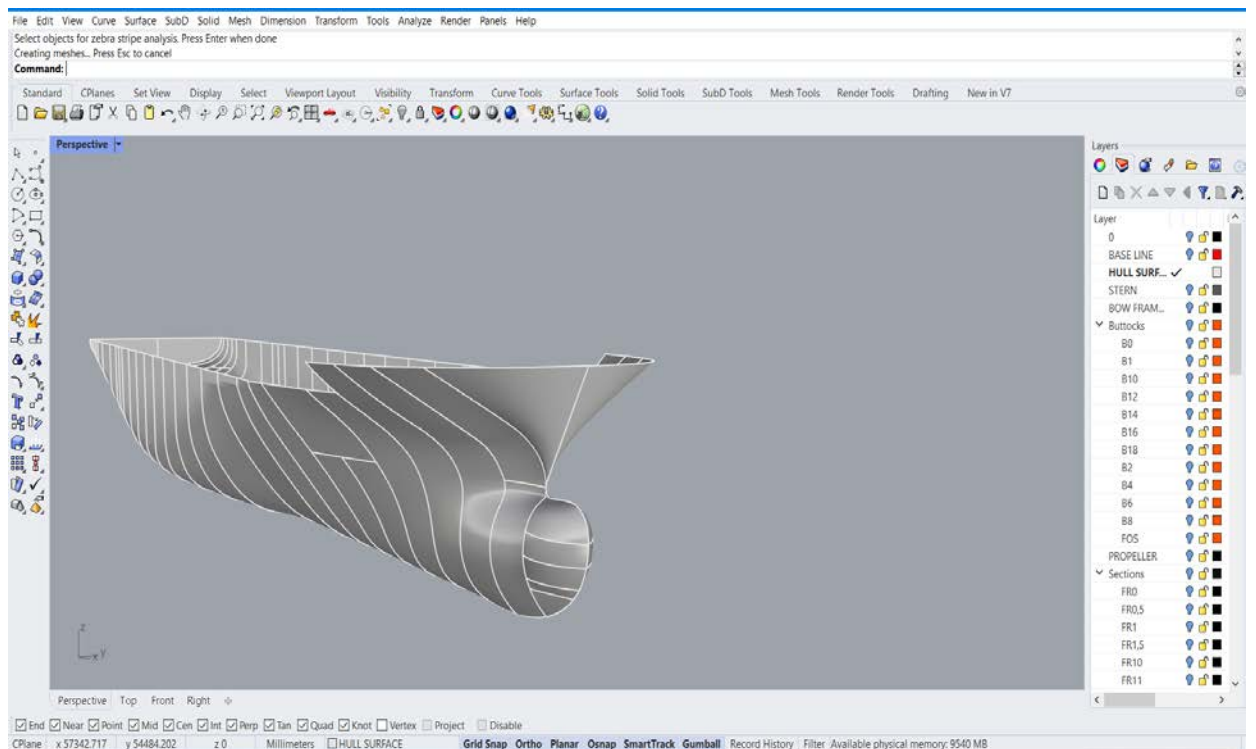
Στη συνέχεια, αφού έχουμε ολοκληρώσει τις παραπάνω διαδικασίες, μέσω της εντολής **Mirror** δημιουργούμε το αντίστοιχο συμμετρικό τμήμα της γάστρας και για την άλλη πλευρά του πλοίου, ολοκληρώνοντας με αυτό τον τρόπο την σχεδίαση της γάστρας του πλοίου στο χώρο **3d**, όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 77**.

Με την εντολή **mirror**, επιλέγοντας ως **point of reference** την αντίθετη όψη του πλοίου, δημιουργείται η γάστρα του πλοίου ολοκληρωτικά.

Στην **εικόνα 77** απεικονίζονται και οι 4 όψεις της γάστρας του πλοίου, (**top**, **front**, **right** και **perspective**).



Εικόνα 77 – Απεικόνιση της γάστρας του πλοίου και στις 4 όψεις (top, front, right, perspective).



Εικόνα 78 – Απεικόνιση της γάστρας του πλοίου – μοντέλου σε 3d διάσταση (perspective).

6.2 Εισαγωγή του υπολογιστικού πλοίου – μοντέλου σε υδροστατικό πρόγραμμα μελέτης ευστάθειας Maxsurf.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η εισαγωγή του **3d** μοντέλου γάστρας που σχεδιάστηκε στο **rhino 3d** σε υδροστατικό υπολογιστικό πρόγραμμα **Maxsurf** για να υπολογιστούν για διάφορες συνθήκες φόρτωσης του πλοίου (**Load Line Conditions**) τα υδροστατικά του χαρακτηριστικά.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο κύριος σκοπός της εργασίας, είναι να μελετήσουμε τα υδροστατικά χαρακτηριστικά ευστάθειας της γάστρας του πλοίου (υπολογιστικού μοντέλου) σε 2 συνθήκες φόρτωσης και να τα συγκρίνουμε με τα υφιστάμενα κριτήρια ευστάθειας του (**I.M.O intact stability criteria**).

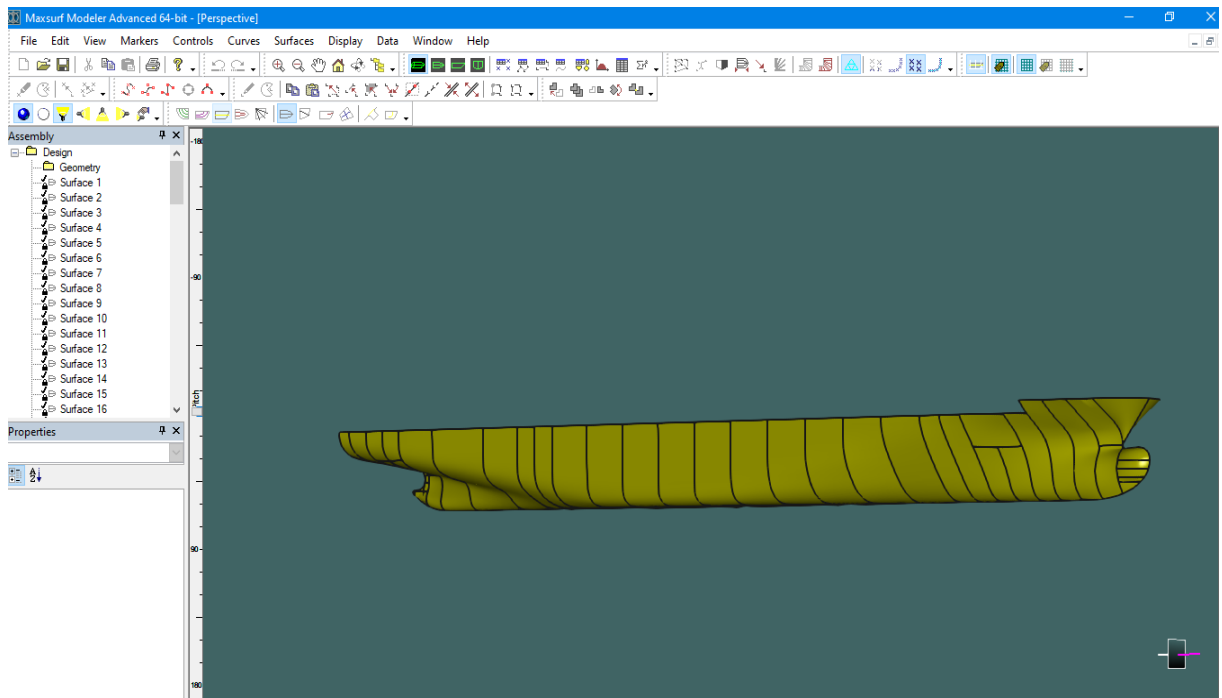
Στη συνέχεια, αφού έχει εφαρμοστεί ο παραπάνω έλεγχος των κριτηρίων ευστάθειας, θα πειραματιστούμε στα κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς (**S.G.I.S.e**) για την περίπτωση παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) σύμφωνα με τα επίπεδα ευαισθησίας (**Level 1** και **Level 2 vulnerability criteria** όπου αναλύθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο. Ουσιαστικά, μέσω του υδροστατικού προγράμματος **Maxsurf** για διάφορα κύματα τα οποία θα μελετήσουμε, θα αναλύσουμε σε ποιες καταστάσεις κύματος (**μήκος λ, ύψος H, συχνότητα κύματος ω**) σε συνδυασμό με τη γάστρα του μοντέλου (πλοίου **container ship**) και ταχύτητας (**service speed** σε **Kn**) είναι το πλοίο ευάλωτο στο φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού. (**parametric rolling**).

Όσον αφορά το **Maxsurf** αποτελεί ένα υδροστατικό υπολογιστικό πρόγραμμα το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ολοκληρωμένες δυνατότητες για το σχεδιασμό όλων των κατηγοριών πλοίων. Το υδροστατικό πρόγραμμα **Maxsurf** περιλαμβάνει πολυδιάστατες δυνατότητες για τη μοντελοποίηση γάστρας, ανάλυση ευστάθειας πλοίου, κινήσεις και πρόβλεψη αντίστασης, δομική μοντελοποίηση, δομική ανάλυση, και την λεπτομερή εξαγωγή της γάστρας του πλοίου.

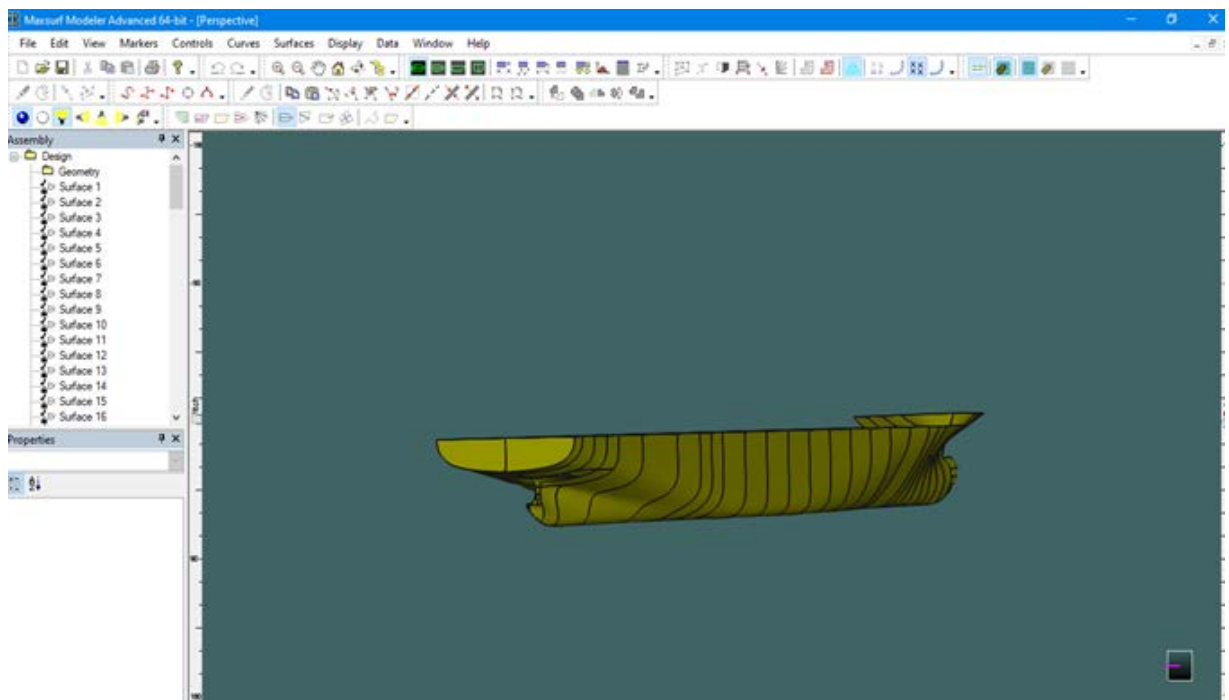
Επομένως θα μελετήσουμε τα παρακάτω βήματα για να εισάγουμε το μοντέλο της γάστρας μας στο υδροστατικό μοντέλο **Maxsurf**.

1^ο Βήμα:

Αρχικά πρέπει να εισάγουμε το αρχείο της γάστρας του πλοίου το οποίο βρίσκεται σε μορφή **rhino_ 3dm** στο υδροστατικό πρόγραμμα **Maxsurf modeler** όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 79 και 80**:



Εικόνα 79 – Απεικόνιση της γάστρας του πλοίου στο πρόγραμμα Maxsurf – modeler.

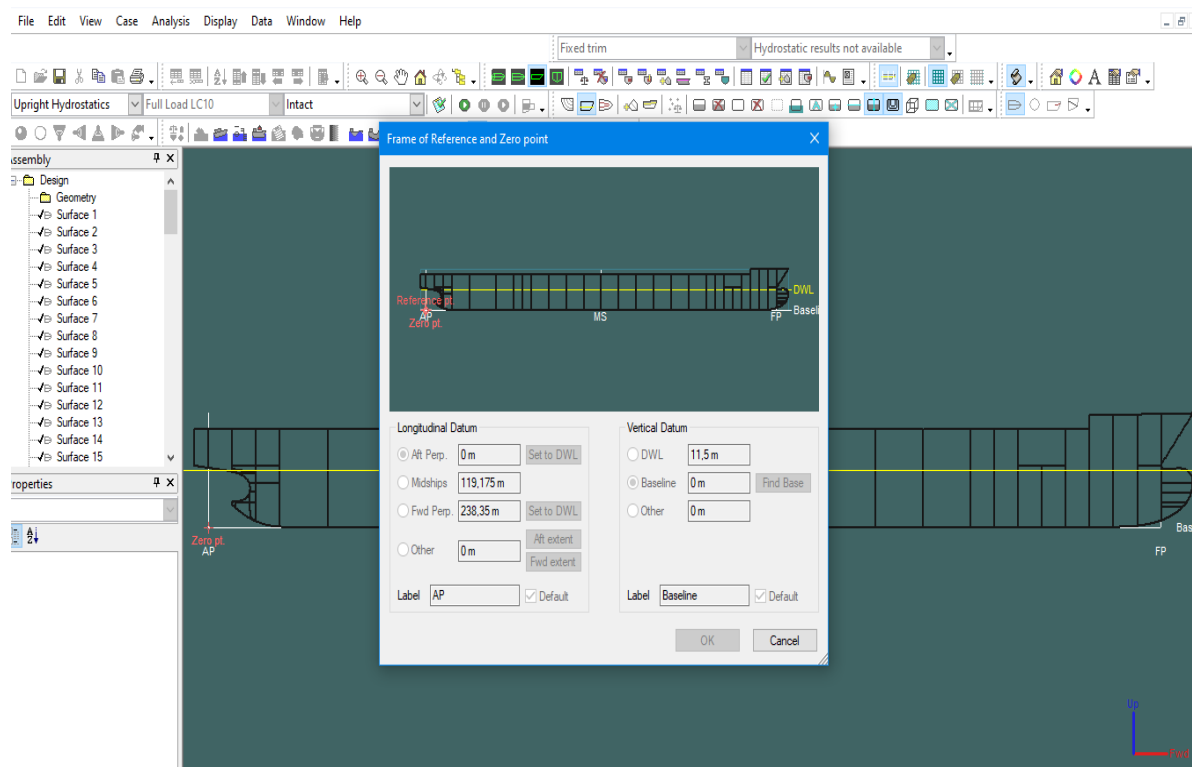


Εικόνα 80 – Απεικόνιση της γάστρας του πλοίου στο πρόγραμμα Maxsurf – Modeler.

2^ο Βήμα:

Στη συνέχεια επιλέγουμε την εντολή **data** και επιλέγουμε **Frame of Reference and Zero point**. Για $A_{ft} = 0 \text{ m}$ και $F_{wd} = 238,35 \text{ Per}$ επιλέγουμε στο **Longitudinal Datum** και στο **Vertical Datum** επιλέγουμε για **Baseline BL = 0 m** βύθισμα **Draught Water**

Line DWL = 11,5 m όπου μας δίνεται και από το **lines_Plan** σχέδιο γραμμών του πλοίου.



Εικόνα 81 – Απεικόνιση της εντολής Frame of Reference and Zero point.

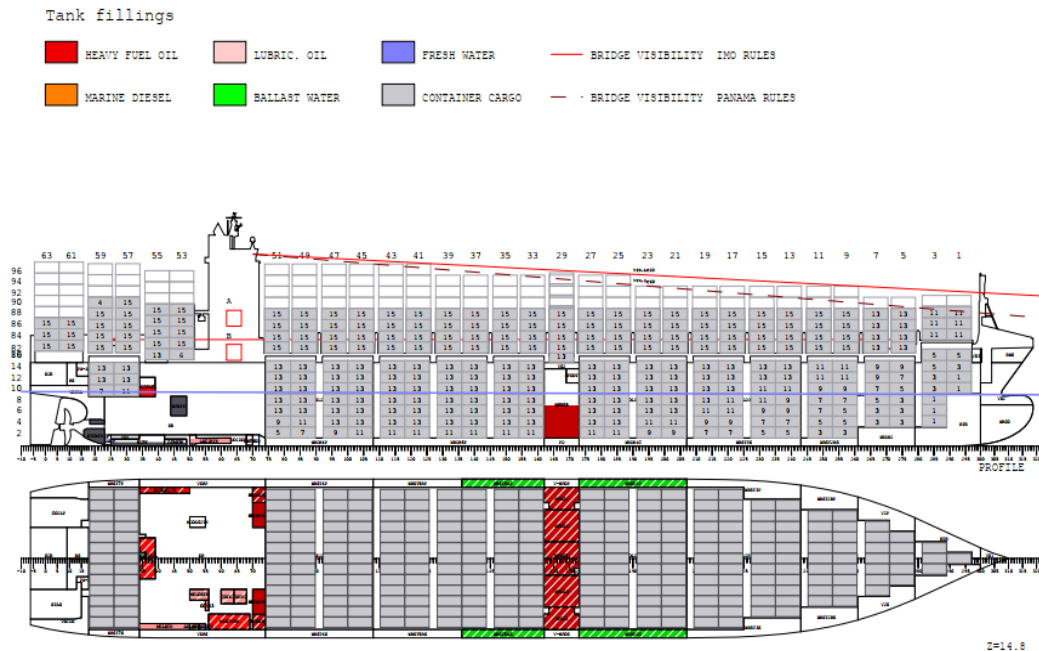
Αφού έχουμε φτάσει σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να επιλέξουμε 2 καταστάσεις φόρτωσης **Load Line Conditions**, έτσι ώστε να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε την συμπεριφορά ευστάθειας του πλοίου – μοντέλου της γάστρας με βάση τα βασικά κριτήρια ευστάθειας **Intact Stability Criteria** του **I.M.O.** τα οποία υπάρχουν στο υδροστατικό πρόγραμμα **Maxsurf Stability advanced**.

6.3 Περίπτωση έμφορτης κατάστασης πλοίου LC10 (Load Line Condition 10 - 3592 Cont. 14t/TEU hom., Mid) – Έλεγχος κριτηρίων ευστάθειας στο υδροστατικό πρόγραμμα Maxsurf Stability Advanced.

Αρχικά, από το **Stability Booklet** του πλοίου, το οποίο μας έχει παραχωρηθεί για την εκπόνηση του υπολογιστικού μέρους της διπλωματικής εργασίας θα επιλέξουμε 2 καταστάσεις φόρτωσης. Η μία θα είναι η έμφορτη κατάσταση φόρτωσης του πλοίου **LC10 (Load Line Condition 10 - 3592 Cont. 14t/TEU hom., Mid)** που θα αναλύσουμε σε αυτό το κεφάλαιο και η άλλη θα είναι μια **Ballast Condition** (Κατάσταση Έρματος) που θα αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Σε αυτή την περίπτωση θα ασχοληθούμε με την κατάσταση φόρτωσης **LC10** όπως απεικονίζεται στην παρακάτω **εικόνα 82**:

Loading Condition LC10: 3592 Cont. 14t/TEU hom., Mid.



Εικόνα 82 – Απεικόνιση της έμφορτης κατάστασης του πλοίου LC10 από το Stability Booklet.

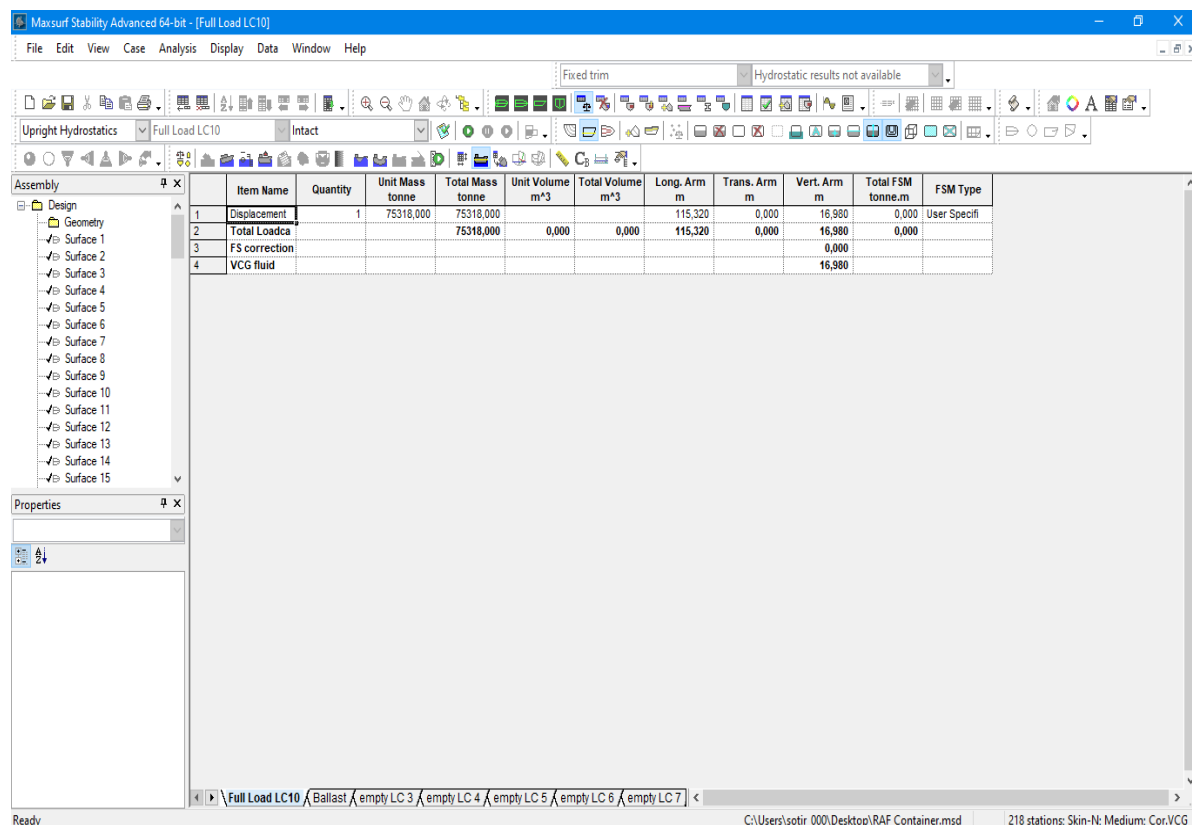
Στη συνέχεια στην παρακάτω **εικόνα 83**, παρουσιάζονται τα υδροστατικά στοιχεία φόρτωσης (**Loading Components**) από το **stability Booklet** του πλοίου, τα οποία θα πρέπει να τα περάσουμε στο πρόγραμμα **Maxsurf Stability** για να υπολογίσουμε τα υδροστατικά του στοιχεία.

FLOATING POSITION			
Displacement	75318 t	Density	1.025 t/m ³
Keel thickness	0.017 m		
Mean draught (bottom of keel)	12.43 m	Trim	-0.71 m
Draught fore (bottom of keel)	12.07 m	Heel	0.0 deg
Draught aft (bottom of keel)	12.78 m		
KM above the moulded base	17.67 m		
KG (solid)	16.87 m	GMO (solid)	0.80 m
Free surface correction	0.10 m	GM (FLUID)	0.70 m
KG (fluid)	16.98 m		

Lightweight	19100.0	104.45	-0.05 13.50
Deadweight	56218.4	119.01	0.02 18.02
Total weight	75318.4	115.32	0.00 16.87

Εικόνα – 83 Απεικόνιση floating position πλοίου στη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης.

Στη συνέχεια περνάμε τα στοιχεία αυτά στο πρόγραμμα **Maxsurf Stability Advanced** όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 84**:



Εικόνα – 84 Εισαγωγή των υδροστατικών στοιχείων φόρτωσης LC10 στο υδροστατικό πρόγραμμα Maxsurf.

Συνεπώς μέσω του υδροστατικού προγράμματος **MaxSurf** υπολογίζουμε τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου μέσω της επιλογής **run - report** με βάση το συγκεκριμένο βύθισμα **Design Draft = 11,50 m**.

HYDROSTATICS – RAF CONTAINER

Fixed Trim = 0 m (+ve by stern)

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Draft Amidships m	11,500
Displacement t	67253
Heel deg	0,0
Draft at FP m	11,500
Draft at AP m	11,500
Draft at LCF m	11,500
Trim (+ve by stern) m	0,000
WL Length m	240,786
Beam max extents on WL m	37,307
Wetted Area m²	10815,514

Waterpl. Area m²	7291,268
Prismatic coeff. (Cp)	0,649
Block coeff. (Cb)	0,635
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,979
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,812
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	117,360
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	110,441
KB m	6,340
KG m	11,500
BMt m	11,189
BML m	382,380
GMt m	6,028
GML m	377,220
KMt m	17,528
KML m	388,720
Immersion (TPc) tonne/cm	74,735
MTc tonne.m	1064,372
RM at 1deg = GMt.Disp.sin (1) tonne.m	7075,667
Max deck inclination deg	0,0000
Trim angle (+ve by stern) deg	0,0000

Στη συνέχεια έχει επιλεχτεί για κάθε βύθισμα από **9 m** έως **12,5 m** υπολογισμός των υδροστατικών στοιχείων με βήμα βυθίσματος **0,233 m** όπως απεικονίζεται στην **εικόνα 84**.

