



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ – ΡΟΗ Ι

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παραμετρική αστάθεια και δυναμικές αποκρίσεις σε κυματισμούς φρεγάτας
τύπου Standard του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού.



ΚΟΛΕΤΣΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Κ. ΣΠΥΡΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.

Κεφάλαιο 2: Παραμετρικός διατοιχισμός.

2.1 Γενικά περί παραμετρικού διατοιχισμού.

2.2 Κριτήρια ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό.

2.3 Υπολογισμός της απόσβεσης διατοιχισμού.

2.3.1 Ημι-εμπειρική μέθοδος Ikeda.

2.3.2 Εμπειρική μέθοδος Miller.

Κεφάλαιο 3: Μοντελοποίηση γάστρας φρεγάτας τύπου Standard.

3.1 Μοντελοποίηση επιφάνειας γάστρας στο περιβάλλον λογισμικού Maxsurf.

3.2 Έλεγχος καταλληλότητας μοντέλου.

Κεφάλαιο 4: Έλεγχος της ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό.

4.1 Μεταβολή της εγκάρσιας ευστάθειας πλοίου σε διαμήκεις κυματισμούς.

4.1.1 Παραδοχές.

4.1.2 Αποτελέσματα.

4.2 Εφαρμογή του κριτηρίου συχνότητας.

4.2.1 Παραδοχές.

4.2.2 Αποτελέσματα.

4.3 Εφαρμογή του κριτηρίου οριακής τιμής της απόσβεσης διατοιχισμού.

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 5: Δυναμικές αποκρίσεις φρεγάτας τύπου Standard σε κυματισμούς στους έξι(6) βαθμούς ελευθερίας.

5.1 Γενικά.

5.2 Έλεγχος αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 6: Ανακεφαλαίωση – Τελική αξιολόγηση ευπάθειας πλοίου σε παραμετρικό διατοιχισμό.

Σύμβολα και ονοματολογία.

Βιβλιογραφία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α : Έλεγχος της μοντελοποίησης γάστρας.

Παράρτημα Β : Έλεγχος ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό.

Παράρτημα Γ : Αρχεία "m-files" σε περιβάλλον Matlab.

Παράρτημα Δ: Διερεύνηση μέγιστου σταθερού πλάτους παραμετρικού διατοιχισμού στη περίπτωση της κατάστασης φόρτωσης II.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Κ. Σπύρου για την καθοδήγηση και επίβλεψη σε όλη τη διάρκεια της εργασίας καθώς και τον αξιωματικό της Φ/Γ Κανάρης Υποπλοίαρχο (Μ) Δ.Ψύχαλο Π.Ν για τη σημαντική βοήθειά του με την εύρεση και παραχώρηση των απαραίτητων στοιχείων και σχεδίων του υπό μελέτη πλοίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικός σκοπός της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό μιας φρεγάτας τύπου Standard του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Παράλληλα διερευνώνται οι δυναμικές αποκρίσεις του πλοίου σε κυματισμούς και στους έξι(6) βαθμούς ελευθερίας, μέσω του υπολογισμού των αντίστοιχων τελεστών πλάτους απόκρισης (response amplitude operators ή RAO). Ερέθισμα για την επιλογή του θέματος αποτέλεσαν τα κάτωθι :

α. Το φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού αν και γνωστό στην επιστημονική κοινότητα ήδη από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, συγκεντρώνει τα τελευταία μόλις χρόνια το αυξημένο ενδιαφέρον των διεθνών οργανισμών (ΙΜΟ, νηογνώμονες) που ασχολούνται με την ευστάθεια πλοίου και αναγνωρίζουν πλέον μια νέα διάσταση στο τομέα της δυναμικής ευστάθειας που υπό προϋποθέσεις μπορεί να οδηγήσει ακόμη και στην ανατροπή του σκάφους.

β. Τα πολεμικά πλοία υπακούοντας σε ιδιαίτερους και ανεξάρτητους κανονισμούς ασφαλείας, πέραν των διεθνώς αναγνωρισμένων που αφορούν αποκλειστικά στον εμπορικό στόλο, αποτελούν ένα εξειδικευμένο αντικείμενο της ναυπηγικής επιστήμης στο οποίο η εφαρμογή των σύγχρονων εξελίξεων και ευρημάτων αν και αυτονόητη δεν είναι προφανής.

γ. Οι φρεγάτες τύπου Standard, Ολλανδικής κατασκευής, παρά την ηλικία τους (σχεδίαση και κατασκευή της δεκαετίας του 70) αποτελούν τη κύρια μονάδα κρούσης του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού επιχειρώντας επί σειρά ετών άνευ περιορισμών σε οποιαδήποτε κατάσταση θαλάσσης, επιδεικνύοντας ιδιαίτερη αξιοπλοΐα.

Η ποιοτική και ποσοτική περιγραφή του μηχανισμού που επιφέρει το παραμετρικό διατοιχισμό ενός πλοίου θεωρούνται σήμερα ιδιαίτερα ικανοποιητικές. Η δυναμική του φαινομένου είναι πλήρως κατανοητή και ουσιαστικά ταυτίζεται με εκείνη ενός εκκρεμούς το οποίο με απώλεια της ευσταθούς κίνησής του εκτρέπεται προς τα πάνω, όταν το σημείο άρθρωσής του δεν είναι σταθερό αλλά μετακινείται περιοδικά στη κατακόρυφη διεύθυνση με κατάλληλο πλάτος και συχνότητα. Ναυτικά ατυχήματα των τελευταίων ετών που οδήγησαν σε απώλεια φορτίων και σκαφών (κυρίως πλοίων containerships) και οφείλονταν στην εμφάνιση αιφνίδιου, μεγάλου πλάτους διατοιχισμού, βρήκαν την ερμηνεία τους στο φαινόμενο του παραμετρικού συντονισμού. Ταυτόχρονα έδωσαν την αφορμή στο Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό(ΙΜΟ) να κινηθεί προς τη κατεύθυνση της αναθεώρησης – βελτίωσης [1] των κριτηρίων άθικτης ευστάθειας, που έως τον πρόσφατο

κώδικα "2008 Intact Stability Code" (από το Μάιο 2007) αντιμετωπίζουν με επιφύλαξη τις εξελίξεις στη ναυπηγική επιστήμη και ιδίως εκείνες που αναφέρονταν στη δυναμική συμπεριφορά του σκάφους εν πλω. Δυναμικά φαινόμενα όπως η αυθεντική και παραμετρική αστάθεια, το broaching και ο συντονισμός κλασσικού τύπου μόλις πρόσφατα άρχισαν να αξιολογούνται σε μια προσπάθεια θέσπισης κριτηρίων για την αποφυγή τους, κριτηρίων που εφαρμόζονται είτε στο στάδιο σχεδίασης του σκάφους είτε στο στάδιο χειρισμού εν πλω. Η πρόσφατη, βελτιωμένη [2] "Οδηγία προς τον Πλοίαρχο για την αποφυγή επικίνδυνων καταστάσεων σε δυσμενείς καιρικές και θαλάσσιες συνθήκες" που εκδόθηκε από τον IMO τον Ιανουάριο 2007 αποτελεί μια τέτοια προσπάθεια. Αντίστοιχες προσπάθειες που ταυτόχρονα αποτέλεσαν οδηγό στην εκπόνηση της παρούσης εργασίας αποτελούν η οδηγία [3] του οργανισμού ITTC (International Towing Tank Conference) και η οδηγία [4] του Αμερικανικού νηογνώμονα ABS (American bureau of shipping).

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιχειρεί να αξιολογήσει την ευπάθεια σε παραμετρικό διατοιχισμό μιας φρεγάτας τύπου Standard που πλέει σε αρμονικούς διαμήκεις κυματισμούς και δεν επεκτείνεται στη περίπτωση φυσικών – ακανόνιστων κυματισμών λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου που αποτελεί τρέχον πεδίο έρευνας της ναυπηγικής επιστήμης και για το οποίο δεν έχουν διατυπωθεί έως τώρα συγκεκριμένα κριτήρια ευπάθειας [3]. Η εργασία περιορίζεται επίσης στη μελέτη της ευπάθειας μόνο σε "κύριο παραμετρικό συντονισμό" με δεδομένο ότι αυτός έχει ιδιαίτερη πρακτική εφαρμογή στα πλοία [5],[6].

Για το σκοπό αυτό η παρούσα μελέτη ακολουθεί εν μέρει τη μεθοδολογία του περιγράφεται στη οδηγία του Αμερικανικού νηογνώμονα ABS, εφαρμόζει όμως για την αξιολόγηση της ευπάθειας της φρεγάτας τις μαθηματικές σχέσεις που περιλαμβάνονται στην οδηγία του ITTC, δεδομένου ότι αυτές είναι απλούστερες και η ορθότητά τους αναμφίβολη καθώς προκύπτουν από την εφαρμογή στη μοντελοποίηση του φαινομένου της διαφορικής εξίσωσης Mathieu. Συνοπτικά η εργασία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια :

α. Μοντελοποίηση της επιφάνειας της γάστρας του σκάφους με τη βοήθεια καμπυλών B-splines και NURBS στο περιβάλλον του κατάλληλου λογισμικού Maxsurf.

β. Έλεγχος της καταλληλότητας του μοντέλου συγκρίνοντας τα υδροστατικά του χαρακτηριστικά και τη καμπύλη στατική ευστάθειας (όπως αυτά

προκύπτουν με χρήση του λογισμικού Hydromax) με τα αντίστοιχα που περιλαμβάνονται στο "Εγχειρίδιο ευστάθειας" του πλοίου.

γ. Τοποθέτηση του μοντέλου (επίσης στο περιβάλλον του λογισμικού Hydromax) σε αρμονικούς κυματισμούς με διάφορα μήκη και ύψη και υπολογισμός των τιμών του μετακεντρικού ύψους GM καθώς η κορυφή του κύματος διατρέχει το μήκος του πλοίου. Υπολογισμός της μεταβολής και της μέσης τιμής του GM για τις επιμέρους θέσεις της κορυφής του κύματος ως προς το μήκος του πλοίου. Υπολογισμός της ιδιοσυχνότητας διατοιχισμού στο κύμα με χρήση της μέσης τιμής του GM.

δ. Εφαρμογή του "κριτηρίου συχνότητας" για την εμφάνιση κύριου παραμετρικού συντονισμού, δηλαδή συχνότητα συνάντησης κύματος ίση με το διπλάσιο της ιδιοσυχνότητας διατοιχισμού στο κύμα και εύρεση της ταχύτητας πλοίου που συνεπάγεται η εν λόγω εξίσωση. Επαλήθευση ότι η υπολογιζόμενη ταχύτητα βρίσκεται εντός των επιχειρησιακών δυνατοτήτων του σκάφους.

ε. Υπολογισμός του αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης διατοιχισμού (roll damping ratio) στο κύμα με χρήση των ημι-εμπειρικών τύπων των Ikeda και Miller καθώς και του λογισμικού FD-Waveload και έλεγχος της ισχύος του "κριτηρίου οριακής τιμής της απόσβεσης" για την εμφάνιση κύριου παραμετρικού διατοιχισμού, το οποίο απαιτεί ο αδιάστατος λόγος μεταβολής του μετακεντρικού ύψους GM στο κύμα να υπερβαίνει το τετραπλάσιο του αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης διατοιχισμού.

στ. Σχολιασμός των αποτελεσμάτων της μελέτης και πρόβλεψη του σταθερού πλάτους παραμετρικού διατοιχισμού στη περίπτωση εμφάνισής του, με εφαρμογή των αναγραφόμενων στις αντίστοιχες παραγράφους των βιβλιογραφικών αναφορών [3] και [8].

ζ. Τελική αξιολόγηση της ευπάθειας του πλοίου σε κύριο παραμετρικό συντονισμό.

Παράλληλα με αφορμή τις δυνατότητες των χρησιμοποιούμενων λογισμικών Maxsurf και FD-Waveload, διερευνώνται οι δυναμικές αποκρίσεις του πλοίου σε κυματισμούς και στους έξι(6) βαθμούς ελευθερίας μέσω του υπολογισμού των αντίστοιχων τελεστών RAO και γίνεται μια ενδεικτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του σκάφους χρησιμοποιώντας ένα μικρό αριθμό των σχετικών κριτηρίων αξιοπλοΐας πολεμικών πλοίων που αναφέρονται στην οδηγία NATO Stanag 4154 (edition 3 από το 1998).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΣ

2.1 Γενικά περί παραμετρικού διατοίχισμού.

Ο παραμετρικός διατοίχισμός αναγνωρίζεται ως μια αιφνίδια και σημαντική ενίσχυση του πλάτους διατοίχισμού σε διαμήκεις θάλασσες και προκαλείται από τη περιοδική μεταβολή της εγκάρσιας ευστάθειας του πλοίου σε αυτό το είδος

κυματισμού, η οποία χαρακτηρίζεται από την αύξηση της ευστάθειας όταν το σκάφος βρεθεί στην κοιλάδα του κύματος και αντίθετα από τη μείωσή της όταν αυτό βρεθεί στη κορυφή του. Η μεταβολή της ευστάθειας σε διαμήκεις κυματισμούς είναι με τη σειρά της αποτέλεσμα της μορφής της γάστρας του πλοίου που γενικά εμφανίζει σχεδόν κατακόρυφες γραμμές στο μέσο και γραμμές που αλλάζουν έντονα τη κλίση τους στα άκρα και ιδιαίτερα στη πλώρη. Όταν το πλοίο βρεθεί στην κορυφή του κύματος η απώλεια όγκου κάτω από την ίσαλο και προς τα άκρα του πλοίου μαζί με την ταυτόχρονη αύξηση του βυθισμένου όγκου στο μέσο, θα επιφέρουν τη μετακίνηση του κέντρου άντωσης προς τα πάνω δηλαδή την αύξηση του KB. Παράλληλα σημαντική επιφάνεια ισάλου θα απωλεσθεί κοντά στα άκρα λόγω της κλίσης των γραμμών στη περιοχή και επομένως η ροπή αδράνειας της ισάλου επιφάνειας ως προς τον διαμήκη άξονα περιστροφής I_T θα μειωθεί. Άμεση συνέπεια θα είναι η μείωση της μετακεντρικής ακτίνας $BM = I_T \cdot \rho / \Delta$ η οποία γενικά είναι εντονότερη της αύξησης του KB, με αποτέλεσμα μια τελική μείωση του $GM = KB + BM - KG$ (KG αμετάβλητο).

Η μεταβολή του GM με το χρόνο καθώς ένα ημιτονοειδές κύμα διατρέχει το μήκος του πλοίου είναι γενικά μια περιοδική συνάρτηση με περίοδο T_e , μπορούμε όμως με ικανοποιητική προσέγγιση να θεωρήσουμε ότι αποτελεί επίσης μια ημιτονοειδή συνάρτηση του χρόνου που δύναται να εκφρασθεί ως $GM(t) = GM_m + GM_a \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varepsilon) \rightarrow GM(t) = GM_m \cdot [1 + h \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varepsilon)]$. Θεωρώντας το διατοιχισμό σε διαμήκη κυματισμό γραμμικό (γραμμική απόσβεση και ροπή επαναφοράς) και μη συζευγμένο με τις άλλες κινήσεις του πλοίου προκύπτει η ακόλουθη διαφορική εξίσωση που τον περιγράφει ως :

$$(I + \Delta I) \cdot \ddot{\varphi} + B_{44} \cdot \dot{\varphi} + m \cdot g \cdot GM_m \cdot [1 + h \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varepsilon)] \cdot \varphi = 0 \quad \text{και ισοδύναμα}$$

$$\ddot{\varphi} + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_\varphi \cdot \dot{\varphi} + \omega_\varphi^2 \cdot [1 + h \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varepsilon)] \cdot \varphi = 0. \quad (1)$$

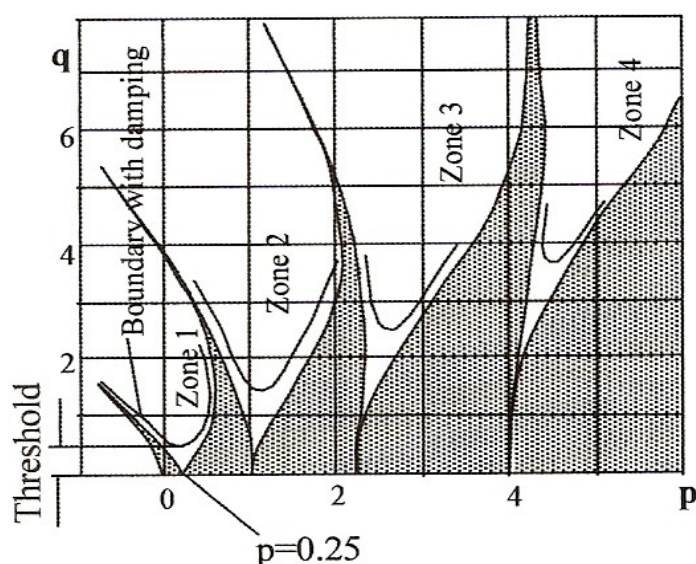
Η διαφορική εξίσωση (1) χωρίς την απόσβεση $\zeta=0$ είναι η γνωστή στα μαθηματικά εξίσωση Mathieu η οποία παρά την απλότητά της δεν επιδέχεται μια ακριβή αναλυτική λύση. Περιοριζόμαστε έτσι σε μια ποιοτική περιγραφή των λύσεων διακρίνοντας αυτές σε ευσταθείς και ασταθείς, δεχόμενοι ως ευσταθείς τις λύσεις στις οποίες για $t \rightarrow \infty$ η εξαρτημένη μεταβλητή $\varphi(t)$ λαμβάνει πεπερασμένες, φραγμένες τιμές, ενώ στη περίπτωση της αστάθειας για $t \rightarrow \infty$ η εξαρτημένη μεταβλητή $\varphi(t) \rightarrow \infty$ πέρα από κάθε όριο, γεγονός που στη

περίπτωση του διατοιχισμού σημαίνει διαρκώς αυξανόμενες γωνίες εγκάρσιας κλίσης ϕ και τελικά ανατροπή του σκάφους.

2.2 Κριτήρια ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό.

Τα κριτήρια ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό που διατυπώνονται παρακάτω προκύπτουν ως φυσικό επακόλουθο της μαθηματικής ανάλυσης των λύσεων της εξίσωσης (1).

Αποδεικνύεται [5] ότι για $(4 \cdot \omega_\phi^2 / \omega_e^2) = n^2$, όπου n οποιοσδήποτε φυσικός αριθμός, υπάρχουν λύσεις της εξίσωσης Mathieu που αντιπροσωπεύουν ασταθείς καταστάσεις. Την εποπτεία των περιοχών ασταθούς λύσεως διευκολύνει το γνωστό ως διάγραμμα Strutt-Ince που φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα Strutt-Ince. Ισχύει ότι $p = (\omega_\phi / \omega_e)^2$ και $q = h \cdot p$. Οι γραμμοσκιασμένες περιοχές του διαγράμματος αντιπροσωπεύουν τις ευσταθείς λύσεις της εξίσωσης Mathieu όπως αυτές προκύπτουν από τους κατάλληλους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων p και q . Στη περίπτωση του κύριου συντονισμού όπου $p = 0,25$ (Zone 1) φαίνεται στο σχήμα ο περιορισμός της περιοχής ασταθών λύσεων που επιφέρει η ύπαρξη απόσβεσης και η αντίστοιχη οριακή τιμή (threshold) που πρέπει να υπερβεί η διέγερση h ώστε να έχουμε ασταθή λύση. Ειδικότερα και στη περίπτωση όπου $\omega_e \approx 2 \cdot \omega_\phi$ αποδεικνύεται [3] ότι ασταθείς λύσεις προκύπτουν εφόσον ισχύει ότι $h \geq \sqrt{[(2 - (\omega_e^2 / 2 \cdot \omega_\phi^2))^2 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot (\omega_e^2 / \omega_\phi^2)]}$.

Από τις περιοχές αστάθειας της εξίσωσης Mathiew εκείνες που προκύπτουν για $n \geq 2$ δεν έχουν πρακτική εφαρμογή στα πλοία [5],[6]. Για το λόγο αυτό η παρούσα εργασία περιορίζεται στη περιοχή του κύριου παραμετρικού συντονισμού όπου $n=1$. Σε αυτή τη περιοχή και προκειμένου να ελεγχθεί η ευπάθεια του πλοίου σε παραμετρικό διατοιχισμό εφαρμόζονται τα ακόλουθα κριτήρια [3],[4] :

α. Κριτήριο συχνότητας : Οι συχνότητες ω_ϕ και ω_e να ικανοποιούν τη σχέση $\omega_e = 2 \cdot \omega_\phi$.

β. Κριτήριο οριακής τιμής της απόσβεσης διατοιχισμού : Η "διέγερση" h να ικανοποιεί τη σχέση $h \geq 4\zeta$.

Από τα ανωτέρω είναι προφανές ότι η απόσβεση διατοιχισμού (roll damping) ρυθμίζει καίρια την αποφυγή του παραμετρικού συντονισμού και συνεπώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα κατά τη σχεδίαση του σκάφους.

2.3 Υπολογισμός της απόσβεσης διατοιχισμού.

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, παράγοντας κλειδί στην αποτροπή εμφάνισης παραμετρικού συντονισμού και στη περίπτωση που ικανοποιείται το κριτήριο συχνότητας είναι η ροπή απόσβεσης $B_{44} \cdot \phi'$ που υπεισέρχεται στην εξίσωση διατοιχισμού ως γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας ϕ' . Στη πραγματικότητα όταν το πλάτος διατοιχισμού και η γωνιακή ταχύτητα ϕ' λαμβάνουν υψηλές τιμές, η ροπή απόσβεσης γίνεται μη γραμμική. Για το λόγο αυτό και προς απλούστευση της σχετικής ανάλυσης συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ένας "ισοδύναμος γραμμικοποιημένος" διαστατός συντελεστής απόσβεσης $B_{44} = B_{44p} + B_{44v}$ [5],[9],[10]. Ο όρος B_{44p} αντιπροσωπεύει τη γραμμική, δυναμική (potential) απόσβεση που προβλέπεται από τη θεωρία δυναμικής ροής (potential flow theory) και εκφράζει την απώλεια ενέργειας από το πλοίο προς τα κύματα που δημιουργούνται λόγω του διατοιχισμού του στην επιφάνεια της θάλασσας. Ο όρος B_{44v} αντιπροσωπεύει τη μη γραμμική απόσβεση που οφείλεται κυρίως σε συνεκτικά φαινόμενα και ο οποίος γραμμικοποιείται κατάλληλα αποτελούμενος από επιμέρους συντελεστές $B_{44v} = B_{44s} + B_{44f} + B_{44e} + B_{44l} + B_{44k}$, όπως αυτοί ορίζονται στη βιβλιογραφική αναφορά [10].

Για τον υπολογισμό της δυναμικής απόσβεσης B_{44p} χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Trident FD-Waveload. Πρόκειται για λογισμικό υδροδυναμικής ανάλυσης στο πεδίο συχνοτήτων που εφαρμόζει τη θεωρία δυναμικής ροής απεικονίζοντας τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας με τρισδιάστατα επίπεδα

στοιχεία (3D panel-method code). Η γάστρα της φρεγάτας μοντελοποιήθηκε εκ νέου (με χρήση των offsets σημείων των σχεδιαστικών της νομέων) και για κάθε ιδιοσυχνότητα διατοιχισμού ω_ϕ του πλοίου στο κύμα υπολογίστηκε η αντίστοιχη τιμή B_{44p} .

Για τον υπολογισμό των επιμέρους όρων του γραμμικοποιημένου συντελεστή απόσβεσης B_{44v} χρησιμοποιήθηκε η ημι-εμπειρική μέθοδος Ikeda όπως αυτή περιγράφεται στη βιβλιογραφική αναφορά [10]. Για τον υπολογισμό των εν λόγω όρων δημιουργήθηκαν κατάλληλα αρχεία "m-files" σε περιβάλλον Matlab. Τα εν λόγω αρχεία περιλαμβάνονται στο παράρτημα Γ. Παράλληλα και σε μια προσπάθεια ελέγχου των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε και η εμπειρική μέθοδος Miller όπως αυτή περιγράφεται στη βιβλιογραφική αναφορά [11]. Και στη περίπτωση αυτή δημιουργήθηκαν κατάλληλα "m-files" που επίσης περιλαμβάνονται στο παράρτημα Γ.