Fixed Trim = 0 m (+ve by stern)

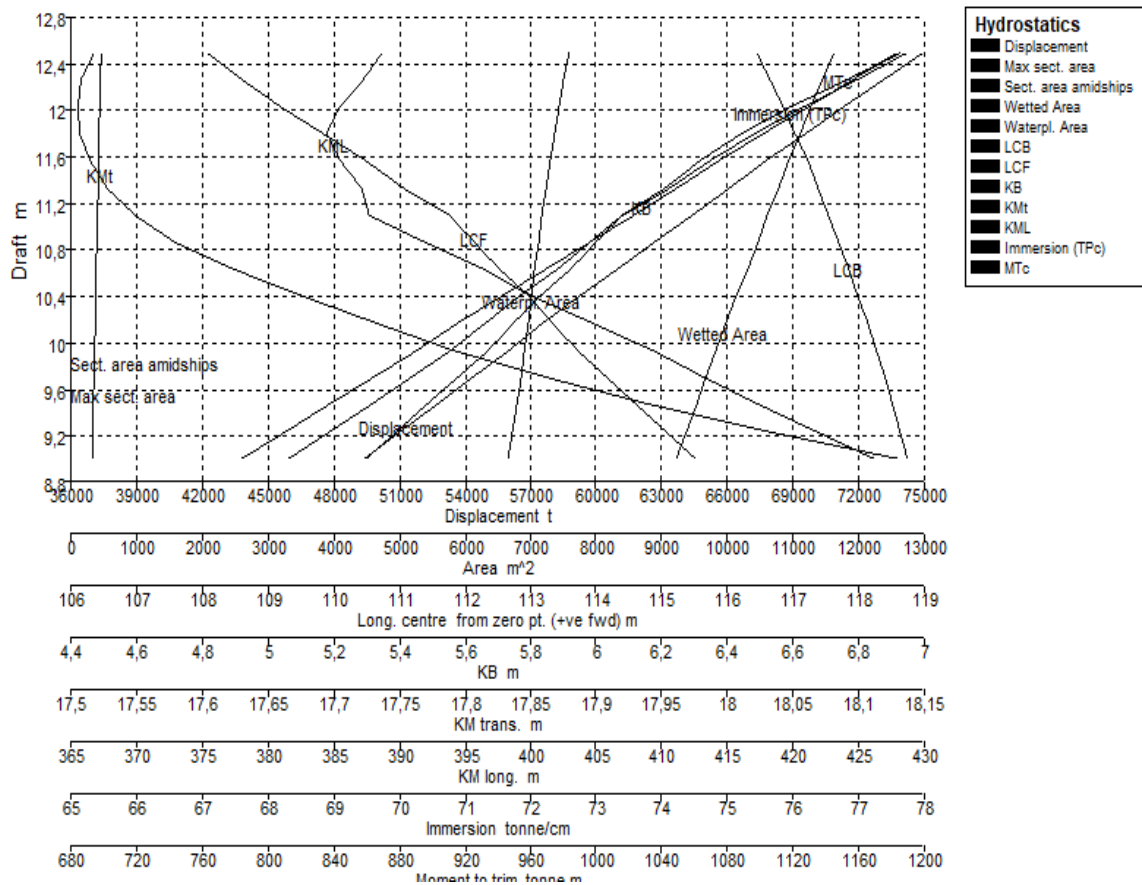
Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Draft Amidships m	9,000	9,233	9,467	9,700	9,933	10,167	10,400	10,633	10,867	11,100	11,333	11,567	11,800	12,033	12,267	12,500
Displacement t	49446	51048	52664	54294	55938	57596	59266	60949	62644	64351	66072	67808	69561	71330	73117	74923
Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Draft at FP m	9,000	9,233	9,467	9,700	9,933	10,167	10,400	10,633	10,867	11,100	11,333	11,567	11,800	12,033	12,267	12,500
Draft at AP m	9,000	9,233	9,467	9,700	9,933	10,167	10,400	10,633	10,867	11,100	11,333	11,567	11,800	12,033	12,267	12,500
Draft at LCF m	9,000	9,233	9,467	9,700	9,933	10,167	10,400	10,633	10,867	11,100	11,333	11,567	11,800	12,033	12,267	12,500
Trim (+ve by stern) m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
WL Length m	236,250	236,373	236,521	236,682	236,885	237,127	237,402	237,711	238,241	238,952	239,995	241,163	242,367	238,751	240,422	242,119
Beam max extents on WL m	37,306	37,306	37,306	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307
Wetted Area m ²	9223,247	9372,473	9520,946	9671,228	9824,436	9980,614	10139,510	10300,770	10453,630	10601,010	10775,136	10934,088	11102,179	11272,296	11441,934	11615,541
Waterpl. Area m ²	6665,041	6726,340	6785,747	6845,224	6904,310	6957,197	7008,514	7063,567	7112,188	7160,990	7230,702	7292,426	7358,199	7432,516	7509,554	7584,597
Prismatic coeff. (Cp)	0,625	0,628	0,631	0,634	0,637	0,640	0,642	0,645	0,647	0,648	0,649	0,649	0,649	0,662	0,661	0,660
Block coeff. (Cb)	0,608	0,612	0,615	0,618	0,622	0,625	0,628	0,630	0,633	0,634	0,635	0,636	0,636	0,649	0,648	0,647
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,974	0,974	0,975	0,976	0,976	0,977	0,977	0,978	0,978	0,979	0,979	0,980	0,980	0,980	0,981	0,981
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,756	0,763	0,769	0,775	0,781	0,786	0,791	0,796	0,800	0,803	0,808	0,811	0,814	0,834	0,837	0,840
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	118,739	118,630	118,514	118,390	118,260	118,123	117,983	117,838	117,689	117,537	117,377	117,209	117,029	116,841	116,647	116,445
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	115,503	115,056	114,621	114,172	113,714	113,334	112,958	112,512	112,146	111,768	111,068	110,475	109,827	109,183	108,604	108,070
KB m	4,921	5,053	5,185	5,317	5,449	5,582	5,714	5,847	5,979	6,112	6,245	6,378	6,512	6,646	6,781	6,916
KG m	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500
BMt m	13,207	12,978	12,757	12,547	12,344	12,150	11,961	11,777	11,599	11,436	11,283	11,136	10,995	10,859	10,728	10,602
BML m	421,228	416,727	412,191	407,959	403,952	399,079	394,326	390,594	385,962	381,564	380,948	379,055	378,007	378,824	380,440	381,773
GMt m	6,628	6,531	6,442	6,364	6,293	6,232	6,176	6,124	6,079	6,048	6,028	6,014	6,007	6,005	6,008	6,018
GML m	414,650	410,281	405,876	401,776	397,902	393,161	388,540	384,941	380,441	376,176	375,694	373,933	373,019	373,970	375,720	377,188

KMt m	18,128	18,031	17,942	17,864	17,793	17,732	17,676	17,624	17,579	17,548	17,528	17,514	17,507	17,505	17,508	17,518
KML m	426,150	421,781	417,376	413,276	409,402	404,661	400,040	396,441	391,941	387,676	387,194	385,433	384,519	385,470	387,220	388,688
Immersion (TPc) tonne/cm	68,317	68,945	69,554	70,164	70,769	71,311	71,837	72,402	72,900	73,400	74,115	74,747	75,422	76,183	76,973	77,742
MTc tonne.m	860,205	878,707	896,787	915,207	933,828	950,047	966,103	984,333	999,887	1015,616	1041,446	1063,803	1088,634	1119,168	1152,575	1185,663
RM at 1deg = GMT.Disp.sim(1) tonne.m	5720,022	5818,418	5920,921	6029,817	6143,418	6263,903	6387,579	6513,978	6645,582	6792,898	6951,238	7117,216	7292,499	7475,905	7666,903	7869,288
Max deck inclination deg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Trim angle (+ve by stern) deg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Εικόνα 85 – Απεικόνιση των υδροστατικών χαρακτηριστικών της γάστρας του μοντέλου για βυθίσματα από 9 m έως 12,5 m.

Επιπλέον στην **εικόνα 86** παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των υδροστατικών αποτελεσμάτων για τα συγκεκριμένα βυθίσματα σε συνδυασμό όλων των αριθμητικών αποτελεσμάτων του πίνακα της **εικόνας 85**.



Εικόνα 86 – Γραφική παράσταση των υδροστατικών αποτελεσμάτων του μοντέλου της γάστρας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω του προγράμματος μπορεί να υπολογιστεί η ισορροπία του πλοίου σε βύθισμα $T = 12,517 \text{ m}$ και Εκτόπισμα $\Delta = 75315 \text{ m}$.

Βέβαια, είναι γεγονός ότι υπάρχει μικρή διαφορά των αποτελεσμάτων της γάστρας του μοντέλου μας σε σχέση με την πραγματική γάστρα του πλοίου από τις μετρήσεις του **Stability Booklet**. Για παράδειγμα στο μοντέλο της γάστρας το $GM_M = 0,632 \text{ m}$ ενώ στο πραγματικό πλοίο είναι περίπου $GM_R = 0,697 \text{ m}$.

Αυτές οι διαφορές είναι απολύτως λογικές, καθώς οι 2 γάστρες δεν έχουν ακριβώς τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Υπήρξαν κάποιες διαφοροποιήσεις κατά τη σχεδίαση του μοντέλου της γάστρας από το σχεδιαστικό πρόγραμμα **rhino 3d** κάτι το οποίο είναι σε μία τάξη ανοχής πολύ μικρή κατά προσέγγιση και δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη μελέτη κριτηρίων ευστάθειας από το υδροστατικό πρόγραμμα **Maxsurf**.

Equilibrium Calculation - RAF Container

Loadcase - Full Load LC10

Damage Case - Intact

Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Fluid analysis method: Use corrected VCG

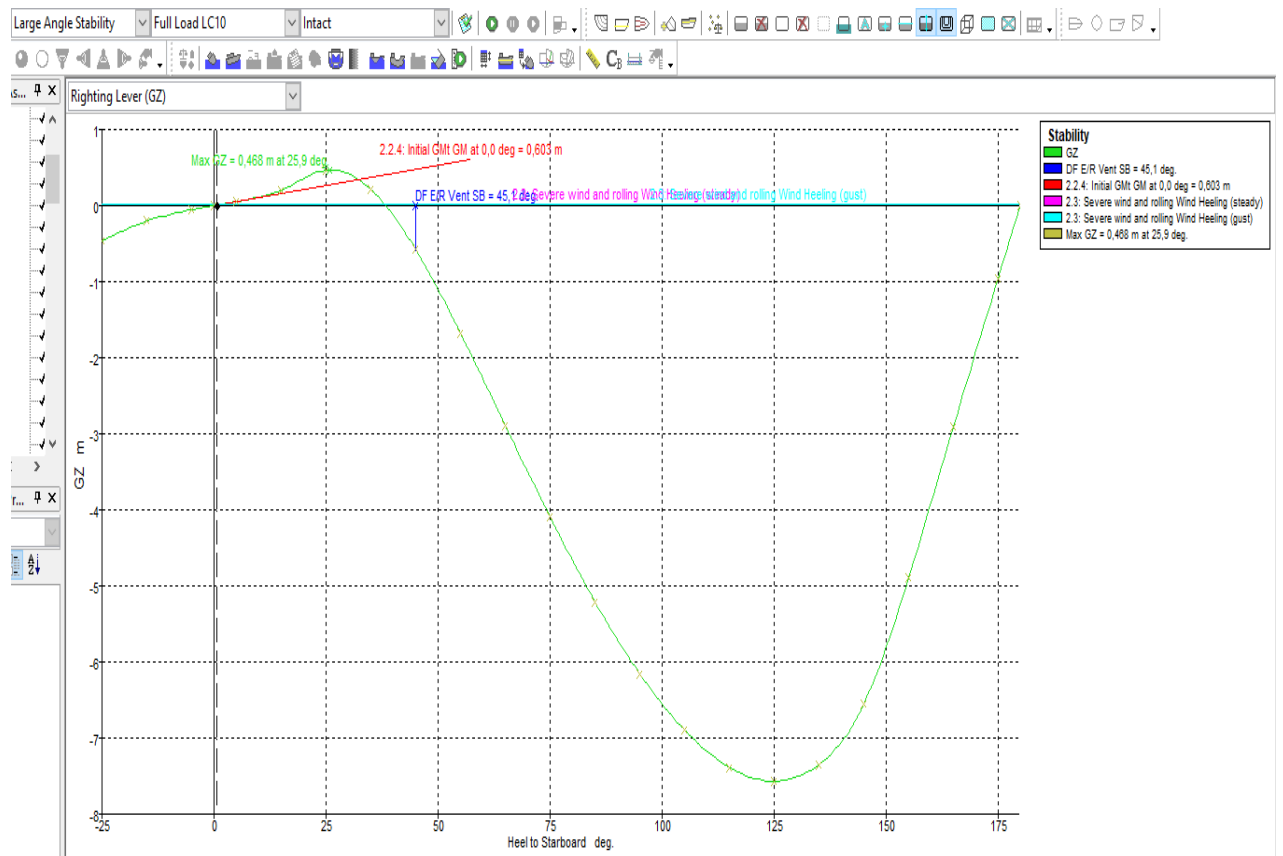
Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Displacement	1	75318,000	75318,000			115,320	0,000	16,980	0,000	User Specified
Total Loadcase			75318,000	0,000	0,000	115,320	0,000	16,980	0,000	
FS correction								0,000		
VCG fluid								16,980		

Draft Amidships m	12,517
Displacement t	75315
Heel deg	0,0
Draft at FP m	12,178
Draft at AP m	12,856
Draft at LCF m	12,552
Trim (+ve by stern) m	0,678
WL Length m	242,322
Beam max extents on WL m	37,307
Wetted Area m²	11676,418
Waterpl. Area m²	7637,991
Prismatic coeff. (Cp)	0,661
Block coeff. (Cb)	0,635
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,983
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,845
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	115,304
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	106,888
KB m	6,946
KG fluid m	16,980
BMt m	10,636
BML m	388,031
GMt corrected m	0,602

GML m	377,998
KMt m	17,582
KML m	394,976
Immersion (TPc) tonne/cm	78,289
MTc tonne.m	1194,410
RM at 1deg = GMt.Disp.sin (1) tonne.m	791,329
Max deck inclination deg	0,1630
Trim angle (+ve by stern) deg	0,1630

Key point	Type	Freeboard m
Margin Line (freeboard pos = -3,702 m)		7,058
Deck Edge (freeboard pos = -3,702 m)		7,134
DF E/R Vent PS	Downflooding point	11,273
DF E/R Vent SB	Downflooding point	11,273

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς **GZcurve** από **-25°** έως **180°** για **starboard** πλευρά του πλοίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 87**:



Εικόνα 87 – Διάγραμμα ευστάθειας καμπύλης GZ από -25° και 180°.

Όπου **GZ** είναι η καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς και **severe wind and rolling wind heeling angle** για **steady** και **gust** συνθήκες ανέμου. Δηλαδή σταθερό άνεμο και ριπές ανέμου που δέχεται η γάστρα του πλοίου από αυτή την πλευρά.

Παρατηρούμε ότι το μέγιστο **GZ_{max} = 0,468 m** στις **25,9°** μοίρες και η αρχική επαπτόμενη της είναι **GZ_{initial} = 0,603 m**.

Κλείνοντας θα εξετάσουμε αν η γάστρα του πλοίου μας ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στα κριτήρια ευστάθειας του **I.M.O (Intact Stability Criteria)** για τη συγκεκριμένη συνθήκη φόρτωσης **LC10** μέσω του προγράμματος **Maxsurf**. Όπως φαίνεται στις παρακάτω **εικόνες 88** και **89**:

267(85) Ch2 - General Criteria			Value	Units
1	<input type="checkbox"/>	L, length on waterline, user spec.	66.97	m
2	<input checked="" type="checkbox"/>	L, Stability calculated		m
3	<input type="checkbox"/>	B, moulded breadth, user spec.	15.50	m
4	<input checked="" type="checkbox"/>	B, Stability calculated		m
5	<input type="checkbox"/>	d, mean moulded draft, user spec.	4.329	m
6	<input checked="" type="checkbox"/>	d, Stability calculated		m
7	<input type="checkbox"/>	GMf, fluid corrected metacentric height, user spec.	1.273	m
8	<input checked="" type="checkbox"/>	GMf, Stability calculated		m
9	<input type="checkbox"/>	VCG, centre of gravity above zero point, user spec.	5.705	m
10	<input checked="" type="checkbox"/>	VCG, Stability calculated		m
11	<input type="checkbox"/>	CB, block coefficient, user spec.	0.717	
12	<input checked="" type="checkbox"/>	CB, Stability calculated		
13	<input type="checkbox"/>	Ak, keel area, user spec.	57.60	m ²
14	<input type="checkbox"/>	Method for k factor	Tabul	
15	<input checked="" type="checkbox"/>	Evaluates to	17.1	deg

Εικόνα 88 – Απεικόνιση γενικών κριτηρίων 2.3 I.M.O roll back angle.

267(85) Ch2 - General Criteria			Value	Units
1	<input type="checkbox"/>	Wind arm: $a P A (h - H) / (g \text{ disp.} \cos^n(\phi))$		
2	<input type="checkbox"/>	constant: a =	0.999	
3	<input type="checkbox"/>	wind model	Press	
4	<input type="checkbox"/>	wind pressure: P =	504.0	Pa
5	<input checked="" type="checkbox"/>	area centroid height (from zero point): h =	22.95	m
6	<input checked="" type="checkbox"/>	total area: A =	4815.	m ²
7	<input type="checkbox"/>	additional area: A =	0.000	m ²
8	<input type="checkbox"/>	height of lateral resistance: H =	0.000	m
9	<input type="checkbox"/>	H = mean draft / 2		m
10	<input checked="" type="checkbox"/>	H = vert. centre of projected lat. u'water area		m
11	<input type="checkbox"/>	H = waterline		m
12	<input type="checkbox"/>	cosine power: n =	0	
13	<input type="checkbox"/>	gust ratio	1.5	
14	<input type="checkbox"/>	Area2 integrated to the lesser of		
15	<input type="checkbox"/>	roll back angle from equilibrium (with steady heel arm)	25.0	deg
16	<input checked="" type="checkbox"/>	2.3: IMO roll back angle	17.1	deg
17	<input type="checkbox"/>	roll back to equilibrium (ignoring heel arm)		deg
18	<input type="checkbox"/>	Area 1 upper integration range, to the lesser of:		
19	<input checked="" type="checkbox"/>	spec. heel angle	50.0	deg
20	<input type="checkbox"/>	angle of first GZ peak		deg
21	<input type="checkbox"/>	angle of max. GZ		deg
22	<input type="checkbox"/>	angle of max. GZ above gust heel arm		deg
23	<input checked="" type="checkbox"/>	first downflooding angle		deg

Εικόνα 89 – Απεικόνιση γενικών κριτηρίων ανέμου ευστάθειας 2.3 Severe wind and rolling.

Επιπλέον στις **εικόνες 90** και **91** μέσω του προγράμματος **Maxsurf** αναλύονται για γωνίες εγκάρσιας κλίσης από **-25°** έως **180°** από τη δεξιά πλευρά του πλοίου (**starboard side**) όλα τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου σε πίνακες.

Heel to Starboard deg	-25	-15	-5	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
GZ m	-0,466	-0,203	-0,054	0,001	0,055	0,205	0,464	0,21	-0,578	-1,677	-2,89	-4,095	-5,206	-6,156	-6,897
Area under GZ curve from zero heel m.deg	4,6077	1,344	0,1298	0,0005	0,1437	1,3154	4,7992	8,6842	7,1991	-3,9058	-26,704	-61,673	-108,28	-165,25	-230,7
Displacement t	75318	75318	75318	75318	75318	75318	75318	75315	75312	75318	75318	75318	75315	75317	75318
Draft at FP m	12,052	12,186	12,182	12,174	12,177	12,168	12,032	11,977	12,014	12,186	12,634	13,891	20,688	-0,131	-7,032
Draft at AP m	12,053	12,525	12,814	12,86	12,823	12,553	12,087	11,953	12,208	12,711	13,619	15,71	26,09	5,271	-5,213
WL Length m	242,437	242,323	242,321	242,324	242,324	242,333	242,462	247,55	247,995	248,284	249,304	249,906	250,124	249,981	249,822
Beam max extents on WL m	39,204	38,623	37,45	37,307	37,45	38,623	39,183	33,946	28,284	24,415	22,068	21,403	22,207	22,983	22,978
Wetted Area m ²	11923,4	11645,4	11665,2	11676,9	11667,3	11650,9	11924,6	12685,9	13061,3	13236,6	13329,3	13368,2	13370	13345,1	13325,4
Waterpl. Area m ²	7543,83	7686,71	7634,19	7638,38	7636,03	7683,57	7533,81	6448,31	5626,71	5102,7	4810,86	4678,16	4658,79	4750,11	4855,92
Prismatic coeff. (Cp)	0,688	0,671	0,662	0,661	0,662	0,67	0,688	0,7	0,721	0,735	0,741	0,746	0,749	0,753	0,755
Block coeff. (Cb)	0,446	0,499	0,591	0,635	0,591	0,498	0,446	0,465	0,524	0,584	0,635	0,659	0,655	0,617	0,587
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	115,318	115,307	115,293	115,291	115,293	115,304	115,317	115,321	115,313	115,307	115,303	115,303	115,311	115,31	115,307
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	113,06	109,459	107,288	106,878	107,256	109,476	113,166	117,739	120,771	123,3	125,234	126,414	126,455	125,865	124,516
Max deck inclination deg	25	15,0002	5,0023	0,1648	5,0024	15,0003	25	35	45	55	65	75	85	95	105
Trim angle (+ve by stern) deg	0,0001	0,0815	0,1519	0,1648	0,1554	0,0925	0,0132	-0,0057	0,0467	0,1263	0,2368	0,4373	1,2984	1,2984	0,4373

Εικόνα 90 – Πίνακας περιγραφής υδροστατικών πλοίου από -25 έως 105 μοίρες εγκάρσιας κλίσης.

Heel to Starboard deg	115	125	135	145	155	165	175	180
GZ m	-7,387	-7,569	-7,35	-6,552	-4,897	-2,912	-0,959	0,008
Area under GZ curve from zero heel m.deg	-302,35	-377,42	-452,39	-522,56	-580,36	-619,45	-638,77	-641,14
Displacement t	75318	75324	75323	75318	75318	75319	75319	75318
Draft at FP m	-8,523	-9,219	-9,693	-10,039	-10,282	-10,329	-10,283	-10,272
Draft at AP m	-7,409	-8,524	-9,281	-9,941	-10,737	-11,411	-11,781	-11,832
WL Length m	250,109	250,13	250,086	250,014	249,935	249,924	246,42	244,456
Beam max extents on WL m	23,064	24,415	28,284	34,824	40,439	38,615	37,449	37,307
Wetted Area m ²	13331,3	13411,2	13588,5	13955,4	14491,3	14570,3	14609,6	14620,3
Waterpl. Area m ²	5033,43	5339,12	5869,71	6711,69	7597,93	7440,03	7317,69	7297,4
Prismatic coeff. (Cp)	0,758	0,764	0,776	0,797	0,832	0,856	0,871	0,878
Block coeff. (Cb)	0,565	0,529	0,468	0,403	0,381	0,454	0,567	0,622
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	115,297	115,315	115,318	115,319	115,32	115,321	115,317	115,313
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	123,897	122,786	120,873	117,294	113,023	110,18	109,406	109,384
Max deck inclination deg	115	125	135	145	155	164,998	174,987	179,625
Trim angle (+ve by stern) deg	0,2678	0,1672	0,0991	0,0234	-0,1093	-0,26	-0,3602	-0,3749

Εικόνα 91 – Πίνακας περιγραφής υδροστατικών πλοίου από 115 έως 180 μοίρες.

**Αποτελέσματα γενικών κριτηρίων ευστάθειας για κατάσταση φόρτωσης
LC10 – General IMO Intact Stability Criteria**

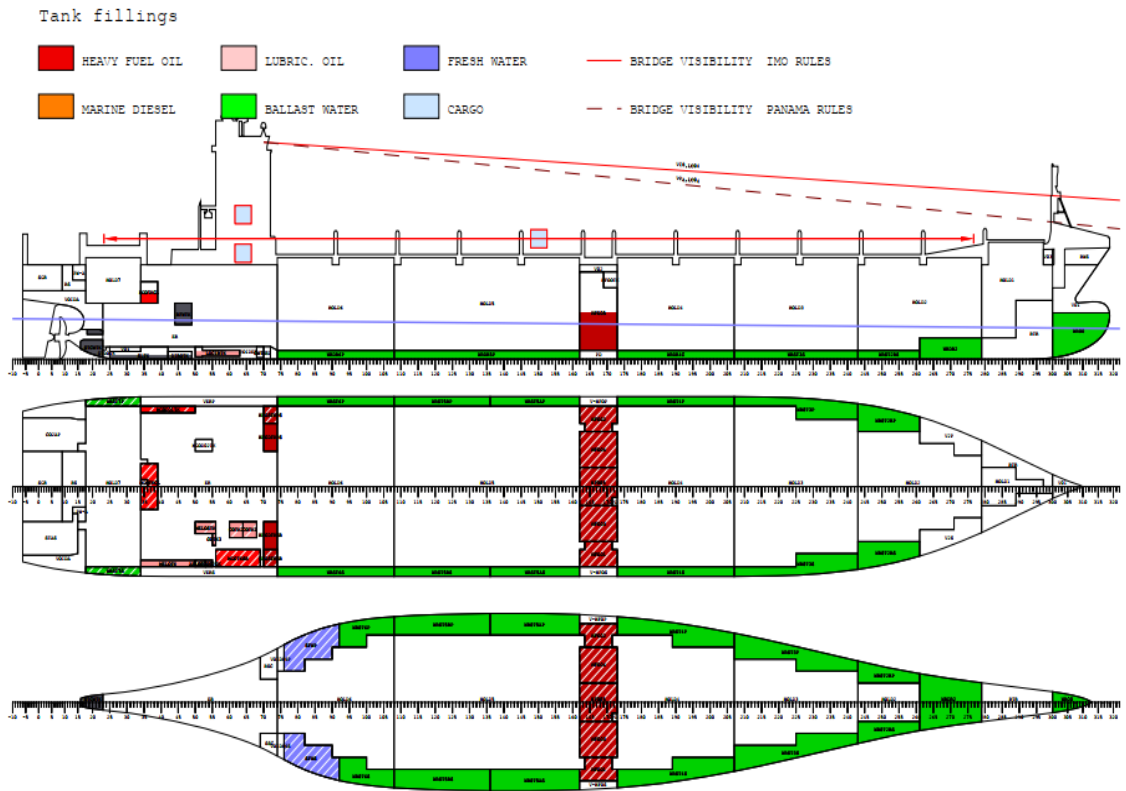
Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: IMO roll back angle	17,2	deg			
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.deg	7,0645	Pass	+124,18
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.deg	9,0423	Pass	+75,35
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	1,9778	Pass	+15,06
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	0,414	Pass	+107,00
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	25,9	Pass	+3,58
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMT	0,150	m	0,603	Pass	+302,00
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: Severe wind and rolling					
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16,0	deg	1,2	Pass	+92,74
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80,00	%	5,11	Pass	+93,61
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100,00	%	430,67	Pass	+330,67

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα αποτελεσμάτων κριτηρίων ευστάθειας, παρατηρούμε ότι η γάστρα του μοντέλου μας περνάει αποτελεσματικά τα κριτήρια του **I.M.O.**

Συνεπώς δε θα χρειαστεί κάποια επιπλέον διαφοροποίηση της γεωμετρίας της γάστρας του μοντέλου εφόσον τα κριτήρια ευστάθειας ικανοποιούνται σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υδροστατικών από το πρόγραμμα **Maxsurf**.

6.4 Περίπτωση κατάστασης φόρτωσης έρματος πλοίου LC04 (Loading Condition - Normal Ballast Condition/Midway) – Έλεγχος κριτηρίων ευστάθειας στο υδροστατικό πρόγραμμα Maxsurf Stability Advanced.

Σε αυτή την περίπτωση θα ασχοληθούμε με την κατάσταση φόρτωσης έρματος **LC04** όπως απεικονίζεται στην παρακάτω **εικόνα 92** από το **Stability Booklet**.



Εικόνα 92 - Απεικόνιση κατάστασης φόρτωσης έρματος χωρίς Container από το Stability Booklet.

Στη συνέχεια στην παρακάτω **εικόνα 93**, παρουσιάζονται τα υδροστατικά στοιχεία φόρτωσης (**Loading Components**) από το **stability Booklet** του πλοίου, τα οποία θα πρέπει να τα περάσουμε στο πρόγραμμα **Maxsurf Stability** για να υπολογίσουμε τα υδροστατικά του στοιχεία.