2.3.1 Ημι-εμπειρική μέθοδος Ikeda.

Η μέθοδος Ikeda [10] προέκυψε με κατάλληλες τροποποιήσεις από σχετική εργασία των Ikeda, Himeno και Tanaka που δημοσιεύθηκε το 1978 και εφαρμοζόμενη στις περιπτώσεις πλοίων συνήθους μορφής έχει αποδώσει αποτελέσματα που προσεγγίζουν ικανοποιητικά τα αντίστοιχα των πειραμάτων. Αντίθετα η ακρίβεια της μεθόδου ελέγχεται στη περίπτωση πλοίων ασυνήθους μορφής, πλοίων με μεγάλο λόγο πλάτους προς βύθισμα και πλοίων με πολύ υψηλές τιμές συντελεστή μέσης τομής. Η εν λόγω μέθοδος περιλαμβάνει τους ακόλουθους υπολογισμούς:

α. Διόρθωση της δυναμικής απόσβεσης λόγω της πρόσω ταχύτητας πλοίου (B_{44s}) :

Πρόκειται για τη διόρθωση του συντελεστή δυναμικής απόσβεσης B_{44} που είναι απαραίτητη όταν ληφθεί υπόψη και η εμπρόσθια κίνηση του πλοίου. Ισχύει ότι [10] :

$$B_{44s} = B_{44} \cdot \{ 0,5 \cdot [A_2 + 1 + (A_2 - 1) \cdot \tanh[20 \cdot (\Omega - 0,3)]] + (2 \cdot A_1 - A_2 - 1) \cdot e^{-150 \cdot (\omega - 0,25)^2} - 1 \}$$

όπου $\Omega = \omega \cdot V_s / g$ αδιάστατη συχνότητα διατοιχισμού.

$\xi_d = \omega^2 \cdot D/g$ τετραγωνισμένη αδιάστατη συχνότητα διατοιχισμού .

$A_1 = 1 + \xi_d^{-1,2} \cdot e^{-2 \cdot \xi_d}$ κατάλληλος συντελεστής.

$A_2 = 0,5 + \xi_d^{-1} \cdot e^{-2 \cdot \xi_d}$ κατάλληλος συντελεστής.

Για τον υπολογισμό του B_{44s} χρησιμοποιήθηκαν τα "m-files" fsedamp και fsedamp2 για τις καταστάσεις φόρτωσης I και II αντίστοιχα.

β. Απόσβεση λόγω τριβών στη βρεχόμενη επιφάνεια (B_{44f}) :

Πρόκειται για τον όρο B_{44f} του μη γραμμικού τμήματος της απόσβεσης διατοιχισμού που εκφράζει την απώλεια ενέργειας λόγω των δυνάμεων τριβής που εξασκεί το νερό στη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας. Ο γραμμικοποιημένος συντελεστής B_{44f} δίνεται από τη σχέση [10] :

$$B_{44f} = (8/3\pi \cdot \varphi_a \cdot \omega) \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot r_f^3 \cdot S_f \cdot C_f \cdot (1+4,1 \cdot V_s / \omega \cdot L)$$

όπου $S_f = L \cdot (1,7 \cdot D + C_B \cdot B)$, προσέγγιση της βρεχόμενης επιφάνειας.

$r_f = [(0,887 + 0,145 \cdot C_B) \cdot S_f / L + 2 \cdot OG] / \pi$, προσέγγιση της απόστασης r_f .

$R_n = 0,512 \cdot (r_f / \varphi_a)^2 \cdot \omega / \nu$, κατάλληλα ορισμένος αριθμός Reynolds.

$C_f = 1,328 \cdot R_n^{-0,5} + 0,014 \cdot R_n^{-0,114}$, συντελεστής τριβής.

Για τον υπολογισμό του B_{44f} χρησιμοποιήθηκαν τα "m-files" frictiondamp και frictiondamp2 για τις καταστάσεις φόρτωσης I και II αντίστοιχα.

γ. Απόσβεση λόγω δινών (B_{44E}) :

Πρόκειται για τον όρο B_{44E} του μη γραμμικού τμήματος της απόσβεσης διατοιχισμού που εκφράζει την απώλεια ενέργειας από τις δίνες που δημιουργούνται λόγω των γωνιών (ακμών) στη τρόπιδα ή το κυρτό της γάστρας. Ο γραμμικοποιημένος συντελεστής B_{44E} δίνεται από τη σχέση [10] :

$$B_{44E} = (8/3\pi \cdot \varphi_a \cdot \omega) \cdot B_{44E0} \cdot 1/1+K^2$$

όπου $K = V_s / 0,04 \cdot \omega \cdot L$, κατάλληλος συντελεστής.

$B_{44E0} = \int B_{44E0\text{section}} \cdot dx_b$, ο συντελεστής απόσβεσης δινών όπως προκύπτει από την ολοκλήρωση σε ολόκληρο το μήκος του πλοίου των επιμέρους συντελεστών $B_{44E0\text{section}}$ κάθε εγκάρσιας τομής.

Χάριν συντομίας και λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων που εφαρμόζονται στον υπολογισμό των συντελεστών $B_{44Eosection}$ οι εν λόγω σχέσεις δεν αναγράφονται στη παρούσα παράγραφο, περιγράφονται όμως λεπτομερώς στη σχετική βιβλιογραφική αναφορά [10] καθώς και στα "m-files" eddydamp και eddydamp2 για τις καταστάσεις φόρτωσης I και II αντίστοιχα.

δ. Απόσβεση λόγω ανωστικών δυνάμεων στα παρελκόμενα (B_{44L}) :

Πρόκειται για τον όρο B_{44L} του μη γραμμικού τμήματος της απόσβεσης διατοιχισμού που εκφράζει την απώλεια ενέργειας λόγω της ροπής απόσβεσης που οφείλεται στις ανωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα παρελκόμενα (π.χ πηδάλιο) του κινούμενου σκάφους. Ο γραμμικοποιημένος συντελεστής B_{44L} δίνεται από τη σχέση [10] :

$$B_{44L} = 0,5 \cdot \rho \cdot S_L \cdot V_s \cdot k_N \cdot L_O \cdot L_R \cdot (1 + 1,4 \cdot OG/L_R + 0,7 \cdot OG^2 / L_O \cdot L_R)$$

όπου $k_N = (2 \cdot \pi \cdot D/L) + \chi \cdot (4,1 \cdot B/L - 0,045)$

με $\chi = 0,00$ αν $C_M < 0,92$

$\chi = 0,10$ αν $0,92 < C_M < 0,97$

$\chi = 0,30$ αν $0,97 < C_M < 0,99$

Για τον υπολογισμό του B_{44L} χρησιμοποιήθηκαν τα "m-files" liftdamp και liftdamp2 για τις καταστάσεις φόρτωσης I και II αντίστοιχα.

ε. Απόσβεση λόγω παρατροπιδίων (B_{44K}) :

Πρόκειται για τον όρο B_{44K} του μη γραμμικού τμήματος της απόσβεσης διατοιχισμού που εκφράζει την απώλεια ενέργειας λόγω της ύπαρξης των παρατροπιδίων τα οποία καθώς το νερό προσπίπτει επάνω τους κατά το διατοιχισμό υπό κάθετη γωνία αναπτύσσουν δυνάμεις αντίστασης που αντιτίθενται στη ταλάντωση του πλοίου. Ο γραμμικοποιημένος συντελεστής B_{44K} δίνεται από τη σχέση [10] :

$$B_{44K} = (8/3\pi \cdot \varphi_a \cdot \omega) \cdot \int B_{44Ksection} \cdot dx_b$$

όπου $B_{44Ksection}$ ο συντελεστής απόσβεσης σε κάθε εγκάρσια τομή από την ολοκλήρωση του οποίου σε ολόκληρο το μήκος του παρατροπιδίου προκύπτει ο συνολικός συντελεστής B_{44K} . Και στη περίπτωση αυτή χάριν συντομίας και λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων που εφαρμόζονται στον υπολογισμό των συντελεστών $B_{44Ksection}$ οι εν λόγω σχέσεις παραλείπονται στη παρούσα παράγραφο, περιγράφονται όμως λεπτομερώς στη σχετική βιβλιογραφική αναφορά [10] καθώς και στα "m-files" `bkdamp` και `bkdamp2` για τις καταστάσεις φόρτωσης I και II αντίστοιχα.

2.3.2 Εμπειρική μέθοδος Miller.

Παράλληλα με τη μέθοδο Ikeda και σε μια προσπάθεια ελέγχου των ως ανωτέρω αποτελεσμάτων ο αδιάστατος συντελεστής ζ υπολογίσθηκε και με την εμπειρική μέθοδο Miller [11]. Η μέθοδος Miller προτάθηκε το 1974 και προέκυψε ως αποτέλεσμα της ανάλυσης (regression analysis) της απόσβεσης διατοιχισμού ενός αριθμού τυπικών πλοίων του U.S. Navy. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ισχύει ότι :

$$\zeta = (\zeta_1 + \zeta_2) / 2$$

όπου $\zeta_1 = 19,25 \cdot [(A_{bk} \cdot \sqrt{b_{BK}}) + 0,0024 \cdot L \cdot B \cdot \sqrt{d}] \cdot [(d^2 \cdot \sqrt{d} \cdot \varphi_a) / L \cdot B^3 \cdot T \cdot C_b]$

και $\zeta_2 = 0,00085 \cdot (L/B) \cdot [\sqrt{(L/GM)}] \cdot F \cdot \{1 + F + 2 \cdot F^2\}$

Για την εκτέλεση των ανωτέρω σχέσεων χρησιμοποιήθηκαν τα "m-files" `Miller.m` και `Miller2.m` του παραρτήματος Γ για τις καταστάσεις φόρτωσης I και II αντίστοιχα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ ΦΡΕΓΑΤΑΣ ΤΥΠΟΥ STANDARD.

3.1 Μοντελοποίηση επιφάνειας γάστρας στο περιβάλλον λογισμικού Maxsurf.

Το πλοίο στο οποίο αναφέρεται η παρούσα μελέτη είναι μια φρεγάτα τύπου Standard του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού και συγκεκριμένα η Φ/Γ Κανάρης πρώην Jan Van Brakel του Ολλανδικού Ναυτικού που κατελκύστηκε το 1981 από τα ναυπηγεία Royal Schelde και πωλήθηκε στη χώρα μας μεταχειρισμένη το 2002. Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα :

Ολικό μήκος Loa	130,5 m
Μήκος μεταξύ καθέτων Lbp	121,8 m
Πλάτος σχεδίασης B	14,4 m

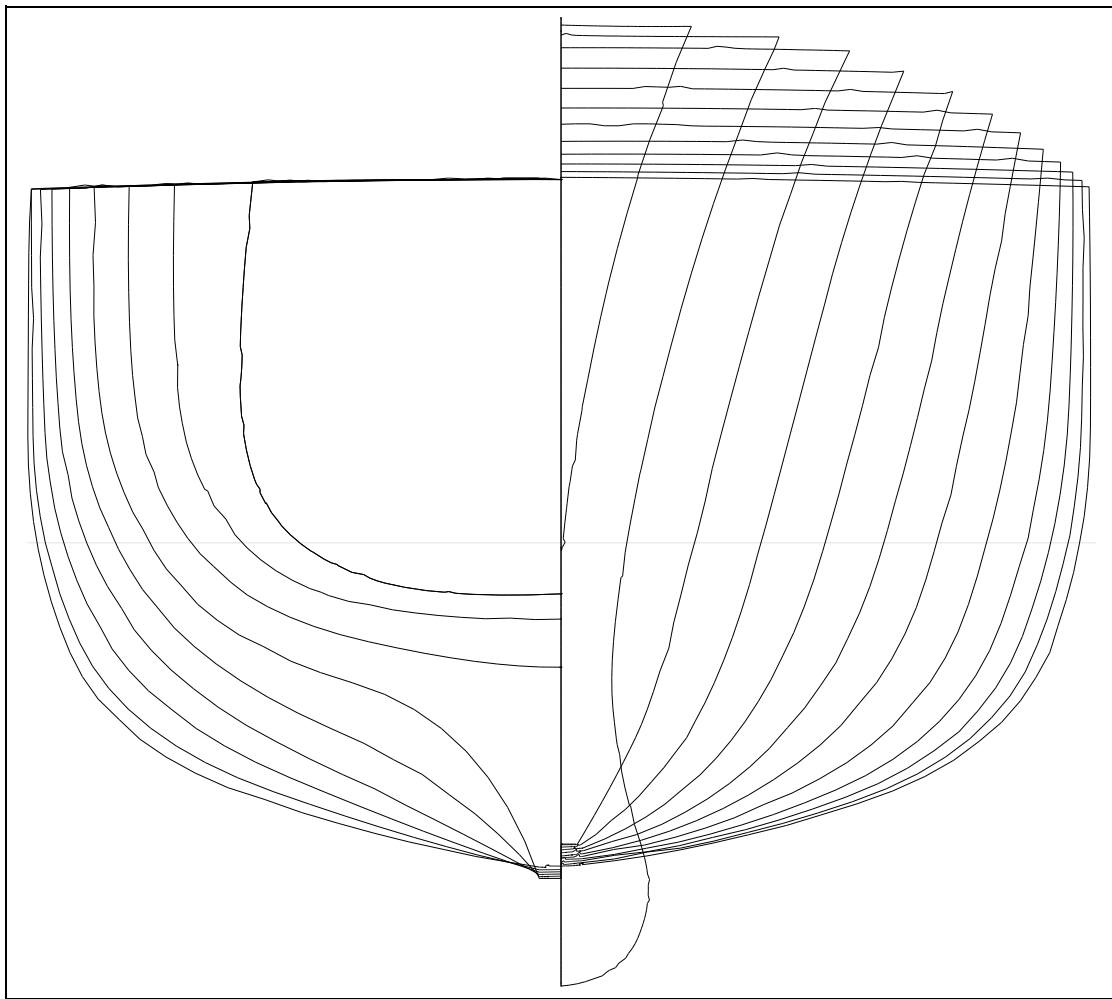
Βύθισμα σχεδίασης T	4,3 m
Εκτόπισμα πλήρους φόρτου	3630 tns
Μέγιστη ταχύτητα	30 knots
Ακτίνα ενέργειας	4700 naut.miles at 16 knots
Πλήρωμα	200

Πίνακας 3.1 : *Κύρια χαρακτηριστικά φρεγάτας τύπου Standard.*

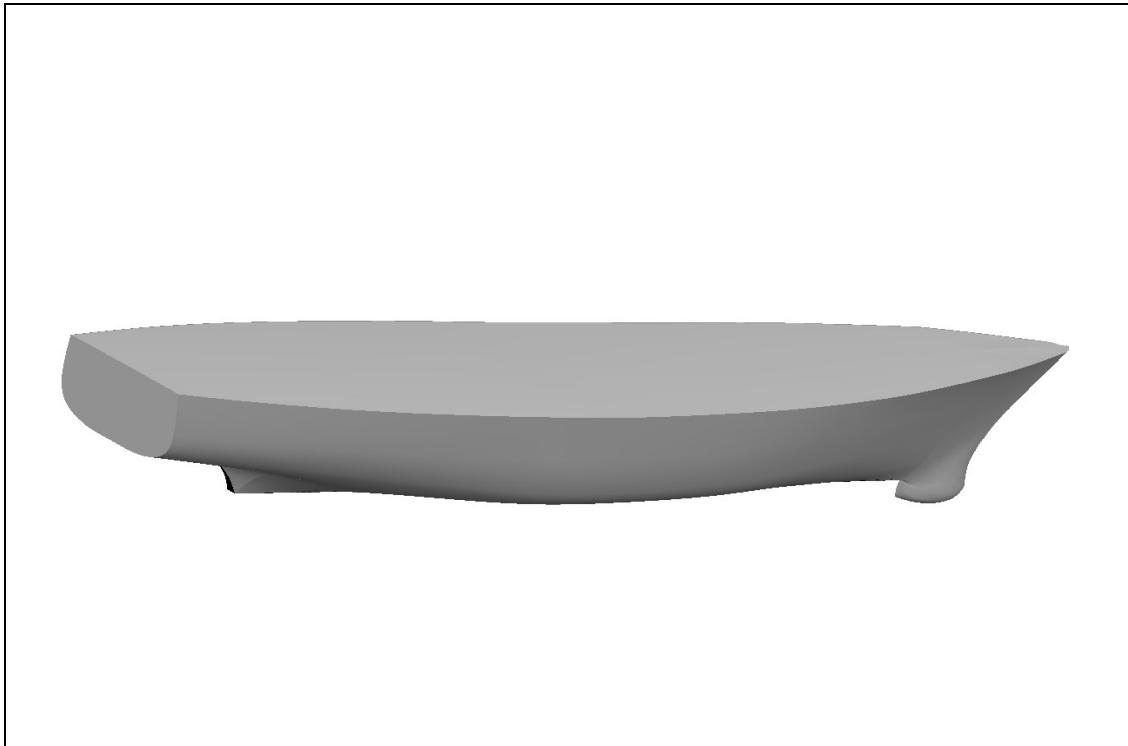
Για τη μοντελοποίηση της γάστρας του σκάφους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Maxsurf. Πρόκειται για λογισμικό δημιουργίας τρισδιάστατων επιφανειών με εφαρμογή στο πεδίο της ναυπηγικής σχεδίασης. Το θεωρητικό υπόβαθρο του προγράμματος είναι η χρήση καμπυλών B-splines και Nurbs στο χώρο μέσω της δημιουργίας ενός δικτύου τρισδιάστατων σημείων ελέγχου (control points network) σε τρόπο ώστε τελικά να αναπαραχθεί η ζητούμενη επιφάνεια από ένα δίκτυο τέτοιων καμπυλών.

Στη περίπτωση της φρεγάτας από το σχέδιο γραμμών του πλοίου μετρήθηκαν τα offsets αριθμού σημείων επί των σχεδιαστικών νομέων τα οποία αποτέλεσαν τη πληροφορία που εισήχθη στο πρόγραμμα. Με αυτό το τρόπο δημιουργήθηκε ένα "νέφος" χαρακτηριστικών σημείων (marker points) στο οποίο μετά τη κατάλληλη προεργασία ο αλγόριθμος του προγράμματος προσάρμοσε τη απαιτούμενη επιφάνεια. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δέκα(10) επιφάνειες για τη καλύτερη μοντελοποίηση της επιφάνειας της γάστρας και των ασυνεχειών της. Έμφαση δόθηκε στην ακριβέστερη απεικόνιση της επιφάνειας της γάστρας και λιγότερο στην εξομάλυνση των γραμμών της. Όπου απαιτήθηκε διόρθωση έγινε προσαρμογή της επιφάνειας "τοπικά" με μετακίνηση των αντίστοιχων σημείων ελέγχου (control points).

Το τελικό αποτέλεσμα κρίνεται ικανοποιητικό καθώς η μέση απόκλιση της επιφάνειας που προέκυψε από τα marker points ήταν 4mm ενώ και η καμπυλότητα αυτής εμφάνισε ικανοποιητική ομαλότητα. Στα σχήματα 3.1 έως 3.6 φαίνονται το body plan, διάφορες όψεις της επιφάνειας γάστρας και η καμπυλότητά της όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του Maxsurf.



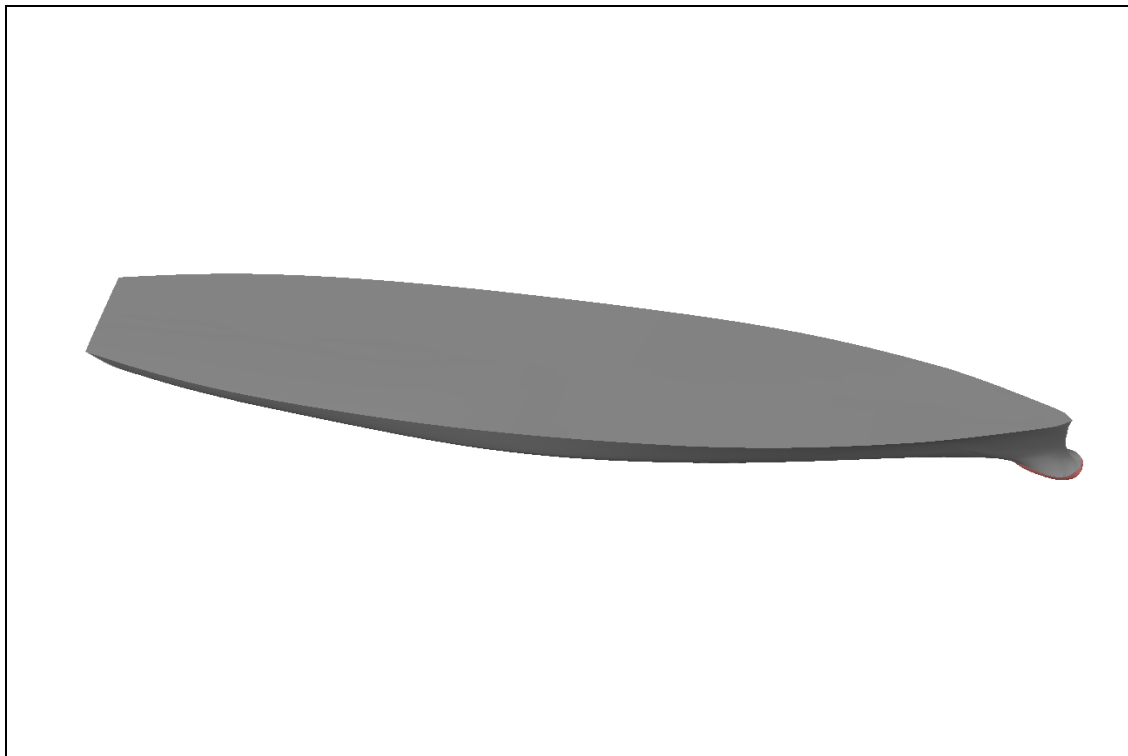
Σχήμα 3.1: *Body-plan* φρεγάτας από λογισμικό *Maxsurf*.



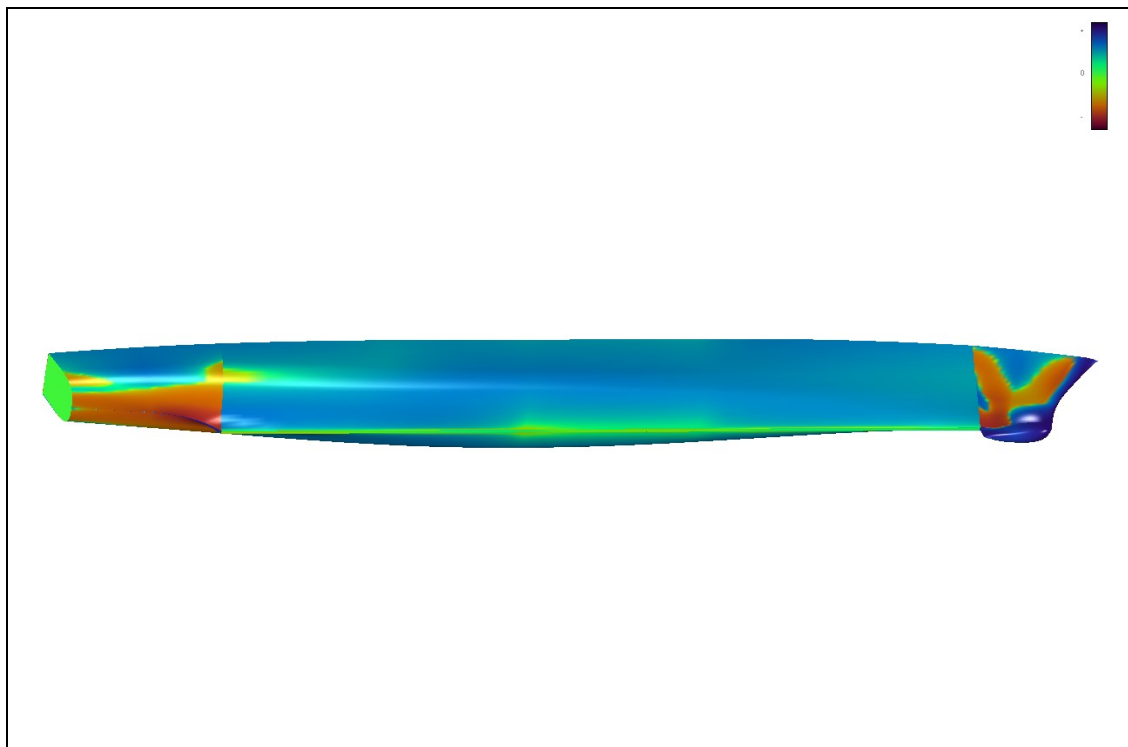
Σχήμα 3.2: Τελική επιφάνεια γάστρας από λογισμικό Maxsurf (πλάγια όψη)



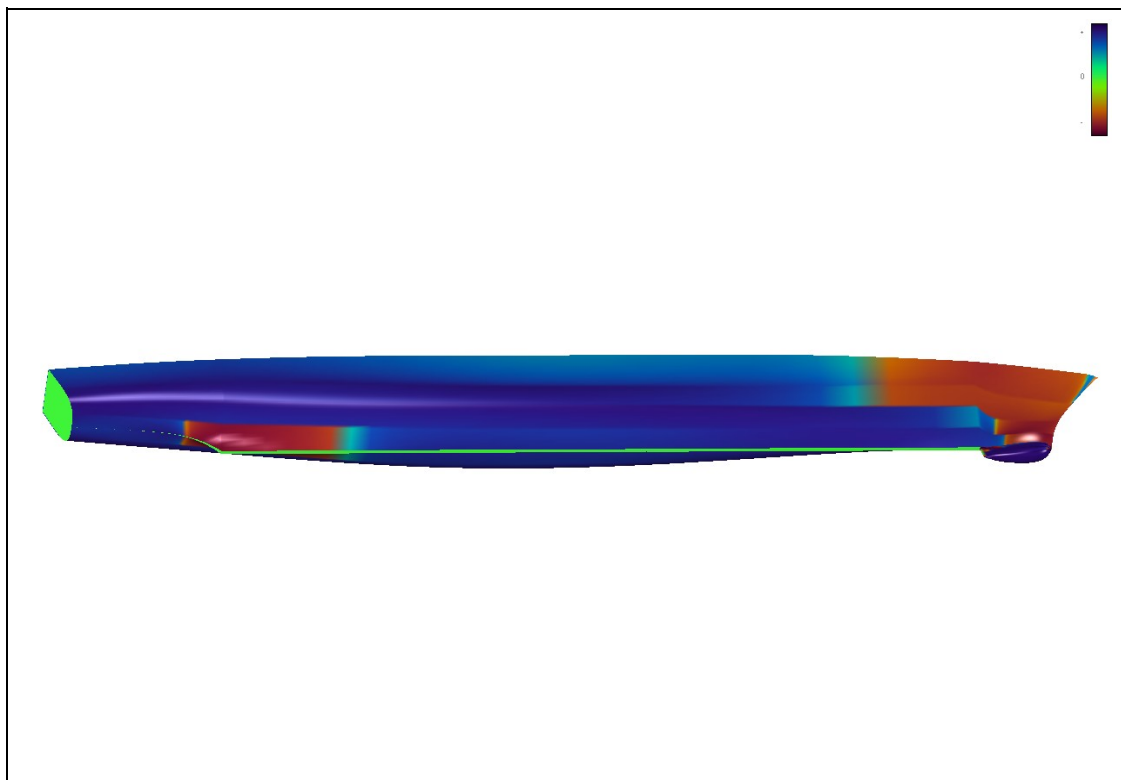
Σχήμα 3.3: Τελική επιφάνεια γάστρας από λογισμικό Maxsurf (όψη πυθμένα)



Σχήμα 3.4: Τελική επιφάνεια γάστρας από λογισμικό Maxsurf (όψη καταστρώματος).



Σχήμα 3.5: Διαμήκης καμπυλότητα επιφάνειας από λογισμικό Maxsurf.



Σχήμα 3.6: Εγκάρσια καμπυλότητα επιφάνειας από λογισμικό Maxsurf.

3.2 Έλεγχος καταλληλότητας μοντέλου.

Για τον έλεγχο της καταλληλότητας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Hydromax. Πρόκειται για λογισμικό υδροστατικής ανάλυσης και ανάλυσης της άθικτης και μετά από βλάβη ευστάθειας πλοίου, το οποίο ανήκοντας στην ίδια σουΐτα προγραμμάτων με το Maxsurf συνεργάζεται αρμονικά μ'αυτό. Με χρήση του προγράμματος υπολογίσθηκαν τα υδροστατικά χαρακτηριστικά και η καμπύλη στατικής ευστάθειας $GZ(\varphi)$ σε ήρεμο νερό της μοντελοποιημένης γάστρας και συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα από το εγχειρίδιο ευστάθειας του πλοίου. Ως κριτήριο για τις επιτρεπτές αποκλίσεις τιμών χρησιμοποιήθηκε το παράρτημα 2 της βιβλιογραφικής αναφοράς [1].

Τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται στους πίνακες και τα σχήματα του παραρτήματος Α. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της θέσης του κέντρου βάρους δεν εκτελέσθηκε διαμερισματοποίηση της γάστρας και μοντελοποίηση των δεξαμενών του σκάφους αλλά τα κέντρα βάρους του Lightship και των επιμέρους φορτίων του Deadweight προσδιορίσθηκαν με την κατάλληλη εισαγωγή στο Hydromax των αριθμητικών τιμών των συντεταγμένων τους, όπως αυτές αναγράφονται στο εγχειρίδιο ευστάθειας του πλοίου. Για το σκοπό

αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο καταστάσεις φόρτωσης. Η κατάσταση φόρτωσης I που αποτελεί τη συνήθη κατάσταση απόπλου και επιχειρησιακής δράσης του πλοίου και η κατάσταση φόρτωσης II που αποτελεί την ελάχιστη επιτρεπτή κατάσταση πλεύσης και η οποία απαιτεί τον άμεσο ανεφοδιασμό του σκάφους.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατέδειξαν τη καταλληλότητα του μοντέλου. Οι αποκλίσεις των τιμών ευρέθησαν σχεδόν στο σύνολό τους εντός των προβλεπόμενων ορίων. Οι όποιες υπερβάσεις είτε είναι μικρού μεγέθους ώστε να επηρεάσουν την αξιοπιστία του μοντέλου, είτε όπως στη περίπτωση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς $GZ(\varphi)$ εμφανίζονται αυξημένες σε γωνίες διατοιχισμού άνω των 70 deg που βρίσκονται εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος της παρούσης μελέτης. Στη δεύτερη περίπτωση οι αποκλίσεις δύναται να δικαιολογηθούν από τη μικρότερη – συγκριτικά με το σύνολο των επιφανειών – ακρίβεια στη μοντελοποίηση της επιφάνειας κυρίου καταστρώματος και το γεγονός ότι σε γωνία διατοιχισμού περί τις 35 deg το κατάστρωμα συναντά την επιφάνεια του νερού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΕΥΠΑΘΕΙΑΣ ΣΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟ

4.1 Μεταβολή της εγκάρσιας ευστάθειας πλοίου σε διαμήκεις κυματισμούς.

Είναι γνωστό [5],[7] ότι η ευστάθεια ενός πλοίου που ταξιδεύει σε μεγάλα διαμήκη κύματα μπορεί να αλλάξει σημαντικά σε σύγκριση με τη κατάσταση ήρεμου νερού. Αυτό οφείλεται στη περιοδική μεταβολή του μετακεντρικού ύψους GM_i το οποίο μειώνεται όταν το μέσο του πλοίου βρίσκεται στη κορυφή του κύματος και αυξάνει όταν αυτό βρίσκεται σε κοιλάδα. Αυτή ακριβώς η μεταβολή αποτελεί την αιτία του παραμετρικού διατοιχισμού. Η διερεύνηση της μεταβολής του GM_i στη περίπτωση της φρεγάτας τύπου Standard έγινε στο περιβάλλον του λογισμικού Hydromax ως ακολούθως :

α. Η μοντελοποιημένη γάστρα του πλοίου τοποθετήθηκε σε ημιτονοειδή διαμήκη κυματισμό με διάφορα μήκη $\lambda = 0,8L - L - 1,2L - 1,4L - 1,6L - 1,8L - 2L$ (όπου L το μήκος πλοίου μεταξύ καθέτων) και κλίση (steepness) $H/\lambda = 1/60 - 1/50 - 1/40 - 1/30 - 1/20 - 1/10$. Για κάθε συνδυασμό μήκους και κλίσης το Hydromax θέτει αυτόματα τη κορυφή του κύματος σε προκαθορισμένες θέσεις κατά το διάμηκες του σκάφους (εμφανίζονται ως τιμές "phase offsets" που δίνουν τη θέση της κορυφής από τη πρωραία κάθετο ως ποσοστό του συνολικού μήκους κύματος) και υπολογίζει το αντίστοιχο GM_i .

β. Για κάθε συνδυασμό μήκους και κλίσης διαμήκους κυματισμού δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον Excel κατάλληλοι πίνακες και γραφήματα που καταδεικνύουν τη μεταβολή του GM_i και τις συνθήκες υπό τις οποίες αυτό εμφανίζει μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Κατ' αυτό τον τρόπο υπολογίσθηκε στη συνέχεια η αδιάστατη παράμετρος $h = GM_a/GM_m$, η οποία αποτελεί τη "διέγερση" του παραμετρικού διατοιχισμού. Η μελέτη αφορά και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης I και II που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο 3.2 λαμβάνοντας υπόψη τη διόρθωση του GM_i λόγω ελεύθερων επιφανειών.

Τα αποτελέσματα των ανωτέρω ενεργειών φαίνονται στους πίνακες και τα γραφήματα του παραρτήματος Β.

4.1.1 Παραδοχές.

α. Το πλοίο θεωρούμε ότι βρίσκεται επί του κύματος σε κατάσταση υδροστατικής ισορροπίας, οπότε ο υπολογισμός των τιμών του GM_i γίνεται κατ' ανάλογο τρόπο με τον υπολογισμό σε ήρεμο νερό. Οι κινήσεις heave και pitch που φυσιολογικά προκαλούνται στους διαμήκεις κυματισμούς αγνοούνται από το λογισμικό Hydromax κατά τον εν λόγω υπολογισμό. Η θεώρηση αυτή

εκτιμάται ότι οδηγεί σε σχετικά ακριβή αποτελέσματα ιδιαίτερα στη περίπτωση ακολουθούντων κυμάτων όπου η χαμηλή συχνότητα συνάντησης ω_e προκαλεί πολύ μικρή απόκριση heave και pitch, γεγονός που επιτρέπει την υπόθεση ότι το πλοίο κινούμενο διαγράφει το κύμα σε κατάσταση σχεδόν ισορροπίας ως προς τη κατακόρυφο [5]. Παράλληλα η συμπεριφορά σε πρωραίους κυματισμούς θεωρούμε ότι δίνει μικρές διαφορές τιμών του GM_t σε σχέση με την εν λόγω παραδοχή, όπως αναφέρεται και στη σχετική περίπτωση της βιβλιογραφικής αναφοράς [8].

β. Η μεταβολή του GM_t καθώς το ημιτονοειδές κύμα διαγράφει το διάμηκες του πλοίου θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι απεικονίζεται από μια επίσης ημιτονοειδή συνάρτηση του χρόνου κάτι που αντικειμενικά δε συμβαίνει. Η περιοδικότητα όμως της μεταβολής του GM_t επιτρέπει την ανάπτυξη της κατά Fourier, οπότε η χρήση της πρώτης μόνο αρμονικής του αναπτύγματος δικαιολογεί την υιοθέτηση της παραδοχής [5].

4.1.2 Αποτελέσματα.

Η μελέτη των πινάκων και γραφημάτων του παραρτήματος Β καταδεικνύει τα ακόλουθα :

α. Και για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης η διέγερση h του παραμετρικού διατοιχισμού εμφανίζει γενικά χαμηλές τιμές, γεγονός που προϋποθέτει για αρνητική ευπάθεια του πλοίου.

β. Για κάθε μία από τις επιμέρους μορφές κύματος η διέγερση h του παραμετρικού διατοιχισμού εμφανίζει υψηλότερες τιμές στη κατάσταση φόρτωσης II.

γ. Στη κατάσταση φόρτωσης I και για τις ίδιες τιμές H/λ , οι υψηλότερες τιμές της διέγερσης h εμφανίζονται στη περίπτωση κύματος με μήκος $\lambda=L_{pp}$, γεγονός το οποίο συμφωνεί με την αντίστοιχη παραδοχή της διαδικασίας ελέγχου της ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό που προτείνεται στη βιβλιογραφική αναφορά [4]. Εξαίρεση αποτελεί η κλίση $H/\lambda=0,1$ που δίνει μέγιστη τιμή $h=0,363$ για κύμα μήκους $\lambda=1,8 \cdot L_{pp}$. Το σχήμα Β-1 του παραρτήματος Β απεικονίζει γραφικά τα προηγούμενα.

δ. Στη κατάσταση φόρτωσης II ισχύουν τα ίδια με την ανωτέρω παράγραφο (γ) με τη διαφορά ότι υφίστανται δύο εξαιρέσεις τιμών $H/\lambda=0,05$ και $H/\lambda=0,1$ που δίνουν μέγιστες τιμές $h=0,299$ και $h=0,421$ για κύμα μήκους $\lambda=1,2 \cdot L_{pp}$ και $\lambda=2 \cdot L_{pp}$ αντίστοιχα.

ε. Και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης το κύμα με μήκος $\lambda=L_{pp}$ εμφανίζει τις ελάχιστες τιμές του μετακεντρικού ύψους GM_t όταν η κορυφή του κύματος βρίσκεται σε απόσταση από τη πρωραία κάθετο ίση με $0,6-0,65 L_{pp}$. Το σχήμα B-2 του παραρτήματος Β απεικονίζει ενδεικτικά την εν λόγω παρατήρηση για τη κατάσταση φόρτωσης Ι και κύμα με τιμή $H/\lambda=1/10$.

4.2 Εφαρμογή του κριτηρίου συχνότητας.

Έχοντας στη διάθεσή μας τα αποτελέσματα της μεταβολής της ευστάθειας του πλοίου σε αρμονικό κυματισμό και οδηγό τη διαδικασία ελέγχου της ευπάθειας σε παραμετρικό διατοιχισμό που περιγράφεται στη βιβλιογραφική αναφορά [4], διερευνούμε στη συνέχεια το κριτήριο συχνότητας (όπως αυτό διατυπώθηκε στη παράγραφο 2.2) για τη περίπτωση της φρεγάτας τύπου Standard. Τα αποτελέσματα της διερεύνησης που εκτελέσθηκε σε περιβάλλον Excel φαίνονται στους αντίστοιχους πίνακες και στα γραφήματα του παραρτήματος Β.

4.2.1 Παραδοχές.

α. Ισχύουν όλες οι παραδοχές που επιτρέπουν στο διατοιχισμό του πλοίου σε διαμήκεις κυματισμούς να περιγράφεται μαθηματικά από μια γραμμική, ομογενή διαφορική εξίσωση τύπου Mathieu όπως έχει ήδη αναφερθεί στη παράγραφο 2.1. Ο διατοιχισμός θεωρείται μη συζευγμένος με τις άλλες κινήσεις του σκάφους (ιδιαίτερα με τις κινήσεις pitch και heave), η ροπή επαναφοράς είναι γραμμική συνάρτηση της γωνίας διατοιχισμού φ , η ροπή απόσβεσης είναι γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας διατοιχισμού $\dot{\varphi}$ και η μεταβολή του μετακεντρικού ύψους GM_t στο κύμα προσεγγίζεται με μια αρμονική συνάρτηση του χρόνου.

β. Το πλοίο ευρισκόμενο σε διαμήκη κυματισμό και διεγερμένο κατά την εγκάρσια διεύθυνση από κάποια εξωτερική αιτία (π.χ ριπή ανέμου) εκτελεί διατοιχισμό με ιδιοπερίοδο που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$T_{\varphi} = 2 \cdot C \cdot B / \sqrt{GM_{\varphi}}, \quad \text{όπου } C = 0,373 + 0,023 \cdot (B/d) - 0,043 \cdot (L/100) \text{ με}$$

L το μήκος ισάλου, B το πλάτος σχεδίασης, d το μέσο βύθισμα σχεδίασης και GM_{φ} το μετακεντρικό ύψος στο κύμα, το οποίο λόγω της μεταβολής του θεωρούμαι ότι είναι $GM_{\varphi} \equiv GM_m = 0,5 \cdot (GM_{max} + GM_{min})$.

γ. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στη παράγραφο 2.2 διερευνάται μόνο η περίπτωση του κύριου συντονισμού όπου $\omega_e = 2 \cdot \omega_{\varphi} \leftrightarrow T_{\varphi} = 2 \cdot T_e$, οπότε η ζητούμενη ταχύτητα πλοίου προκύπτει από τις σχέσεις :

$$\text{Πρωραίος κυματισμός : } V_s = [(1,562/T_e) \cdot T_w^2] - (1,562 \cdot T_w), \text{ σε [m/sec]}$$

$$\text{Ακολουθών κυματισμός : } V_s = (1,562 \cdot T_w) - [(1,562/T_e) \cdot T_w^2], \text{ σε [m/sec]}$$

4.2.2 Αποτελέσματα.

α. Οι ταχύτητες πλοίου που συνεπάγονται την ικανοποίηση του κριτηρίου συχνότητας $\omega_e = 2 \cdot \omega_{\varphi}$ για την εμφάνιση κύριου παραμετρικού διατοιχισμού απεικονίζονται σε πράσινο φόντο στους πίνακες B-5 και B-6 του παραρτήματος Β. Οι ταχύτητες αυτές και για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης προκύπτουν μόνο για πρωραίους κυματισμούς, ενώ αντίθετα οι ακολουθούντες κυματισμοί δίνουν αρνητικές τιμές, γεγονός μη αποδεκτό εφόσον αναζητούμε θετικές προς τα εμπρός ταχύτητες πλοίου.

β. Η πιθανότητα εμφάνισης κύριου παραμετρικού διατοιχισμού μόνο στη περίπτωση πρωραίων κυματισμών θέτει σε αμφιβολία τη παραδοχή του μη συζευγμένου διατοιχισμού που χρησιμοποιήσαμε για να καταλήξουμε σ' αυτά τα αποτελέσματα. Η πιθανότητα επίδρασης στο διατοιχισμό των κινήσεων pitch και heave είναι ιδιαίτερα υψηλή σε πρωραία κύματα, σε τρόπο ώστε η υπόθεση της "στατικής ισορροπίας" πάνω στο κύμα να χάνει την αξιοπιστία της. Παρόλα αυτά και ελλείψει προς το παρόν διαθέσιμης εναλλακτικής μεθόδου θεωρούμε τα υφιστάμενα αποτελέσματα κατά προσέγγιση ορθά. [3]

4.3 Εφαρμογή του κριτηρίου οριακής τιμής της απόσβεσης διατοιχισμού.

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης διατοιχισμού εφαρμόσθηκαν τα αναφερόμενα στην παράγραφο 2.3. Οι τιμές που προέκυψαν (επιμέρους συντελεστές και συνολικός B_{44}) αναγράφονται στους πίνακες B-7 και B-8 του παραρτήματος Β. Στον υπολογισμό των γραμμικοποιημένων όρων όπου απαιτείται, χρησιμοποιήθηκε τιμή πλάτους διατοιχισμού $\varphi_a = 10\text{deg}$, τιμή

συνήθης πλην όμως αυθαίρετη η οποία αναγκαστικά επιλέχθηκε για την εξέλιξη της μελέτης. Από το συνολικό συντελεστή απόσβεσης διατοιχισμού B_{44} υπολογίσθηκε στη συνέχεια ο αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης $\zeta = B_{44} \cdot \omega_{\phi} / 2 \cdot W \cdot GM_{\phi}$, όπου ω_{ϕ} , GM_{ϕ} η ιδιοπερίοδος διατοιχισμού και το μετακεντρικό ύψος στο κύμα αντίστοιχα και $W = g \cdot \Delta$ το βάρος του πλοίου. Έγινε έτσι δυνατός ο έλεγχος του κριτηρίου απόσβεσης $h \geq 4 \cdot \zeta$.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναγράφονται στις αντίστοιχες στήλες των πινάκων B-9 και B-10 του παραρτήματος Β.

4.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.

α. Όπως φαίνεται στο πίνακα B-9 του παραρτήματος Γ, το κριτήριο οριακής τιμής της απόσβεσης διατοιχισμού $h > 4 \cdot \zeta$ δεν ικανοποιείται σε καμία περίπτωση πρωραίου κυματισμού και ταχύτητας πλοίου για την οποία ισχύει το κριτήριο συχνότητας. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αρνητική ευπάθεια της φρεγάτας τύπου Standard στο κύριο παραμετρικό διατοιχισμό όταν το πλοίο ευρίσκεται στη συνήθη κατάσταση επιχειρησιακής του δράσης (κατάσταση φόρτωσης Ι). Αντίθετα στη κατάσταση φόρτωσης ΙΙ υφίσταται η πιθανότητα εμφάνισης παραμετρικού διατοιχισμού σε συγκεκριμένους συνδυασμούς μορφής κύματος και ταχύτητας πλοίου, όπως απεικονίζεται με κόκκινο φόντο στο πίνακα B-10 του παραρτήματος Γ.

β. Η εφαρμογή της εμπειρικής μεθόδου Miller έδωσε τιμές του αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης διατοιχισμού "ζ" που αποκλίνουν σημαντικά των αντίστοιχων τιμών που υπολογίσθηκαν με την ημι-εμπειρική μέθοδο Ikeda (η απόκλιση αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας πλοίου). Η αποδοχή των τιμών της μεθόδου Miller αποκλείει την εμφάνιση παραμετρικού διατοιχισμού και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου. Η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί τις τιμές της μεθόδου Ikeda καθώς αυτές εμφανίζονται ως περισσότερο ρεαλιστικές [12] και επιτρέπουν την συντηρητικότερη αντιμετώπιση της πιθανής ευπάθειας του σκάφους.

γ. Όπως φαίνεται στο πίνακα B-10 του παραρτήματος Γ, η διέγερση h του παραμετρικού διατοιχισμού υπερβαίνει ελάχιστα την οριακή τιμή ($4 \cdot \zeta$) της απόσβεσης. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη λειτουργία των ενεργών πτερυγίων σταθεροποίησης (μηχανισμού που μειώνει το διατοιχισμό σχεδόν 2,5 φορές περισσότερο από τα παρατροπίδια [13]) που διαθέτει η φρεγάτα, εκτιμάται ότι πρακτικά ακυρώνει την εμφάνιση παραμετρικού συντονισμού σε κάθε

περίπτωση. Παρόλα αυτά και στο πλαίσιο της προσπάθειας για πληρέστερη μελέτη του φαινομένου, διερευνάται στο παράρτημα Δ το μέγιστο σταθερό πλάτος διατοιχισμού που θα αναπτυχθεί στη περίπτωση της κατάστασης φόρτωσης II όταν $h > 4 \cdot \zeta$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

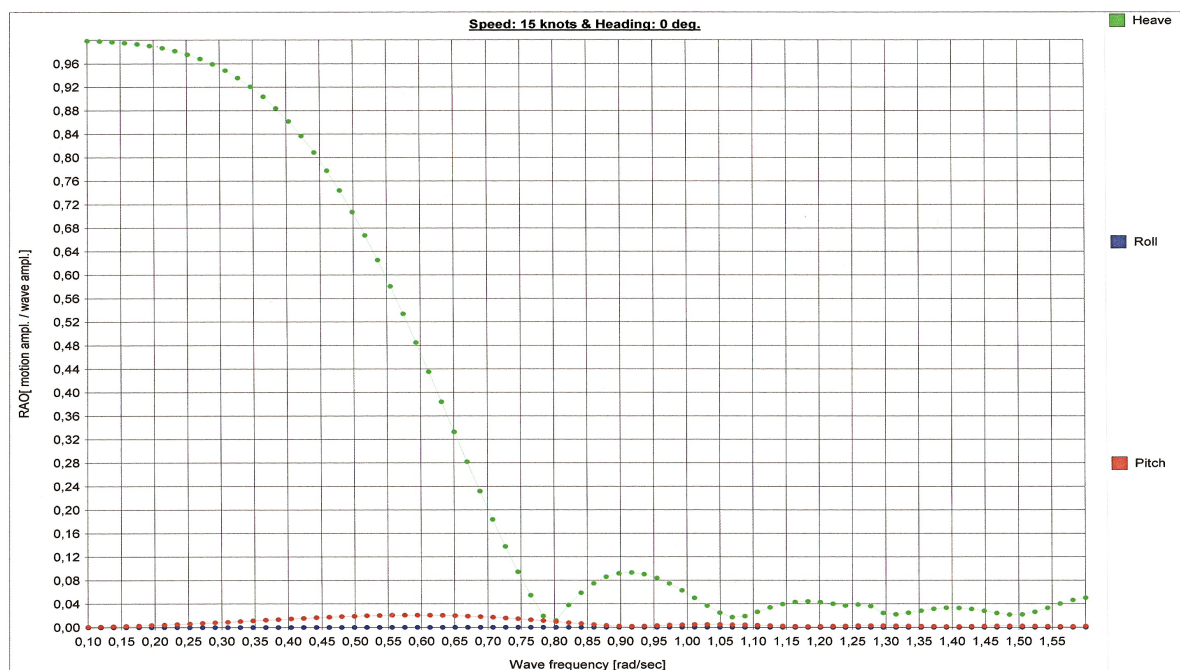
ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΦΡΕΓΑΤΑΣ ΣΕ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΣΤΟΥΣ ΕΞΙ(6) ΒΑΘΜΟΥΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ.