FLOATING POSITION			

Displacement	39483 t	Density	1.025 t/m ³
Keel thickness	0.017 m		
Mean draught (bottom of keel)	7.42 m		
Draught fore (bottom of keel)	6.48 m	Trim	-1.89 m
Draught aft (bottom of keel)	8.37 m	Heel	0.0 deg
KM above the moulded base	19.49 m		
KG (solid)	9.47 m	GMO (solid)	10.02 m
Free surface correction	0.12 m		0.12 m
KG (fluid)	9.59 m	GM (FLUID)	9.90 m

Propeller immersion ratio I/D:	44.8 % => 50%		
Propeller tip immersion:	-0.446 m		
Bridge visibility:	283.3 m	<=	499.9 m
Lightweight	19100.0	104.45	-0.05 13.50
Deadweight	20382.8	126.23	0.07 5.69
Total weight	39482.8	115.69	0.01 9.47

Εικόνα 93 – Απεικόνιση floating position κατάστασης φόρτωσης έρματος LC04.

Στη συνέχεια περνάμε τα στοιχεία αυτά στο πρόγραμμα **Maxsurf Stability Advanced** όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 94**:

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	39483,000	39483,000			115,690	0,000	9,590	0,000	User Specifi
2	Total Loadca			39483,000	0,000	0,000	115,690	0,000	9,590	0,000	
3	FS correction								0,000		
4	VCG fluid								9,590		

Εικόνα 94 – Απεικόνιση των υδροστατικών στοιχείων φόρτωσης LC04 στο υδροστατικό πρόγραμμα Maxsurf.

Συνεπώς μέσω του υδροστατικού προγράμματος **MaxSurf** υπολογίζουμε τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου μέσω της επιλογής **run - report** με βάση το συγκεκριμένο βύθισμα **Design Draft = 7,404 m** που δίνεται από το **stability booklet** στη συγκεκριμένη συνθήκη φόρτωσης **LC04**.

Hydrostatics - RAF Container

Fixed Trim = 0 m (+ve by stern)

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Draft Amidships m	7,404
Displacement t	38863
Heel deg	0,0
Draft at FP m	7,404
Draft at AP m	7,404
Draft at LCF m	7,404
Trim (+ve by stern) m	0,000
WL Length m	235,832
Beam max extents on WL m	37,306
Wetted Area m²	8195,448
Waterpl. Area m²	6228,418
Prismatic coeff. (Cp)	0,601

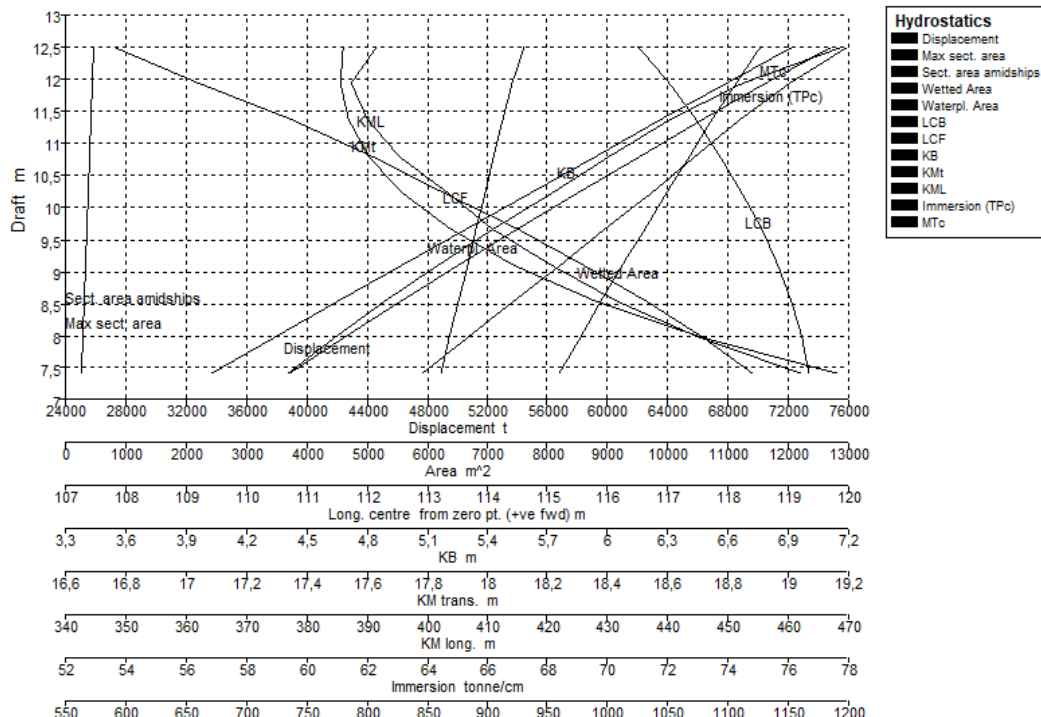
Block coeff. (Cb)	0,582
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,969
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,708
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	119,327
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	118,392
KB m	4,027
KG m	11,500
BMt m	15,132
BML m	457,961
GMt m	7,659
GML m	450,488
KMt m	19,159
KML m	461,988
Immersion (TPc) tonne/cm	63,841
MTc tonne.m	734,528
RM at 1deg = GMt.Disp.sin (1) tonne.m	5194,704
Max deck inclination deg	0,0000
Trim angle (+ve by stern) deg	0,0000

Στη συνέχεια έχει επιλεγεί για κάθε βύθισμα από **7,404 m** έως **12,5 m** υπολογισμός των υδροστατικών στοιχείων με βήμα βυθίσματος **0,455 m** όπως απεικονίζεται στην **εικόνα 95**:

Draft Amidships m	7,404	7,970	8,536	9,103	9,669	10,235	10,801	11,368	11,934	12,500
Displacement t	38863	42521	46264	50094	54010	58011	62098	66266	70523	74882
Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Draft at FP m	7,404	7,970	8,536	9,103	9,669	10,235	10,801	11,368	11,934	12,500
Draft at AP m	7,404	7,970	8,536	9,103	9,669	10,235	10,801	11,368	11,934	12,500
Draft at LCF m	7,404	7,970	8,536	9,103	9,669	10,235	10,801	11,368	11,934	12,500
Trim (+ve by stern) m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
WL Length m	235,832	235,926	236,071	236,299	236,655	237,201	238,103	240,139	242,415	242,122
Beam max extents on WL m	37,306	37,306	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,308
Wetted Area m ²	8195,448	8540,495	8891,910	9247,416	9606,335	9977,571	10343,930	10726,506	11126,757	11530,251
Waterpl. Area m ²	6228,418	6374,780	6523,775	6674,064	6819,948	6970,201	7110,085	7257,906	7417,269	7605,871
Prismatic coeff. (Cp)	0,601	0,610	0,618	0,625	0,633	0,640	0,646	0,648	0,650	0,660
Block coeff. (Cb)	0,582	0,591	0,600	0,609	0,617	0,625	0,631	0,635	0,637	0,647
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,969	0,971	0,972	0,974	0,976	0,977	0,978	0,979	0,980	0,981
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,708	0,724	0,741	0,757	0,772	0,788	0,800	0,810	0,820	0,842
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	119,327	119,213	119,045	118,823	118,550	118,229	117,862	117,461	117,010	116,514
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	118,392	117,584	116,649	115,603	114,508	113,269	112,105	110,750	109,197	107,791
KB m	4,027	4,342	4,658	4,977	5,296	5,618	5,940	6,264	6,589	6,917
KG m	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500	11,500
BMt m	15,132	14,368	13,702	13,111	12,580	12,100	11,666	11,274	10,923	10,604
BML m	457,961	440,644	426,848	415,662	405,480	397,749	389,512	383,814	380,881	384,828
GMT m	7,659	7,210	6,860	6,588	6,377	6,218	6,106	6,038	6,012	6,021
GML m	450,488	433,486	420,006	409,139	399,277	391,867	383,953	378,577	375,970	380,245
KMt m	19,159	18,710	18,360	18,088	17,877	17,718	17,606	17,538	17,512	17,521
KML m	461,988	444,986	431,506	420,639	410,777	403,367	395,453	390,077	387,470	391,745
Immersion (TPc) tonne/cm	63,841	65,341	66,869	68,409	69,904	71,445	72,878	74,394	76,027	77,960
MTc tonne.m	734,528	773,319	815,231	859,883	904,757	953,751	1000,330	1052,521	1112,422	1194,615
RM at 1deg = GMT.Disp.sin(1) tonne.m	5194,704	5350,671	5539,171	5759,448	6010,691	6295,402	6617,565	6982,460	7399,183	7868,452
Max deck inclination deg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Trim angle (+ve by stern) deg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Εικόνα 95 – Απεικόνιση των υδροστατικών στοιχείων για κάθε βύθισμα από 7,404 m έως 12,500 m.

Επιπλέον στην **εικόνα 96** παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των υδροστατικών αποτελεσμάτων για τα συγκεκριμένα βυθίσματα σε συνδυασμό όλων των αριθμητικών αποτελεσμάτων του πίνακα της **εικόνας 95**.



Εικόνα 96 – Απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων των υδροστατικών της γάστρας του πλοίου για τα παραπάνω βυθίσματα.

Επιπλέον στην **εικόνα 96** παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των υδροστατικών αποτελεσμάτων για τα συγκεκριμένα βυθίσματα σε συνδυασμό όλων των αριθμητικών αποτελεσμάτων του πίνακα της **εικόνας 95**.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω του υδροστατικού προγράμματος μπορεί να υπολογιστεί η ισορροπία του πλοίου σε βύθισμα **T = 7,485 m** και Εκτόπισμα **Δ = 39483 m**.

Βέβαια, είναι γεγονός ότι υπάρχει μικρή διαφορά των αποτελεσμάτων της γάστρας του μοντέλου μας σε σχέση με την πραγματική γάστρα του πλοίου από τις μετρήσεις του **Stability Booklet**.

Για παράδειγμα στο μοντέλο της γάστρας το **GM_M = 9,725 m** ενώ στο πραγματικό πλοίο είναι περίπου **GM_R = 9,901 m**.

Equilibrium Calculation - RAF Container

Loadcase - Ballast LC04

Damage Case - Intact

Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Fluid analysis method: Use corrected VCG

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Lightship	1	39483,000	39483,000			115,690	0,000	9,590	0,000	User Specified
Total Loadcase			39483,000	0,000	0,000	115,690	0,000	9,590	0,000	
FS correction								0,000		
VCG fluid								9,590		

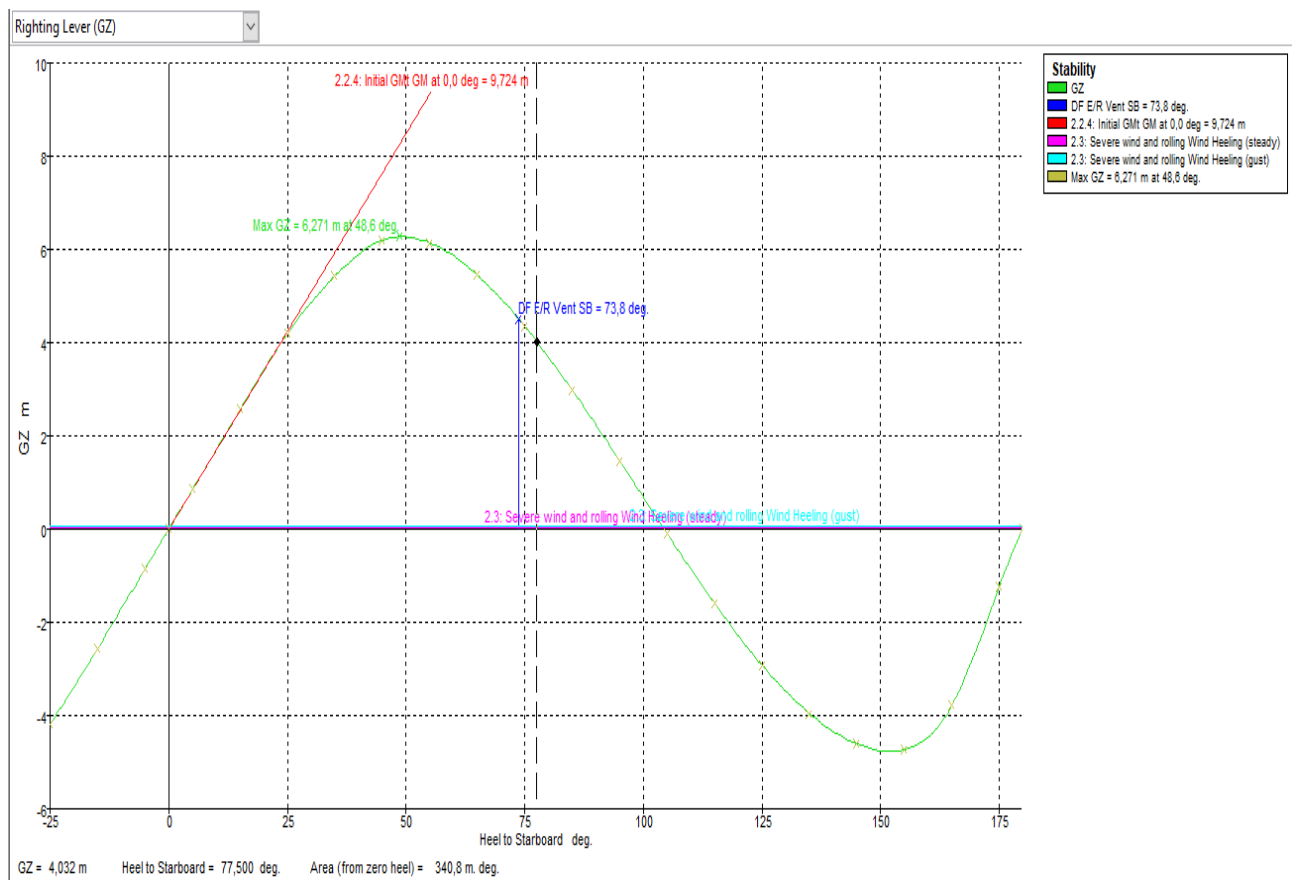
Draft Amidships m	7,485
Displacement t	39483
Heel deg	0,0
Draft at FP m	6,538
Draft at AP m	8,432

Draft at LCF m	7,510
Trim (+ve by stern) m	1,894
WL Length m	235,459
Beam max extents on WL m	37,306
Wetted Area m²	8280,499
Waterpl. Area m²	6325,405
Prismatic coeff. (Cp)	0,593
Block coeff. (Cb)	0,530
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,966
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,720
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	115,638
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	116,066
KB m	4,095
KG fluid m	9,590
BMt m	15,219
BML m	470,211
GMt corrected m	9,725
GML m	464,716
KMt m	19,314
KML m	474,292
Immersion (TPc) tonne/cm	64,835
MTc tonne.m	769,810
RM at 1deg = GMt.Disp.sin (1) tonne.m	6700,937
Max deck inclination deg	0,4553
Trim angle (+ve by stern) deg	0,4553

Key point	Type	Freeboard m
Margin Line (freeboard pos = 11,381 m)		0,332

Deck Edge (freeboard pos = 11,381 m)		0,408
DF E/R Vent PS	Downflooding point	15,904
DF E/R Vent SB	Downflooding point	15,904

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς **GZcurve** από **-25°** έως **180°** για **starboard** πλευρά του πλοίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω **εικόνα 97**.



Εικόνα 97 – Απεικόνιση αναπαράστασης καμπύλης ευστάθειας **GZ** από **-25°** έως **180°** για **Starboard side** του πλοίου.

Όπου **GZ** είναι η καμπύλη μοχλοβραχίονα επαναφοράς και **severe wind and rolling wind heeling angle** για **steady** και **gust** συνθήκες ανέμου. Δηλαδή σταθερό άνεμο και ριπές ανέμου που δέχεται η γάστρα του πλοίου από αυτή την πλευρά.

Παρατηρούμε ότι το μέγιστο **GZmax = 6,271 m** στις **48,6 μοίρες** και η αρχική εφαπτόμενη της είναι **GZinitial = 9,724 m**.

Heel to starboard deg	-25	-15	-5	0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105
GZ m	-4,2	-2,564	-0,85	0	0,849	2,563	4,197	5,424	6,196	6,139	5,454	4,354	2,987	1,469	-0,093
Area under GZ curve from zero heel m.deg	53,0997	19,2196	2,1151	-0,0002	2,117	19,1723	53,1952	101,634	160,283	222,625	281,004	330,323	367,194	389,552	396,425
Displacement t	39483	39483	39483	39483	39483	39483	39482	39482	39483	39483	39482	39482	39483	39484	39481
Draft at FP m	6,512	6,572	6,545	6,54	6,546	6,575	6,501	6,02	4,864	3,073	-0,017	-7,185	-43,542	-65,931	-29,381
Draft at AP m	6,984	7,943	8,377	8,43	8,376	7,941	6,999	5,289	2,668	-1,066	-7,373	-21,453	-89,294	-111,68	-43,99
WL Length m	245,61	235,45	235,455	235,46	235,455	235,451	245,705	249,282	248,454	246,613	245,013	247,711	249,031	249,714	250,066
Beam max extents on WL m	36,448	38,092	37,441	37,306	37,441	38,092	36,454	32,8	28,284	27,194	25,19	22,135	20,076	20,076	20,706
Wetted Area m ²	8474,99	8374,55	8291,75	8280,42	8291,67	8374,35	8461,69	8386,92	8426,02	8580,17	8588,76	8592,16	8605,07	8652,02	8724,92
Waterpl. Area m ²	6528,2	6445,01	6341,32	6325,22	6341,24	6444,88	6515,7	6492,1	6008,22	5315,93	4747,2	4349,35	4107,45	4018,88	4065,46
Prismatic coeff. (Cp)	0,623	0,615	0,596	0,593	0,596	0,615	0,623	0,629	0,636	0,644	0,652	0,651	0,656	0,666	0,68
Block coeff. (Cb)	0,343	0,395	0,498	0,53	0,498	0,395	0,342	0,346	0,39	0,406	0,45	0,53	0,622	0,548	0,478
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	115,676	115,643	115,643	115,646	115,648	115,653	115,657	115,709	115,759	115,782	115,817	115,859	115,895	115,877	115,883
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	115,511	115,942	116,049	116,072	116,052	115,948	115,698	115,965	116,98	120,455	122,984	122,564	121,518	120,774	120,193
Max deck inclination deg	25,0002	15,0033	5,0192	0,4542	5,0191	15,0033	25,0002	35,0003	45,0012	55,002	65,0023	75,0018	85,0007	94,9993	104,998
Trim angle (+ve by stern) deg	0,1134	0,3296	0,4405	0,4542	0,44	0,3283	0,1198	-0,1757	-0,5279	-0,9948	-1,7678	-3,4257	-10,866	-10,866	-3,5074

Εικόνα 98 – Απεικόνιση υδροστατικών αποτελεσμάτων γωνίας εγκάρσιας κλίσης από -25 μοίρες έως 105 μοίρες.

Heel to starboard deg	115	125	135	145	155	165	175	180
GZ m	-1,595	-2,92	-3,956	-4,613	-4,733	-3,781	-1,239	0,008
Area under GZ curve from zero heel m.deg	387,889	365,116	330,463	287,25	239,991	195,994	170,167	167,222
Displacement t	39482	39483	39483	39483	39480	39483	39483	39487
Draft at FP m	-22,054	-18,902	-17,192	-16,232	-15,757	-15,611	-15,812	-15,829
Draft at AP m	-29,982	-23,665	-19,964	-17,576	-16,107	-15,529	-15,477	-15,486
WL Length m	250,13	249,813	248,87	246,055	244,501	244,385	244,54	244,553
Beam max extents on WL m	22,068	24,29	26,524	28,064	30,241	36,453	37,451	37,309
Wetted Area m ²	8914,16	9061,52	9303,67	9676,48	10331,9	11625,1	11792,4	11801,7
Waterpl. Area m ²	4241,82	4550,5	4967,06	5511,25	6328,75	7912,52	8179,98	8162,51
Prismatic coeff. (Cp)	0,701	0,731	0,775	0,836	0,898	0,829	0,811	0,809
Block coeff. (Cb)	0,422	0,375	0,349	0,354	0,369	0,369	0,486	0,576
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	115,856	115,818	115,771	115,721	115,706	115,706	115,676	115,677
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	119,595	118,91	118,141	117,203	114,89	110,527	108,812	108,533
Max deck inclination deg	114,997	124,997	134,998	144,999	155	165	174,999	179,918
Trim angle (+ve by stern) deg	-1,905	-1,1448	-0,6664	-0,323	-0,0842	0,0198	0,0805	0,0825

Εικόνα 99 – Απεικόνιση υδροστατικών αποτελεσμάτων γωνίας εγκάρσιας κλίσης από 115 έως 180 μοίρες.

Κλείνοντας θα εξετάσουμε αν η γάστρα του πλοίου μας ανταποκρίνεται αποτελεσματικά στα κριτήρια ευστάθειας του **I.M.O (Intact Stability Criteria)** για τη συγκεκριμένη συνθήκη φόρτωσης έρματος (**Ballast condition**) **LC04** μέσω του προγράμματος **Maxsurf**.

Αποτελέσματα γενικών κριτηρίων ευστάθειας για κατάσταση φόρτωσης
LC04 – General IMO Intact Stability Criteria

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: IMO roll back angle	20,6	deg			
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.deg	75,8870	Pass	+2308,12
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.deg	129,9745	Pass	+2420,55
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	54,0875	Pass	+3046,63
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	6,271	Pass	+3035,50
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	48,6	Pass	+94,54
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0,150	m	9,724	Pass	+6382,67
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: Severe wind and rolling					
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16,0	deg	0,3	Pass	+98,39
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80,00	%	0,68	Pass	+99,15
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100,00	%	512,98	Pass	+412,98

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα αποτελεσμάτων κριτηρίων ευστάθειας, παρατηρούμε ότι η γάστρα του μοντέλου μας περνάει αποτελεσματικά τα κριτήρια του **I.M.O.**

Συνεπώς δε θα χρειαστεί κάποια επιπλέον διαφοροποίηση της γεωμετρίας της γάστρας του μοντέλου εφόσον τα κριτήρια ευστάθειας ικανοποιούνται σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υδροστατικών από το πρόγραμμα **Maxsurf**.

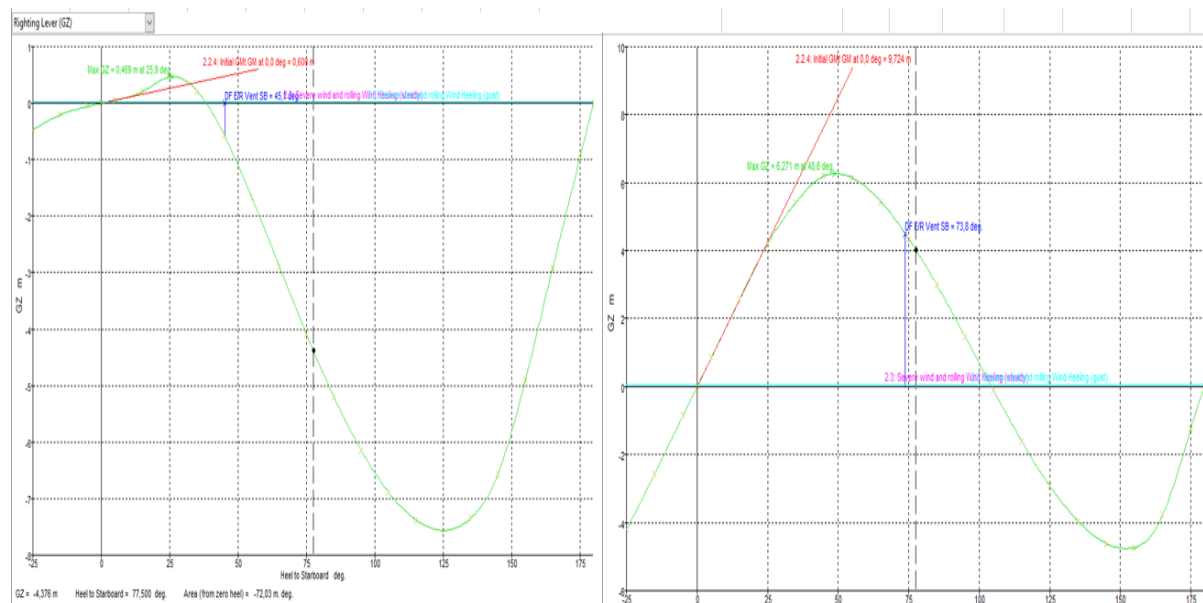
Πρέπει να τονίσουμε ότι και στις 2 συνθήκες φόρτωσης **LC10**, **LC04** το μοντέλο της γάστρας του πλοίου μας ικανοποιεί τα βασικά κριτήρια ευστάθειας του **I.M.O.**

Σίγουρα όμως υπάρχουν διαφορές στην ευστάθεια του πλοίου στις 2 συνθήκες φόρτωσης. Προφανώς το πλοίο στην κατάσταση φόρτωσης **LC04 – Ballast condition** χωρίς φόρτωση **container** η καμπύλη **GZ** συμπεριφέρεται τελείως διαφορετικά σε σχέση με την κατάσταση φόρτωσης **LC10**.

Αυτό οφείλεται στη διαφορετική επιφάνεια ισάλου (**waterplane area**) που έχει το πλοίο στις 2 συνθήκες φόρτωσης. Συνεπώς αλλάζει το **waterplane area**, άρα μεταβάλλεται σημαντικά και το **I** (**δεύτερη ροπή επιφανείας**), άρα και το **BM** του πλοίου καθώς ισχύει ότι **BM=I/Vol**.

Το αποτέλεσμα είναι να μεταβάλλεται σημαντικά το **GM** (**GM=KB+BM-KG**) και άρα και το **GZ** σημαντικά αντίστοιχα, καθώς το **GZ** είναι συνάρτηση του **GM**. Στην

περίπτωση φόρτωσης **LC04** έχουμε πολύ καλύτερη ευστάθεια, δηλαδή συμπεριφορά της καμπύλης **GZ** όπως παρατηρείται στην παρακάτω **εικόνα 100**:



Εικόνα 100 – Απεικόνιση καμπύλης GZ (αριστερά συνθήκη φόρτωσης LC10 και δεξιά συνθήκη φόρτωσης LC04).

6.5 Εκτίμηση μοντέλου – γάστρας σε φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling) μέσω του υδροστατικού προγράμματος (Maxsurf).

Είναι γεγονός ότι παραμετρικές κινήσεις διατοιχισμού (**parametric rolling**) ή οι παραμετρικές κινήσεις διατοιχισμών με μεγάλα και επικίνδυνα πλάτη κυμάτων διατοιχισμού οφείλονται στη μεταβολή της ευστάθειας του πλοίου μεταξύ της θέσης κορυφής του κύματος από το μέσο του πλοίου και της θέσης της κοιλάδας του κύματος από το μέσο του πλοίου.

Επιπλέον ο συνδυασμός των διαφόρων επικίνδυνων φαινομένων, η δυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου στους πλωραίους και πρυμναίους κυματισμούς είναι πολύ περίπλοκη. Η κίνηση του πλοίου είναι τρισδιάστατη και διάφοροι επιζήμιοι παράγοντες ή επικίνδυνα φαινόμενα όπως πρόσθετες εγκάρσιες κλίσεις λόγω βύθισης στην άκρη του καταστρώματος, παγίδευσης στο κατάστρωμα ή μετατόπισης του φορτίου λόγω μεγάλων κινήσεων διατοιχισμών μπορεί να συμβούν σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα φαινόμενα, ταυτόχρονα ή διαδοχικά. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει εξαιρετικά επικίνδυνους συνδυασμούς, οι οποίοι μπορεί να προκαλέσουν ανατροπή του πλοίου.