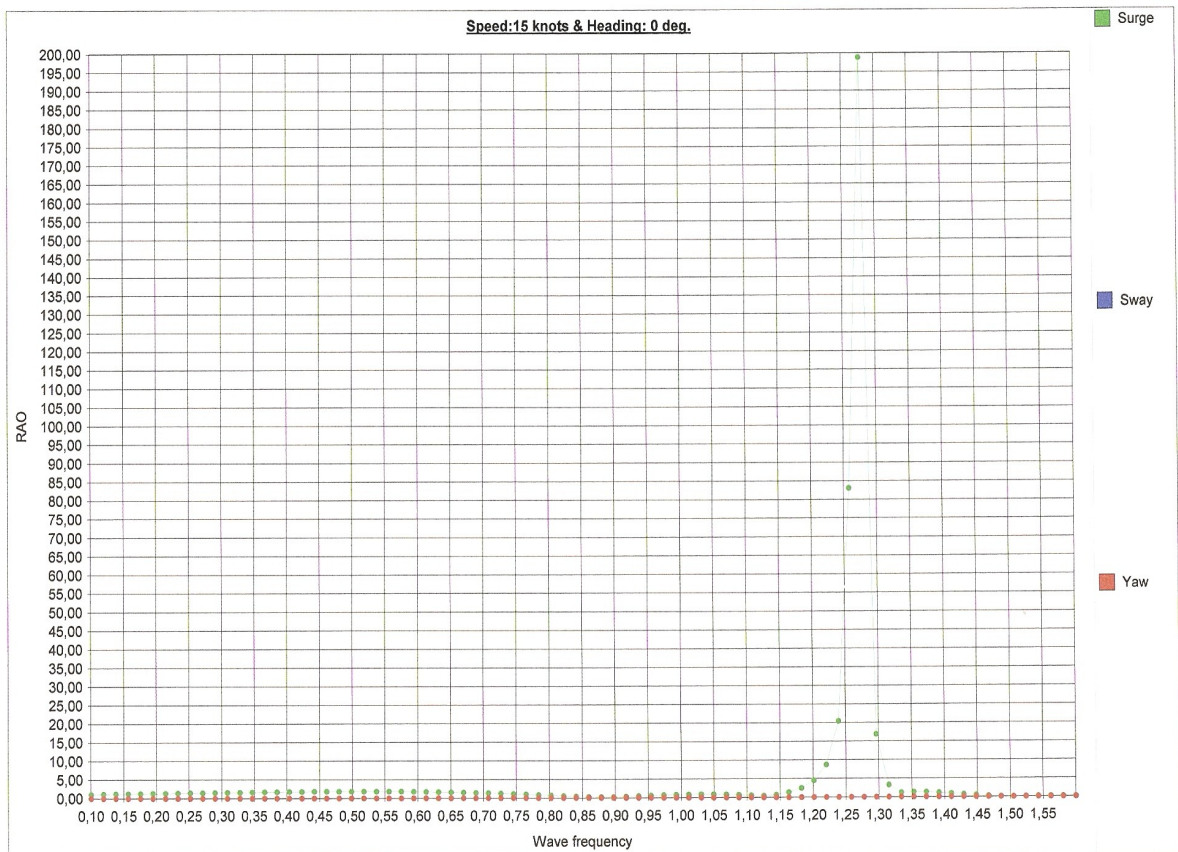
5.1 Γενικά.

Οι δυναμικές αποκρίσεις της φρεγάτας τύπου Standard σε κυματισμούς και στους έξι (6) βαθμούς ελευθερίας της προσδιορίστηκαν μέσω του υπολογισμού των αντίστοιχων τελεστών πλάτους απόκρισης (RAO). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η σχετική δυνατότητα του λογισμικού FD-Waveload με τις

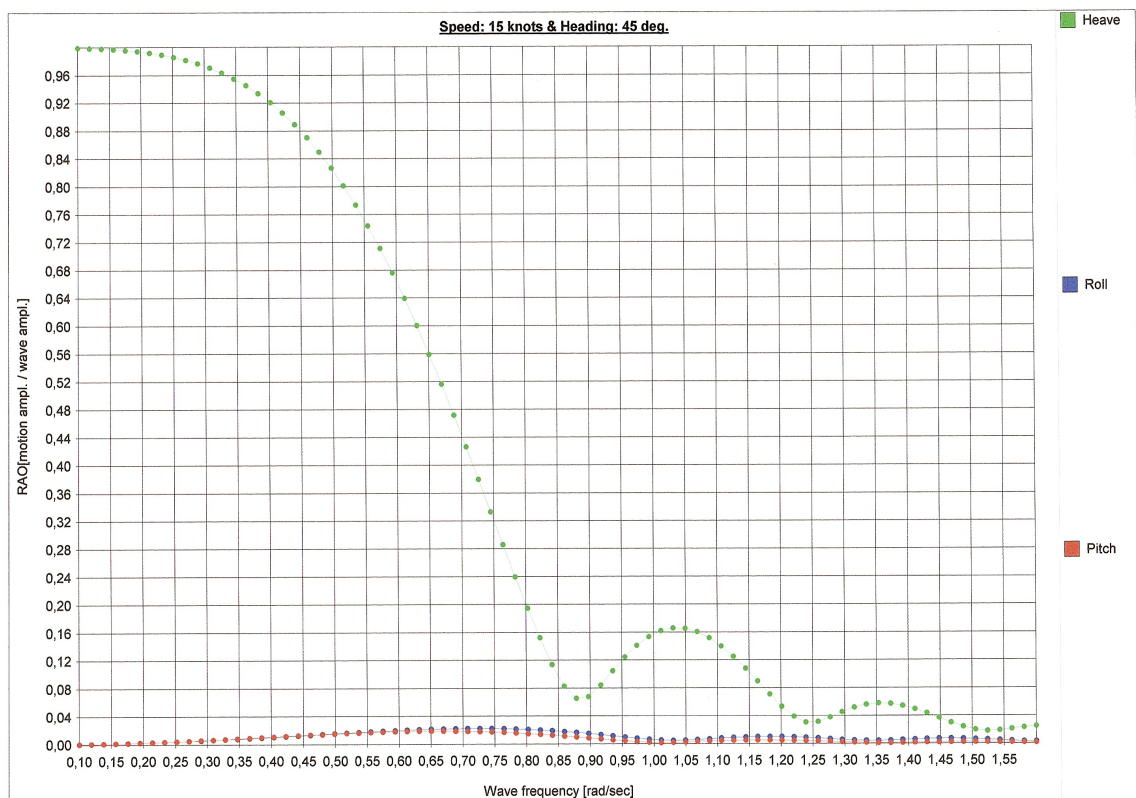
κατάλληλες επιλογές (αρμονικοί κυματισμοί, εύρος συχνοτήτων κύματος από 0,1 έως 1,6 rad/sec, κατάσταση φόρτωσης I, ταχύτητες πλοίου 15 και 25 knots). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα διαγράμματα των σχημάτων 5.1 έως 5.10.

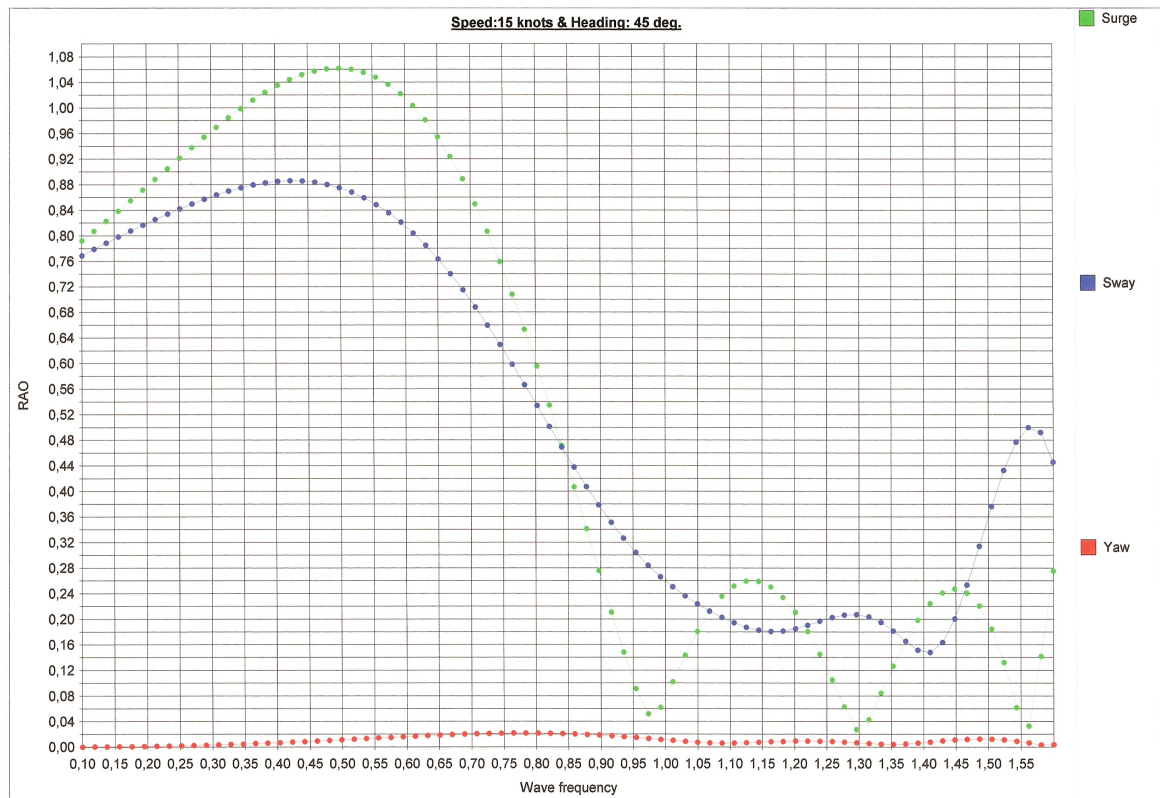
Παράλληλα με στόχο τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, οι ίδιοι τελεστές πλάτους απόκρισης υπολογίσθηκαν με χρήση του λογισμικού Seakeeper το οποίο αποτελεί τμήμα της σουίτας προγραμμάτων Maxsurf, στηρίζεται σε διαφορετικό θεωρητικό υπόβαθρο (είναι εφαρμογή της θεωρίας λωρίδων σε αντίθεση με το FD-Waveload που αποτελεί εφαρμογή μιας τρισδιάστατης θεωρίας GFM (Green function method) με χρήση επίπεδων στοιχείων 3D-panels) και υπολογίζει τις δυναμικές αποκρίσεις μόνο στη κατακόρυφη κίνηση (heave), στο διατοιχισμό (roll) και στο προνευσμό (pitch). Ενδεικτικά παραθέτονται τα διαγράμματα των σχημάτων 5.11 έως 5.13.



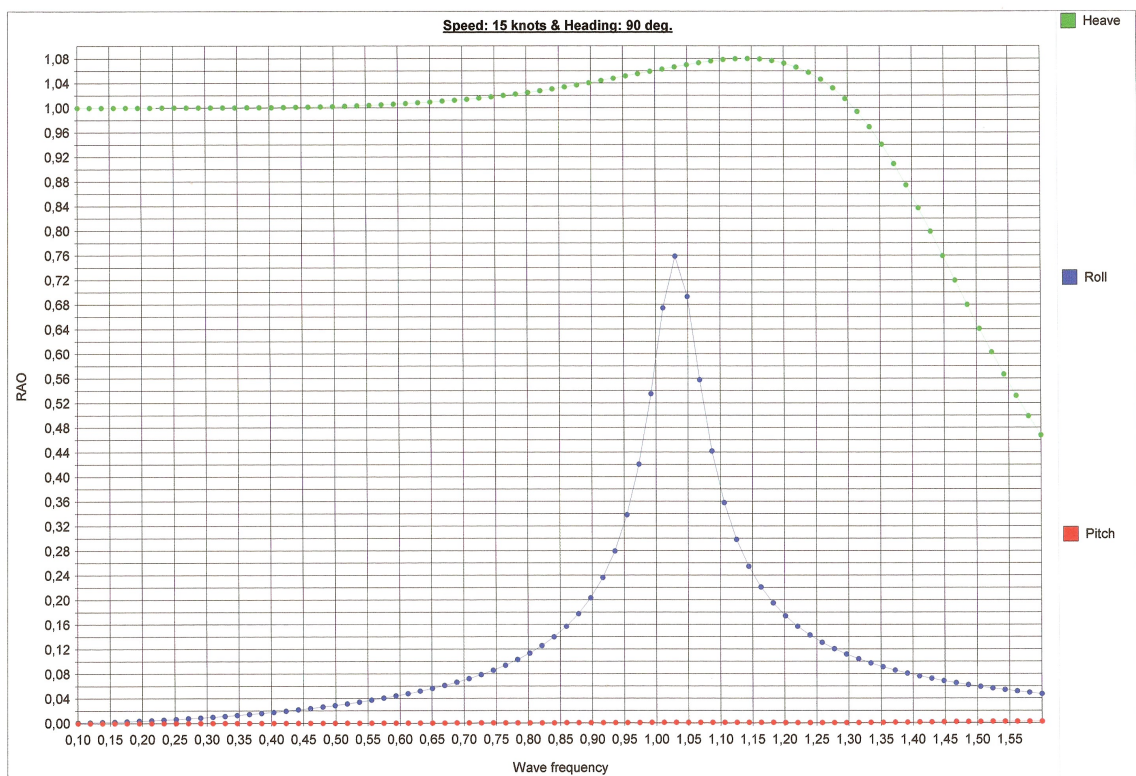


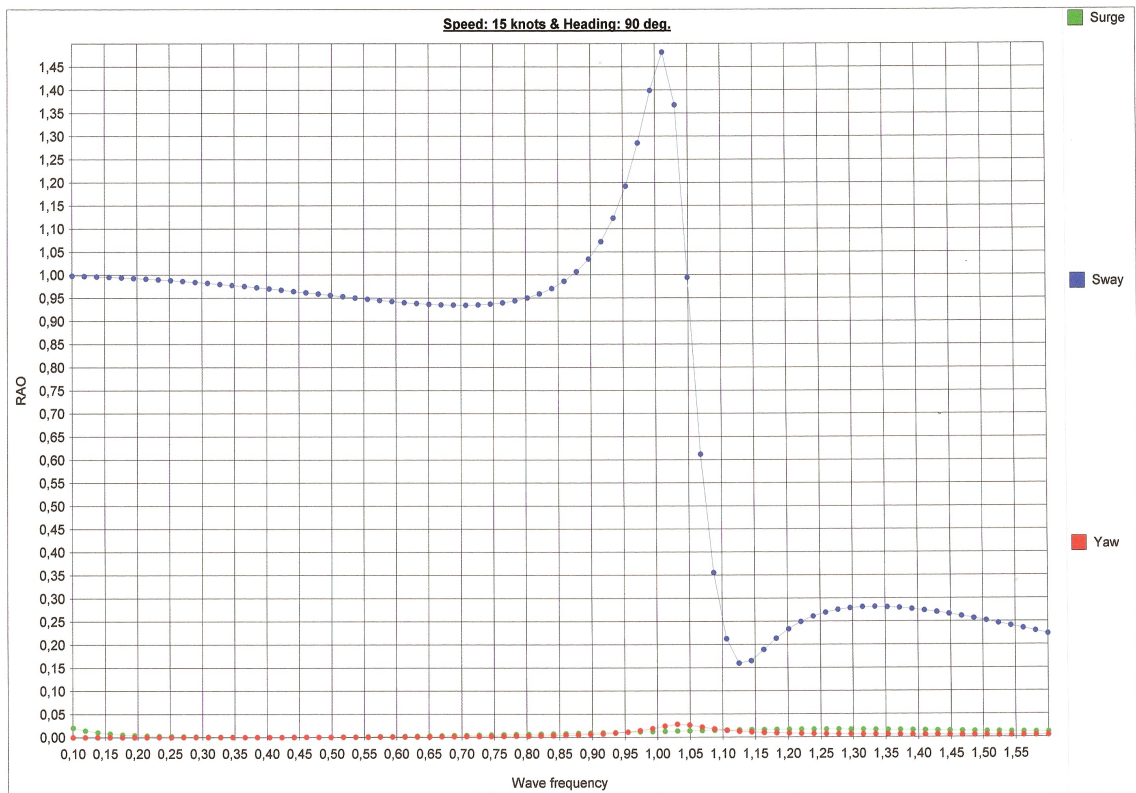
Σχήμα 5.1 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 0 deg.



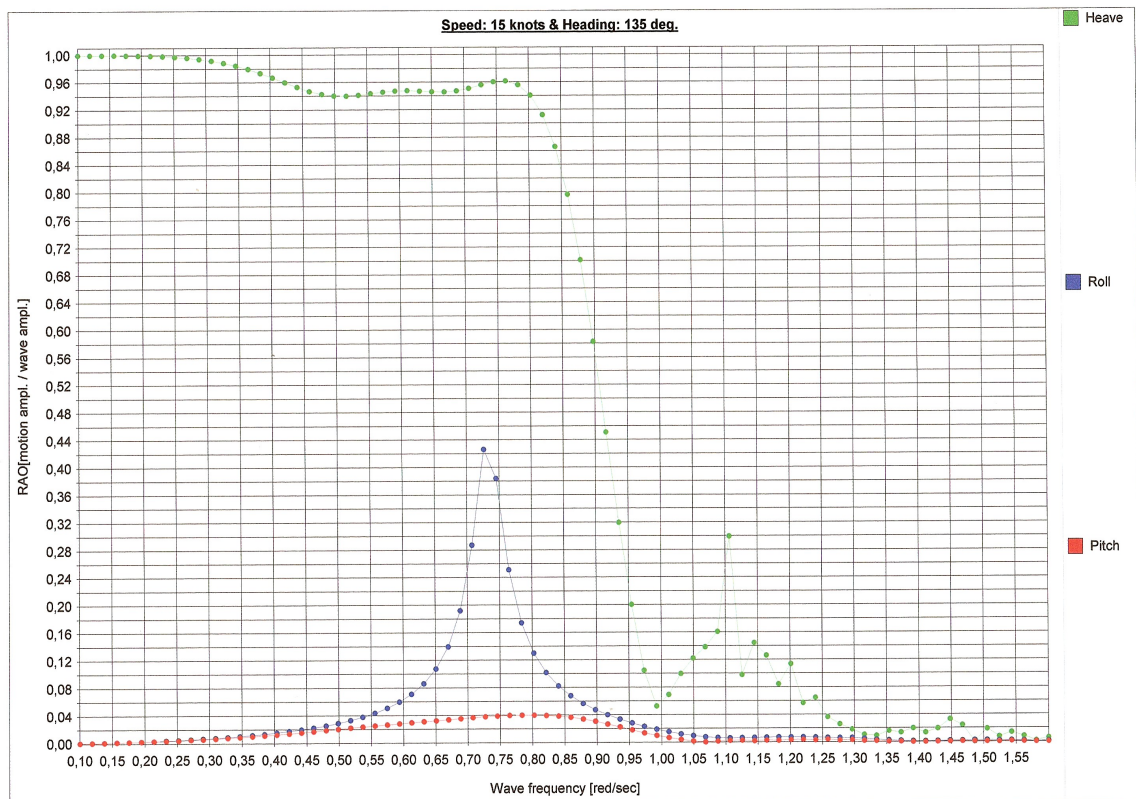


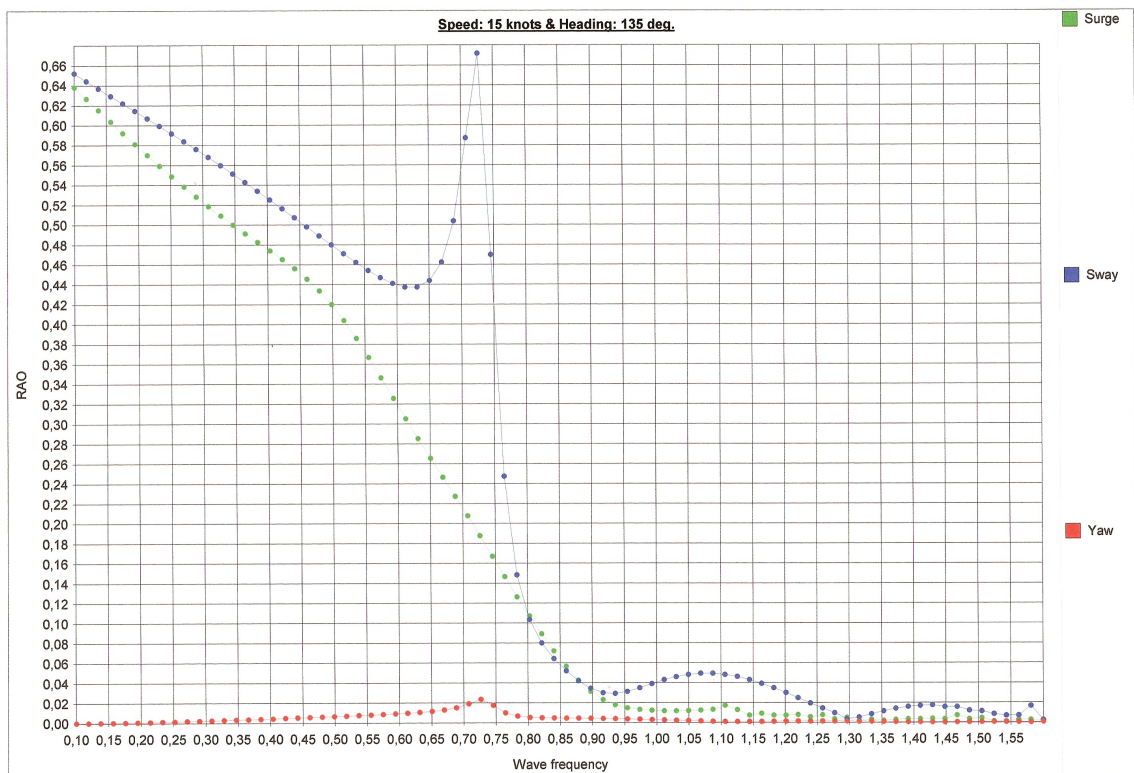
Σχήμα 5.2 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 45 deg.



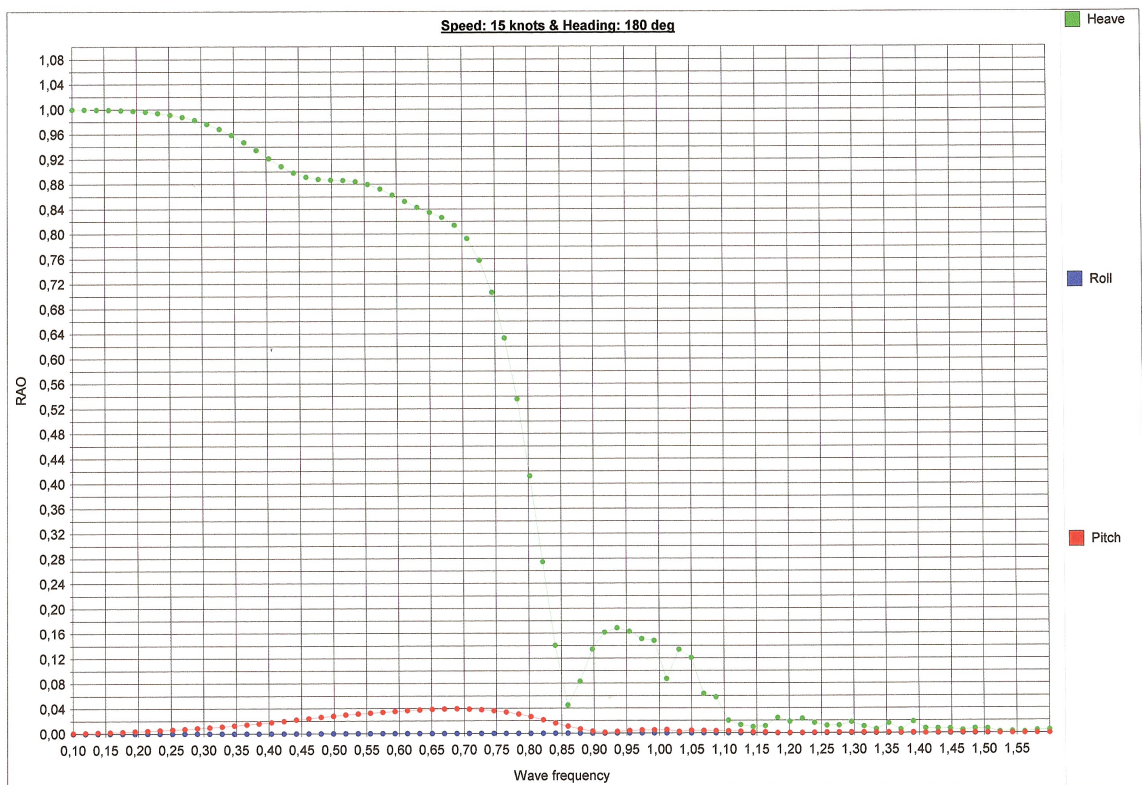


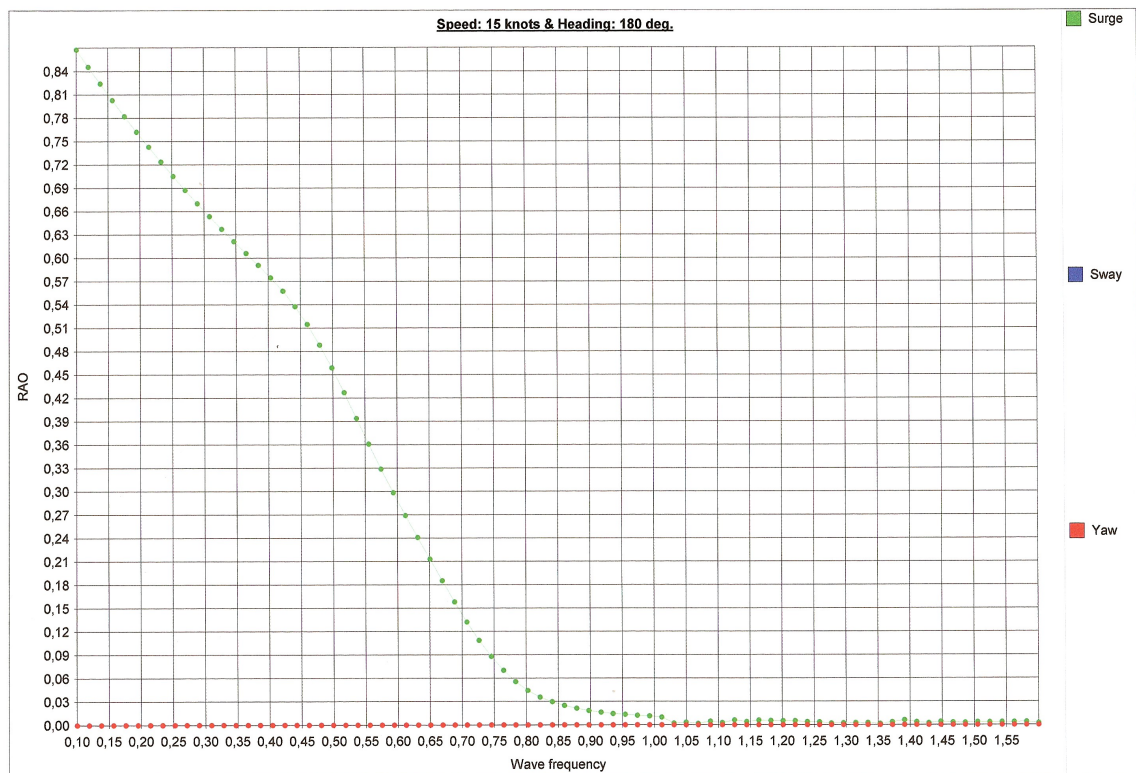
Σχήμα 5.3 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 90 deg.



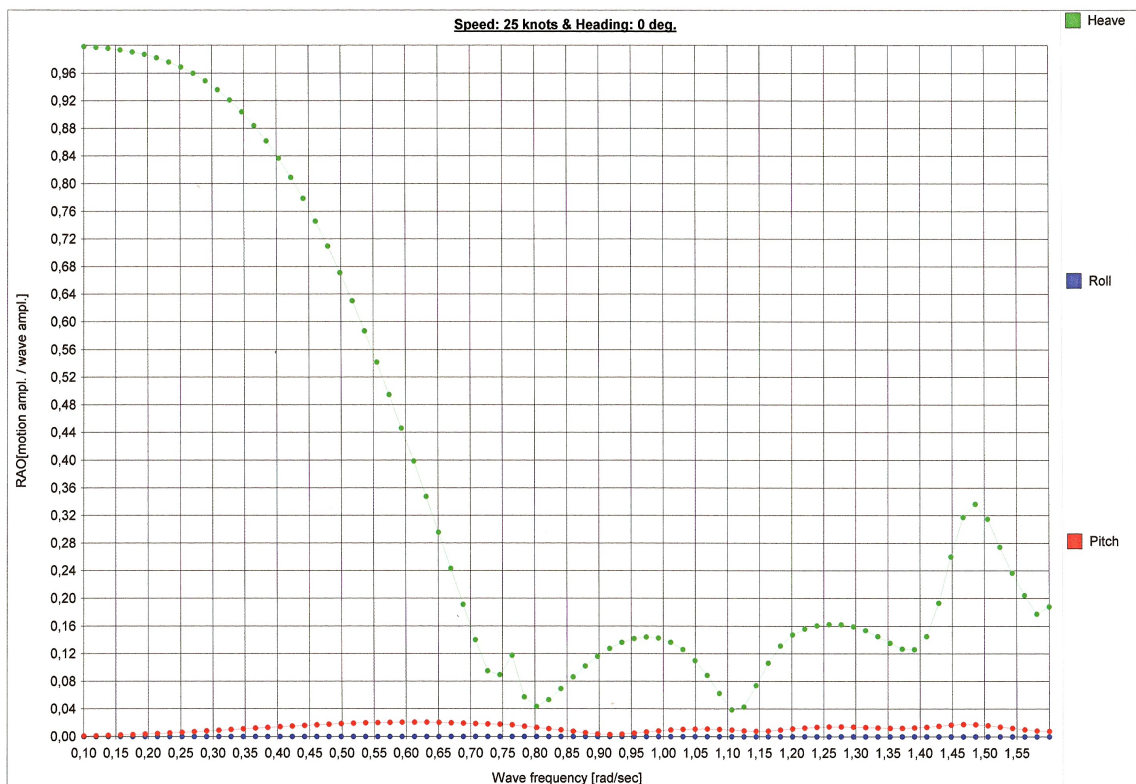


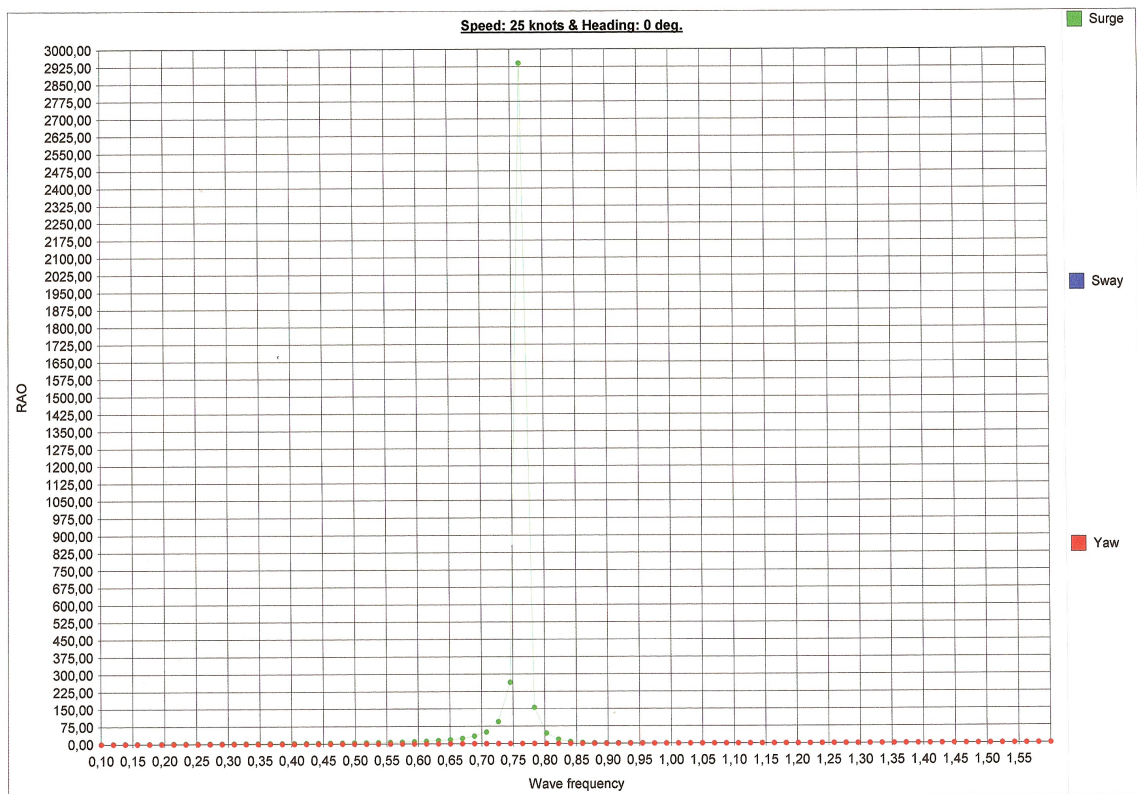
Σχήμα 5.4 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 135 deg.



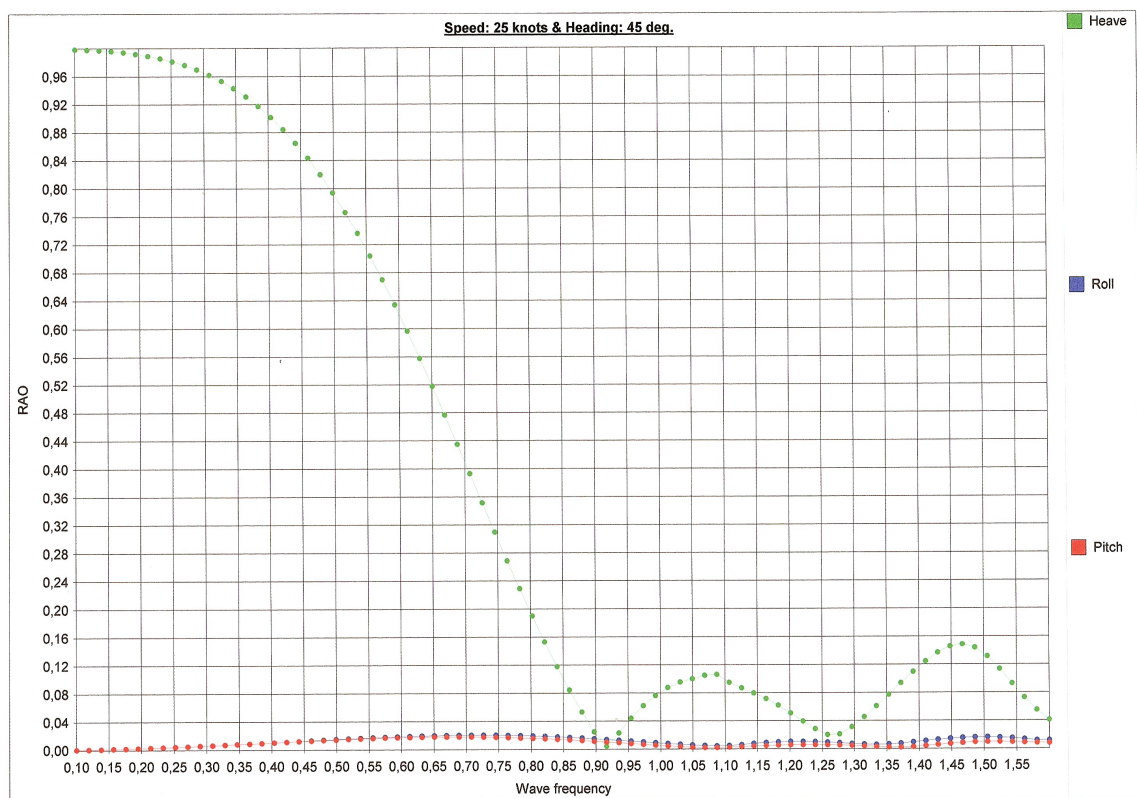


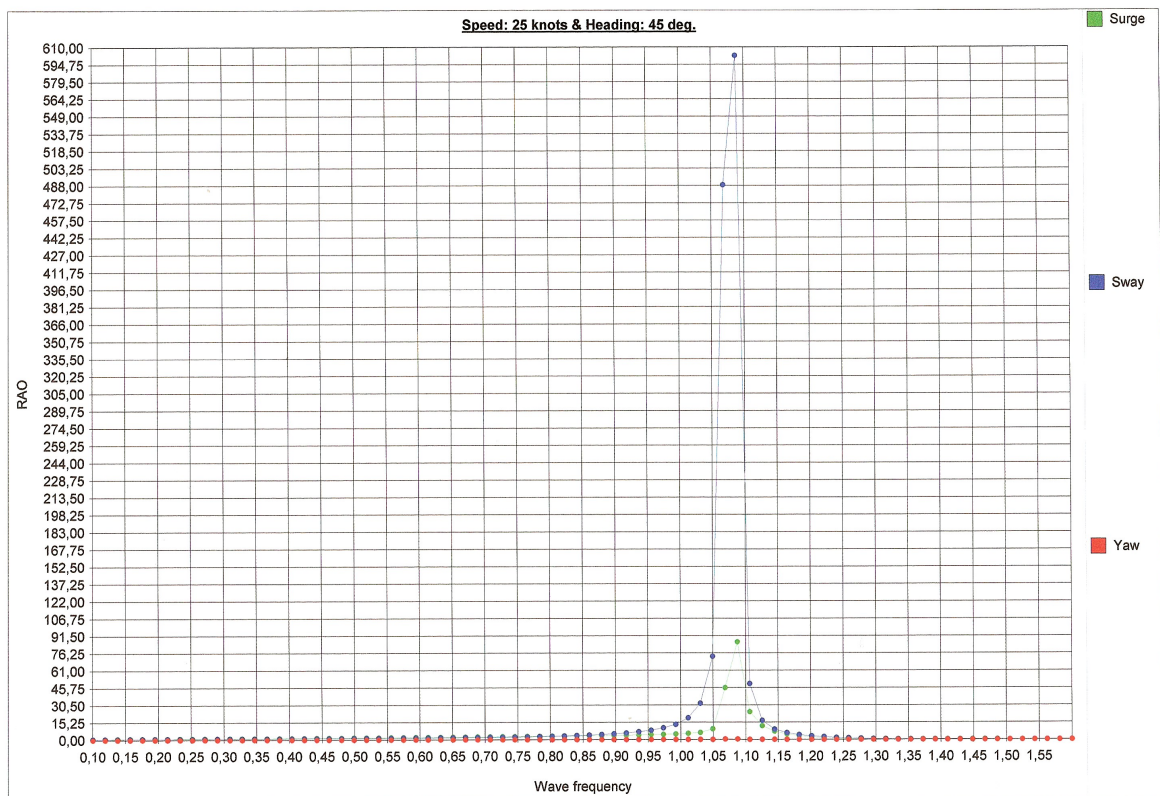
Σχήμα 5.5 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 180 deg.



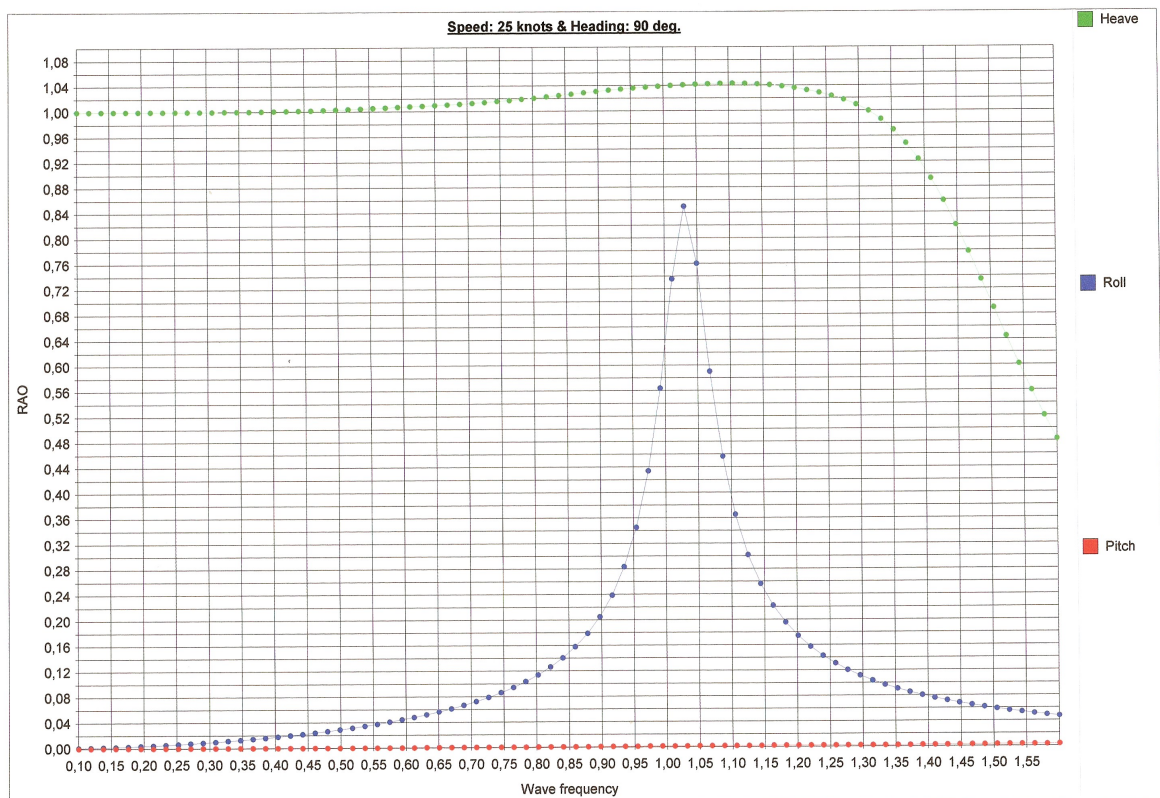


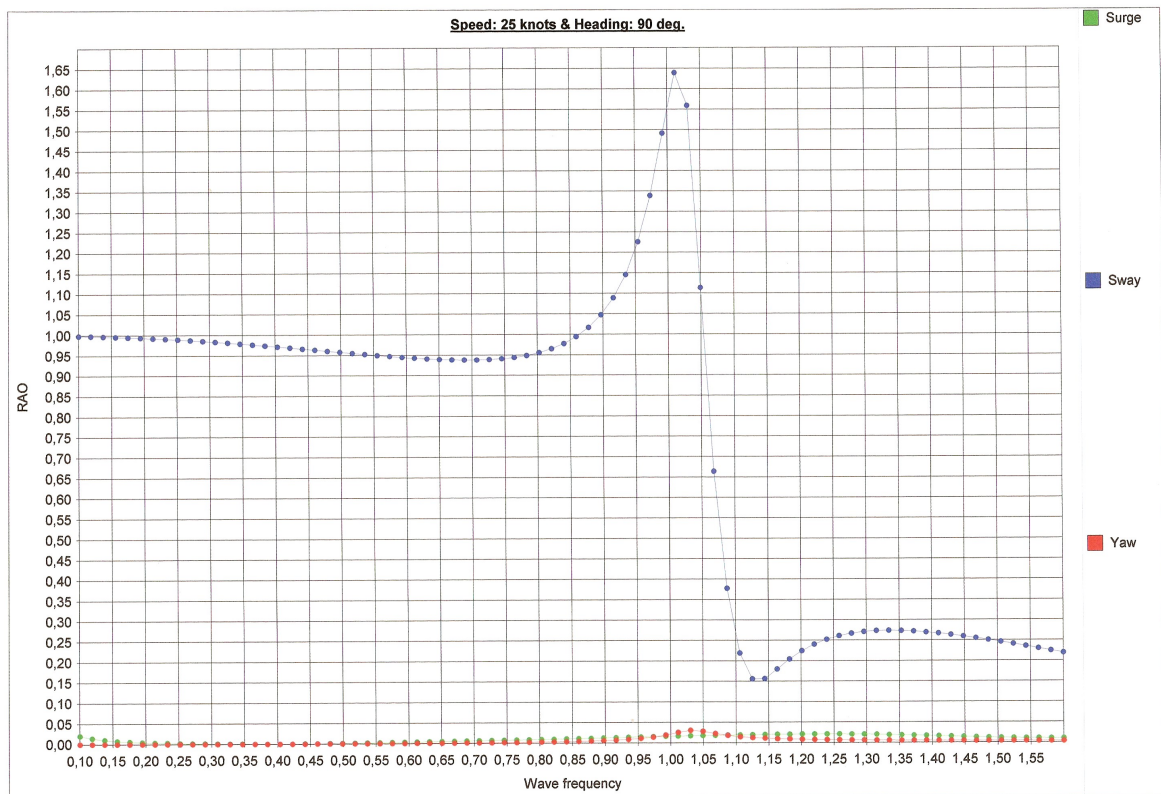
Σχήμα 5.6 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 25 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 0 deg.