Περνώντας στο υπολογιστικό μέρος, θα μελετήσουμε συνδυασμό περιπτώσεων για τις 2 συνθήκες φόρτωσης που επιλέξαμε **LC10** και **LC04** της γάστρας του πλοίου για πιθανότητα εμφάνισης παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**).

Επομένως επιλέγουμε 2 συνθήκες φόρτωσης όπως φαίνεται παρακάτω από το **stability booklet** του πλοίου:

Loading Case (L.C.)	Draft [m]	Initial Metacentric Height: GMo [m]	Vertical Distance of Centroid (Fluid) KGfl [m]
LC04	7,485	9,725	9,590
LC10	12,517	0,602	16,980

Για τον τελικό σκοπό της κατασκευής διαγραμμάτων ευστάθειας του μοντέλου - πλοίου, απαιτείται πρώτα η διακύμανση του μετακεντρικού ύψους (**GMo**) κατά μήκος του κύματος.

Ως εκ τούτου, η μεθοδολογία που περιγράφεται εφαρμόζεται κανονικά σε όλες τις περιπτώσεις φόρτωσης, όμως στη δικιά μας περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε 2 (**LC10** και **LC04**) για φάσεις κυμάτων από **0** έως **0,95** και για το ίδιο εύρος απότομης κλίσης κύματος. Πρέπει να τονίσουμε επίσης ότι όλοι οι υπολογισμοί γίνονται για μία τιμή μήκους κύματος αρχικά από:

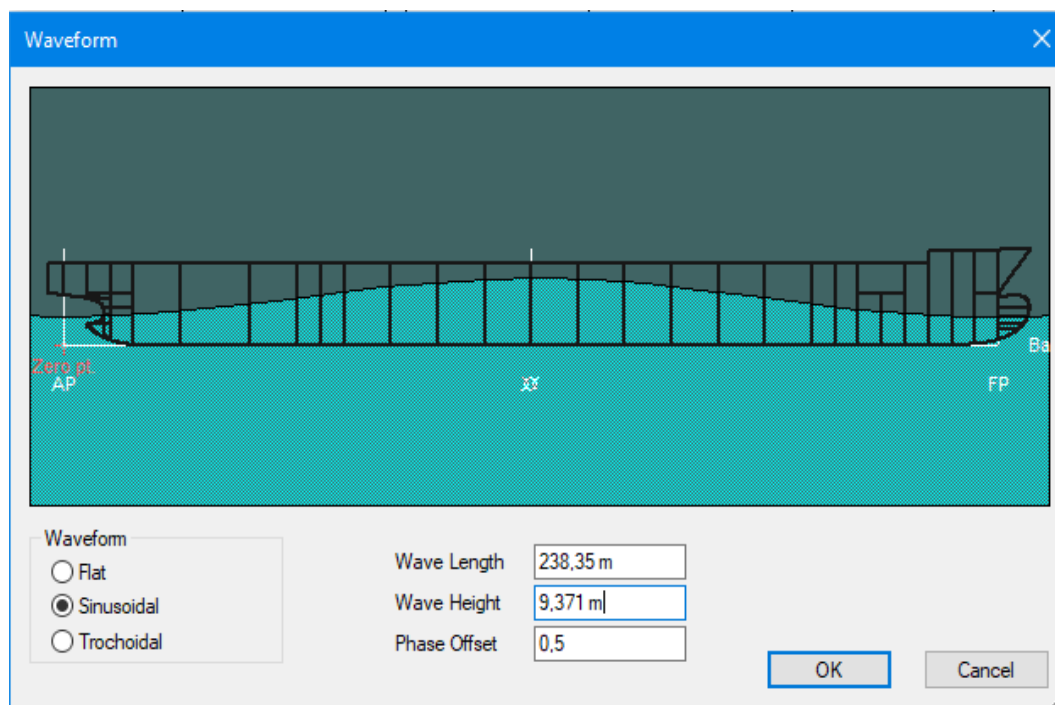
Για **Load Condition LC10**:

$$\lambda = LBP = 238,35 \text{ m}$$

$$\text{WAVE HEIGHT } H = 9,371 \text{ m}$$

$$\text{Wave steepness } H/\lambda = 1/30$$

$$\text{Phase Offset} = 0,5$$



Εικόνα 101 – Απεικόνιση φάσης κύματος Phase offset = 0,5 , $\lambda = 238,35 \text{ m}$, $H = 9,371 \text{ m}$ για LC10 φόρτωση.

Wave Phase	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
1 Draft Amidships m	13,042	12,966	12,829	12,632	12,416	12,202	11,999	11,824	11,697	11,594	11,532	11,564	11,714	11,983	12,296	12,587	12,821	12,982	13,060	13,071
2 Displacement t	75313	75318	75318	75318	75318	75318	75318	75318	75318	75312	75318	75318	75318	75314	75318	75318	75325	75318	75318	75318
3 Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4 Draft at FP m	14,121	12,521	10,806	9,102	7,654	6,611	6,040	6,020	6,632	8,081	10,172	12,421	14,587	16,533	17,869	18,437	18,316	17,688	16,735	15,550
5 Draft at AP m	11,962	13,411	14,851	16,162	17,178	17,793	17,957	17,628	16,763	15,106	12,892	10,706	8,841	7,432	6,722	6,737	7,326	8,276	9,385	10,593
6 Draft at LCF m	12,972	13,002	13,026	13,019	12,956	12,867	12,745	12,560	12,273	11,784	11,570	11,550	11,662	11,892	12,221	12,550	12,781	12,895	12,900	12,939
7 Trim (+ve by stern) m	-2,159	0,890	4,044	7,060	9,524	11,182	11,917	11,608	10,131	7,025	2,720	-1,715	-5,746	-9,101	-11,147	-11,700	-10,990	-9,413	-7,350	-4,957
8 WL Length m	239,042	242,231	249,747	250,238	250,063	249,685	249,362	249,338	249,663	250,104	250,014	230,618	229,857	231,243	232,503	232,975	232,747	232,269	232,001	232,77
9 Beam max extents on	37,306	37,307	37,307	37,307	37,307	37,308	37,308	37,308	37,308	37,309	37,309	37,309	37,308	37,308	37,308	37,308	37,307	37,307	37,307	37,307
10 Wetted Area m²	12350,8	12295,7	12193,2	12057,7	11861,7	11656,8	11442,7	11226,3	10955,0	10456,2	10341,8	10385,0	10531,9	10735,4	10991,3	11301,8	11620,7	11913,3	12212,8	12333,
11 Waterpl. Area m²	8388,30	8286,41	8150,47	8045,08	7995,27	7914,70	7792,86	7639,62	7394,00	6857,63	6680,73	6630,04	6620,95	6699,56	6921,09	7246,61	7605,95	7948,86	8297,08	8410,0
12 Prismatic coeff. (Cp)	0,785	0,792	0,721	0,682	0,643	0,605	0,572	0,541	0,516	0,498	0,493	0,537	0,548	0,559	0,577	0,598	0,627	0,657	0,700	0,749
13 Block coeff. (Cb)	0,444	0,471	0,472	0,479	0,499	0,531	0,537	0,521	0,504	0,490	0,485	0,528	0,538	0,548	0,556	0,491	0,456	0,438	0,433	0,437
14 Max Sect. area coeff. (C)	0,848	0,815	0,825	0,879	0,890	0,938	0,953	0,971	0,978	0,984	0,986	0,986	0,985	0,983	0,976	0,967	0,948	0,932	0,896	0,890
15 Waterpl. area coeff. (C)	0,941	0,917	0,875	0,862	0,857	0,850	0,838	0,821	0,794	0,735	0,716	0,771	0,772	0,777	0,798	0,834	0,876	0,917	0,959	0,968
16 LCB from zero pt. (+ve)	115,407	115,287	115,161	115,034	114,927	114,857	114,827	114,843	114,909	115,034	115,213	115,399	115,558	115,701	115,782	115,806	115,777	115,706	115,602	115,53
17 LCF from zero pt. (+ve)	111,529	109,658	107,564	106,100	105,668	105,013	104,260	104,066	105,635	112,733	115,893	117,224	116,988	116,810	117,576	118,426	118,308	116,961	114,010	112,81
18 KB m	7,508	7,509	7,456	7,364	7,260	7,181	7,153	7,182	7,258	7,334	7,354	7,313	7,241	7,161	7,102	7,095	7,148	7,243	7,353	7,451
19 KG fluid m	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980	16,980
20 BMt m	12,067	12,053	11,945	11,797	11,627	11,411	11,106	10,669	9,987	9,315	9,034	8,936	8,966	9,117	9,383	9,775	10,292	10,869	11,479	11,907
21 BML m	508,985	486,486	460,109	442,841	439,244	429,307	412,240	391,961	360,445	288,230	269,996	265,568	261,503	268,256	297,805	344,434	397,117	448,900	504,195	518,32
22 GML corrected m	2,594	2,582	2,420	2,177	1,899	1,601	1,266	0,880	0,256	-0,335	-0,593	-0,731	-0,776	-0,710	-0,506	-0,122	0,449	1,125	1,848	2,376
23 GML m	499,513	477,015	450,584	433,221	429,516	419,497	402,401	382,152	350,714	278,580	260,369	255,902	251,761	258,430	287,917	334,537	387,275	439,155	494,564	508,79
24 KML m	19,574	19,582	19,400	19,156	18,878	18,580	18,245	17,839	17,235	16,645	16,387	16,249	16,204	16,271	16,475	16,858	17,429	18,104	18,826	19,356
25 KML m	516,473	493,992	467,499	450,011	446,154	436,016	418,879	398,679	367,378	295,439	277,332	272,875	268,668	275,222	304,582	351,114	403,844	455,793	511,309	525,66
26 Immersion (TPc) tonne/	85,980	84,936	83,542	82,462	81,952	81,126	79,877	78,306	75,788	70,291	68,478	67,958	67,865	68,670	70,941	74,278	77,961	81,476	85,045	86,203
27 MTc tonne.m	1578,35	1507,35	1423,83	1368,96	1357,26	1325,60	1271,57	1207,58	1108,24	880,238	822,758	808,642	795,558	816,590	909,814	1057,12	1223,89	1387,72	1562,81	1607,7
28 RM at 1deg = GML Disp	3409,76	3393,90	3181,63	2861,45	2496,40	2104,64	1684,65	1130,09	336,082	-440,50	-778,96	-960,94	-1020,0	-932,69	-664,49	-160,74	590,821	1478,84	2428,60	3123,0
29 Max deck inclination de	0,5189	0,2140	0,9721	1,6966	2,2882	2,6861	2,8622	2,7883	2,4339	1,6881	0,6539	0,4123	1,3809	2,1867	2,6777	2,8102	2,6400	2,2615	1,7663	1,1913
30 Trim angle (+ve by ster	-0,5189	0,2140	0,9721	1,6966	2,2882	2,6861	2,8622	2,7883	2,4339	1,6881	0,6539	-0,4123	-1,3809	-2,1867	-2,6777	-2,8102	-2,6400	-2,2615	-1,7663	-1,1913

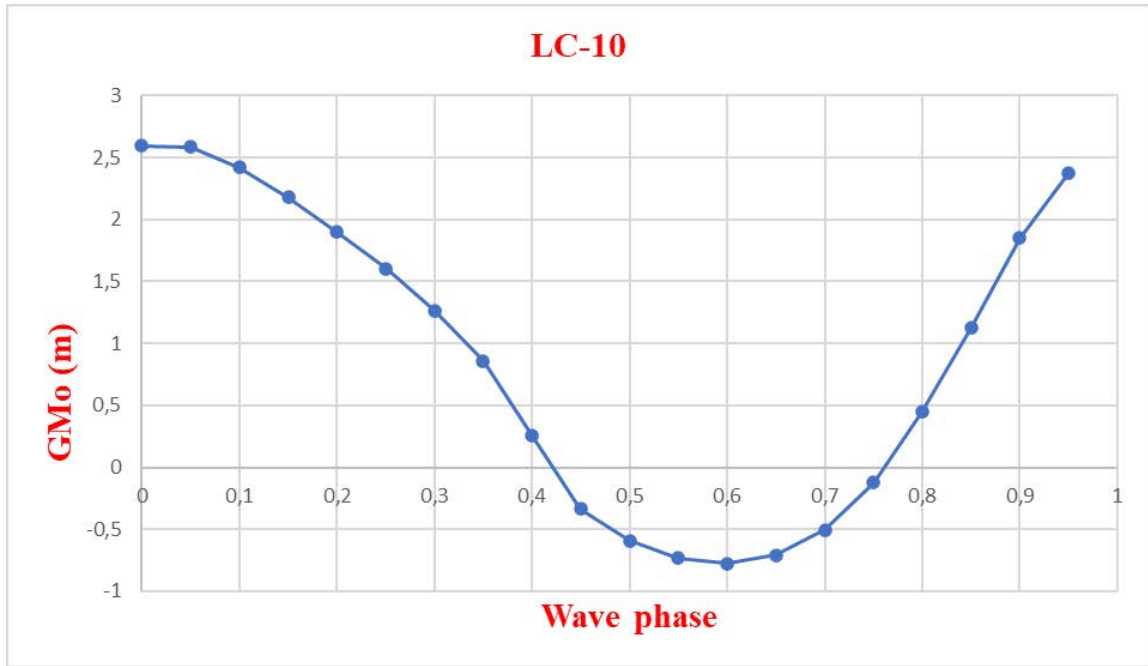
Εικόνα 102 – Απεικόνιση των υδροστατικών στοιχείων του πλοίου για φάση κύματος από 0 έως 0,95.

Παρατηρούμε ότι το πλοίο στη φάση κύματος **0,45** έως **0,75** έχει αρνητικό **GM**, το μεγαλύτερο κομμάτι της γάστρας του πλοίου κατά τον διαμήκη άξονα βυθίζεται όταν η κορυφή του κύματος (**wave crest**) βρίσκεται στο μέσο του πλοίου.

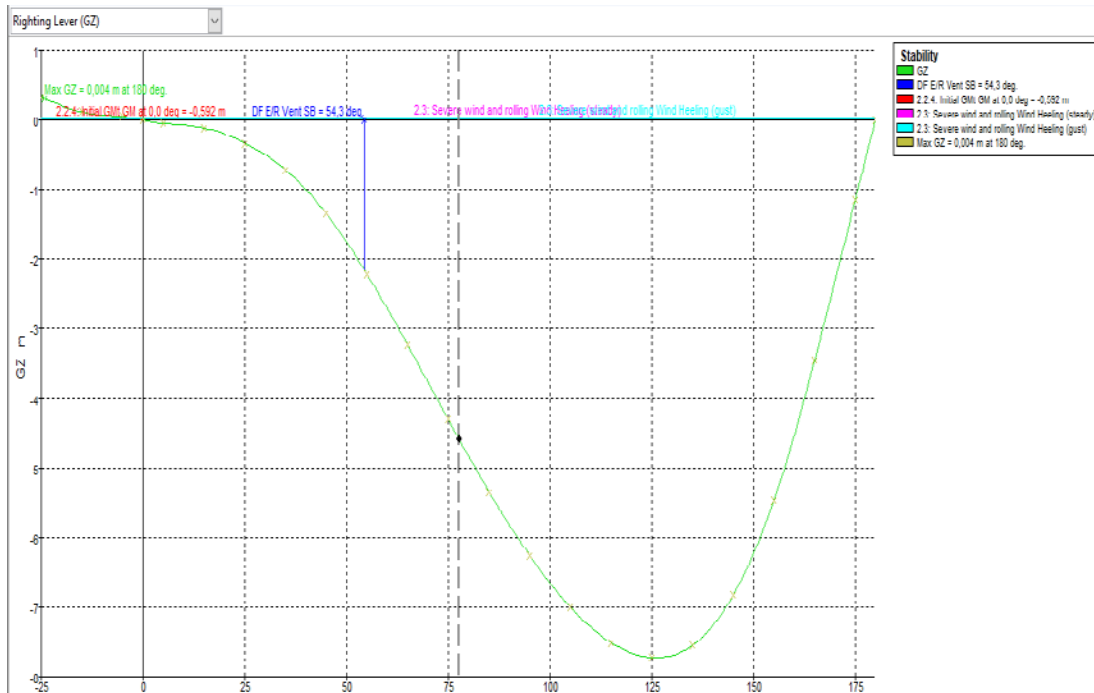
Σύμφωνα με τη θεωρία, όταν το μήκος κύματος είναι όσο το μήκος του πλοίου ή έως 2 φορές το μήκος του πλοίου, υπάρχει περίπτωση απώλειας ευστάθειας του πλοίου προκαλώντας παραμετρικό διατοιχισμό. Σίγουρα αυτό το φαινόμενο μπορεί να δημιουργηθεί πιο έντονα, όταν η φυσική περίοδος της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) είναι ίση με περίπου με το διπλάσιο της περιόδου συναντήσεων κυμάτων.

Επιπλέον παρατηρούμε μέσω της γραφικής παράστασης στην **εικόνα 103** ότι το **GM = - 0,592 m**. Έχουμε **αρνητικό GM** επομένως παρουσιάζεται απώλεια ευστάθειας του πλοίου για αυτά τα χαρακτηριστικά φάσης κύματος.

Ουσιαστικά σε φάση κύματος από **0,5** έως **0,7** έχουμε αρνητικό πρόσημο της καμπύλης **GZ**, άρα και του **GM** καθώς αλλάζει το (**waterplane area**), άρα μεταβάλλεται σημαντικά και το **I** (**δεύτερη ροπή επιφανείας**), άρα και το **BM** του πλοίου καθώς ισχύει ότι **BM=I/Vol**.



Εικόνα 103 – Γραφική Παράσταση του GM συναρτήσει φάσης κύματος για μήκος $\lambda = 238,35$ m.



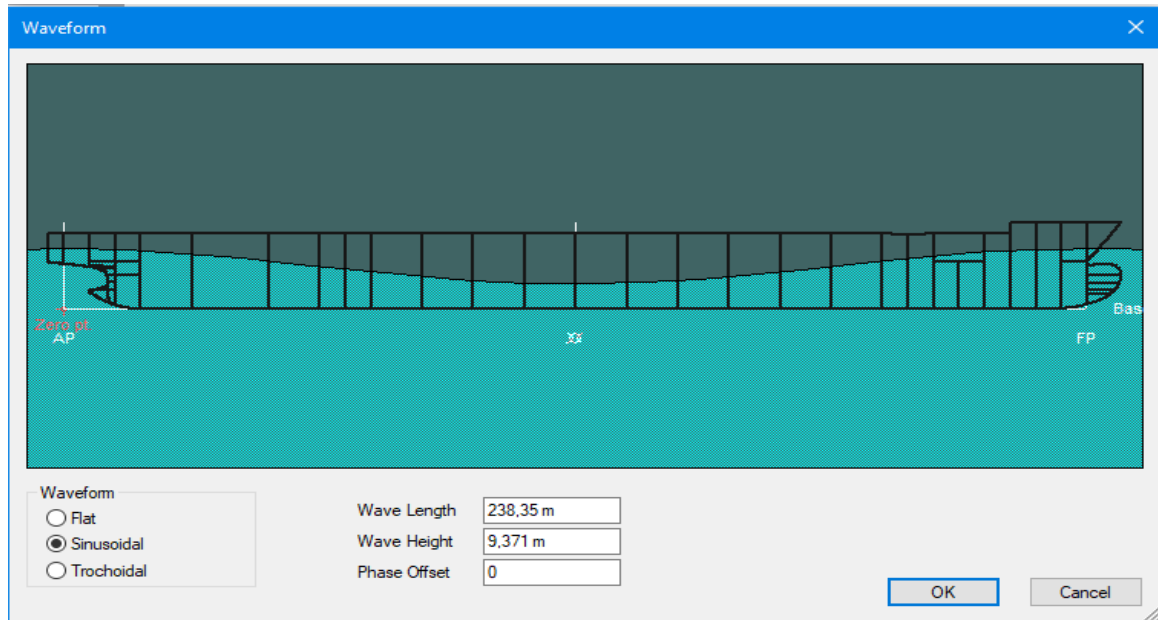
Εικόνα 104 – Απεικόνιση γραφικής παράστασης ευστάθειας GZ για κατάσταση φόρτωσης LC10 και φάσης κύματος Phase offset = 0,5 , $\lambda = 238,35$ m, H = 9,371 m.

$$\lambda = LBP = 238,35 \text{ m}$$

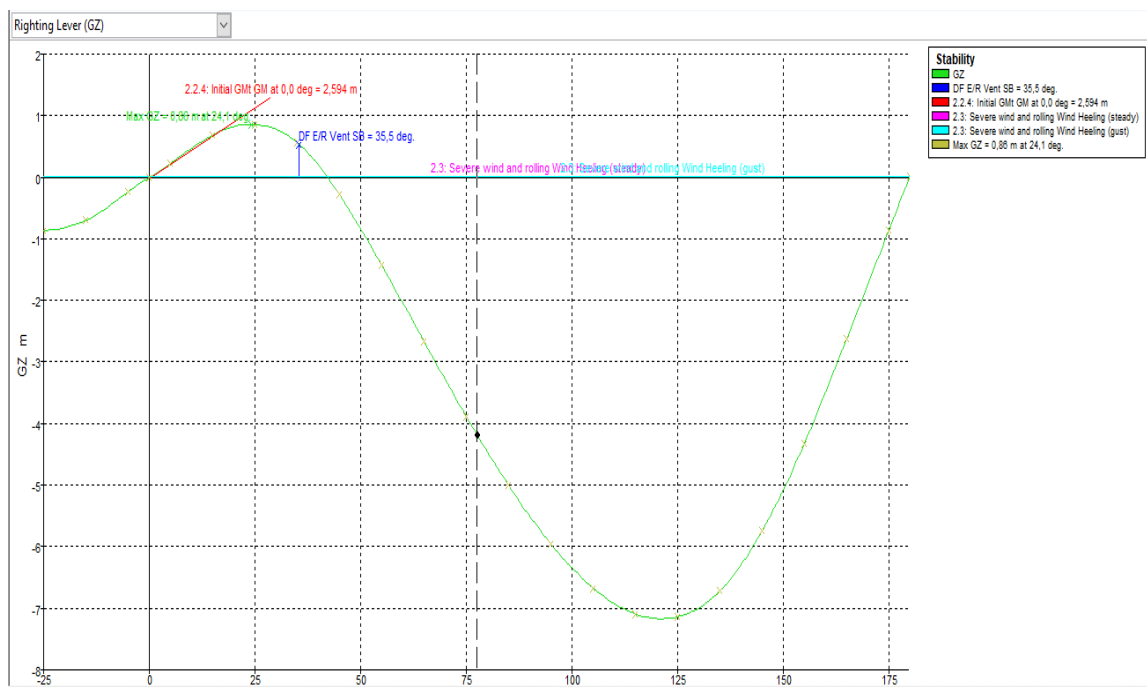
WAVE HEIGHT $H = 9,371 \text{ m}$

Wave steepness $H/\lambda = 1/25$

Phase Offset = 0



Εικόνα 105 - Απεικόνιση φάσης κύματος Phase offset = 0,5 , $\lambda = 238,35 \text{ m}$, $H = 9,371 \text{ m}$ για LC10 φόρτωση



Εικόνα 107 - Απεικόνιση γραφικής παράστασης ευστάθειας GZ για κατάσταση φόρτωσης LC10 και φάσης κύματος Phase offset = 0 , $\lambda = 238,35 \text{ m}$, $H = 9,371 \text{ m}$.

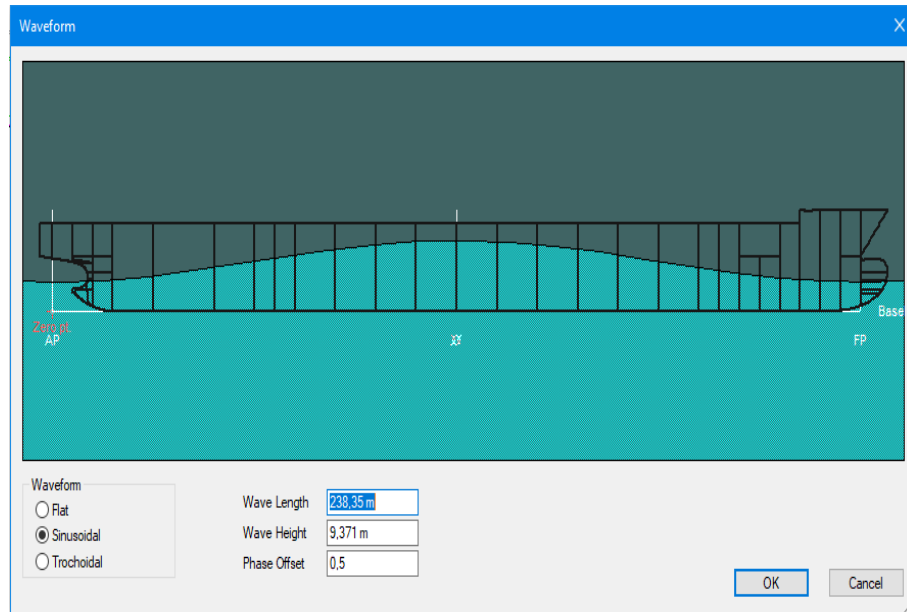
Για Load Condition LC04:

$$\lambda = L_{BP} = 238,35 \text{ m}$$

$$\text{WAVE HEIGHT } H = 9,371 \text{ m}$$

$$\text{Wave steepness } H/\lambda = 1/25$$

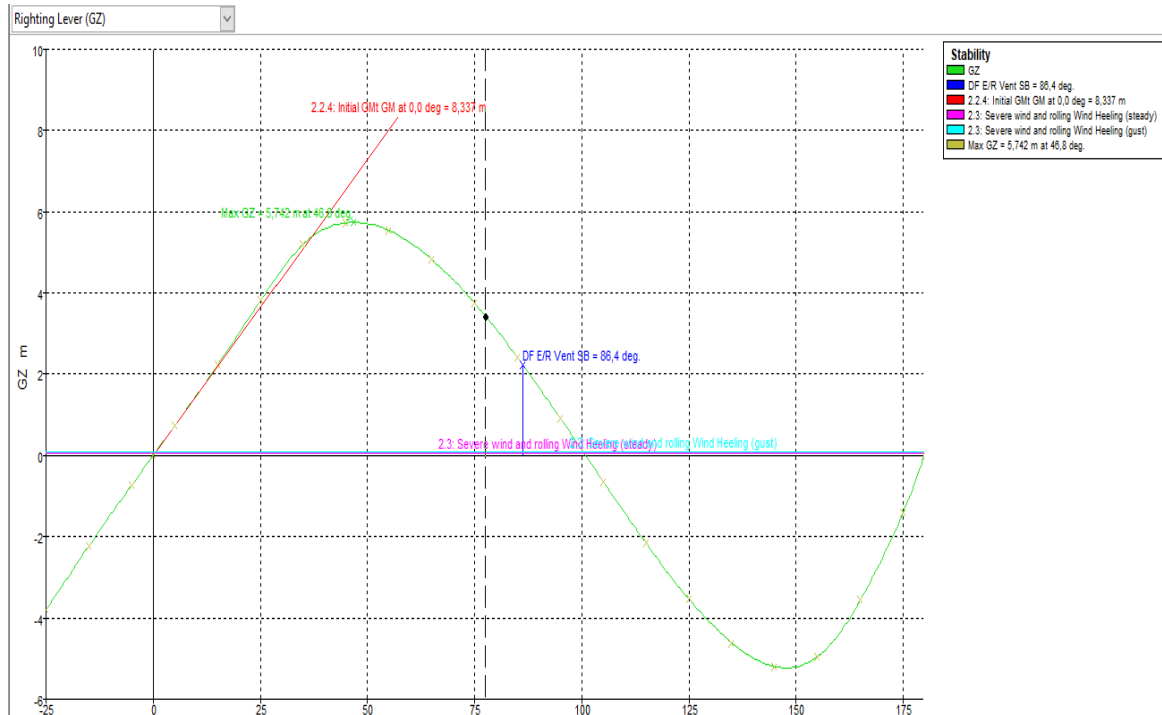
$$\text{Phase Offset} = 0,5$$



Εικόνα 108 - Απεικόνιση φάσης κύματος Phase offset = 0,5, λ = 238,35 m, H = 9,371 m για LC04 φόρτωση.