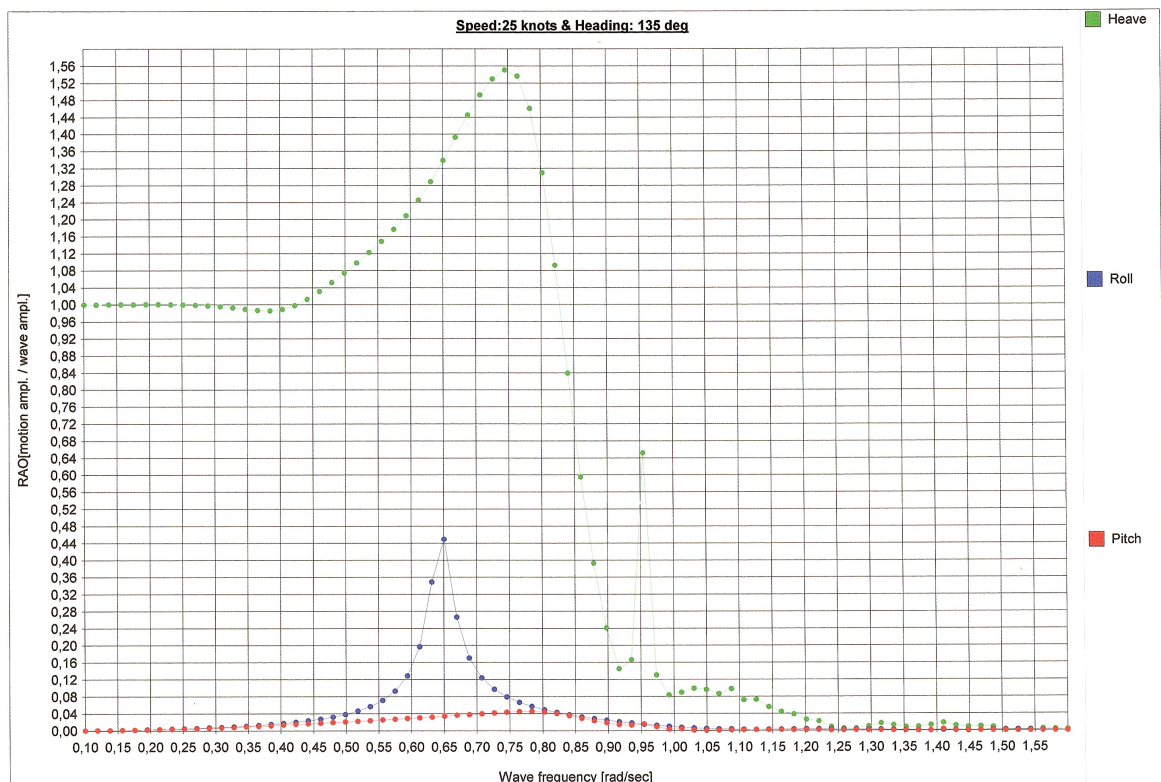


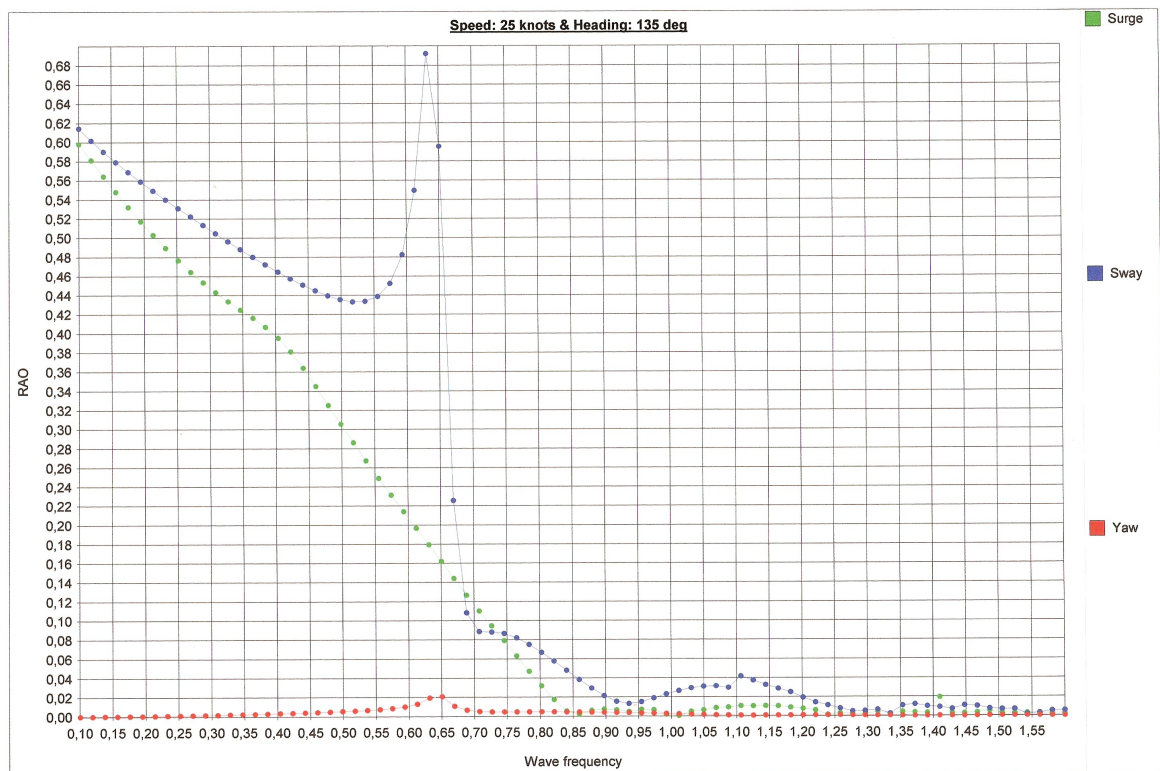
Σχήμα 5.7 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 25 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 45 deg.



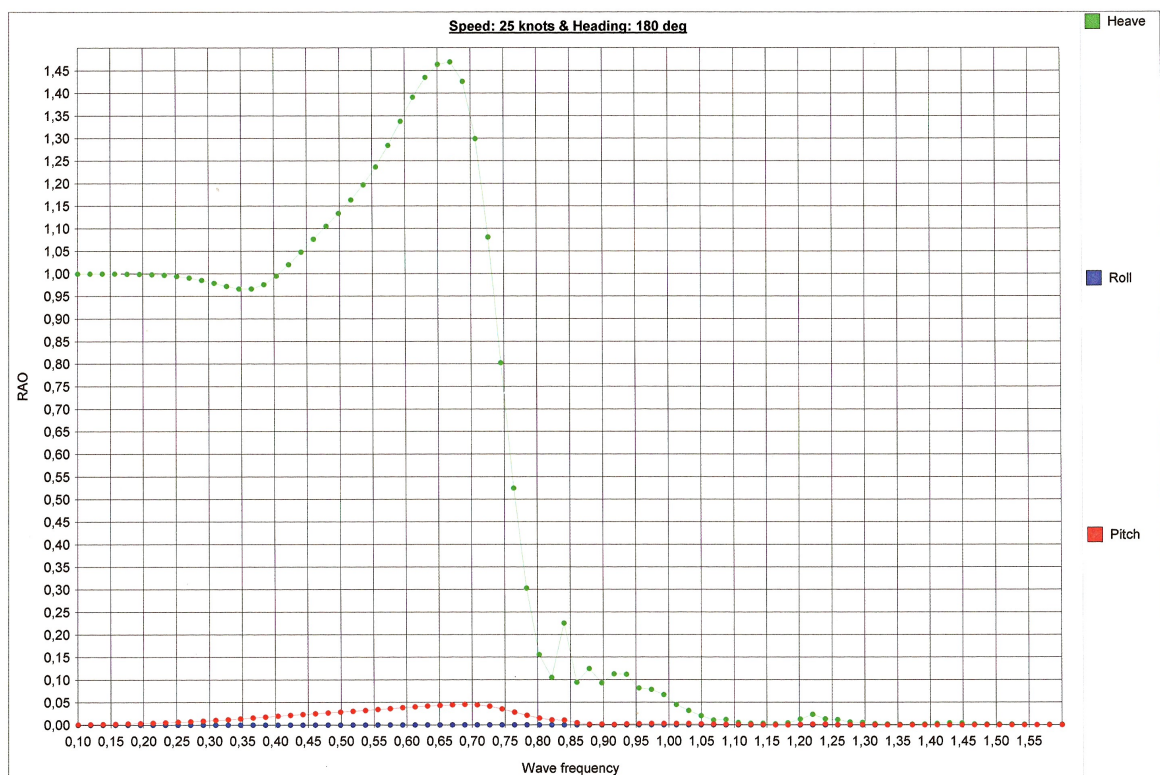


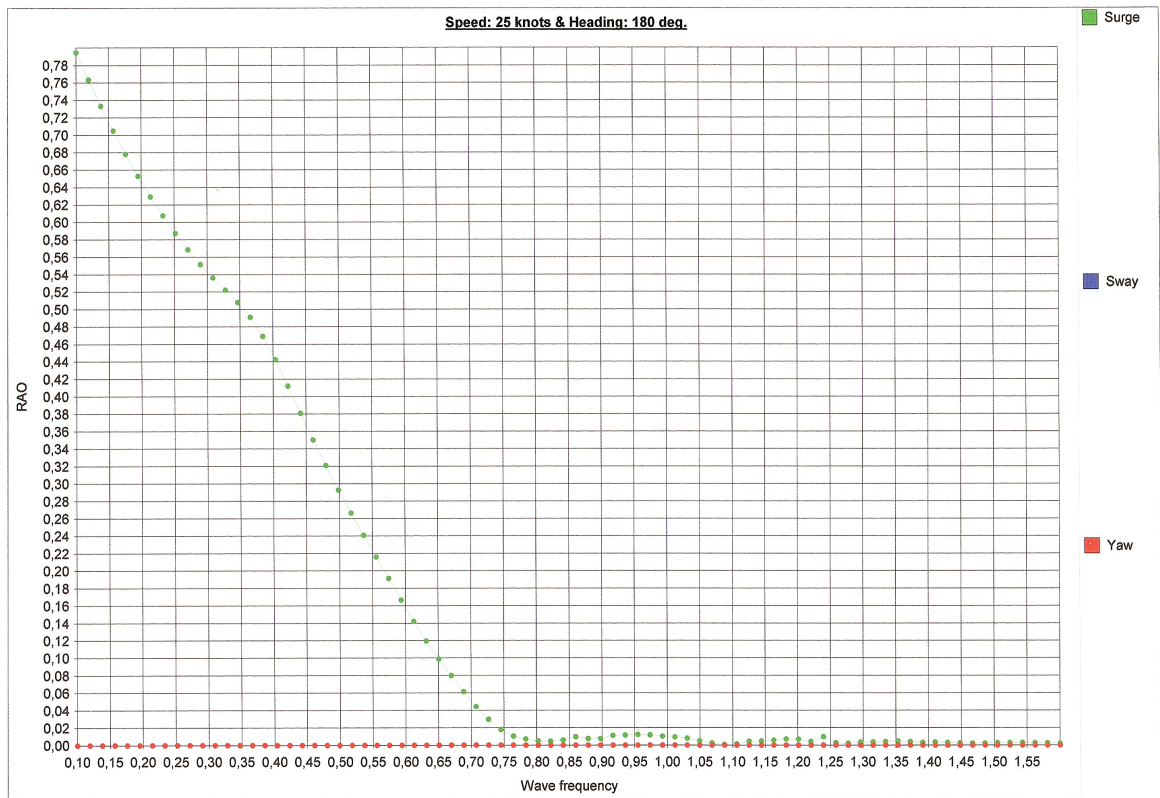
Σχήμα 5.8 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 25 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 90 deg.



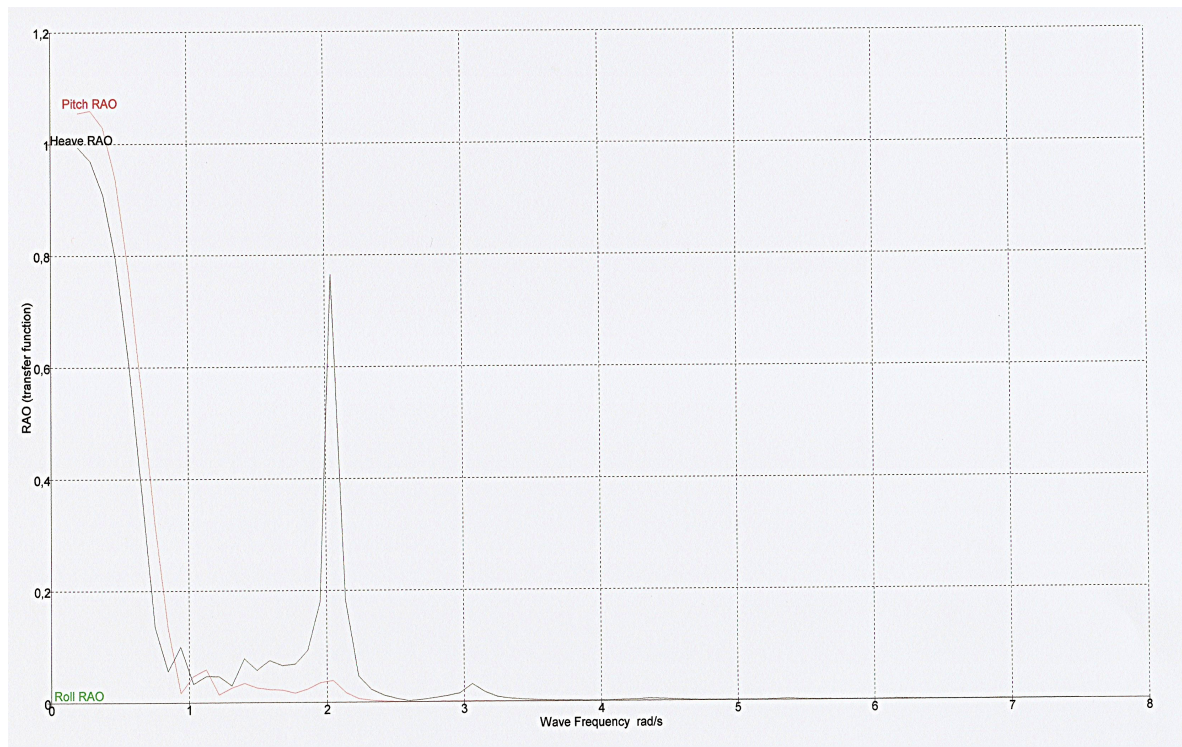


Σχήμα 5.9 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 25 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 135 deg.

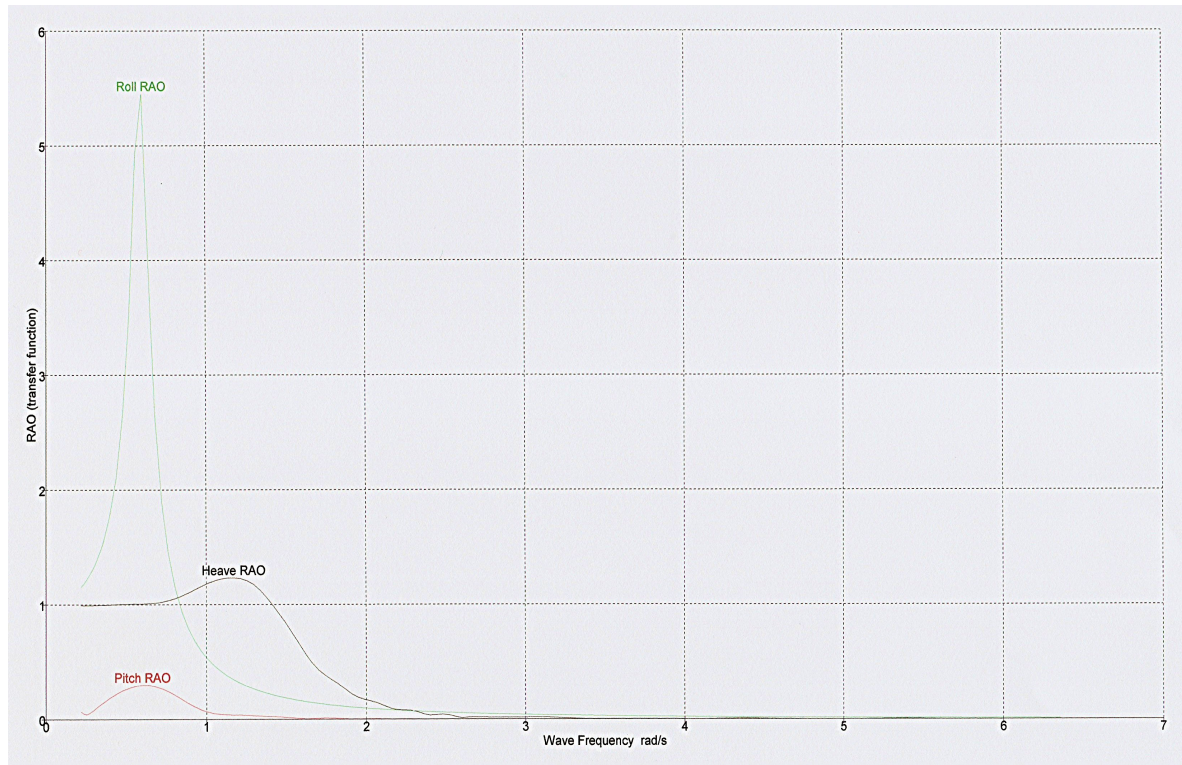




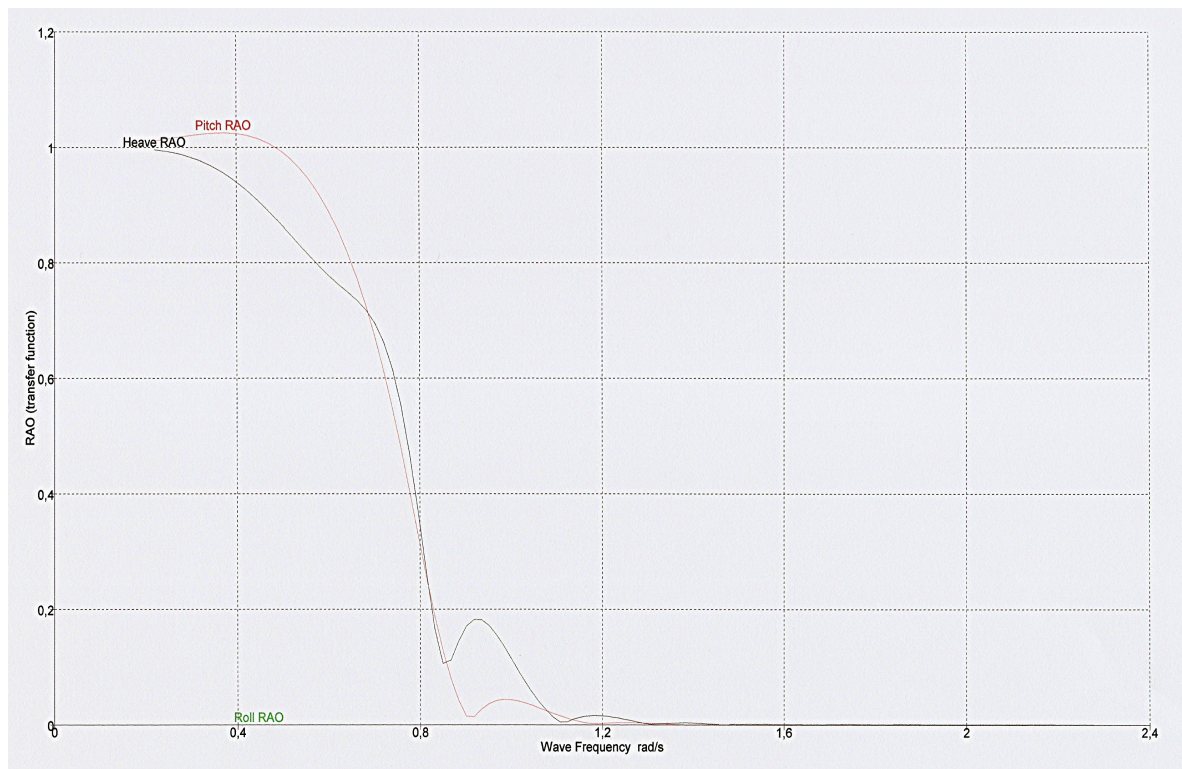
Σχήμα 5.10 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 25 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 180 deg.



Σχήμα 5.11 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 0 deg από Seakeeper.



Σχήμα 5.12 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 90 deg από Seakeeper.



Σχήμα 5.13 : Τελεστές απόκρισης RAO σε ταχύτητα πλοίου 15 knots και γωνία συνάντησης κυμάτων 180 deg από Seakeeper.

5.2 Έλεγχος αποτελεσμάτων.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτουν τα ακόλουθα :

α. Παρόμοιες μορφές διαγραμμάτων των τελεστών RAO_{heave} και ικανοποιητική εγγύτητα τιμών όπως ενδεικτικά καταδεικνύεται στον ακόλουθο πίνακα 5.1 για τρεις (3) διαφορετικούς συνδυασμούς ταχύτητας και πορείας πλοίου. Σημειώνεται ότι και στα δύο λογισμικά οι αδιάστατοι τελεστές RAO_{heave} εκφράζουν πλάτος κίνησης ανά μοναδιαίο πλάτος κύματος.

Heave RAO				
	Speed: 15 knots & Heading: 0 deg.			
	$\omega_w = 0,3 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 0,6 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 1,0 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 1,2 \text{ rad/sec}$
Waveload	0,955	0,47	0,06	0,04
Seakeeper	0,965	0,531	0,053	0,047
	Speed: 15 knots & Heading: 90 deg.			
	$\omega_w = 0,3 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 0,6 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 1,0 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 1,2 \text{ rad/sec}$
Waveload	1,000	1,01	1,06	1,07
Seakeeper	0,995	1,008	1,18	1,228
	Speed: 15 knots & Heading: 180 deg.			
	$\omega_w = 0,3 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 0,6 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 1,0 \text{ rad/sec}$	$\omega_w = 1,2 \text{ rad/sec}$
Waveload	0,98	0,86	0,12	0,02
Seakeeper	0,982	0,779	0,115	0,016

Πίνακας 5.1 : Σύγκριση τιμών RAO_{heave} μεταξύ λογισμικών Waveload και Seakeeper.

β. Διαφορετικές μορφές διαγραμμάτων των τελεστών RAO_{pitch} που οφείλονται όμως στην διαφορετική αδιαστατοποίηση των τελεστών από τα δύο λογισμικά. Συγκεκριμένα στο λογισμικό Waveload ο τελεστής RAO_{pitch} εκφράζει μοίρες

(deg) προνευτασμού ανά μοναδιαίο πλάτος κύματος, ενώ στο λογισμικό Seakeeper εκφράζει μοίρες (deg) προνευτασμού ανά μοναδιαία κλίση κύματος (κλίση κύματος $\alpha=2\cdot\pi\cdot A / \lambda$, όπου A το πλάτος κύματος και λ το μήκος του). Ενδεικτικά αναφέρεται το ακόλουθο παράδειγμα :

Αρμονικό κύμα με συχνότητα $\omega_w=0,6$ [rad/sec], μήκος $\lambda=169,853$ [m] και μοναδιαίο πλάτος $A=1,000$ [m], προκαλεί σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα του Waveload σε ταχύτητα πλοίου 15 [knots] και πορεία πλοίου 0 [deg] προνευτασμό πλάτους 0,02 [deg]. Το ίδιο κύμα με κλίση $\alpha=2\cdot\pi\cdot 1/169,853=0,037$ προκαλεί σύμφωνα με το αντίστοιχο διάγραμμα του Seakeeper προνευτασμό πλάτους $0,531\cdot 0,037=0,019$ [deg].

Παρόμοια εγγύτητα τιμών των τελεστών RAO_{pitch} παρατηρείται και σε κάθε άλλη περίπτωση κύματος.

γ. Παρόμοιες μορφές διαγραμμάτων των τελεστών RAO_{roll} με σημαντικές όμως αποκλίσεις τιμών, που πέραν της ως ανωτέρω για τον προνευτασμό διαφορετικής αδιαστατοποίησης των τελεστών, οφείλονται κυρίως στους διαφορετικούς συντελεστές απόσβεσης "ζ". Ειδικότερα το λογισμικό Waveload εκτέλεσε τους σχετικούς υπολογισμούς λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη γραμμική-δυναμική (potential) συνιστώσα του "ζ" σε αντίθεση με το Seakeeper στο οποίο εισήχθη πριν την υδροδυναμική ανάλυση συνολικός συντελεστής απόσβεσης $\zeta=0.09$ (σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα B-9 του παραρτήματος Β). Κατ' αυτό το τρόπο σε ταχύτητα πλοίου 15 [knots] και πορεία 90 [deg] το Waveload δίνει μέγιστο $RAO_{roll} = 0,76$ σε $\omega_w=1,03$ [rad/sec], ενώ το Seakeeper δίνει μέγιστο $RAO_{roll} = 0,20$ σε $\omega_w=0,6$ [rad/sec].

Όσον αφορά στην εκτίμηση της "αξιοπλοΐας" του σκάφους σε κυματισμούς, εφαρμόστηκαν μερικά εκ των κριτηρίων για πολεμικά σκάφη που αναφέρονται στην οδηγία NATO Stanag 4154 (edition 3 από το 1998). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Seakeeper στο οποίο επιλέχθηκε κατάλληλο κυματικό φάσμα ITTC 2 Param. Bretschneider και δύο (2) καταστάσεις θαλάσσης με $H_{1/3}=2,5$ [m] / $T_p=8,4$ [sec] και $H_{1/3}=5,5$ [m] / $T_p=13,6$ [sec] σύμφωνα με το παράδειγμα της βιβλιογραφικής αναφοράς [14]. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 5.2.

ΘΕΣΗ	ΕΙΔΟΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	ΚΡΙΤΗΡΙΟ Stanag 4154 [τιμή σημαντικού πλάτους=2·RMS]	Μ.Ο Τιμών(2·RMS) Seakeeper $H_{1/3}=2,5$ [m] $T_p=8,4$ [sec]	Μ.Ο τιμών(2·RMS) Seakeeper $H_{1/3}=5,5$ [m] $T_p=13,6$ [sec]
------	------------------	---	---	--

COG	Pitch	3 deg	1,345 deg	3,027 deg
Γέφυρα	Vert. acceleration	4 m/sec ²	1,184 m/sec ²	1,84 m/sec ²
ΠΡ Πυροβόλο	Vert. velocity	1 m/sec	1,264 m/sec	2,382 m/sec
Ελικοδρόμιο	Vert. acceleration	4 m/sec ²	1,024 m/sec ²	1,502 m/sec ²
Ελικοδρόμιο	Heave	1,4 m	1,121 m	3,062 m
Ελικοδρόμιο	Vert. velocity	2 m/sec	0,926 m/sec	1,784 m/sec

Πίνακας 5.2 : Κριτήρια "αξιοπλοΐας" φρεγάτας τύπου Standard.

Από τα αποτελέσματα του ανωτέρω πίνακα είναι προφανές ότι η φρεγάτα τύπου Standard επιδεικνύει γενικά καλή συμπεριφορά στο σύνηθες περιβάλλον επιχειρησιακής της δράσης (οι τιμές $H_{1/3}=2,5$ [m] / $T_p=8,4$ [sec] αντιστοιχούν σε κατάσταση θαλάσσης (sea state) 4 έως 5 στη Μεσόγειο) και γενικά μείωση των επιχειρησιακών της δυνατοτήτων στο δυσμενές κυματικό περιβάλλον με τιμές $H_{1/3}=5,5$ [m] / $T_p=13,6$ [sec] που αντιστοιχούν σε κατάσταση θαλάσσης (sea state) 6 έως 7 στο Βόρειο Ατλαντικό ωκεανό. [9],[14].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ – ΤΕΛΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΥΠΑΘΕΙΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΣΕ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟ.

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η ευπάθεια σε παραμετρικό συντονισμό μιας φρεγάτας τύπου Standard του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού. Το φαινόμενο του παραμετρικού συντονισμού, αν και γνωστό στην επιστημονική κοινότητα ήδη από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, συγκεντρώνει τα τελευταία μόλις

χρόνια το ενδιαφέρον των διεθνών οργανισμών ως μια νέα διάσταση στη δυναμική ευστάθεια του σκάφους. Οι πρώτες οδηγίες για την αποφυγή του φαινομένου, τόσο σε σχεδιαστικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο, είναι ήδη πραγματικότητα και η σχετική έρευνα εντείνεται κυρίως στη κατεύθυνση των ακανόνιστων κυματισμών που αποτελούν και το πραγματικό, φυσικό θαλάσσιο περιβάλλον.

Η παρούσα μελέτη περιορίσθηκε στον κύριο παραμετρικό συντονισμό (ως πιο πιθανό) και σε αρμονικούς κυματισμούς λόγω της ύπαρξης σ' αυτό το θαλάσσιο περιβάλλον συγκεκριμένων κριτηρίων αξιολόγησης της ευπάθειας. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε ακολούθησε εν γένει το περίγραμμα της μεθόδου που εφαρμόζεται στην περίπτωση των containerships σύμφωνα με την βιβλιογραφική αναφορά [4], στηρίχθηκε όμως στα γενικότερα κριτήρια και τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφονται στην βιβλιογραφική αναφορά [3]. Ο υπολογισμός της κρίσιμης παραμέτρου του "γραμμικοποιημένου" συντελεστή απόσβεσης διατοιχισμού "ζ", ο οποίος μόνο πειραματικά μπορεί να υπολογισθεί με αξιοπιστία, έγινε με την ημι-εμπειρική μέθοδο Ikeda χρησιμοποιώντας ως αρχικό πλάτος διατοιχισμού την αυθαίρετη πλην όμως "λογική" τιμή $\phi_a=10[\text{deg}]$. Το σύνολο των απαραίτητων υπολογισμών εκτελέσθηκε κατά περίπτωση σε περιβάλλον λογισμικού Excel και Matlab, ενώ για την μοντελοποίηση της γάστρας του σκάφους χρησιμοποιήθηκε το ειδικό λογισμικό Maxsurf και Hydromax. Η μελέτη του πλοίου έγινε σε δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης που αποτελούν σύμφωνα με το Stability book τη βέλτιστη και δυσμενέστερη αντίστοιχα κατάσταση άθικτης ευστάθειας όσον αφορά στη τιμή του μετακεντρικού ύψους GM σε ήρεμο νερό.

Η μελέτη κατέδειξε εν γένει την αρνητική ευπάθεια της φρεγάτας τύπου Standard σε παραμετρικό συντονισμό. Ειδικότερα:

α. Στη κατάσταση φόρτωσης I, που αποτελεί τη συνήθη κατάσταση επιχειρησιακής δράσης του πλοίου, η μη ικανοποίηση του κριτηρίου απόσβεσης αποκλείει την εμφάνιση κύριου παραμετρικού συντονισμού σε κάθε περίπτωση αρμονικού κύματος που εξετάσθηκε.

β. Στη κατάσταση φόρτωσης II, που θεωρητικά κυρίως δύναται να υπάρξει, η ικανοποίηση του κριτηρίου απόσβεσης κάνει πιθανή την εμφάνιση παραμετρικού συντονισμού σε έξι(6) μόνο εκ των σαράντα δύο(42) εξεταζόμενων περιπτώσεων αρμονικών κυματισμών. Και στις περιπτώσεις όμως αυτές οι τιμές του σταθερού πλάτους του παραμετρικού διατοιχισμού

($\geq 15[\text{deg}]$) καθώς και ο χρόνος που απαιτείται για την ανάπτυξή του (τιμές πίνακα Δ-1 παραρτήματος Δ), περιορίζουν σε πρακτικό επίπεδο τις "επικίνδυνες" καταστάσεις συντονισμού σε τρεις(3) για $\lambda=1,2 \cdot L$ & $H/\lambda=0,1$ ή $\lambda=L$ & $H=0,1 \cdot \lambda$ ή $\lambda=1,4 \cdot L$ & $H=0,1 \cdot \lambda$. Ταυτόχρονα η ύπαρξη ενεργών πτερυγίων σταθεροποίησης που λειτουργούν σε εύρος ταχυτήτων πλοίου 6 έως 26 knots, εκτιμάται ότι πρακτικά ακυρώνει τη πιθανότητα εμφάνισης παραμετρικού συντονισμού σε κάθε περίπτωση.

Η αρνητική ευπάθεια του πλοίου πρέπει καταρχήν να αποδοθεί στην μορφή της γάστρας που διακρίνεται στο μεγαλύτερο μήκος της από νομείς τύπου "U" με μηδενική σχεδόν γωνία εξοχής στο κατάστρωμα (flare angle) και στη συνέχεια στην ύπαρξη παρατροπιδίων και ενεργών πτερυγίων σταθεροποίησης που σε συνδυασμό με τις υψηλές ταχύτητες πλεύσης επιτυγχάνουν υψηλό συντελεστή απόσβεσης διατοιχισμού. Σε κάθε περίπτωση και πέραν των παραδοχών – προσεγγίσεων της παρούσης μελέτης, η φρεγάτα τύπου Standard παρά την σχεδιαστική της ηλικία, αποδεικνύει και στο τομέα αυτό την αξιοπλοΐα της, για την οποία επί σειρά ετών περηφανεύονται τα πληρώματά της.

ΣΥΜΒΟΛΑ ΚΑΙ ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ.

Γενικά.

I_T ροπή ισάλου επιφάνειας περί το διαμήκη άξονα συμμετρίας.

Δ μάζα εκτοπίσματος.

ρ πυκνότητα νερού.

g επιτάχυνση βαρύτητας.

GM_m η μέση τιμή του μεταβαλλόμενου στο αρμονικό κύμα GM , οριζόμενη ως

$$GM_m = 0,5 \cdot (GM_{\max} + GM_{\min}).$$

- Gm_a το πλάτος της μεταβολής του GM στο αρμονικό κύμα, οριζόμενο ως $Gm_a = 0,5 \cdot (Gm_{max} - Gm_{min})$.
- h αδιάστατη παράμετρος οριζόμενη ως $h = Gm_a / GM_m$, η οποία αποτελεί την "διέγερση" του παραμετρικού διατοιχισμού.
- φ η γωνία διατοιχισμού.
- ω_e η συχνότητα συνάντησης του αρμονικού κύματος με το σκάφος.
- T_e η περίοδος συνάντησης του αρμονικού κύματος με το σκάφος.
- ε κατάλληλη διαφορά φάσης.
- I η ροπή αδράνειας της μάζας του σκάφους περί τον διαμήκη άξονα του διατοιχισμού.
- ΔI η υδροδυναμική ροπή αδράνειας του σκάφους περί τον διαμήκη άξονα του διατοιχισμού.
- B_{44} ο συντελεστής απόσβεσης διατοιχισμού σε μονάδες $kg \cdot m^2/sec$.
- m η μάζα του πλοίου.
- ω_φ η ιδιοσυχνότητα διατοιχισμού οριζόμενη ως $\omega_\varphi = \sqrt{[m \cdot g \cdot GM_\varphi / (I + \Delta I)]}$, όπου για την περίπτωση του μεταβαλλόμενου στο αρμονικό κύμα GM ισχύει ότι $GM_\varphi \equiv GM_m$.
- ζ ο αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης οριζόμενος ως $\zeta = B_{44} \cdot \omega_\varphi / 2 \cdot m \cdot g \cdot GM_\varphi$.

Μέθοδος Ikeda.

- ρ πυκνότητα νερού.
- V κινηματικό ιξώδες νερού.
- g επιτάχυνση βαρύτητας.
- V_s εμπρόσθια ταχύτητα πλοίου.
- Rn αριθμός Reynolds.
- ω συχνότητα διατοιχισμού.
- φ_a πλάτος διατοιχισμού.
- L μήκος πλοίου μεταξύ καθέτων.
- B πλάτος πλοίου.
- D μέσο βύθισμα.
- C_M συντελεστής μέσης τομής.
- C_B συντελεστής γάστρας.
- $S_L \approx L \cdot D$ πλευρική προβολή βρεχόμενης επιφάνειας.

- S_f βρεχόμενη επιφάνεια γάστρας.
 OG απόσταση κέντρου βάρους από την επιφάνεια ήρεμου νερού($\uparrow +$).
 B_s πλάτος ισάλου εγκάρσιας τομής.
 D_s βύθισμα εγκάρσιας τομής.
 A_s επιφάνεια εγκάρσιας τομής.
 σ_s συντελεστής εγκάρσιας τομής.
 $H_o = B_s/2D_s$.
 a_1 συντελεστής Lewis εγκάρσιας τομής.
 a_3 συντελεστής Lewis εγκάρσιας τομής.
 M_s συντελεστής κλίμακας Lewis εγκάρσιας τομής.
 r_f μέση απόσταση μεταξύ άξονα διατοιχισμού και επιφάνειας γάστρας.
 L_o ειδική απόσταση από άξονα διατοιχισμού που προσεγγίζεται με $L_o=0,3D$.
 L_R ειδική απόσταση από άξονα διατοιχισμού που προσεγγίζεται με $L_o=0,5D$.
 h_k ύψος παρατροπιδίων.
 L_k μήκος παρατροπιδίων.
 r_k απόσταση παρατροπιδίων και άξονα διατοιχισμού.
 f_k διόρθωση λόγω αύξησης της ταχύτητας ροής στο κυρτό τμήμα της γάστρας.
 C_p συντελεστής πίεσης.
 I_m μοχλοβραχίονας ροπής.
 r_b ακτίνα καμπυλότητας στο κυρτό τμήμα της γάστρας.

Μέθοδος Miller.

- A_{bk} η ολική επιφάνεια των παρατροπιδίων.
 b_{BK} το πλάτος του παρατροπιδίου.
 d η απόσταση επιπέδου συμμετρίας ισάλου από κυρτό γάστρας .
 L μήκος πλοίου μεταξύ καθέτων.
 B πλάτος πλοίου.
 T μέσο βύθισμα.
 C_b συντελεστής γάστρας.
 GM αρχικό μετακεντρικό ύψος.
 $F_n = V_s/\sqrt{(g \cdot L)}$, ο αριθμός Froude όπου V_s η ταχύτητα του πλοίου.
 φ_a το πλάτος διατοιχισμού σε [rad].
 F κατάλληλη παράμετρος οριζόμενη ως $F=F_n/C_b$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

- [1] IMO SLF 49/5/4, "Revision of the intact stability code", April 2006.

- [2] IMO MSC.1/Circ.1228, "Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions", January 2007.

- [3] ITTC –Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-07-04.3, "Predicting the occurrence and magnitude of parametric rolling", effective date 2006.

[4] ABS, "Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers", September 2004.

[5] Κ.Σπύρου, "Ασφάλεια του πλοίου έναντι κατάκλισης και κανονισμοί ασφαλείας", Σημειώσεις μαθήματος ροής Ι, Σεπτέμβριος 2005.

[6] Francescutto A., Bulian G., "Nonlinear and stochastic aspects of parametric rolling modelling", Proc. 6th Int. Ship Stability Workshop, Webb Institute, 2002.

[7] Biran A, "Ship hydrostatics and stability", Butterworth-Heinemann, 2003.

[8] Shin Y.S, Belenky V.L, Paulling J.R, Weems K.M, Lin W.M, "Criteria for parametric roll of large containerhips in longitudinal seas", SNAME annual meeting, 2004.

[9] Γ. Γρηγορόπουλος, "Δυναμική συμπεριφορά πλοίων σε κυματισμούς", Σημειώσεις για τους σπουδαστές του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών, Μέρος Β΄, Απρίλιος 2004.

[10] Journee J.M.J, Adegeest L.J.M, "Theoretical manual of SEAWAY for Windows", TUD report No.1370, December 2003.

[11] Lewis E., "Principles of Naval Architecture, Vol III", Second revision, SNAME, November 1989.

[12] Journee J.M.J, " User manual of SEAWAY ", TUD report No.1212a, February 2001.

[13] Rawson K.J, Tupper E.C, "Βασική θεωρία πλοίου", Τόμος Β΄, Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2004.

[14] Eefsen T., Walree V.F, Peri D., Terwisga V.P., Kristensen O.H, Dattola R., Visser M., "Development of frigate designs with good seakeeping characteristics", 9th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Luebeck-Travemuende, Germany, 2004.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ Ι (departure)					
	Stabity Booklet (υδροστατικές καμπύλες)	Hydromax (upright hydrostatics analysis)	Απόκλιση (%)	Όρια απόκλισης	ΕΛΕΓΧΟΣ
Draft amidsh. [m]	4,280	4,280	0,000	–	–
Moulded volume (no shell&append.) [m^3]	3490,000	3530,731	1,167	–	–

Displacement (no shell&append.) [tns]	3577,250	3598,000	0,580	2%	OK
Waterpl.area [m^2]	1265,000	1248,540	1,301	–	–
LCF from AP. [m]	52,975	53,000	0,047	1% 50cm max	OK
LCB from AP. [m]	58,100	58,139	0,067	1% 50cm max	OK
KB [m]	2,590	2,584	0,232	1% 5cm max	OK
KM_T [m]	7,000	6,930	1,000	1% 5cm max	OK
KM_L [m]	302,590	298,349	1,402	1% 50cm max	ΕΚΤΟΣ
MCT 1cm [tns*m]	88,000	88,123	0,140	2%	OK
Wetted surface [m^2]	1730,000	1716,881	0,758	–	–

Πίνακας Α-1: Έλεγχος με χρήση υδροστατικών καμπυλών.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ II (ελάχιστη επιτρεπτή)					
	Stabity Booklet (υδροστατικές καμπύλες)	Hydromax (upright hydrostatics analysis)	Απόκλιση (%)	Όρια απόκλισης	ΕΛΕΓΧΟΣ
Draft amidsh. [m]	3,930	3,930	0,000	–	–
Moulded volume (no shell&append.) [m^3]	3090,000	3098,536	0,276	–	–
Displacement (no shell&append.) [tns]	3167,250	3176,000	0,276	2%	OK
Waterpl.area [m^2]	1225,000	1216,099	0,727	–	–
LCF from AP. [m]	53,400	53,343	0,107	1% 50cm max	OK
LCB from AP. [m]	58,850	58,727	0,209	1% 50cm max	OK

KB [m]	2,390	2,371	0,795	1% 5cm max	OK
KM_T [m]	7,120	7,029	1,278	1% 5cm max	ΕΚΤΟΣ
KM_L [m]	317,400	319,317	0,604	1% 50cm max	OK
MCT 1cm [tns*m]	83,250	83,253	0,004	2%	OK
Wetted surface [m^2]	1625,000	1642,620	1,084	–	–

Πίνακας Α-2: Έλεγχος με χρήση υδροστατικών καμπυλών.

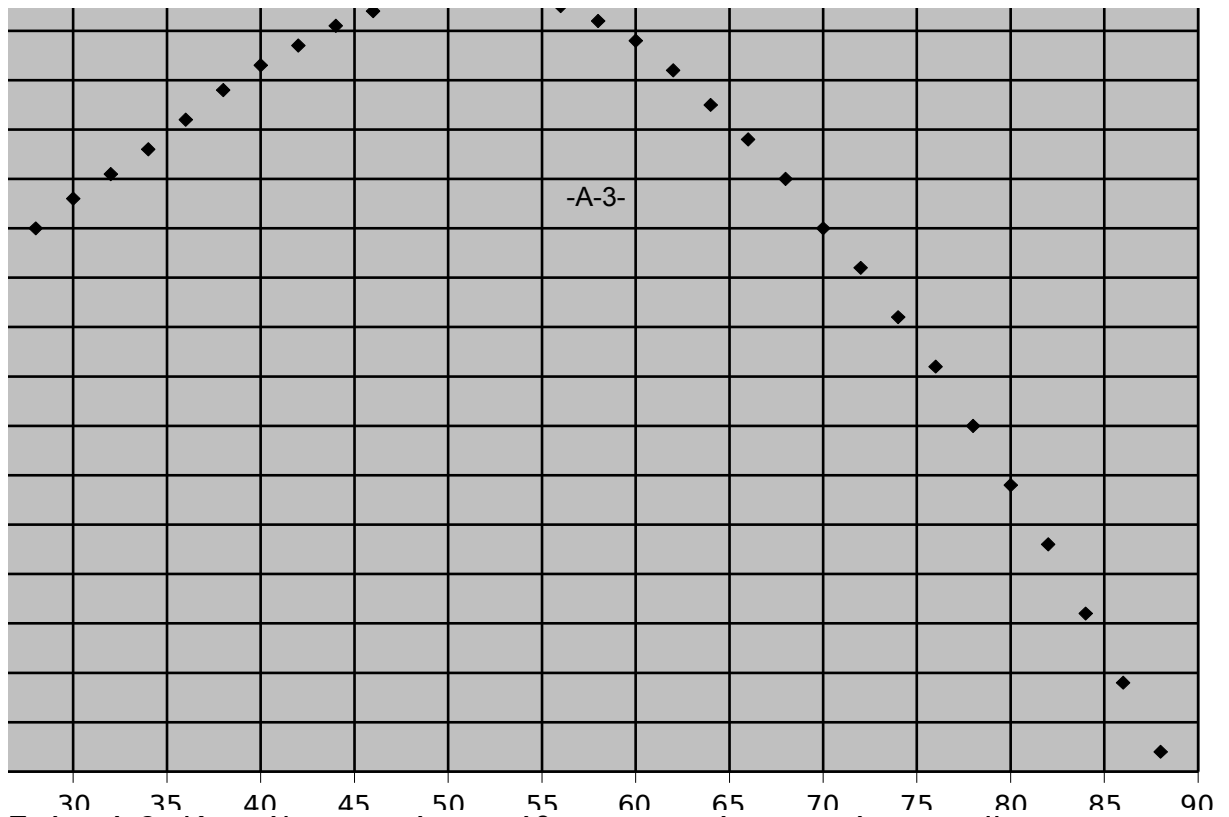
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ I (departure)					
	Stabity Booklet	Hydromax (equilibrium analysis)	Απόκλιση (%)	Όρια απόκλισης	ΕΛΕΓΧΟΣ
Draft amidsh. [m]	4,280	4,307	0,631	1% 5cm max	OK
Draft on FP [m]	4,390	4,381	0,205	1% 5cm max	OK
Draft on AP. [m]	4,180	4,233	1,268	1% 5cm max	OK
KG [m]	5,350	5,344	0,112	1% 5cm max	OK
KM_T [m]	6,950	6,923	0,388	1% 5cm max	OK
GM_i [m]	1,600	1,580	1,250	1% 5cm max	OK
FS correction	0,160	0,162	1,250	2%	OK

Πίνακας Α-3: Έλεγχος με χρήση στοιχείων φόρτου.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ II (ελάχιστη επιτρεπτή)					
	Stabity Booklet	Hydromax (equilibrium analysis)	Απόκλιση (%)	Όρια απόκλισης	ΕΛΕΓΧΟΣ
Draft amidsh. [m]	3,930	3,947	0,433	1% 5cm max	OK
Draft on FP [m]	3,980	3,967	0,327	1% 5cm max	OK
Draft on AP. [m]	3,870	3,926	1,447	1% 5cm max	OK
KG [m]	5,750	5,743	0,122	1% 5cm max	OK
KM_T [m]	7,050	7,019	0,440	1% 5cm max	OK
GM_i [m]	1,300	1,276	1,846	1% 5cm max	OK
FS correction	0,060	0,061	1,667	2%	OK

Πίνακας Α-4: Έλεγχος με χρήση στοιχείων φόρτου.

Σχήμα Α-1: Καμπύλη στατικής ευστάθειας για κατάσταση φόρτωσης Ι.



Σχήμα Α-2: Καμπύλη στατικής ευστάθειας για κατάσταση φόρτωσης ΙΙ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΑΡΧΕΙΑ "M-FILES" ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB.

```
%this m-file calculates semi-theoretically the forward speed effect
%on the linear potential roll damping according to Ikeda's method.
B44=input('potential roll damping in kg*m^2/sec=');
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
g=9.81; %gravity acceleration in m/s^2.
D=4.28; %the amidships draught.
Crf=circfr*V2/g; %the non-dimensional circular roll frequency.
Crf2=(circfr^2)*D/g; %the non-dimensional circular roll frequency squared.
A1=1+((Crf2^-1.2)*(exp(-2*Crf2)));
A2=0.5+((Crf2^-1)*(exp(-2*Crf2)));
B44s=B44*((0.5*((A2+1)+((A2-1)*tanh(20*(Crf-0.3)))+(2*A1-A2-1)*exp(-150*((circfr-0.25)^2))))-1)
```

fsedamp.m

```
%this m-file calculates semi-theoretically the forward speed effect
%on the linear potential roll damping according to Ikeda's method.
B44=input('potential roll damping in kg*m^2/sec=');
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
g=9.81; %gravity acceleration in m/s^2.
D=3.93; %the amidships draught.
Crf=circfr*V2/g; %the non-dimensional circular roll frequency.
Crf2=(circfr^2)*D/g; %the non-dimensional circular roll frequency squared.
A1=1+((Crf2^-1.2)*(exp(-2*Crf2)));
A2=0.5+((Crf2^-1)*(exp(-2*Crf2)));
B44s=B44*((0.5*((A2+1)+((A2-1)*tanh(20*(Crf-0.3)))+(2*A1-A2-1)*exp(-150*((circfr-0.25)^2))))-1)
```

fsedamp2.m

```

%this m-file calculates semi-theoretically the frictional roll damping
%according to Ikeda's method.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
B=14.4; %the moulded breadth of ship in meters.
D=4.28; %the amidships draught.
cb=0.473; %the block coefficient.
OG=1.07; %distance of cg above still waterlevel.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
Sf=L*(1.7*D+cb*B); %approximation of wetted hull surface area.
rf=((Sf/L)*(0.887+0.145*cb))+(2*OG)/pi; %approximation of average
    %distance between roll axis and hull surface.
v=1.14e-6; %the kinematic viscosity of water in m^2/sec.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
Rn=(0.512*((rf/angroll)^2)*circfr)/v; %an effective Reynolds number.
Cf=(1.328*(Rn^-0.5))+(0.014*(Rn^-0.114)); %the skin friction coefficient.
d=(8*angroll*circfr)/(3*pi); %in rad/sec.
B44f=0.5*dens*(rf^3)*Sf*Cf*(1+4.1*(V2/(L*circfr)));
B44flinear=d*B44f %in kg*m^2/sec.