Wave Phase	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95
1 Draft Amidships m	8,534	8,413	8,230	7,998	7,711	7,376	7,008	6,596	6,187	5,914	5,815	5,870	6,062	6,383	6,811	7,293	7,754	8,139	8,408	8,543
2 Displacement t	39483	39483	39483	39487	39483	39483	39483	39481	39485	39483	39483	39483	39480	39483	39483	39483	39483	39484	39481	39483
3 Heel deg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4 Draft at FP m	8,638	6,802	4,932	3,150	1,535	0,197	-0,711	-0,702	0,581	2,643	5,154	7,680	9,873	11,602	12,888	13,615	13,611	12,945	11,799	10,312
5 Draft at AP m	8,431	10,024	11,529	12,846	13,886	14,554	14,727	13,893	11,793	9,185	6,476	4,059	2,251	1,165	0,734	0,972	1,897	3,333	5,017	6,774
6 Draft at LCF m	8,522	8,621	8,655	8,635	8,558	8,393	8,041	6,985	6,398	6,015	5,826	5,871	6,102	6,418	6,767	7,214	7,658	8,000	8,234	8,397
7 Trim (+ve by stern) m	-0,207	3,222	6,598	9,696	12,351	14,357	15,438	14,594	11,211	6,543	1,322	-3,621	-7,622	-10,437	-12,154	-12,644	-11,713	-9,612	-6,783	-3,538
8 WL Length m	236,065	236,439	239,619	246,158	242,980	238,395	231,538	231,027	232,762	231,331	235,037	239,816	237,505	233,629	227,488	228,644	230,237	231,632	237,005	235,984
9 Beam max extents on	37,147	37,152	37,253	37,299	37,299	37,306	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,307	37,306	37,304	37,299	37,299	37,272	37,200
10 Wetted Area m ²	9666,12	9692,01	9596,27	9436,57	9212,53	8924,44	8506,18	7622,75	7337,04	7157,71	7115,46	7221,07	7407,32	7643,29	7936,47	8225,55	8544,23	8856,54	9129,11	9388,83
11 Waterpl. Area m ²	7422,79	7514,70	7544,19	7486,90	7343,42	7114,00	6724,77	5840,11	5579,21	5500,35	5535,04	5613,97	5711,27	5803,43	5878,04	6026,75	6238,89	6504,13	6799,18	7100,23
12 Prismatic coeff. (Cp)	0,673	0,750	0,709	0,635	0,589	0,547	0,518	0,482	0,454	0,440	0,428	0,424	0,439	0,464	0,498	0,517	0,538	0,554	0,571	0,614
13 Block coeff. (Cb)	0,334	0,335	0,327	0,325	0,346	0,380	0,435	0,460	0,439	0,429	0,418	0,414	0,428	0,450	0,443	0,365	0,324	0,305	0,297	0,310
14 Max Sect. area coeff. (C)	0,770	0,639	0,808	0,853	0,875	0,909	0,948	0,958	0,969	0,976	0,978	0,978	0,977	0,973	0,967	0,952	0,926	0,897	0,846	0,793
15 Waterpl. area coeff. (C)	0,846	0,855	0,845	0,815	0,810	0,800	0,779	0,678	0,642	0,637	0,631	0,627	0,645	0,666	0,693	0,707	0,726	0,753	0,770	0,809
16 LCB from zero pt. (+ve)	115,696	115,624	115,557	115,489	115,427	115,376	115,360	115,365	115,436	115,535	115,645	115,766	115,858	115,903	115,964	115,971	115,954	115,896	115,850	115,756
17 LCF from zero pt. (+ve)	104,782	103,729	103,845	103,531	102,820	102,285	103,217	112,813	114,692	115,503	117,183	119,301	120,426	119,977	118,319	117,681	117,221	115,734	113,065	109,379
18 KB m	4,917	4,968	4,902	4,749	4,569	4,420	4,341	4,379	4,480	4,561	4,591	4,537	4,430	4,331	4,270	4,265	4,339	4,478	4,641	4,794
19 KG fluid m	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590	9,590
20 BMT m	18,432	18,977	19,088	18,884	18,351	17,434	15,966	14,369	13,768	13,465	13,336	13,325	13,405	13,575	13,858	14,283	14,860	15,611	16,492	17,450
21 BML m	726,383	750,498	763,845	748,954	709,418	650,444	557,527	350,265	306,188	298,284	314,159	339,348	365,887	383,872	388,313	413,960	456,871	512,717	576,791	644,917
22 GML corrected m	13,758	14,354	14,398	14,039	13,324	12,254	10,706	9,148	8,651	8,434	8,337	8,272	8,243	8,311	8,531	8,950	9,603	10,495	11,540	12,654
23 GML m	721,709	745,876	759,155	744,109	704,390	645,284	552,268	345,044	301,071	293,253	309,160	334,295	360,725	378,609	382,986	408,627	451,614	507,601	571,839	640,121
24 KML m	23,348	23,943	23,983	23,618	22,896	21,822	20,273	18,721	18,232	18,021	17,927	17,861	17,829	17,893	18,110	18,527	19,182	20,076	21,126	22,243
25 KML m	731,299	755,398	768,455	753,084	713,037	653,687	560,703	353,989	310,329	302,733	318,746	343,846	370,130	387,835	392,079	417,643	460,660	516,779	581,198	649,640
26 Immersion (TPc) tonne/	76,084	77,026	77,328	76,741	75,270	72,919	68,929	59,861	57,187	56,379	56,734	57,543	58,541	59,485	60,250	61,774	63,949	66,667	69,692	72,777
27 MTC tonne.m	1195,52	1235,55	1257,55	1232,75	1166,83	1068,88	914,840	571,540	498,748	485,776	512,126	553,762	597,506	627,170	634,414	676,896	748,102	840,868	947,215	1060,36
28 RM at 1deg = GML Disp	9480,39	9891,18	9921,45	9674,88	9181,20	8443,66	7377,50	6303,35	5961,56	5811,40	5745,10	5699,72	5679,62	5727,15	5878,31	6167,29	6617,07	7231,76	7951,63	8719,54
29 Max deck inclination de	0,0498	0,7745	1,5856	2,3295	2,9684	3,4470	3,7058	3,5039	2,6930	1,5723	0,3178	0,8704	1,8315	2,5073	2,9191	3,0365	2,8135	2,3093	1,6300	0,8505
30 Trim angle (+ve by ster	-0,0498	0,7745	1,5856	2,3295	2,9684	3,4470	3,7058	3,5039	2,6930	1,5723	0,3178	-0,8704	-1,8315	-2,5073	-2,9191	-3,0365	-2,8135	-2,3093	-1,6300	-0,8505

Εικόνα 109 - Απεικόνιση των υδροστατικών στοιχείων του πλοίου για φάση κύματος από 0 έως 0,95.



Εικόνα 110 - Απεικόνιση γραφικής παράστασης ευστάθειας GZ για κατάσταση φόρτωσης LC04 και φάσης κύματος Phase offset = 0,5 , $\lambda = 238,35$ m, $H = 9,371$ m.

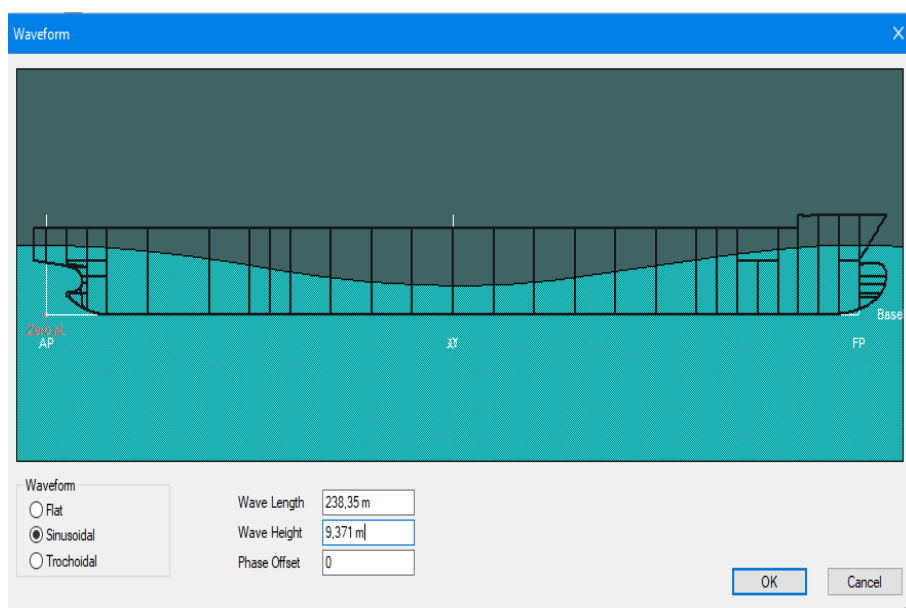
Για Load Condition LC04:

$$\lambda = L_{BP} = 238,35 \text{ m}$$

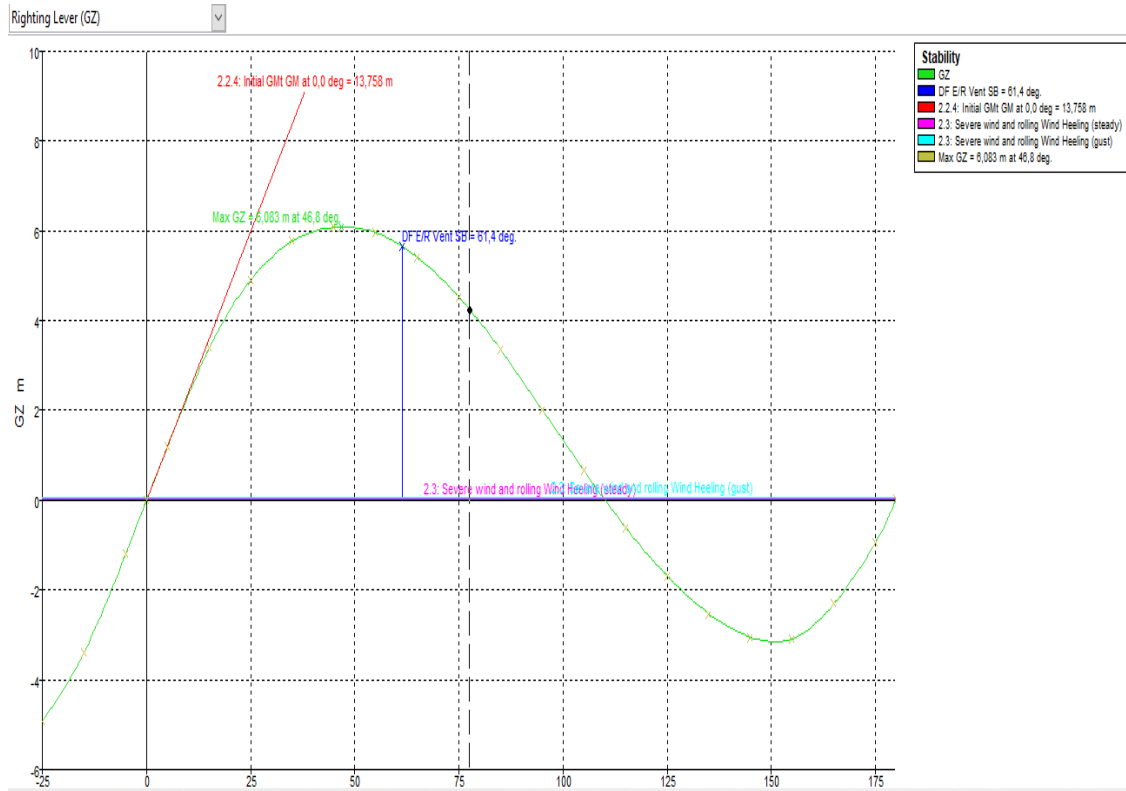
$$\text{WAVE HEIGHT } H = 9,371 \text{ m}$$

$$\text{Wave steepness } H/\lambda = 1/25$$

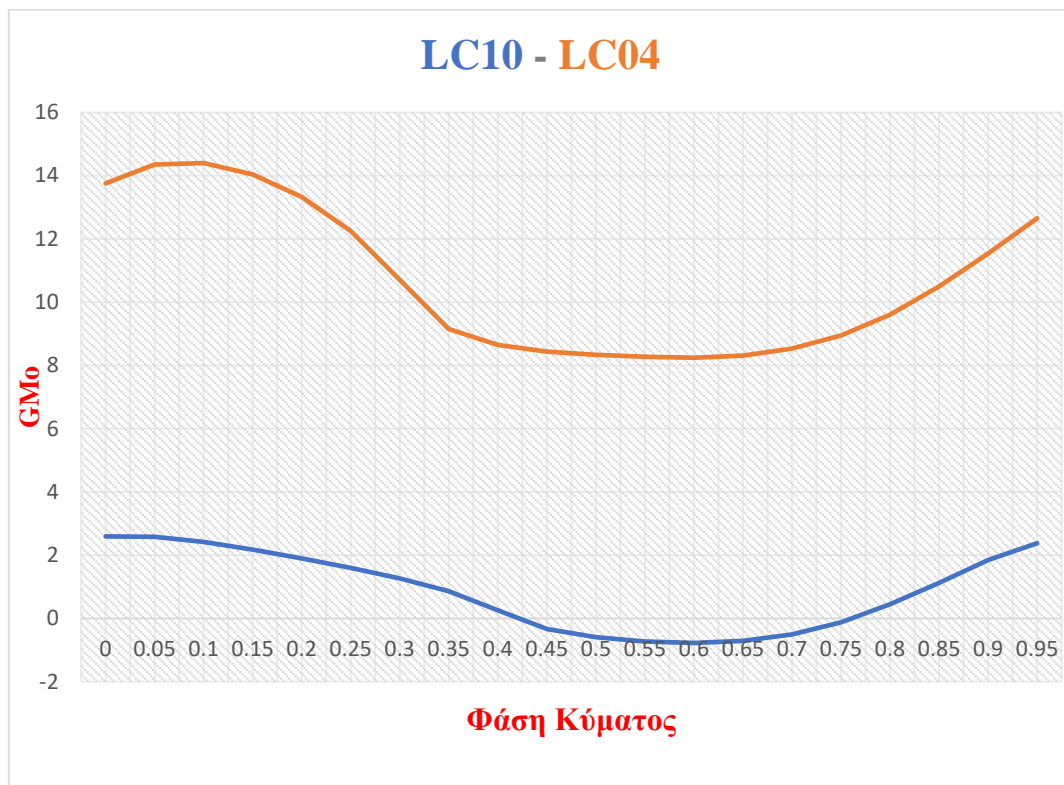
$$\text{Phase Offset} = 0$$



Εικόνα 111 - Απεικόνιση φάσης κύματος Phase offset = 0 , $\lambda = 238,35$ m, $H = 9,371$ m για LC04 φόρτωση.



Εικόνα 112 - Απεικόνιση γραφικής παράστασης ευστάθειας GZ για κατάσταση φόρτωσης LC04 και φάσης κύματος Phase offset = 0 , λ = 238,35 m, H = 9,371 m.



Εικόνα 113 – Αναπαράσταση καμπύλης GM₀ και για τις 2 συνθήκες φόρτωσης για LC10 και LC04.

Παρατηρούμε ότι στις 2 συνθήκες φόρτωσης το **GMo** συμπεριφέρεται τελείως διαφορετικά για μήκος κύματος $\lambda = 238,35\text{m}$ και $H = 9,371\text{ m}$. Στην κατάσταση φόρτωσης **LC04** δεν παρατηρείται κάποιο επικίνδυνο φαινόμενο απώλειας ευστάθειας του πλοίου ακόμα και όταν η κορυφή του κύματος (**wave phase = 0,5**) βρίσκεται περίπου στο μέσο της γάστρας του πλοίου.

Από την άλλη πλευρά, παρατηρούμε ότι στην έμφορτη κατάσταση **LC10** οι τιμές του **GMo** είναι πολύ χαμηλές και στη φάση κύματος (**0,5 – 0,75**) παρουσιάζεται απώλεια ευστάθειας του πλοίου και πιθανότητα παραμετρικού συντονισμού στο πλοίο.

Στη συνέχεια θα πράξουμε την ίδια διαδικασία στο πλοίο και για τις 2 συνθήκες φόρτωσης (**LC10, LC04**) για μεγαλύτερα μήκη κύματος.

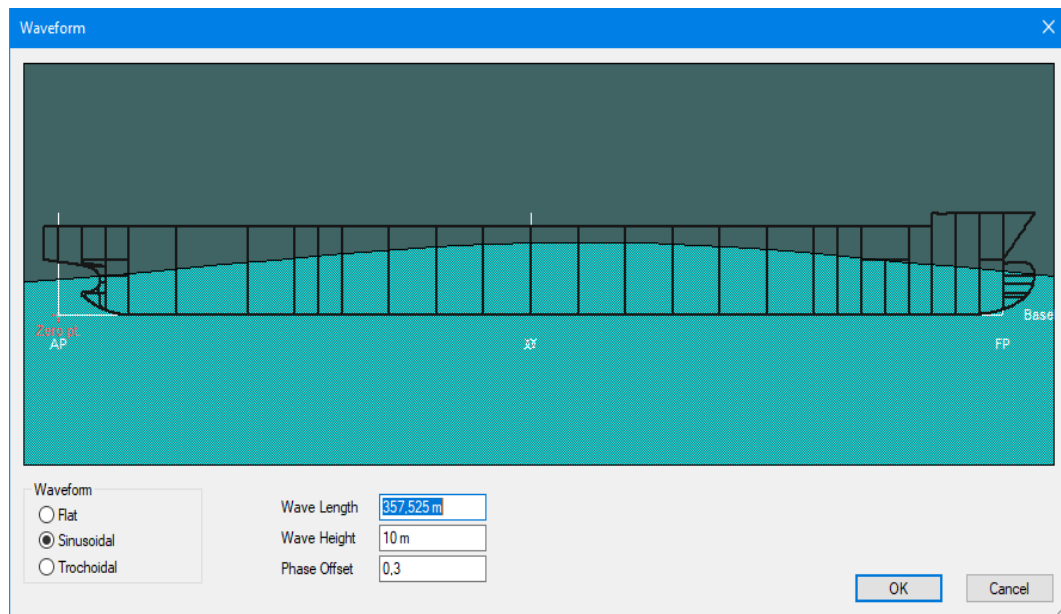
Όπως:

$$\lambda = 1,5 * LBP = 357,525\text{ m}$$

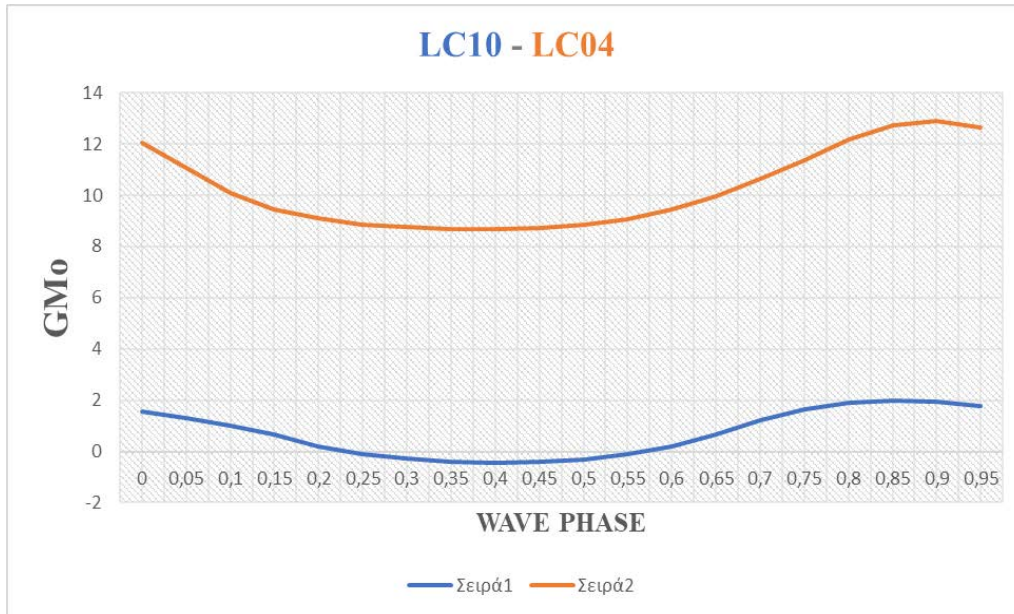
$$\text{WAVE HEIGHT } H = 10\text{ m}$$

$$\text{Wave steepness } H/\lambda = 1/50$$

$$\text{Phase Offset} = 0,3$$



Εικόνα 114 - Απεικόνιση φάσης κύματος Phase offset = 0,3 , $\lambda = 357,525\text{ m}$, $H = 10\text{ m}$ για LC04 και LC10 φόρτωση.



Εικόνα 115 - Αναπαράσταση καμπύλης GMo και για τις 2 συνθήκες φόρτωσης για LC10 και LC04.

Παρατηρούμε και σε αυτή την περίπτωση μήκος κύματος $\lambda = 357,525 \text{ m}$ με **wave steepness** = $1/50$ έχουμε διαφορετική συμπεριφορά του **GMo**. Στην περίπτωση φόρτωσης **LC04** έχουμε πολύ καλύτερη ευστάθεια της γάστρας σε σχέση με τη συνθήκη φόρτωσης **LC10**, όπου στην κορυφή του κύματος (**wave phase** = **0,4**) παρατηρούνται αρνητικές τιμές του **GMo**, συνεπώς αρνητική επίπτωση στην καμπύλη ευστάθειας **GZ**. Ουσιαστικά, σε αυτή την περίπτωση υπάρχει απώλεια ευστάθειας και πιθανότητα παραμετρικού συντονισμού με βάση τη θεωρία που έχει αναλυθεί.

Τέλος θα πράξουμε την ίδια διαδικασία στο πλοίο και για τις 2 συνθήκες φόρτωσης (**LC10**, **LC04**) για μεγαλύτερα μήκη κύματος.

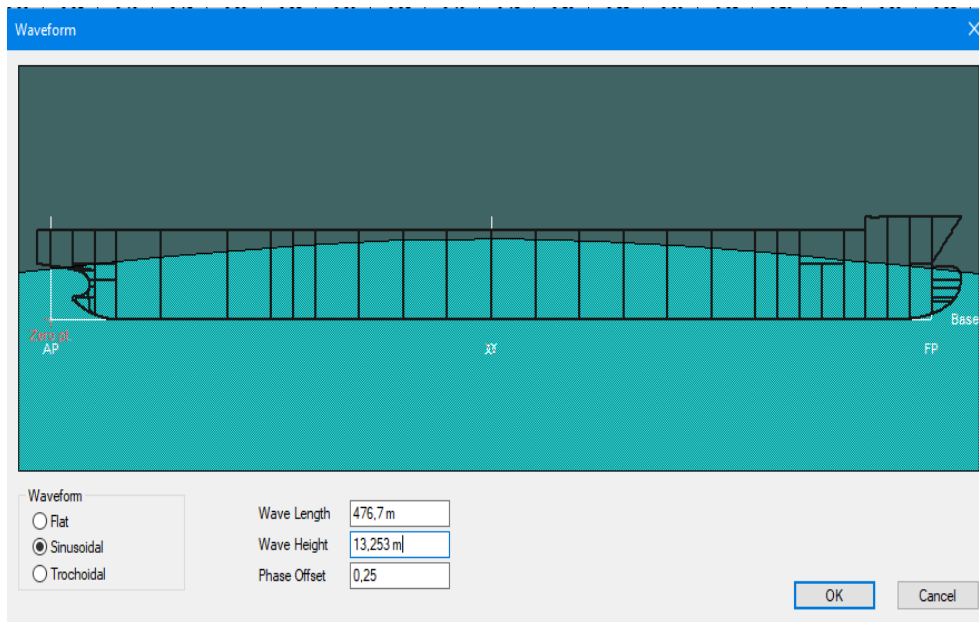
Όπως:

$$\lambda = 2LBP = 476,7 \text{ m}$$

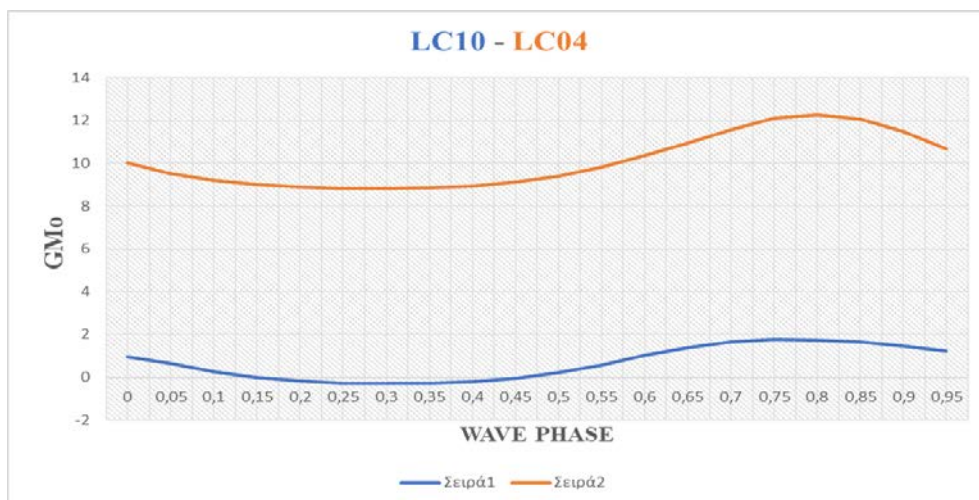
$$\text{WAVE HEIGHT } H = 13,253 \text{ m}$$

$$\text{Wave steepness } H/\lambda = 1/50$$

$$\text{Phase Offset} = 0,25$$



Εικόνα 116 - Απεικόνιση φάσης κύματος Phase offset = 0,25 , $\lambda = 476,7$ m, $H = 13,253$ m για LC04 και LC10 φόρτωση.



Εικόνα 117 - Αναπαράσταση καμπύλης GM0 και για τις 2 συνθήκες φόρτωσης για LC10 και LC04.

Παρατηρούμε ότι στις 2 συνθήκες φόρτωσης το **GMo** συμπεριφέρεται τελείως διαφορετικά για μήκος κύματος $\lambda = 476,7$ m και $H = 13,253$ m. Στην κατάσταση φόρτωσης **LC04** δεν παρατηρείται κάποιο επικίνδυνο φαινόμενο απώλειας ευστάθειας του πλοίου ακόμα και όταν η κορυφή του κύματος (**wave phase = 0,25**) βρίσκεται περίπου στο μέσο της γάστρας του πλοίου.

Στην περίπτωση φόρτωσης **LC04** έχουμε πολύ καλύτερη ευστάθεια της γάστρας σε σχέση με τη συνθήκη φόρτωσης **LC10**, όπου στην κορυφή του κύματος (**wave phase = 0,25**) παρατηρούνται αρνητικές τιμές του **GMo**, συνεπώς αρνητική επίπτωση στην καμπύλη ευστάθειας **GZ**. Ουσιαστικά, σε αυτή την περίπτωση υπάρχει απώλεια ευστάθειας και πιθανότητα παραμετρικού συντονισμού.

6.6 Έλεγχος ευπάθειας πλοίου επιπέδου 1 – (Level 1 Vulnerability check).

Σύμφωνα με τα κριτήρια ευπάθειας επιπέδου 1 (**level 1 Vulnerability Criteria**) για την περίπτωση παραμετρικού διατοιγισμού, ο λόγος $\Delta GM/GM$ πρέπει να συγκριθεί με την τιμή του τυπικού R_{PR} . Η τιμή της διακύμανσης του GM και ΔGM μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\Delta GM = \frac{I_H - I_L}{2V} \text{ εναλλακτικά ισχύει ότι } \Delta GM = \frac{V_D - V}{A_w(D - d)}$$

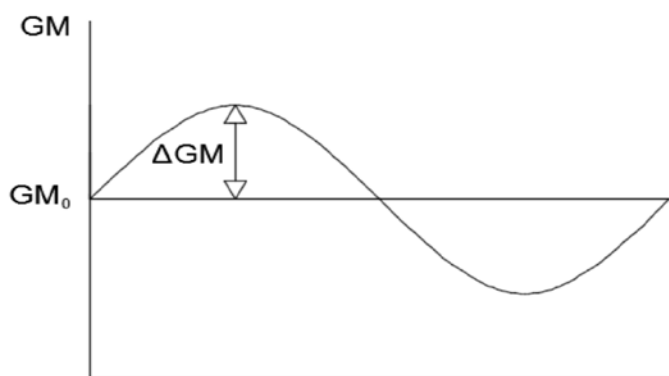
Επιπλέον μια εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό του ΔGM πρέπει να υπολογιστεί ως το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του GM , λαμβάνοντας υπόψη ότι το πλοίο πρέπει να εξισορροπηθεί σε δέκα διαφορετικά σημεία κατά μήκος ενός κύματος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Για συνθήκη φόρτωσης LC10:

$$\text{Μήκος κύματος } \lambda = L_{BP} = 238,35 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος κύματος } H = 238,35 * S_w, H = 238,35 * 1/60 = 3,973 \text{ m}$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το υδροστατικό πρόγραμμα **Maxsurf**, υπολογίζουμε τις τιμές του GM θεωρώντας ότι το πλοίο πρέπει να εξισορροπηθεί σε δέκα διαφορετικά σημεία κατά μήκος του κύματος.



Εικόνα 118 – Απεικόνιση γραφικής παράστασης της χρονικής εξάρτησης του GM . (Japan, 2020)

Στη συνέχεια, η τιμή της διακύμανσης GM θα είναι ο λόγος $\Delta GM/GM$ πρέπει να συγκριθεί με την τιμή του R_{PR} , όπου:

$$R_{PR} = 0,17 + 0,425 * \left(\frac{100 * A_k}{L * B} \right), \text{ εάν } C_M > 0,96$$

$$R_{PR} = 0,17 + (10,625 * C_M - 9,775) * \left(\frac{100 * A_k}{L * B} \right), \text{ εάλν } 0,94 < C_M < 0,96$$

$$R_{PR} = 0,17 + 0,2125 * \left(\frac{100 * A_k}{L * B} \right), C_M < 0,96$$

Εάν $\Delta GM/GM \leq R_{PR}$ η εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης δεν θα θεωρείται ευάλωτη στον παραμετρικό διατοιχισμό.

Επομένως για τη συνθήκη φόρτωσης **LC10** θα ισχύει ότι:

$$L_{OA} = 250 \text{ m}$$

$$L_{BP} = 238,35 \text{ m}$$

$$B = 37,30 \text{ m}$$

$$D = 19,60 \text{ m}$$

$$C_B = 0,565$$

$$V = 62788,83 \text{ m}^3$$

$$d = 11,50 \text{ m}$$

$$d_{FULL} = 12,50 \text{ m}$$

$$V_D = 75318 \text{ m}^3$$

$$dH = d + \min (D - d, L * S_W / 2) = 13,485 \text{ m}$$

$$dL = d + \min (d - 0,25 * d_{FULL}, L * S_W / 2) = 13,485 \text{ m}$$

$$A_W = 6942,55 \text{ m}^2$$

Όμως ισχύει ότι:

$$\Delta GM = \frac{GM_{MAX} - GM_{MIN}}{2} = 0,637$$

$$\Delta GM = 0,637$$

Και η αναλογία μας θα είναι:

$$\Delta GM/GM = 0,637/0,602 = 1,058$$

Στη συνέχεια, ο λόγος $\Delta GM/GM$ πρέπει να συγκριθεί με την τιμή του R_{PR} , δεδομένου ότι **CM=0.92** και **A_k = 57,60 m²** από αποτελέσματα προγράμματος **Maxsurf**.

Επιπλέον ο συντελεστής R_{PR} , μπορούμε να τη βρούμε από τον εξής τύπο:

$$R_{PR} = 0,17 + 0,2125 * \left(\frac{100 * A_k}{L * B} \right), \text{ εάλν } C_M < 0,96$$

$$R_{PR} = 0,17 * 0,2125 * \left(\frac{100 * 57,60}{238,35 * 37,30} \right)$$

$$R_{PR} = 0,230$$

Ωστόσο, ισχύει ότι $\Delta GM/GM > R_{PR}$ και η κατάσταση φόρτωσης **LC10** θεωρείται ευάλωτη σε παραμετρικό διατοιχισμό. Επομένως, απαιτείται έλεγχος επιπέδου **2A vulnerability check**.

Για συνθήκη φόρτωσης **LC04**:

$$\text{Μήκος κύματος } \lambda = L_{BP} = 238,35 \text{ m}$$

$$\text{Πλάτος κύματος } H = 238,35 * S_w, H = 238,35 * 1/60 = 3,973 \text{ m}$$

$$L_{OA} = 250 \text{ m}$$

$$L_{BP} = 238,35 \text{ m}$$

$$B = 37,30 \text{ m}$$

$$D = 19,60 \text{ m}$$

$$C_B = 0,565$$

$$V = 37597,95 \text{ m}^3$$

$$d = 7,485 \text{ m}$$

$$d_{FULL} = 6,486 \text{ m}$$

$$V_D = 39483 \text{ m}^3$$

$$d_H = d + \min (D - d, L * S_w / 2) = 9,470455 \text{ m}$$

$$d_L = d + \min (d - 0,25 * d_{FULL}, L * S_w / 2) = 9,470455 \text{ m}$$

$$A_W = 6947,27 \text{ m}^2$$

Όμως ισχύει ότι:

$$\Delta GM = \frac{GM_{MAX} - GM_{MIN}}{2} = 10,125$$

$$\Delta GM = 10,125$$

Και η αναλογία μας θα είναι:

$$\Delta GM/GM = 10,125/9,725 = 1,041$$

Στη συνέχεια, ο λόγος $\Delta GM/GM$ πρέπει να συγκριθεί με την τιμή του R_{PR} , δεδομένου ότι $CM=0.98$ και $A_k = 57,60 \text{ m}^2$ από αποτελέσματα προγράμματος **Maxsurf**.

Επιπλέον ο συντελεστής R_{PR} , μπορούμε να τη βρούμε από τον εξής τύπο:

$$R_{PR} = 0,17 * 0,425 * \left(\frac{100 * A_k}{L * B} \right), \text{ εάλν } C_M > 0,96$$

$$R_{PR} = 0,17 * 0,425 * \left(\frac{100 * 57,60}{238,35 * 37,30} \right)$$

$$R_{PR} = 0,0468$$

Ωστόσο, ισχύει ότι $\Delta GM/GM > R_{PR}$ και η κατάσταση φόρτωσης **LC04** θεωρείται εύαλωτη σε παραμετρικό διατοιχισμό. Επομένως, απαιτείται έλεγχος επιπέδου **2A vulnerability check**.

6.7 Έλεγχος ευπάθειας πλοίου επιπέδου 2 – (Level 2 Vulnerability check).

Ο έλεγχος ευπάθειας επιπέδου **2A** απαιτεί τον υπολογισμό του λόγου $\Delta GM/GM$ για την περίπτωση κύματος 15 και τη σύγκρισή του με την τιμή του R_{PR} σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$GM(H_i, \lambda_i) > 0 \text{ και } \frac{\Delta GM(H_i, \lambda_i)}{GM(H_i, \lambda_i)} < R_{PR} \quad (7, 1)$$

Επιπλέον, απαιτείται η σύγκριση της ταχύτητας V_{pri} (V_{pri} είναι η πιθανή ταχύτητα στην οποία μπορεί να εμφανιστεί παραμετρικός διατοιχισμός) με την ταχύτητα αναφοράς V_s που αντιστοιχεί στον συντονισμό της εξίσωσης **Mathieu** για κάθε περίπτωση κύματος, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$V_{PR,i} = \left| \frac{2\lambda_i}{T_0} \sqrt{\left(\frac{GM(H_i, \lambda_i)}{GM} \right)} - \sqrt{\frac{g\lambda_i}{2\pi}} \right| > V_s \quad (7, 2)$$

Όπου $\Delta GM(H_i, \lambda_i)$ ορίζεται ως το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων τιμών του GM υπολογίζοντας ως ένα κύμα που χαρακτηρίζεται από (H_i, λ_i) που περνά το πλοίο, T_0 είναι η φυσική περίοδος κίνησης διατοιχισμού, g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και GM το μετακεντρικό ύψος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης ευπάθειας C_1 είναι:

$$c_1 = \sum_{i=1}^N W_i C_i$$

Όπου C_i όπου παίρνει την τιμή 1 όταν οι σχέσεις (7,1) και (7,2) δεν ικανοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπλέον η συνθήκη φόρτωσης του πλοίου δε θεωρείται ευάλωτη στον παραμετρικό διατοιχισμό εάν η παράμετρος $C_1 \leq 0,06$.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά 15 διαφορετικών κυμάτων για τη μελέτη περίπτωσης 2Α σε συνθήκη φόρτωσης LC10:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ 15 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Wave case	Weight	Wave length	Wave height
N	W(i)	λ (m)	H (m)
1	0,000013	22,574	0,350
2	0,001654	37,316	0,495
3	0,020912	55,430	0,857
4	0,092799	77,857	1,295
5	0,199218	103,655	1,732
6	0,248788	130,100	2,205
7	0,208699	166,309	2,800
8	0,128990	203,164	3,150
9	0,062446	243,705	3,625
10	0,002473	287,931	4,04
11	0,000650	335,843	4,4205
12	0,000158	387,44	4,7695
13	0,000034	442,724	5,097
14	0,000158	501,691	5,3695
15	0,000007	564,345	5,621

Επιπλέον, η ταχύτητα σχεδιασμού πρέπει να συγκριθεί με την ταχύτητα αναφοράς που αντιστοιχεί στον συντονισμό της εξίσωσης Mathieu για κάθε κύμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ 15 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ
ΚΥΜΑΤΟΣ**

Number of case	GM ratio	GMratio standard	Design speed	Reference speed	Index
N	ΔGM/GM	R_{PR}	V_s (kn)	V_{pr} (kn)	C₁
1	0,01973	0,230	21	4,54628	0
2	0,02345	0,230	21	5,33330	0
3	0,19890	0,230	21	5,89236	0
4	0,20514	0,230	21	6,21527	0
5	0,41860	0,230	21	6,28680	1
6	0,29069	0,230	21	6,13297	1
7	1,88372	0,230	21	5,69373	1
8	1,17607	0,230	21	4,37756	1
9	1,23754	0,230	21	4,18364	1
10	1,18438	0,230	21	3,15386	1
11	1,08554	0,230	21	1,95367	1
12	1,03986	0,230	21	0,53653	1
13	0,85465	0,230	21	1,11806	1
14	0,74667	0,230	21	3,01163	1
15	0,64617	0,230	21	8,78462	1

Η συνολική τιμή του δείκτη **C1** για την ευπάθεια του πλοίου επιπέδου **Level 2A Vulnerability check** είναι:

$$C1 = \sum_{i=1}^n WiCi$$

$Ci = 0$ εάν:

$$GM(Hi, \lambda i) > 0 \text{ και } \frac{\Delta GM(Hi, \lambda i)}{GM(Hi, \lambda i)} < R_{PR} \text{ ή } V_{PRi} > Vs$$

$Ci = 1$ εάν δεν ισχύει η παραπάνω σχέση

Έχουμε ότι:

$$C1 = 0,94442 > 0,06 = R_{PRO}$$

Αυτό σημαίνει ότι εντοπίζεται ευπάθεια επιπέδου **2A** του πλοίου μας στον παραμετρικό διατοιχισμό για συνθήκη φόρτωσης **LC10**.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα χαρακτηριστικά 15 διαφορετικών κυμάτων για τη μελέτη περίπτωσης **2A** σε συνθήκη φόρτωσης **LC04**.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ 15 ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Number of case	GM ratio	GMratio standard	Design speed	Reference speed	Index
N	ΔGM/GM	R_{PR}	V_s (kn)	V_{pr} (kn)	C₁
1	0,0038046	0,0468	21	0,373277	0
2	0,0041645	0,0468	21	1,599725	0
3	0,0117223	0,0468	21	4,355950	0
4	0,0255526	0,0468	21	8,180059	0
5	0,0340874	0,0468	21	12,86952	0
6	0,0808226	0,0468	21	17,89895	1
7	0,1176863	0,0468	21	25,12639	0
8	0,1221079	0,0468	21	32,64163	0
9	0,1188174	0,0468	21	41,07474	0
10	0,1070951	0,0468	21	50,30046	0
11	0,0933161	0,0468	21	60,37603	0
12	0,0791773	0,0468	21	71,32760	0
13	0,0665809	0,468	21	83,15132	0
14	0,0553727	0,468	21	95,90553	0
15	0,0457877	0,468	21	109,6108	1

Η συνολική τιμή του δείκτη **C1** για την ευπάθεια του πλοίου επιπέδου **Level 2A** **Vulnerability check** είναι:

$$C1 = \sum_{i=1}^n WiCi$$

C_i = 0 εάν:

[140]

$$GM(Hi, \lambda i) > 0 \text{ και } \frac{\Delta GM(Hi, \lambda i)}{GM(Hi, \lambda i)} < R_{PR} \text{ ή } V_{PRi} > Vs$$

$C_i = 1$ εάν δεν ισχύει η παραπάνω σχέση

Έχουμε ότι:

$$C_1 = 0,248795 > 0,06 = R_{PRO}$$

Αυτό σημαίνει ότι εντοπίζεται ευπάθεια επιπέδου **2A** του πλοίου μας στον παραμετρικό διατοιχισμό για συνθήκη φόρτωσης **LC04**.

Γενικά παρατηρούμε ότι το πλοίο και στις 2 συνθήκες φόρτωσης **LC10**, **LC04** για δεδομένη ταχύτητα αναφοράς **21Kn** με αυτά τα χαρακτηριστικά κυμάτων προκύπτει ότι είναι ευάλωτο το πλοίο σε παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**), όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Loading Condition	V(Kn)	C1 Index	Status
LC04	21	0,248795	Fail
LC10	21	0,94442	Fail

Στη συνέχεια, θα πρέπει να προχωρήσουμε σε έλεγχο ευπάθειας επιπέδου **2B (Level 2B Vulnerability Check)**.

Εξέταση συνθήκης φόρτωσης **LC10**, με μεγαλύτερη πιθανότητα παραμετρικού διατοιχισμού σε σχέση με τη **Ballast Condition LC04**.

Για να εξετάσουμε την κατάσταση φόρτωσης **LC10** σε έλεγχο ευπάθειας επιπέδου **2B** απαιτείται ο υπολογισμός του μέγιστου παραμετρικού πλάτους διατοιχισμού για 10 περιπτώσεις κυμάτων σε επτά διαφορετικές κατευθύνσεις κύματος $\beta(0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ και 180° σε μηδενική ταχύτητα) με την εξής σχέση:

$$C_2 = \left[\sum_{i=1}^3 C2(F_{ni}, \beta_h) + C2(0, \beta_h) + \sum_{i=1}^3 C2(F_{ni}, \beta_f) \right] / 7$$

Όπου, $C2(Fn, \beta) = \sum_{i=1}^N WiCi$

Ισχύει ότι **N** είναι ο αριθμός των κυμάτων και ο συντελεστής **Ci** παίρνει την τιμή **1** όταν το μέγιστο παραμετρικό εύρος διατοιχισμού είναι μεγαλύτερο από **25°** μοίρες ενώ

παίρνει την τιμή **0** όταν το παραμετρικό εύρος διατοιχισμού είναι μικρότερο από **25°**μοίρες.

Πρέπει να τονίσουμε ότι η κατάσταση φόρτωσης δεν θεωρείται ευάλωτη στο φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού εάν **C2 ≤ 0,15**.

Επιπλέον κάθε περίπτωση κύματος χαρακτηρίζεται από **li = Lwl** και ύψος σύμφωνα με την εξίσωση **H=0.01 J·L, j=1,2,.....10**.

Το παραμετρικό πλάτος διατοιχισμού μπορεί να υπολογιστεί είτε με την επίλυση αριθμητικά της μέσης εξίσωσης του **(7,3)** είτε με την επίλυση αριθμητικά της διαφορικής εξίσωσης ενός βαθμού ελευθερίας του παραμετρικού διατοιχισμού **(7,4)** ως προσέγγιση χρονικού τομέα. Η προσέγγιση του χρονικού τομέα θεωρείται πιο ακριβής για την πρόβλεψη της παραμετρικής γωνίας διατοιχισμού, παρά το γεγονός ότι η προσέγγιση της μεθόδου μέσου όρου είναι μικρότερη σε πολυπλοκότητα και πιο ακριβής με τις προσεγγίσεις ευστάθειας 2^{ης} γενιάς, οπότε πιθανότατα θα υιοθετηθεί πλήρως στην τελική μορφή τροποποίησης.

$$\frac{GM_{amp}}{GM} < 2 * \sqrt{\left\{ \left(1 + \frac{GM_{mean}}{GM} \right) - \frac{1}{4} \left(\frac{\omega_e}{\omega_f} \right)^2 \right\}^2 + \left(\frac{a}{\omega_f} \right)^2 * \left(\frac{\omega_e}{\omega_f} \right)^2} \quad (7,3)$$

$$\ddot{\varphi} + 2\alpha\dot{\varphi} + \gamma\varphi^3 + \omega_f^2\varphi + \omega_f^2 I_3\varphi^3 + \omega_f^2 I_5\varphi^5 + \omega_f^2 (GM_{mean} + GM_{amp} \cos(\omega_e t)) * \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\pi} \right)^2 \right) \frac{\varphi}{GM} = 0 \quad (7,4)$$

Όπου ισχύει ότι **A** είναι το πλάτος παραμετρικού διατοιχισμού, **ω_f** είναι η φυσική συχνότητα διατοιχισμού, **ω_e** είναι η συχνότητα συνάντησης κύματος, **GM_{mean}** η μέση τιμή από το εύρος τιμών του μετακεντρικού ύψους **GM**, **GM_{amp}** το εύρος τιμών του μετακεντρικού ύψους, **I₃** και **I₅** οι συντελεστές ροπών επαναφοράς που καθορίζονται στην καμπύλη **GZ** σε ήρεμο νερό, **a** και **γ** γραμμικοί συντελεστές απόσβεσης διατοιχισμού που καθορίζονται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία.

Επιπλέον, η πρώτη εξίσωση είναι μια αριθμητική λύση μιας μη γραμμικής εξίσωσης **I_{keda}** που διατυπώνεται παρακάτω:

$$I_{xx}\ddot{\varphi} + B_{44}\dot{\varphi} + mgGZ = 0 \quad (7,5)$$

Όπου **I_{xx}** είναι η ροπή αδράνειας διατοιχισμού, **B₄₄** είναι ο γραμμικός συντελεστής απόσβεσης και **GZ** είναι ο μοχλοβραχίονας επαναφοράς.

Το παραμετρικό πλάτος διατοιχισμού, υπολογίζεται επίσης με την αριθμητική επίλυση της μέσης εξίσωσης, όπως διατυπώνεται στην παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{GM_{amp}}{GM_0} \right)^2 \\
&= \left\{ \frac{\pi^2 \omega_e 8a}{(2\pi^2 - A^2)\omega_0^2} \right\}^2 \\
&+ \left\{ \frac{6A^2\omega_0^2 - 8\pi^2 * \omega_0^2}{4(\pi^2 - A^2)\omega_0^2} * \frac{GM_{mean}}{GM_0} \right. \\
&+ \left. \frac{-5\pi^2 * A^4 * l_5 * \omega_0^2 - 6\pi^2 * A^2 l_3 * \omega_0^2 + 8\pi^2 * \omega_e^2 - 8\pi^2 \omega_0^2}{4(\pi^2 - A^2)\omega_0^2} \right\} \quad (7,6)
\end{aligned}$$

Όπου A είναι παραμετρικό πλάτος διατοιχισμού, ω_0 είναι φυσική συχνότητα διατοιχισμού και a είναι γραμμικός συντελεστής απόσβεσης.

Τέλος, μια άλλη μη γραμμική παραμετρική εξίσωση διατοιχισμού επιλύεται αριθμητικά για τον υπολογισμό του πλάτους διατοιχισμού. Αυτή η εξίσωση διατυπώνεται ως εξής:

$$\ddot{\varphi} + 2\zeta\omega_0\dot{\varphi} + \omega_0^2(1 - h\cos(\omega_e t)\varphi - c_3\omega_0^2\varphi^3 - c_5\omega_0^2\varphi^5) \quad (7,7)$$

Όπου ζ είναι γραμμικός συντελεστής απόσβεσης και $h = GM_{amp}/GM_{mean}$ και C_3, C_5 είναι οι συντελεστές αποκατάστασης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του παραμετρικού διατοιχισμού μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση **Ikeda (7,5)**.

Οι αδιάστατοι συντελεστές απόσβεσης της εξίσωσης **Ikeda** για γωνία διατοιχισμού 1° και 20° μοίρες, συμπεριλαμβανομένης των παρατροπιδίων (**bilge keels**) για την ταχύτητα των **21 kn** είναι αντίστοιχα:

$$B_{44,1^\circ} = 0,0048 \quad \text{και} \quad B_{44,20^\circ} = 0,0187$$

Χρησιμοποιώντας την απλοποίηση εξίσωσης (7,5) ισχύει ότι:

$$B_{44,1^\circ} = 3,780 * 10^7 \quad \text{και} \quad B_{44,20^\circ} = 1,432 * 10^8$$

Στη συνέχεια η διαδικασία παραγωγής γραμμικών (α) και κυβικών (γ) συντελεστών απόσβεσης διατοιχισμού αποδίδουν τα εξής:

$$\alpha = \frac{B_{44,1} * \pi}{2(I_{XX} + J_{XX})\omega_f} = 0,08567 \quad \alpha_e = \frac{B_{44,20} * \pi}{2(I_{XX} + J_{XX})\omega_f} = 0,3325$$

Όπου $I_{xx} = \rho * V(0,4B)^2 = 3,03582 * 10^9$ και J_{xx} είναι η προστιθέμενη μάζα σε διατοιχισμό $J_{xx} = 0,25 * I_{xx} = 0,758955 * 10^9$.

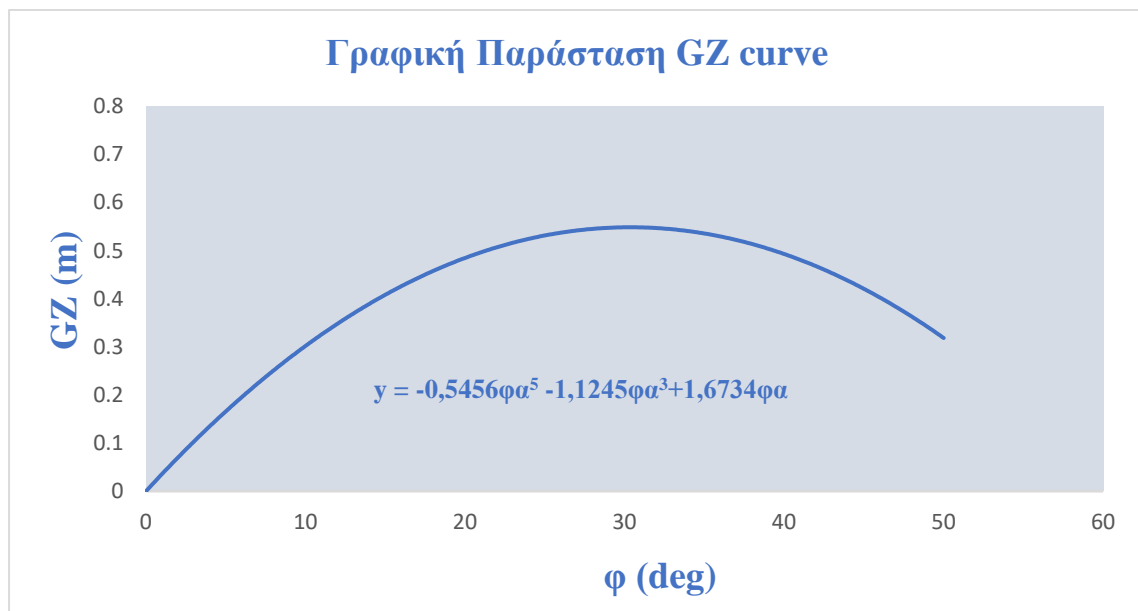
Όπου:

$$c = \frac{a - ae}{\varphi_m^2} = 1,2986 \quad \text{όπου } \varphi_m = 25^\circ = 0,436 \text{ rad}$$

Όμως

$$\alpha = \frac{\omega_f}{\pi} * \alpha = 0,01245 \quad \text{και } \gamma = \frac{4c}{3\pi^2} \left(\frac{2\pi}{\omega_f} \right) = 2,9490$$

Η προσαρμοσμένη εξίσωση της καμπύλης **GZ** για ήρεμο νερό (**calm water**) από το οποίο υπολογίζονται οι συντελεστές αποκατάστασης **5ης** και **3ης** τάξης απεικονίζεται στην **εικόνα 119**:



Εικόνα 119 – Απεικόνιση γραφικής παράστασης καμπύλης GZ.

Επιπλέον, όσο η καμπύλη **GZ** σε ήρεμο νερό διαμορφώνεται ως $GZ = \varphi + I_3\varphi^3 + I_5\varphi^5$, οι συντελεστές αποκατάστασης είναι:

$$I_5 = \frac{-0,5456}{1,6743} = -0,32586 \quad I_3 = \frac{-1,1245}{1,7453} = -0,64430$$

Πρέπει να τονίσουμε ότι στο επίπεδο **2B** έλεγχο ευπάθειας (**level 2 vulnerability check**), η συχνότητα κύματος είναι σταθερή σε μια συγκεκριμένη τιμή λόγω του γεγονότος ότι μόνο το ύψος κύματος μεταβάλλεται και όχι το μήκος κύματος. Ωστόσο,

για το μήκος ίσαλης γραμμής $L_{WL} = 238,3 \text{ m}$ το ακόλουθο αποτέλεσμα αποδίδει για συχνότητα κύματος ως εξής:

$$\omega_o = \sqrt{\frac{2 * \pi * g}{L}} = 0,25847 \text{ rad/s}$$

Για τον υπολογισμό του παραμετρικού πλάτους διατοχισμού για επτά διαφορετικές κατευθύνσεις (0° , 30° , 60°) για τους πρυμναίους κυματισμούς, (120° , 150° , 180°) για τους πλωραίους κυματισμούς και 0° για μηδενική ταχύτητα) θα πρέπει να βρούμε τη συχνότητα συνάντησης κύματος από την παρακάτω σχέση:

$$\omega_e = \omega_o - \frac{\omega^2}{g} V_s \cos\beta = \frac{\sqrt{2\pi}}{\lambda} (\sqrt{\lambda g} - V_s \sqrt{2\pi} * \cos\beta) \quad (7,8)$$

Όπου το V_s είναι η ταχύτητα προς τα εμπρός σε **m/s (service speed)** για $V_s = 21 \text{ Kn} = 10,794 \text{ m/s}$, το β είναι η γωνία εγκάρσιας κλίσης σε σχέση με τα κύματα (0° για πρυμναίους κυματισμούς, το g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, το ω_o είναι η πραγματική συχνότητα του κύματος και το λ είναι το μήκος κύματος.

Στη συνέχεια κάνοντας τους υπολογισμούς με τη σύμφωνα με σχέση (7,8) παρατηρούμε τις συχνότητες συνάντησης για τη συνήθη ταχύτητα λειτουργίας **21 kn** του πλοίου μας σε συνδιασμό για κάθε κατεύθυνση κύματος, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Wave direction (deg)	Encounter frequency (rad/s)
0	0.1974
30	0.2536
60	0.4071
120	0.8266
150	0.9801
180	1.0363

Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων για (**level 2B vulnerability check**) και οι τιμές των **GMmean** και **Gmamp** παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΩΝ ΓΙΑ LEVEL 2B CHECK

Case No.	Weight Wi	Wave Length λi [m]	Wave Height Hi [m]	Steepness si=Hi/λi	GMmean	GMamp
1	0,2272	238,35	2,3835	0,01	1,8865	0,8825
2	0,2035	238,35	4,767	0,02	2,0195	1,4005
3	0,115	238,35	7,1505	0,03	2,103	1,76
4	0,0488	238,35	9,534	0,04	2,178	2,043
5	0,0182	238,35	11,9175	0,05	2,2115	2,2355
6	0,0055	238,35	14,301	0,06	2,2265	2,3855
7	0,0015	238,35	16,845	0,07	2,215	2,492
8	0,0004	238,35	19,068	0,08	2,139	2,528
9	0,0001	238,35	21,4515	0,09	1,9095	2,4025
10	0	238,35	23,835	0,1	1,6345	2,2295

Ο υπολογισμός του δείκτη **C2** για τον υπολογισμό του παραμετρικού πλάτους διατοιχισμού (A) είναι:

$$C2 = 0,02386 < 0,15$$

Επομένως δεν εντοπίζεται ευπάθεια επιπέδου **2B** στο πλοίο για παραμετρικό διατοιχισμό για τη συνθήκη φόρτωσης **LC10**.

Είναι προφανές ότι από τα 10 κύματα, μόνο τα 6 έχουν μη μηδενική πιθανότητα. Αυτό τείνει να ισχύει για μεγάλα πλοία, όπου το ύψος κύματος εκφράζεται ως ποσοστό του μήκους του πλοίου και οδηγεί σε μεγάλα κύματα που είναι εξαιρετικά υψηλά. Με αυτόν τον τρόπο, μόνο μικρά κύματα συμβάλλουν στον σταθμισμένο μέσο όρο του δείκτη και έτσι μπορεί να εμφανιστούν μικρότερες τιμές του **C2**.

Επιπλέον, παρόλο που η ευπάθεια δεν εντοπίστηκε, στους πλωραίους κυματισμούς, με ταχύτητα σχεδιασμού **21 kn** μεγάλα παραμετρικά πλάτη διατοιχισμού εμφανίζονται μόνο σε μεγάλα ύψη κύματος άνω των **12 m**. Από την άλλη πλευρά στους πρυμναίους κυματισμούς η κατάσταση είναι αντίθετη, έτσι ώστε η ταχύτητα πρέπει να αυξάνεται σε μεγάλα παραμετρικά πλάτη διατοιχισμού για ύψοι κυμάτων μεγαλύτερα από **7 m**.

7 Συμπεράσματα – Προτάσεις.

7.1 Συμπεράσματα.

Είναι γεγονός ότι το φαινόμενο του παραμετρικού συντονισμού είναι ένα πολυδιάστατο πρόβλημα το οποίο μπορεί να προκύψει από συνδιασμό πολλών παραγόντων. Αποτελεί το φαινόμενο της προοδευτικής ανάπτυξης μεγάλων εγκάρσιων κλίσεων, καθώς το πλοίο ταξιδεύει σε ακολουθούντες πρυμναίους κυματισμούς (**following seas**). Παρόλο που ο κίνδυνος για ανατροπή υφίσταται κυρίως σε μικρότερα πλοία, όπως τ' αλιευτικά, είναι πολύ πιθανή η απώλεια ή και καταστροφή φορτίου στα μεγάλα (**container ships**) το οποίο θα έχει ισχυρές οικονομικές συνέπειες στην εφοπλιστική εταιρία.

Σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, η πιο ολοκληρωμένη μαθηματική μέθοδος για την εκτίμηση της ευαισθησίας στον παραμετρικό διατοιχισμό είναι η λύση της εξίσωσης **Mathieu**. Προφανώς, ορισμένοι κώδικες προγραμμάτων διαφορετικών επιπέδων πολυπλοκότητας μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να ελέγξουν εάν συνέβη παραμετρικός διατοιχισμός στα αποτελέσματα προσομοίωσης τους.

Για κάθε χρονικό βήμα η γωνία εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού (**rolling**) μπορεί να συγκριθεί με ένα επίπεδο κατωφλίου (οριακό πεδίο). Εάν τα δύο επόμενα πλάτη διατοιχισμού (**rolling**) (**αρνητικά ή θετικά**) είναι υψηλότερα από εκείνο το κατώτατο όριο, το σύνολο κάθε γωνιών εγκάρσιας κλίσης διατοιχισμού, **μπορεί να χαρακτηριστεί ως παραμετρικός διατοιχισμός.**

Στη συνέχεια, ένα κρίσιμο θεμελιώδες συμπέρασμα που έχει διατυπωθεί το οποίο αποτελεί σημαντικό παράγοντα εμφάνισης παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) περιλαμβάνει τα εξής κριτήρια:

- Όταν η φυσική περίοδος **T_{natural}** της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) είναι ίση περίπου με το διπλάσιο της περιόδου συναντήσεων κυμάτων.
- Όταν το μήκος κύματος καλύπτει το μήκος του πλοίου (μεταξύ **0.8** έως και **2** φορές του **L_{BP}**).
- Όταν το ύψος κύματος **H** υπερβαίνει ένα κρίσιμο όριο.
- Όταν η απόσβεση (**damping**) της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Όταν η κοιλάδα του κύματος (**wave through amidship**) διέρχεται από το μέσο νομέα του πλοίου έχουμε αύξηση της ευστάθειας του πλοίου και μείωση της ευστάθειας του πλοίου, όταν στο μέσο του πλοίου διέρχεται η κορυφή του κύματος (**wave crest**).
- Έχει παρατηρηθεί αυτό το φαινόμενο, όταν η γάστρα του πλοίου έχει σχετικά μεγάλο μήκος, είναι λεπτόγραμμη και έχει σχετικά έντονη κλίση πλώρης (**bow flare**), κάτι το οποίο το συναντάμε κυρίως σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ship**).

Στην περίπτωση του υπολογιστικού μέρους της εργασίας, παίρνοντας σχέδιο γραμμών (**lines plan**) από πραγματικό πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ship**) δημιουργήσαμε τη γάστρα του πλοίου σε σχεδιαστικό πρόγραμμα **rhino 3d**.

Ουσιαστικά, χρειάζεται η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου, έτσι ώστε να μπορέσουμε να εισάγουμε το πλοίο σε υδροστατικό υπολογιστικό πρόγραμμα **Maxsurf Stability**. Σε αυτό το πρόγραμμα υπολογίσαμε για 2 πραγματικές συνθήκες φόρτωσης από το **stability Booklet** του πλοίου **LC04** και **LC10, (Ballast condition)** και έμφορτη κατάσταση με **container** αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, μέσω του υδροστατικού προγράμματος **Maxsurf**, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι το πλοίο ικανοποιεί για συγκεκριμένα βυθίσματα (**drafts**) τα κριτήρια ευστάθειας (**Intact Stability Criteria**)/ **2008** σύμφωνα με τον **IMO**.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα καταλήξαμε, ότι το πλοίο έχει πολύ καλύτερη συμπεριφορά ευστάθειας στην περίπτωση **LC04** σε σχέση με την περίπτωση **LC10** σύμφωνα με τα διαγράμματα ευστάθειας απεικόνισης **GZ curve**.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά τη μελέτη του πλοίου ως προς το φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού, πειραματιστήκαμε για κάθε φάση κύματος, μήκος λ , πλάτος **H**, και σταθερή αναλογία (**wave steepness**) τη συμπεριφορά της καμπύλης **GZ**, άρα και του **GM**.

Με αυτό τον τρόπο αποδείχτηκε ιδιαίτερα στη συνθήκη φόρτωσης **LC10**, ότι όταν η κορυφή του κύματος (**wave crest**) βρίσκεται στη μέση περίπου του μέσου νομέα του πλοίου, έχουμε αρνητικό **GM**, δηλαδή αρνητική επίπτωση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς **GZ**, επομένως σημαντική απώλεια ευστάθειας, κάτι το οποίο μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling resonance**).

Επιπλέον, η κατάσταση φόρτωσης του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ship**) είναι ζωτικής σημασίας για την ανταπόκριση του πλοίου στο παραμετρικό διατοιχισμό. Εκ πρώτης όψεως, όσο υψηλότερο είναι το αρχικό μετακεντρικό ύψος **BM**, τόσο το καλύτερο για τη προφύλαξη της παραμετρικής αστάθειας γενικότερα.

Ωστόσο, για το μοντέλο της γάστρας μας που έχει μελετηθεί, όταν η αρχική μετακεντρική ακτίνα αυξάνεται, το ελάχιστο που απαιτείται ύψος κύματος **H** για παραμετρικό συντονισμό που θα συμβεί στην ταχύτητα εξυπηρέτησης του πλοίου μειώνεται.

Από την άλλη πλευρά, για να μπορέσουμε να αναλύσουμε περισσότερο, εάν το πλοίο-μοντέλο είναι ευάλωτο σε παραμετρικό διατοιχισμό, χρειάστηκε η συμμετοχή και άλλων πρακτικών μεθόδων, τα θεμελιώδη (**vulnerability criteria check**), όπου έχουν αναλυθεί από τα κριτήρια ευστάθειας 2^{ης} γενιάς σύμφωνα με τον **IMO**.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τόσο τα κριτήρια ευπάθειας επιπέδου 1 (**level 1 vulnerability criteria**) – (ανάλυση για 15 διαφορετικά χαρακτηριστικά κυμάτων) όσο και επιπέδου 2 (**level 2 vulnerability criteria**) για παραμετρικό διατοιχισμό **parametric rolling** (φαίνεται να πληρούν επαρκώς τους σκοπούς τους). Ο έλεγχος

ευπάθειας επιπέδου 1 απαιτεί υδροστατικό υπολογισμό του **GM** στο εύρος του κύματος για $\lambda=L_{BP}$ και $s_w=0.0167$ που χρησιμοποιήσαμε στη δικιά μας περίπτωση.

Επιπλέον, ο έλεγχος επιπέδου 2 ακολουθεί την ίδια υδροστατική έννοια, αλλά περιλαμβάνει επίσης μια επιπλέον προσέγγιση βασισμένη στον κίνδυνο αξιοποιώντας την πιθανότητα εμφάνισης κάθε κύματος.

Όμως το επίπεδο **2B** φαίνεται να είναι αρκετά προβληματικό καθώς πολλά σημαντικά ζητήματα απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία. Πρώτα απ' όλα, το γεγονός ότι εξετάζεται μόνο ένα μήκος κύματος είναι αμφισβητήσιμο, διότι χωρίς αμφιβολία υπάρχουν πολλές περιπτώσεις κυμάτων με μήκος λ ελαφρώς μικρότερο ή μεγαλύτερο από το μήκος του πλοίου που συνδέεται με την εμφάνιση πολύ μεγάλων παραμετρικών πλάτων διατοιχισμού.

Επιπλέον, το γεγονός ότι λαμβάνεται υπόψη μόνο η ταχύτητα σχεδιασμού είναι επίσης αμφισβητήσιμο. Οι υπολογισμοί σε δείγματα πλοίων έδειξαν ότι η ταχύτητα πλεύσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο.

Μια άλλη πολύ σημαντική πτυχή που φαίνεται να δημιουργεί προβλήματα και επηρεάζει την αξιοπιστία του ελέγχου επιπέδου **2B** είναι το γεγονός ότι ο κανονισμός με την τρέχουσα μορφή του απαιτεί τον υπολογισμό του παραμετρικού πλάτους διατοιχισμού όχι μόνο στους πλωραίους αλλά και στους πρυμναίους κυματισμούς για γωνίες εγκάρσιας κλίσης των $30^\circ, 60^\circ, 120^\circ$, και 150° . Ωστόσο, στον 1° βαθμό ελευθερίας της διαφορική εξίσωση παραμετρικού διατοιχισμού που χρησιμοποιείται είναι ικανή να προσομοιώνει μόνο τους πλωραίους και πρυμναίους κυματισμούς, καθώς δεν περιλαμβάνεται η διέγερση κύματος. Στην περίπτωση των γωνιών εγκάρσιας κλίσης των 60° ή 150° μοιρών οι δυνάμεις **Froude-Krylov** δημιουργούνται λόγω του γεγονότος ότι η ενσωμάτωση της πίεσης γύρω από την βρεχόμενη επιφάνεια δεν είναι παράλληλες προς τον άξονα **roll** κίνησης του πλοίου.

Επιπλέον, οι τιμές των **GMmean** και **GMamp** καθώς το κύμα περνά το πλοίο υπολογίζονται για τις περιπτώσεις **head** ή **following seas**, σε περίπτωση πρυμναίων κυματισμών όπου αντιστοιχεί η γωνία εγκάρσιας κλίσης 60° και 150° μοίρες, οι τιμές των **GMmean** και **GMamp** είναι αναμφίβολα πολύ διαφορετικές. Εάν ληφθεί επίσης υπόψη το γεγονός ότι αυτές οι τιμές **GM** μοντελοποιούν τις μεταβολές των κυμάτων αποκατάστασης και διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στον παραμετρικό συντονισμό διατοιχισμού, μπορούμε προφανώς να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα για πιθανές ανιχνευόμενες παραμετρικές γωνίες διατοιχισμού σε αυτές τις γωνίες εγκάρσιας κλίσης δεν είναι αξιόπιστα, ακόμη και αν πληρούνται τα κριτήρια συχνότητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης ευπάθειας **C2** του επιπέδου **2B** είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος 7 διαφορετικών γωνιών κατεύθυνσης κύματος. Ωστόσο, εξετάζοντας επίσης τις γωνίες εγκάρσιας κλίσης 60° και 150° μοίρες, η τιμή **C2** μειώνεται καθώς διαιρείται με το 7. Επιπλέον με βάση τους υπολογισμούς του δείγματος θεωρείται ότι η τιμή **0,15** που αντιστοιχεί στο όριο ευπάθειας είναι πολύ υψηλή, οδηγώντας σε λιγότερο συντηρητικό κριτήριο χωρίς προφανή λόγο. Η ανάλυση για τις οριακές καμπύλες **GM** του επιπέδου **2B** που παρουσιάστηκαν στην εργασία

δείχνουν ότι οι τιμές του **GM** που απαιτούνται από το σχέδιο κανονισμού είναι εντελώς μη αποδεκτές και αμφισβητήσιμες.

Ως συμπέρασμα πρέπει να αναφερθεί ότι το επίπεδο **2B** απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη και πιθανώς αλλαγές στη δομή του. Αρχικά πρέπει να συμπεριληφθεί η επίδραση διαφορετικών λειτουργικών ταχυτήτων και ο έλεγχος πρέπει να γίνει για διαφορετικά μήκη κύματος, για παράδειγμα σε μήκος κύματος 3 φορές μικρότερο ίσο και μεγαλύτερο από το μήκος του πλοίου. Επιπλέον, πρέπει να εξαλειφθεί ο έλεγχος των γωνιών εγκάρσιας κλίσης των 60° και 150° μοιρών και να επανεξεταστεί ο έλεγχος των 30° και 60° μοιρών. Τέλος, η τιμή **C2 = 0.15** για το όριο ευπάθειας θα πρέπει να επανεξεταστεί επίσης.

Επιπρόσθετα, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η υιοθέτηση των **22,5° deg** ως οριακής τιμής για το παραμετρικό πλάτος διατοιχισμού (**σύμφωνα με τον ABS**) είναι προς τη σωστή κατεύθυνση λόγω του γεγονότος ότι τα υλικά πρόσδεσης στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ships**) έχουν όριο απόδοσης κοντά στους **20** έως **25 deg**. (ABS, 2020)

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί, ότι έχουν γίνει υπολογισμοί του **HSVA (The Hamburg Ship Model Basin)** με το μη γραμμικό πρόγραμμα (**seakeeping ROLLSS**) σχετικά με τον παραμετρικό διατοιχισμό αυτού του πλοίου, όπως επισυνάπτεται. Ο υπολογισμός εκτελέστηκε για τιμή **GM = 0,5 m** σε **design draft**. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε μια φυσική περίοδος διατοιχισμού **T_{natural} = 41,5 s**. Ως αποτέλεσμα διαπιστώθηκε ότι το πλοίο μπορεί να εκτεθεί σε παραμετρικό διατοιχισμό σε μεσαίες ταχύτητες **V** ειδικά σε πρυμναίους κυματισμούς με σημαντικό ύψος κύματος **H = 6 m** και περιόδους κύματος μεταξύ περίπου **10** και **20 sec**. Στους πλωραίους κυματισμούς δεν εντοπίστηκαν αξιοσημείωτες κινήσεις **roll** που θα μπορούσαν να προκαλέσουν παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**).

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να τονιστεί ότι το βασικό σχέδιο κανονισμού για την παραμετρική αποτυχία ευστάθειας διατοιχισμού (**parametric rolling**), απαιτεί κάποια περαιτέρω ανάπτυξη και εξέταση. Η διατύπωση σαφών απαιτήσεων είναι απαραίτητη για την επίτευξη έγκυρων εφαρμογών. Εν τω μεταξύ, τα θέματα που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους θα πρέπει να αντιμετωπιστούν, σε μια προσπάθεια να λάβουν αξιόπιστα αποτελέσματα και ρεαλιστικές προσομοιώσεις, έτσι ώστε να έχουμε μία ευρύτερη και λεπτομερή προσέγγιση στο πόσο ευάλωτο είναι ένα πλοίο στο φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού.

7.2 Προτάσεις.

Οι προτάσεις σχετικά με την επέκταση του έργου που εκπονήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται, ως εξής:

- Εξέταση ενός μη γραμμικού μοντέλου για την διαφορική εξίσωση (**Mathieu**) και τη σύζευξη με την κίνηση **Heave, Pitch** ή ακόμα και τους έξι βαθμούς ελευθερίας που κινείται το πλοίο.
- Εξέταση των μη γραμμικών όρων απόσβεσης διατοιχισμού (**damping**).
- Μια πιθανοτική προσέγγιση στο φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού, με το φυσικό περιβάλλον της θάλασσας που περιγράφεται ως στοχαστική διαδικασία ή από ομάδες κυματισμών. Αυτές οι προσεγγίσεις είναι πιο κοντά στην πραγματική μορφή των κυμάτων ή φασμάτων (**spectrum**) αυτών στους ωκεανούς.
- Πειραματικά μοντέλα για την επαλήθευση των αναλυτικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Επιπρόσθετα, τα κριτήρια επιπέδου 1 (**Level 1 vulnerability Criteria**) όλων των μορφών αποτυχίας ευστάθειας είναι απλά και ξεκάθαρα και, ως εκ τούτου, δεν πρέπει να απαιτείται περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων τους.

Όμως, από την άλλη πλευρά, οι έλεγχοι ευπάθειας επιπέδου 2 (**Level 2 vulnerability criteria**) και για το φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού, χρειάζονται κάποιοι περαιτέρω πειραματισμοί. Η σωστή δοκιμή αυτών των μεθόδων θα μπορούσε να διεξαχθεί και να συγκριθεί με τα πειραματικά αποτελέσματα, προκειμένου να προσδιοριστεί ποιο είναι ικανό να προσομοιώνει με μεγαλύτερη ακρίβεια το φαινόμενο.

Επιπλέον, όλοι οι κανονισμοί κριτηρίων **ευστάθειας 2^{ης} γενιάς** θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και για πλοία που είχαν ατυχήματα ευστάθειας στο παρελθόν, σε μια προσπάθεια να καθορίσουν πόσο συνεπείς είναι οι κανονισμοί με την πραγματικότητα.

Όταν εντοπιστεί ευπάθεια επιπέδου 2 (**Level 2 vulnerability criteria**), θα χρειαστεί ένα τρίτο σύνολο υπολογισμών, στο πλαίσιο της άμεσης αξιολόγησης της ευστάθειας. Στο μέλλον, θα προταθούν περισσότερες μέθοδοι και οδηγίες σχετικά με την άμεση αξιολόγηση της ευστάθειας πλοίου, χρησιμοποιώντας δυνητικούς κώδικες ροής, υπολογιστικής ρευστοδυναμικής κλπ.

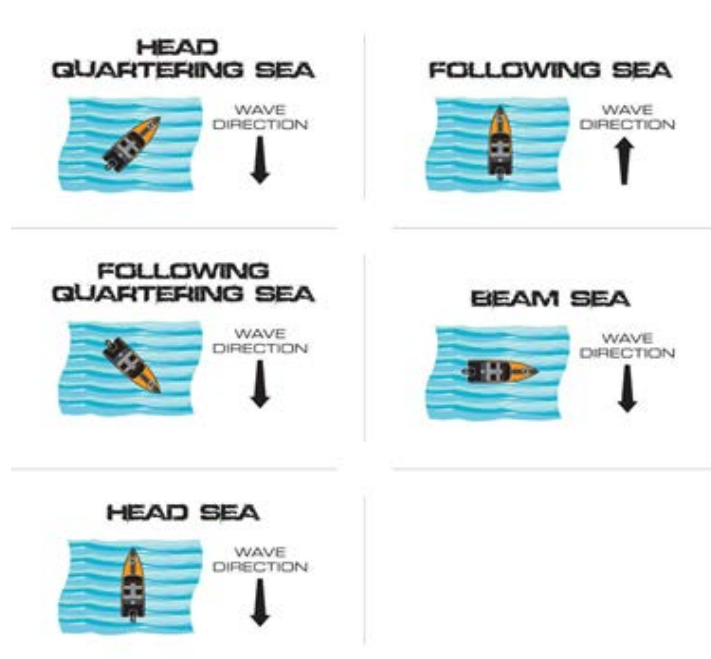
Το κύριο ζήτημα είναι με τη χρήση αυτών των κωδικών ως κανονισμούς, όπως αναφέρθηκε στη διπλωματική εργασία, είναι η επικύρωση, δεδομένου ότι διαφορετικές μέθοδοι μπορεί να παράγουν διαφορετικά αποτελέσματα για το ίδιο πλοίο. Η αξιολόγηση αυτών των μεθόδων θα απαιτηθεί στο μέλλον με την εφαρμογή τους σε μια σειρά πλοίων προκειμένου να ανιχνευθεί η ύπαρξη ασυνεπειών ή σφαλμάτων που μπορεί να δημιουργηθούν.

8 Βιβλιογραφία.

- Κ. Σπύρου ΕΜΠ, 2006, Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου.
- ΥΕΝ, Β.Δ. 740/569 1969, Αθήνα, Περί ευστάθειας εμπορικών πλοίων.
- Κολλι니아τής, Ι. Ε. 1997, Ίδρυμα Ευγενίδου, Αθήνα, Ευστάθεια – Κοπώσεις.
- Moore, C. S. 2010, New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Intact Stability.
- IMO (2008a) International code on intact stability, 2008 (2008 IS Code). Resolution MSC.267(85).
- IMO Second Generation Intact Stability Criteria: General Overview and Focus on Operational Measures Nicola Petacco and Paola Guale.
- (ABS) 2020, Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers.
- IMO, \Draft amendment to part b of the is code with regards to vulnerability criteria of levels 1 and 2 for the parametric rolling mode," SDC 2/WP.4, Annex 2, pp. 1{7, 2016.
- IMO, \Draft explanatory notes on the vulnerability of ships to the parametric roll stability failure mode," SDC 3/WP.5 Annex 4, page 1, pp. 1{34, 2016.
- Εκδόσεις Σταφυλίδη, 2020, Λεξικό Ναυτικών και Ναυτιλιακών όρων.
- Sergio RIBEIRO e SILVA, 2014, On the Parametric Rolling of Container Vessels.
- ANDERS SJULE, 2016, Evaluation of vulnerability to parametric rolling.
- Peters (M), V. Belenky (M), C. Bassler (M), K. Spyrou (M), N. Umeda (M), G. Bulian (V), B. Altmayer (V), 2011, The Second-Generation Intact Stability Criteria: An Overview of Development.
- ABS, 2019, ASSESSMENT OF PARAMETRIC ROLL RESONANCE IN THE DESIGN OF CONTAINER CARRIERS.
- Japan, 2020, FINALIZATION OF SECOND-GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA (Report of the Correspondence Group (part 1).
- MaxSurf, 2013: “Formation Design Systems, User Manual”.
- Yamagata, M., 1959: “Standard of Stability Adopted in Japan”, Transaction of the Institution of Naval Architects, 101:417-443.
- IMO, 1985: “Recommendation on a severe wind and rolling criterion (Weather Criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 meters in length and over”, Resolution A.562(14).
- IMO, 1993: “Code on Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments”, Resolution A.749(18).

Παράρτημα I

Μία σημαντική αναφορά παρουσιάζεται στην **εικόνα 12** για τα διάφορα στάδια κατεύθυνσης θαλάσσιων κυματισμών που μπορεί να συναντήσει ένα πλοίο, όπου θα μελετηθούν στην συνέχεια της εργασίας για την εξέταση τους στον παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**).



Εικόνα 12 – Απεικόνιση όλων των πιθανών κατευθύνσεων μπορεί να συναντήσει ένα πλοίο σε κυματισμούς.¹³

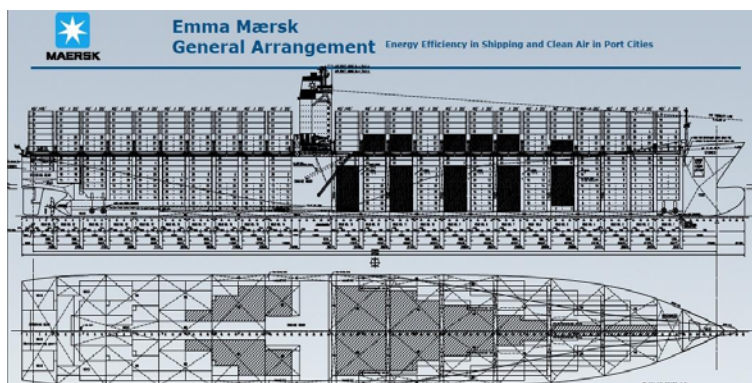
- **Head Quartering Sea:** Ορίζονται οι πλωραίοι κυματισμοί οι οποίοι συναντούν το πλοίο υπό γωνία 45° μοιρών.
- **Following Quartering Sea:** Ορίζονται οι πρυμναίοι κυματισμοί οι οποίοι συναντούν το πλοίο υπό γωνία 45° μοιρών.
- **Head Sea:** Ορίζονται οι πλωραίοι κυματισμοί.
- **Following sea:** Ορίζονται οι πρυμναίοι κυματισμοί.
- **Beam Sea:** Ορίζονται οι κυματισμοί οι οποίοι συναντούν το κύμα κατά τον διαμήκη άξονα είτε από **port** ή **starboard** πλευρά του πλοίου.

¹³ <https://www.thehulltruth.com/gulf-coast/656260-glacier-bay-gurus-2.html>

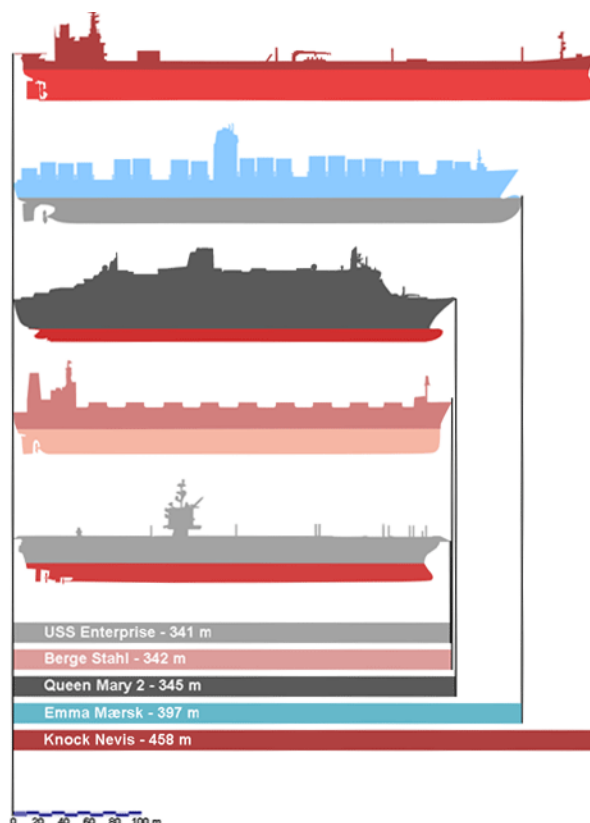
Παράρτημα II

Διάταξη και κανονισμοί πλοίων container ship

Αρχικά θα παρουσιαστεί ένα σκαρίφημα πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και συγκεκριμένα το **Emma Maersk** κατηγορίας VLCS το οποίο κατελκύστηκε το 2006 και αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα **container ships** στον κόσμο μέχρι σήμερα.



Εικόνα 19 – Emma Maersk σκαρίφημα πλάγιας όψης και κάτοψης.¹⁴



Εικόνα 20 – Διάταξη 5 πλοίων σε σύγκριση με το Emma Maersk Container ship.¹⁵

¹⁴ <http://www.vesseltracking.net/article/emma-maersk-container-ship>

¹⁵ <http://www.emma-maersk.com/specification>

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται αναλυτικός πίνακας όλων των κύριων διαστάσεων του **Emma Maersk**.

Emma Maersk details

Name:	Emma Maersk
Owner:	Moller-Maersk
Port of registry:	Taarbaek, Denmark
Identification:	ABS class no: 06151181 Call sign: OYGR2 IMO number: 9321483 MMSI: 220417000
Operator:	A. P. Moller-Maersk Group
Builder:	Odense Steel Shipyard Ltd, Denmark
Class & type:	Maersk E-class container ship
Construction cost	US \$145,000,000+
Tonnage:	170,794 GT 55,396 NT 156,907 DWT
Length:	397 m (1,302 ft)
Beam:	56 m (184 ft)
Draught:	16.02 m (52.6 ft)
Depth:	30 m (98 ft) (deck edge to keel)
Propulsion:	80 MW (109,000 hp) Wärtsilä 14RT-Flex96c plus 30 MW (40,000 hp) from five Caterpillar 8M32
Speed:	25.5 knots (47.2 km/h; 29.3 mph)
Capacity:	14,770+ TEU 1000 TEU (reefers)
Crew:	13, with room for 30
Laid down:	20 January 2006
Launched:	18 May 2006
Acquired:	31 August 2006
In service:	31 August 2006
First Trip	Sept?mber 08, 2006

Εικόνα 21 – Emma Maersk information πίνακας.¹⁶

¹⁶ [tp://www.vesseltracking.net/article/emma-maersk-container-ship](http://www.vesseltracking.net/article/emma-maersk-container-ship)

Στη συνέχεια ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στα κύρια τμήματα που χωρίζεται ένα πλοίο **container ship** τα οποία είναι τα εξής:

- **Πρύμνηθεν της πρυμναίας καθέτου (L_{AP}):** Ορίζεται η απόσταση απ' το πιο πρυμναίο σημείο της ισάλου γραμμής ως την πρυμναία κάθετο του πλοίου.
- **Πρύμνηθεν της πρυμναίας φρακτής (L_{AFT}):** Ορίζεται η απόσταση από την πρυμναία κάθετο (A.P.) έως την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου που συμπίπτει με την πρυμναία φρακτή σύγκρουσης.
- **Χώρος μηχανοστασίου (L_{ER}):** Ορίζεται το τμήμα μεταξύ της πρυμναίας και πρωραίας φρακτής του μηχανοστασίου. Περιλαμβάνει την μηχανολογική εγκατάσταση του πλοίου συμπεριλαμβανομένης της κύριας μηχανής, των γεννητριών και των διάφορων βοηθητικών μηχανημάτων.
- **Χώρος φορτίου (L_{CARGO}):** Ορίζεται ο χώρος μεταξύ της πρωραίας φρακτής μηχανοστασίου και της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης του πλοίου. Στο χώρο αυτό βρίσκονται τα κύττα δηλαδή τα αμπάρια του πλοίου (**Cargo Holds**) που ορίζονται από εγκάρσιες φρακτές.
- **Πρώραθεν της φρακτής σύγκρουσης (L_{LFWD}):** Ορίζεται η απόσταση από την πρωραία φρακτή σύγκρουσης έως την πρωραία κάθετο (F.P.). Η θέση της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης ορίζεται σύμφωνα με τον κανονισμό της **SOLAS** ως εξής:

$$\min \left\{ \begin{array}{l} 5\%L_{subdivision} \\ 10m \end{array} \right\} \leq d \leq \max \left\{ \begin{array}{l} 8\%L_{subdivision} \\ 5\%L_{subdivision} + 3m \end{array} \right\}$$

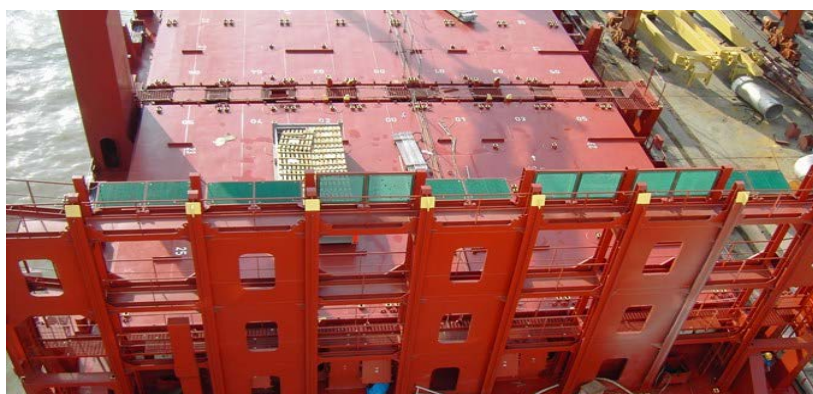
- **Πρώραθεν της πρωραίας καθέτου (L_{F.P.}):** Ορίζεται το τμήμα από τη πρωραία κάθετο του πλοίου ως το πιο πρωραίο σημείο της ισάλου γραμμής. όπου **d**, η απόσταση της φρακτής από την πρωραία κάθετο σε πλοία χωρίς βολβό. Ενώ σε πλοία με βολβό, το **d** ορίζεται ως η απόσταση της φρακτής από σημείο που βρίσκεται πρώραθεν της πρωραίας καθέτου σε απόσταση α από αυτή ίση με:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{L_{BULB}}{2} \\ 1.5\%L_{BP} \\ 3m \end{array} \right\}$$

Από τους κανονισμούς των νηογνομόνων ορίζεται ότι κάθε πλοίο πρέπει να έχει κατ' ελάχιστον μία πρωραία φράκτη σύγκρουσης (**Collision Bulkhead**), μια πρυμναία φρακτή σύγκρουσης (**After Peak Bulkhead**) και από μία φρακτή στο πρυμναίο και πρωραίο όριο του μηχανοστασίου (πρυμναία και πρωραία φρακτή μηχανοστασίου). Στις περιπτώσεις που εξετάζουμε όπου το μηχανοστάσιο βρίσκεται πρύμνηθεν, η πρυμναία φρακτή σύγκρουσης συμπίπτει με την πρυμναία φρακτή του μηχανοστασίου.

Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά πλοίων container ship

- **Κυψέλες οδηγοί (cell guides):** Ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων **container ship** ειδικά σχεδιασμένο για την αποτελεσματική αποθήκευση των εμπορευματοκιβωτίων, για την καλύτερη ασφάλεια σε τυχόν μετακινήσεις φορτίων κατά τη διάρκεια του κατά πλου (ταξιδιού) χρησιμοποιούνται οι γνωστές κατακόρυφες κυψέλες οδηγοί (**cell guides**). Επιπλέον σε **container ships** τύπου **Hatchcoverless** οι κυψέλες οδηγοί συνεχίζονται από τη βάση των αμπαριών του πλοίου μέχρι και πάνω από το κύριο κατάστρωμα (**main deck**).



Εικόνα 22 - Απεικόνιση κυψέλες οδηγών (cell guides) σε container ship.¹⁷

- **Καλύμματα καταπακτών (Hatchcoverless):** Τα καλύμματα καταπακτών των πλοίων **container ship** σχεδιάζονται για να είναι λειτουργικά και οικονομικά αποδοτικά, κατά τη διάρκεια της υπηρεσίας τους ώστε να μειώνεται ο χρόνος παραμονής των πλοίων στα λιμάνια. Ο κύριος στόχος των καλυμμάτων καταπακτών (**Hatchcoverless**) και των συρματόσχοινων (**coamings**) στα πλοία είναι να αποφευχθεί η είσοδος νερού στο χώρο αποσκευών και να προστατευθούν τα εμπορεύματα από την απόσβεση και τη φθορά κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Τα καλύμματα καταπακτών λειτουργούν επίσης ως εμπόδιο στην εσωτερική δομή του πλοίου, υπομένοντας τα πράσινα φορτία νερού σε ακραίες καιρικές συνθήκες, γεγονός που μπορεί να βλάψει την εσωτερική δομή του πλοίου λόγω διάβρωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα τους είναι η αυξημένη χωρητικότητα (**tonnage**) που προσδίδουν στο πλοίο σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο συμβατικό **container ship**. Αντιθέτως, τα πλοία αυτά παρουσιάζουν ένα αρνητικό χαρακτηριστικό που είναι η χαμηλή ακαμψία και στρέψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα **Hatchcoverless** να εφαρμόζονται μόνο σε μικρά πλοία **container ships** τύπου **feeder** δηλαδή. Επιπλέον πρέπει να υπογραμμιστεί ότι υπάρχουν διάφορα είδη καλυμμάτων καταπακτών τα οποία είναι τα εξής:
 - Τύπου Ανύψωσης (**Lifting**).
 - Τύπου **Rolling**.

¹⁷ <https://www.macgregor.com/Products/products/container-stowagesecuring-equipment/cell-guide-systems-on-deck-and-in-the-hold/>

- Τύπου Πτυσσόμενα (Folding).
- Τύπου Sliding.
- Τύπου Roll stowing.

Τα καλύμματα καταπακτών τύπου ανύψωσης (**Lifting**) χρησιμοποιούνται γενικά σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, ενώ ο τύπος **rolling** χρησιμοποιείται σε πλοία χύδην φορτίου. Ο τύπος **rolling** μπορεί να διαιρεθεί σε τύπο **slide rolling**, **piggyback** και τηλεσκοπικό (**telescopic**). Τα πτυσσόμενα καλύμματα **Folding** και τύπου **Roll stowing** καταπακτών χρησιμοποιούνται βασικά σε πλοία γενικού φορτίου **general cargo ships**. Ωστόσο, αυτά μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το χώρο στοιβασίας και τον τύπο του φορτίου που μεταφέρεται.



Εικόνα 23 – Πλοίο feeder ECX -3800 container ship με καλύμματα Hatchcoverless.¹⁸

Εμπορευματοκιβώτια (Containers).

Τα εμπορευματοκιβώτια (**containers**), είναι κιβώτια ειδικά σχεδιασμένα ώστε να μπορούν να μεταφερθούν στον τελικό προορισμό χωρίς να χρειάζεται να γίνει κάποια επέμβαση στο περιεχόμενο τους για λόγους που επιβάλλονται από τη μεταφορά. Υπάρχουν διεθνώς αναγνωρισμένες διαστάσεις τέτοιων κιβωτίων που μπορούν να μεταφερθούν και από μέσα μεταφοράς εκτός των πλοίων όπως φορτηγά, αυτοκίνητα, τραίνα κ.λπ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τυποποίηση του εμπορευματοκιβωτίου στη δεκαετία του 1970, με βάση τα **ISO** πρότυπα, υπήρξε απαραίτητη προϋπόθεση για την επερχόμενη παγκόσμια κυριαρχία των εμπορευματοκιβωτίων.

Τα εμπορευματοκιβώτια (**containers**) κατηγοριοποιούνται σε διαστάσεις **40*8*8,5** και **20*8*8,5**. Η μεταφορική ικανότητα των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μετράτε σε **T.E.U (Twenty – feet Equivalent Unit)** και σπανιότερα σε **F.E.U (Forty – feet Equivalent Unit)**.

¹⁸ <https://www.ajot.com/news/pioneering-container-feeder-vessel-designs>

Τύπος		40' High Cube	40'	20'	20' Open Top	40' Open Top	20' Flat Rack	40' Flat Rack
Εσωτερικές Διαστάσεις	Μήκος	12,056m	12,051m	5,919m	5,919m	12,403m	5,702m	11,820m
	Πλάτος	2,347m	2,340m	2,340m	2,340m	2,338m	2,438m	2,184m
	Ύψος	2,684m	2,380m	2,380m	2,286m	2,272m	2,327m	2,095m
Άνοιγμα Πόρτας	Πλάτος	2,340m	2,286m	2,286m	2,286m	2,279m		
	Ύψος	2,585m	2,278m	2,278m	2,251m	2,272m		
Άνοιγμα Οροφής	Μήκος				5,425m	1,585m		
	Πλάτος				2,222m	2,162m		
Απόβαρο		2900 kg	3084 kg	1900 kg	2174 kg	4300 kg	2330 kg	5260 kg
Χωρητικότητα		76,0 m3	67,3 m3	33,0 m3	31,6 m3	64,0 m3		
Φορτίο		29600 kg	27397 kg	22100 kg	21826 kg	25181 kg	28390 kg	25220 kg

Εικόνα 25 – Παρουσίαση τυποποιημένων διαστάσεων containers.¹⁹

Αξίζει να σημειωθεί, ότι για όλα τα μήκη των **containers** υπάρχουν δύο κατηγορίες ανάλογα τη διάσταση του ύψους. Η μία κατηγορία ονομάζεται (**High Cube**) και το ύψος της έχει καθοριστεί στα **2,90 m.**, ενώ η άλλη ονομάζεται (**Half Height**) και το ύψος της είναι καθορισμένο στα **1,30 m.** Βέβαια ένας ακόμα μεγάλος διαχωρισμός που υπάρχει ανάμεσα στα **containers** έχει σχέση με τη δομή τους. Οι κατηγορίες των **containers** είναι οι εξής:

Για ξηρά γενικά φορτία (**Dry storage container**).

- Επίπεδες επιφάνειες (**Flat rack container**).
- **Containers** που γεμίζουν από πάνω (**Open top container**).
- Διαθέτει πόρτες και στα 2 άκρα (**Tunnel container**).
- Ανοιχτά στα πλάγια (**Open side storage container**).
- Για μεταφορά οικοδομικών υλικών (**Double doors container**).
- Με κατάψυξη (**Refrigerated ISO containers**).
- Με θερμική μόνωση (**Insulated or thermal containers**).
- Για μεταφορά όπλων, εκρηκτικών, επικίνδυνου ειδικού φορτίου (**Special purpose containers**).
- Για υγρά χύδην φορτία και συμπιεσμένων αερίων (**Bulk liquid containers**)

¹⁹ <http://cargoterminalgrou.com/containers.php>



Εικόνα 26 – Κατηγορίες εμπορευματοκιβωτίων. (Πάλλης)

Παράρτημα III

Οδηγίες Νηογνώμωνων σχετικά με το φαινόμενο παραμετρικού διατοιχισμού (parametric rolling).

(SILVA), 2014) Είναι γεγονός ότι το πρόβλημα του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) επανήλθε στο προσκήνιο πολύ πρόσφατα ως αποτέλεσμα της σημαντικής απώλειας φορτίου και της ζημίας που υπέστησαν οι μεταφορείς εμπορευματοκιβωτίων τύπου (**Panamax containership**), γεγονός που οδήγησε τους νηογνώμονες να ενδιαφερθούν ειδικά για το φαινόμενο αυτό.

Ο Αμερικανικός νηογνώμονας (**ABS**) αποτελεί τον κορυφαίο Νηογνώμονα όσον αφορά την τεκμηρίωση του φαινομένου παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**), καθώς εξέδωσε τις πρώτες οδηγίες για την αξιολόγηση του παραμετρικού συντονισμού κίνησης **rolling** στο σχεδιασμό των μεταφορέων εμπορευματοκιβωτίων **container ships** τον Σεπτέμβριο του **2004**, με κύριο σκοπό τη συμπλήρωση των κανόνων και των άλλων κριτηρίων σχεδιασμού και ανάλυσης που εκδίδει ο (**ABS**) για την ταξινόμηση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (**container ships**).

Οι οδηγίες του Αμερικανικού Νηογνώμονα (**ABS**) περιέχουν μια σύντομη περιγραφή του φυσικού φαινομένου του παραμετρικού συντονισμού (**parametric rolling**), το οποίο μπορεί να προκαλέσει υπερβολική κίνηση διατοιχισμού ενός πλοίου σε διαμήκη (**head and following seas**) κύματα. Οι οδηγίες περιέχουν επίσης μια περιγραφή των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί εάν ένα συγκεκριμένο πλοίο είναι ευάλωτο σε παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**) (**κριτήρια ευαισθησίας**) και πόσο μεγάλες είναι αυτές οι κινήσεις **rolling** (**κριτήρια σοβαρότητας**). Η διαδικασία που βασίζεται σε εργασίες που πραγματοποιήθηκαν από τη σχέση (5,7), η οποία έδωσε το τεχνικό υπόβαθρο του Αμερικανικού Νηογνώμονα (**ABS**) εξηγείται λεπτομερώς στη συνέχεια της εργασίας.

Αξίζει να επισημανθεί ότι το Μάρτιο του **2008**, ο Αμερικανικός Νηογνώμονας (**ABS**) απένειμε την πρώτη κατηγορία πλοίων ειδικά για παραμετρική κίνηση **rolling** σε τρία πλοία στο στόλο της **Hyundai Merchant Marine**. Ο προαιρετικός συμβολισμός κλάσης εκδόθηκε με βάση τα κριτήρια που περιέχονται στις οδηγίες του **ABS** για την αξιολόγηση του παραμετρικού συντονισμού (**parametric rolling**) στο σχεδιασμό των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ο οποίος παρέχει μέτρα σχεδιασμού και ανάλυσης για να καθορίσει εάν ένα συγκεκριμένο πλοίο είναι ευάλωτο στον παραμετρικό διατοιχισμό και το εύρος των κινήσεων **rolling**.

Ο Αγγλικός Νηογνώμονας (**Lloyd's Register of Shipping**) υποστηρίζει πρωτοβουλίες που έγιναν για την εισαγωγή καθοδήγησης σχετικά με την αποφυγή του παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**). Επί του παρόντος, η υποεπιτροπή του **IMO** για την ευστάθεια και τις γραμμές φορτώσεως και για την ασφάλεια των αλιευτικών σκαφών (**IMO SLF**) είναι επιφορτισμένη με την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος. Σε απάντηση στις ανησυχίες που εκφράστηκαν στον κλάδο, ο **LR (Lloyd's Register of Shipping)** διερεύνησε τις απαιτήσεις εξασφάλισης εμπορευματοκιβωτίων. Ο **LR**

προτείνει απλουστευμένη μέθοδο εκτίμησης ευαισθησίας που θεωρεί τις κινήσεις διατοιχισμού (**rolling**), αντιμετωπίζοντάς τις ως ένα απλό σύστημα **Αποσβεστήρα Μάζας-Ελατηρίου** με ένα μόνο βαθμό ελευθερίας. Οποιοδήποτε λογισμικό (**seakeeping software**) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των κινήσεων του πλοίου σε επιλεγμένες συνθήκες κύματος, για μια σειρά ταχυτήτων και κατεύθυνσης. Από τα προκύπτοντα δεδομένα, η διακύμανση της ευστάθειας του πλοίου μέσω των κυμάτων και οι λειτουργικές σχέσεις μεταξύ της συχνότητας συνάντησης κύματος και η φυσική συχνότητα κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) χρησιμοποιήθηκαν για να βοηθήσουν στην αποφυγή της πιθανότητας παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**).

Επιπλέον ο Γαλλικός Νηογνώμονας (**Bureau Veritas**) συνιστά κατάλληλες λύσεις του απλούστερου μαθηματικού μοντέλου παραμετρικού διατοιχισμού (**parametric rolling**) λαμβάνοντας υπόψη στον ένα βαθμό ελευθερίας εξίσωσης κίνησης **rolling**, στον οποίο ο συντελεστής αποκατάστασης γίνεται εξαρτώμενος από το χρόνο. Οι υπολογιζόμενες υδροστατικές παραλλαγές προσεγγίζονται από την ημιτονοειδή συνάρτηση που οδηγεί στην εξίσωση τύπου **Mathieu** για κίνηση **rolling**, από την οποία μπορούν να αναγνωριστούν οι περιοχές όπου λαμβάνει χώρα η αστάθεια λόγω κίνησης **rolling**. Σε προκαταρκτικά στάδια ο **BV** προτείνει απλοποιημένα αναλυτικά μοντέλα, τα οποία επιτρέπουν την ταχεία αναγνώριση των επικίνδυνων ζωνών, ωστόσο στην τελική φάση της παραμετρικής αξιολόγησης, προτιμάται η χρήση των μη γραμμικών αριθμητικών μοντέλων που είναι σε θέση να συμπεριλάβουν όλα τα είδη μη γραμμικότητων με φυσικό τρόπο.

Συνοψίζοντας, η προσέγγιση **BV** ορίζει μια διαδικασία δύο βημάτων:

- Προκαταρκτικοί έλεγχοι με χρήση του απλουστευμένου αναλυτικού μοντέλου.
- Πλήρως μη γραμμικές προσομοιώσεις για κρίσιμες περιπτώσεις.

Μετά από τα παραπάνω είναι δυνατή η παραγωγή των πολικών συντεταγμένων που αντιπροσωπεύουν τη μέγιστη αναμενόμενη κίνηση διατοιχισμού (**rolling**) για μια δεδομένη θαλάσσια κατάσταση σε σχέση με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του πλοίου. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι και ο Νορβηγικός Νηογνώμονας (**Det Norske Veritas**) εξέδωσε μια ενημερωμένη έκδοση για πλοία (**containership**), εκτός από τις παραδοσιακές υπηρεσίες κλάσης κατά τη διάρκεια των φάσεων σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας.

Παρέχουν στους ιδιοκτήτες και τους φορείς εκμετάλλευσης ολοένα και πιο δημοφιλείς υπηρεσίες, όπως η ενεργός καθοδήγηση του χειριστή (**Πλοίαρχος**) (**Active Operator Guidance**), συμβουλές σχετικά με τις ακραίες κινήσεις **rolling**-παραμετρικός διατοιχισμός και πώς να τις αποφύγετε για μια θαλάσσια κατάσταση στην οποία η γάστρα του πλοίου, δεδομένου του μήκους και του ύψους κύματος καθώς και της απόστασης μεταξύ των κυμάτων, μπορεί να υπόκειται σε ακραίες κινήσεις διατοιχισμού (**rolling**).

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι ο **IMO (International Maritime Organization)** έχει δημοσιεύσει αναθεωρημένη καθοδήγηση στον πλοίαρχο για την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων σε αντίξοες καιρικές συνθήκες και θαλάσσιες συνθήκες όπου εξηγούνται τα φυσικά φαινόμενα των παραμετρικών κινήσεων διατοιχισμού (**rolling**) ενός πλοίου. Επιχειρησιακή καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο αποφυγής επικίνδυνων συνθηκών στους πρυμναίους και πλωραίους κυματισμούς (**following και head seas**) δίνεται για την περίοδο συνάντησης που είναι κοντά στο ήμισυ της περιόδου κίνησης διατοιχισμού του πλοίου.

Ως εκ τούτου, εκτός από τους ειδικούς ελέγχους των εντύπων της γάστρας και την ανάγκη προσαρμογής των διατάξεων καταστολής της κίνησης διατοιχισμού (**rolling**) κρίνεται σκόπιμο να αναθεωρηθεί η καθοδήγηση προς τον πλοίαρχο για την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων σε (**following και Quartering seas**). Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο αναφερόμενο σενάριο πλωραίων κυματισμών (**bow seas**), όπου η καλύτερη πρώτη πορεία δράσης θα πρέπει να είναι μάλλον η αύξηση της ταχύτητας παρά η μείωση της ταχύτητας του πλοίου, όπως αναφέρεται αναλυτικότερα στα κριτήρια 2^{ης} γενιάς όπου θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Επιπλέον, τα διάφορα κριτήρια των Νηογνωμόνων μπορεί να μην προβλέπουν ισοδύναμες ανταποκρίσεις και επιταχύνσεις στη διάρκεια ζωής ενός πλοίου. Κατά συνέπεια, τα ισχύοντα κριτήρια Νηογνωμόνων δεν παρέχουν απαραίτητα ομοιόμορφα πρότυπα σχεδιασμού – μελέτης για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που αντιμετωπίζουν παραμετρικό διατοιχισμό (**parametric rolling**) στη θάλασσα.