```

frictiondamp.m

```

%this m-file calculates semi-theoretically the frictional roll damping
%according to Ikeda's method.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
B=14.4; %the moulded breadth of ship in meters.
D=3.93; %the amidships draught.
cb=0.451; %the block coefficient.
OG=1.82; %distance of cg above still waterlevel.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
Sf=L*(1.7*D+cb*B); %approximation of wetted hull surface area.
rf=((Sf/L)*(0.887+0.145*cb))+(2*OG)/pi; %approximation of average
    %distance between roll axis and hull surface.
v=1.14e-6; %the kinematic viscosity of water in m^2/sec.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
Rn=(0.512*((rf/angroll)^2)*circfr)/v; %an effective Reynolds number.
Cf=(1.328*(Rn^-0.5))+(0.014*(Rn^-0.114)); %the skin friction coefficient.
d=(8*angroll*circfr)/(3*pi); %in rad/sec.
B44f=0.5*dens*(rf^3)*Sf*Cf*(1+4.1*(V2/(L*circfr)));
B44flinear=d*B44f %in kg*m^2/sec.

```

frictiondamp2.m

```

%this m-file calculates semi-theoretically the roll damping due to eddy
%making according to Ikeda's method.
Bs=[7.221 8.771 10.178 12.264 13.681 14.412 13.934 12.77 10.316 7.249 3.63 1.792 0.07]; %sectional breadth waterline.
Ds=[0.245 1.029 1.671 4.465 4.407 4.343 4.309 4.236 4.189 4.107 4.039 5.931 0.217]; %sectional draft.
As=[1.675 7.038 12.351 30.939 41.757 47.946 46.346 41.103 31.367 20.676 9.412 10.424 0.01]; %sectional area.
s=As./(Bs.*Ds); %sectional area coefficient.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
Ho=Bs./(2*Ds); %sectional half breadth to draft ratio.
OG=1.07; %distance of cg above still waterlevel.
z=ones(1,13);
c1=(3*z)+((4/pi)*s)+((z-((4/pi)*s)).*((Ho-z)./(Ho+z)).^2));
c2=(2*c1)-(6*z);
c3=c1-(4*z);
a3=((-c1)+(3*z)+(((9*z)-(2*c1)).^0.5))./c1; %Lewis mapping coefficient.
a1=((Ho-z)./(Ho+z)).*(a3+z); %Lewis mapping coefficient.
Ms=Ds./(z-a1+a3);
psi1=zeros(1,13);
psi2=0.5./(cos((a1.*(z+a3))./(4*a3)));
r1=Ms.*sqrt((((z+a1).*sin(psi1))-(a3.*sin(3*psi1))).^2+(((z-a1).*cos(psi1))+(a3.*cos(3*psi1))).^2));
r2=Ms.*sqrt((((z+a1).*sin(psi2))-(a3.*sin(3*psi2))).^2+(((z-a1).*cos(psi2))+(a3.*cos(3*psi2))).^2));
for k=1:13
    if r1(k)>r2(k)
        rmax(k)=r1(k);
        psi(k)=psi1(k);
    elseif r1(k)<r2(k)
        rmax(k)=r2(k);
        psi(k)=psi2(k);
    end
end
H=z+(a1.^2)+(9*(a3.^2))+((2*a1).*(z-(3*a3)).*cos(2*psi))-((6*a3).*cos(4*psi));
a=((-2*a3).*cos(5*psi))+((a1.*(z-a3)).*cos(3*psi))+((cos(psi)).*(((6*z)-(3*a1)).*(a3.^2))+((a1.^2)-(3*a1)).*a3)+(a1.^2));
b=((-2*a3).*sin(5*psi))+((a1.*(z-a3)).*sin(3*psi))+((sin(psi)).*(((6*z)+(3*a1)).*(a3.^2))+((a1.^2)+(3*a1)).*a3)+(a1.^2));
f3=z+(4*exp((-1.65e+5)*((z-s).^2));
gamma=((sqrt(pi)*f3).*(rmax+((2*Ms)./H).*(sqrt((a.^2)+(b.^2)))))./(2*Ds).*(sqrt(Ho.*(s+(OG./Ds))))); %the relative velocity ratio
%on a cross section.

Cp=(0.35*exp(-gamma))-((2*exp(-0.187*gamma))+1.5; %the pressure coefficient.
f1=0.5*(z+tanh((20*s)-(14*z)));
f2=(0.5*(z-cos(pi*s))-((1.5*(z-exp((5*z)-(5*s))))).*(sin(pi*s).^2));
for k=[1:13]
    l(k)=(2*Ds(k))*sqrt(Ho(k)*(s(k)-1))/sqrt(pi-4);

```

```

        if (l(k)<Ds(k)) & (l(k)<Bs(k)/2)
            rb(k)=l(k);
        elseif (Ho(k)>1) & (l(k)>Ds(k))
            rb(k)=Ds(k);
        elseif (Ho(k)<1) & (l(k)>Ho(k)*Ds(k))
            rb(k)=Bs(k)/2;
        end
    end
    B44section=(0.5*dens*(Ds.^4)).*(rmax./Ds).^2.*Cp.*((z-((f1.*rb)./Ds)).*(z+(OG./Ds)-((f1.*rb)./Ds)))+(f2.*(Ho-((f1.*rb)./Ds).^2)));
    st=[0.011 6.103 12.194 24.377 36.560 48.743 60.925 73.108 85.291 97.474 109.657 115.748 121.839];
    B44nolinear=trapz(st,B44section); %in kg*m^2.
    ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
    angroll= ang*pi/180; %in rads.
    circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
    V1=input('ship velocity='); %in knots.
    V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
    K=V2/(0.04*circfr*L);
    d=(8*angroll*circfr)/(3*pi); %in rad/sec.
    B44linear=d*(1/(1+K^2))*B44nolinear

```

eddydamp.m


```

%this m-file calculates semi-theoretically the roll damping due to eddy
%making according to Ikeda's method.
Bs=[6.006 7.963 9.592 11.889 13.446 14.262 13.771 12.583 10.129 7.063 3.503 1.727 0.076]; %sectional breadth waterline.
Ds=[0.244 0.690 1.349 4.114 4.056 3.993 3.959 3.887 3.840 3.758 3.690 5.576 0.228]; %sectional draft.
As=[1.286 4.196 9.039 26.818 37.052 42.932 41.5 36.693 27.86 18.272 8.301 9.726 0.011]; %sectional area.
s=As./(Bs.*Ds); %sectional area coefficient.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
Ho=Bs./(2*Ds); %sectional half breadth to draft ratio.
OG=1.82; %distance of cg above still waterlevel.
z=ones(1,13);
c1=(3*z)+((4/pi)*s)+((z-((4/pi)*s)).*((Ho-z)./(Ho+z)).^2));
c2=(2*c1)-(6*z);
c3=c1-(4*z);
a3=((-c1)+(3*z)+((9*z)-(2*c1)).^0.5))./c1; %Lewis mapping coefficient.
a1=((Ho-z)./(Ho+z)).*(a3+z); %Lewis mapping coefficient.
Ms=Ds./(z-a1+a3);
psi1=zeros(1,13);
psi2=0.5./(cos((a1.*(z+a3))./(4*a3)));
r1=Ms.*sqrt((((z+a1).*sin(psi1))-(a3.*sin(3*psi1))).^2+((((z-a1).*cos(psi1))+(a3.*cos(3*psi1))).^2));
r2=Ms.*sqrt((((z+a1).*sin(psi2))-(a3.*sin(3*psi2))).^2+((((z-a1).*cos(psi2))+(a3.*cos(3*psi2))).^2));
for k=1:13
    if r1(k)>r2(k)
        rmax(k)=r1(k);
        psi(k)=psi1(k);
    elseif r1(k)<r2(k)
        rmax(k)=r2(k);
        psi(k)=psi2(k);
    end
end
H=z+(a1.^2)+(9*(a3.^2))+((2*a1).*(z-(3*a3)).*cos(2*psi))-((6*a3).*cos(4*psi));
a=((-2*a3).*cos(5*psi))+((a1.*(z-a3)).*cos(3*psi))+((cos(psi).*((((6*z)-(3*a1)).*(a3.^2))+((a1.^2)-(3*a1)).*a3)+(a1.^2)));
b=((-2*a3).*sin(5*psi))+((a1.*(z-a3)).*sin(3*psi))+((sin(psi).*((((6*z)+(3*a1)).*(a3.^2))+((a1.^2)+(3*a1)).*a3)+(a1.^2)));
f3=z+(4*exp((-1.65e+5)*((z-s).^2)));
gamma=((sqrt(pi)*f3).*(rmax+((2*Ms)./H).*(sqrt((a.^2)+(b.^2)))))./((2*Ds).*(sqrt(Ho.*(s+(OG./Ds))))); %the relative velocity ratio
%on a cross section.

Cp=(0.35*exp(-gamma))-(2*exp(-0.187*gamma))+1.5; %the pressure coefficient.
f1=0.5*(z+tanh((20*s)-(14*z)));
f2=(0.5*(z-cos(pi*s)))-((1.5*(z-exp((5*z)-(5*s))))).*(sin(pi*s).^2);
for k=[1:13]
    l(k)=(2*Ds(k))*sqrt(Ho(k)*(s(k)-1))/sqrt(pi-4);

```

```

    if (l(k)<Ds(k)) & (l(k)<Bs(k)/2)
        rb(k)=l(k);
    elseif (Ho(k)>1) & (l(k)>Ds(k))
        rb(k)=Ds(k);
    elseif (Ho(k)<1) & (l(k)>Ho(k)*Ds(k))
        rb(k)=Bs(k)/2;
    end
end
B44section=(0.5*dens*(Ds.^4)).*(rmax./Ds).^2.*Cp.*(((z-((f1.*rb)./Ds)).*(z+(OG./Ds)-((f1.*rb)./Ds)))+(f2.*(Ho-((f1.*rb)./Ds).√
^2))));
st=[0.0 6.073 12.146 24.292 36.438 48.584 60.729 72.875 85.021 97.167 109.313 115.386 121.459];
B44nolinear=trapz(st,B44section); %in kg*m^2.
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
K=V2/(0.04*circfr*L);
d=(8*angroll*circfr)/(3*pi); %in rad/sec.
B44linear=d*(1/(1+K^2))*B44nolinear

```

eddydam2p.m

```

%this m-file calculates semi-theoretically the roll damping due to lift
%force according to Ikeda's method.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
B=14.4; %the moulded breadth of ship in meters.
D=4.28; %the amidships draught.
Lo=0.3*D; %approximation of distance point of taking representative
           %angle of attack to roll axis.
Lr=0.5*D; %approximation of distance of centre of action of lift force
           %in roll motion to roll axis.
Sl=L*D; % approximation of lateral area.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
OG=1.07; %distance of cg above still waterlevel.
x=0; %the coefficient x=0 because of Cm=0.7<0.92 according to Ikeda.
kn=(2*pi*D/L)+(x*((4.1*(B/L))-0.045));
B44lift=0.5*dens*Sl*V2*kn*Lo*Lr*(1+1.4*(OG/Lr)+0.7*((OG^2)/(Lo*Lr))) %in kg*m^2/sec.

```

lift damp.m

```

%this m-file calculates semi-theoretically the roll damping due to lift
%force according to Ikeda's method.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
B=14.4; %the moulded breadth of ship in meters.
D=3.93; %the amidships draught.
Lo=0.3*D; %approximation of distance point of taking representative
           %angle of attack to roll axis.
Lr=0.5*D; %approximation of distance of centre of action of lift force
           %in roll motion to roll axis.
Sl=L*D; % approximation of lateral area.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
OG=1.82; %distance of cg above still waterlevel.
x=0; %the coefficient x=0 because of Cm=0.7<0.92 according to Ikeda.
kn=(2*pi*D/L)+(x*((4.1*(B/L))-0.045));
B44lift=0.5*dens*Sl*V2*kn*Lo*Lr*(1+1.4*(OG/Lr)+0.7*((OG^2)/(Lo*Lr))) %in kg*m^2/sec.

```

lift damp2.m

```

Bs=[14.438 13.919 13.387 12.330]; %sectional breadth waterline.
Ds=[4.311 4.266 4.242 4.207]; %sectional draft.
As=[48.443 46.148 43.744 39.226]; %sectional area.
s=As./(Bs.*Ds); %sectional area coefficient.
Ho=Bs./(2*Ds); %sectional half breadth to draft ratio.
OG=1.07; %distance of cg above still waterlevel.
z=ones(1,4);
hk=z; %height of the bilge keels.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
for k=[1:4]
    l(k)=(2*Ds(k))*sqrt(Ho(k)*(s(k)-1))/sqrt(pi-4);
    if (l(k)<Ds(k)) & (l(k)<Bs(k)/2)
        rb(k)=l(k);
    elseif (Ho(k)>1) & (l(k)>Ds(k))
        rb(k)=Ds(k);
    elseif (Ho(k)<1) & (l(k)>Ho(k)*Ds(k))
        rb(k)=Bs(k)/2;
    end
end
rk=Ds.*(sqrt(((Ho-0.293*(rb./Ds)).^2)+((z+(OG./Ds)-0.293*(rb./Ds)).^2))); %in meters.
fk=z+0.3*exp(-160*(z-s)); %no dimensions.
cd=((22.5*hk)./(pi*angroll)*rk.*fk))+2.4; %no dimensions.
B44kn=dens*(rk.^3).*hk.*(fk.^2).*cd; %in kgm in every section.
s0=(0.3*pi*angroll)*(fk.*rk)+1.95*hk;
m1=rb./Ds;
m2=-OG./Ds;
m3=z-m1-m2;
m4=Ho-m1;
m5=(0.414*Ho+0.0651*(m1.^2)-(m1.*(0.382*Ho+0.0106)))/(Ho-0.215*m1).*(z-0.215*m1);
m6=(0.414*Ho+0.0651*(m1.^2)-(m1.*(0.382+0.0106*Ho)))/(Ho-0.215*m1).*(z-0.215*m1);
if s0>0.25*pi*rb
    m7=(s0./Ds)-0.25*pi*m1;
elseif s0<0.25*pi*rb
    m7=0;
end
if s0>0.25*pi*rb
    m8=m7+0.414*m1;
elseif s0<0.25*pi*rb

```

```

    m8=m7+1.414*m1.*(z-cos(s0./rb));
end
A=((m3+m4).*m8)-(m7.^2);
B=((1/3*(m4.^3))./(Ho-0.215*m1))+(((z-m1).^2).*(2*m3-m2))./(6*(z-0.215*m1))+(m1.*(m3.*m5)+(m4.*m6));
cp1=1.2;
cp2=(-22.5*hk)./(pi*angroll)*(fk.*rk))-1.2;
C=(Ds.^2).*(-A.*cp2)+(cp1*B); %in m^2.
B44ks=0.5*dens*(rk.^2).*(fk.^2).*C; %in kgm in every section.
d=(8*angroll*circfr)/(3*pi); %in rad/sec.
B44bknonlinear=B44kn+B44ks; %in kgm in every section.
st=[0 9.1 14 21];
vf=trapz(st,B44bknonlinear); %in kg*m^2.
B44bklinear=d*vf %in kg*m^2/sec.

```

bkdamp.m


```

Bs=[14.117 13.602 12.788 12.143]; %sectional breadth waterline.
Ds=[3.974 3.949 3.895 3.876]; %sectional draft.
As=[42.865 40.798 37.484 35.037]; %sectional area.
s=As./(Bs.*Ds); %sectional area coefficient.
Ho=Bs./(2*D); %sectional half breadth to draft ratio.
OG=1.82; %distance of cg above still waterlevel.
z=ones(1,4);
hk=z; %height of the bilge keels.
dens=1025; %density of salt water in kg/m^3.
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
circfr=input('roll circ frequency='); %in rad/sec.
for k=[1:4]
    l(k)=(2*D(k))*sqrt(Ho(k)*(s(k)-1))/sqrt(pi-4);
    if (l(k)<Ds(k)) & (l(k)<Bs(k)/2)
        rb(k)=l(k);
    elseif (Ho(k)>1) & (l(k)>Ds(k))
        rb(k)=Ds(k);
    elseif (Ho(k)<1) & (l(k)>Ho(k)*Ds(k))
        rb(k)=Bs(k)/2;
    end
end
rk=Ds.*(sqrt(((Ho-0.293*(rb./Ds)).^2)+((z+(OG./Ds)-0.293*(rb./Ds)).^2))); %in meters.
fk=z+0.3*exp(-160*(z-s)); %no dimensions.
cd=((22.5*hk)./(pi*angroll)*rk.*fk)+2.4; %no dimensions.
B44kn=dens*(rk.^3).*hk.*(fk.^2).*cd; %in kgm in every section.
s0=(0.3*pi*angroll)*(fk.*rk)+1.95*hk;
m1=rb./Ds;
m2=-OG./Ds;
m3=z-m1-m2;
m4=Ho-m1;
m5=(0.414*Ho+0.0651*(m1.^2)-(m1.*(0.382*Ho+0.0106)))/((Ho-0.215*m1).*(z-0.215*m1));
m6=(0.414*Ho+0.0651*(m1.^2)-(m1.*(0.382+0.0106*Ho)))/((Ho-0.215*m1).*(z-0.215*m1));
if s0>0.25*pi*rb
    m7=(s0./Ds)-0.25*pi*m1;
elseif s0<0.25*pi*rb
    m7=0;
end
if s0>0.25*pi*rb
    m8=m7+0.414*m1;
elseif s0<0.25*pi*rb

```

```

    m8=m7+1.414*m1.*(z-cos(s0./rb));
end
A=(m3+m4).*m8)-(m7.^2);
B=((1/3*(m4.^3))./(Ho-0.215*m1))+((z-m1).^2).*(2*m3-m2))./(6*(z-0.215*m1))+(m1.*(m3.*m5)+(m4.*m6)));
cp1=1.2;
cp2=(-22.5*hk)./(pi*angroll)*(fk.*rk))-1.2;
C=(Ds.^2).*(-A.*cp2)+(cp1*B)); %in m^2.
B44ks=0.5*dens*(rk.^2).*(fk.^2).*C; %in kgm in every section.
d=(8*angroll*circfr)/(3*pi); %in rad/sec.
B44bknonlinear=B44kn+B44ks; %in kgm in every section.
st=[0 8.4 16.8 21];
vf=trapz(st,B44bknonlinear); %in kg*m^2.
B44bklinear=d*vf %in kg*m^2/sec.

```

bkdamp2.m


```

%this m-file calculates the non-dimensional total roll damping coefficient
%according to Miller's empirical method.
Bbk=1; %width of bilge keel in meters.
Abk=109.2; %total(port&starboard) area of bilge keels in meters^2.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
B=14.4; %the moulded breadth of ship in meters.
T=4.28; %the draft of ship in meters.
GM=1.45; %the initial metacentric height of ship in meters.
d=6.8; %distance centerline at the load waterline to the turn of bilge in meters.
cb=0.473; %the block coefficient.
g=9.81; %gravity acceleration in m/s^2.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
Fn=V2/sqrt(g*L); %the Froude number.
F=Fn/cb;
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
k0=19.25*((Abk*sqrt(Bbk))+(0.0024*L*B*sqrt(d)))*(((d^2)*sqrt(d*angroll))/(L*B^3*T*cb));
k1=0.00085*(L/B)*sqrt(L/GM)*F*(1+F+(2*(F^2)));
k2=k0+k1 % the critical damping ratio
z=k2/2 %the total non-dimensional damping ratio

```

Miller.m

```

%this m-file calculates the non-dimensional total roll damping coefficient
%according to Miller's empirical method.
Bbk=1; %width of bilge keel in meters.
Abk=109.2; %total(port&starboard) area of bilge keels in meters^2.
L=121.8; %the Lpp length of ship in meters.
B=14.4; %the moulded breadth of ship in meters.
T=3.93; %the draft of ship in meters.
GM=1.25; %the initial metacentric height of ship in meters.
d=6.6; %distance centerline at the load waterline to the turn of bilge in meters.
cb=0.451; %the block coefficient.
g=9.81; %gravity acceleration in m/s^2.
V1=input('ship velocity='); %in knots.
V2=0.514*V1; %ship velocity in m/sec.
Fn=V2/sqrt(g*L); %the Froude number.
F=Fn/cb;
ang=input('angle of initial roll='); %in degrees.
angroll= ang*pi/180; %in rads.
k0=19.25*((Abk*sqrt(Bbk))+(0.0024*L*B*sqrt(d)))*(((d^2)*sqrt(d*angroll))/(L*B^3*T*cb));
k1=0.00085*(L/B)*sqrt(L/GM)*F*(1+F+(2*(F^2)));
k2=k0+k1 % the critical damping ratio
z=k2/2 %the total non-dimensional damping ratio

```

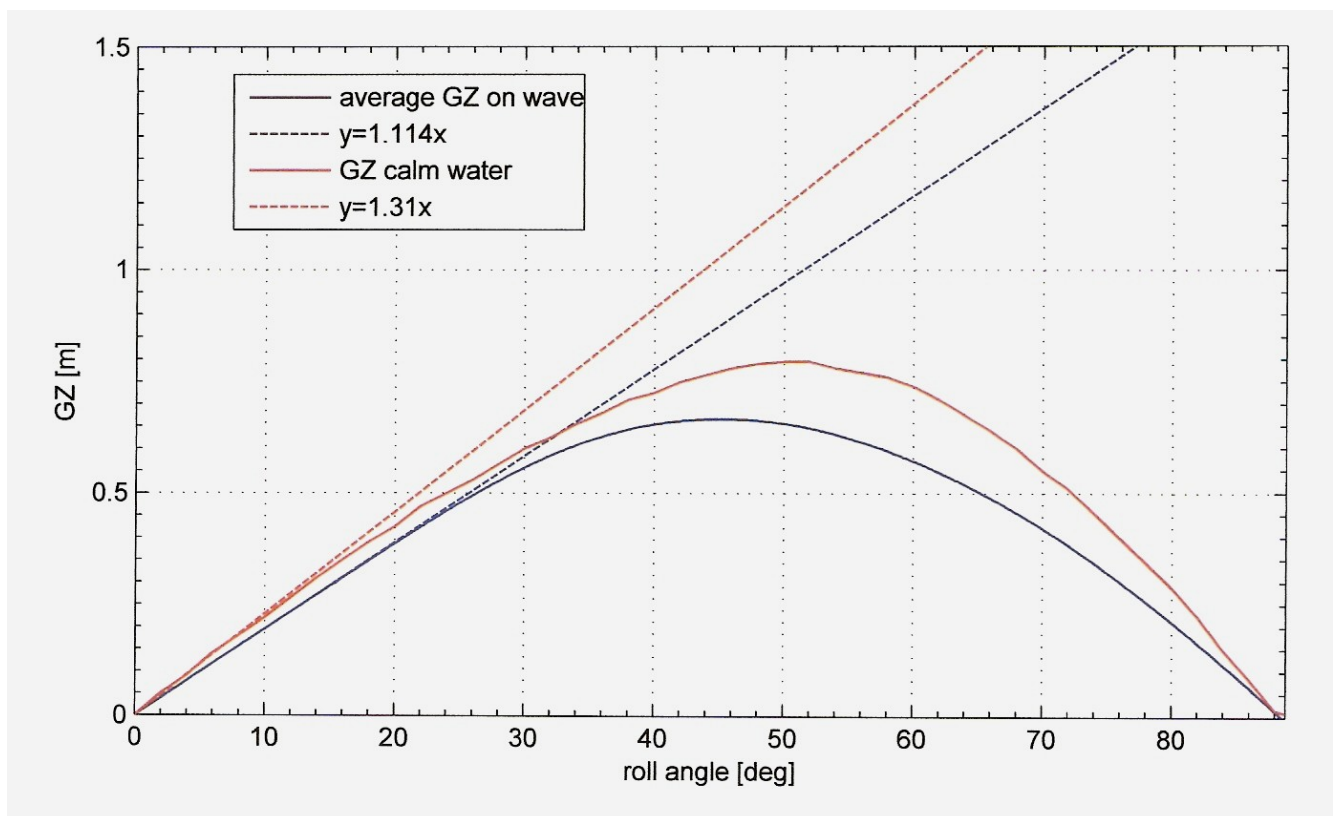
Miller2.m

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ II.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του μέγιστου σταθερού πλάτους διατοίχισμού στην πιθανή περίπτωση εμφάνισής του στη κατάσταση φόρτωσης II του σκάφους, είναι αυτή που περιγράφεται στις σχετικές παραγράφους των βιβλιογραφικών αναφορών [3] και [8]. Παρακάτω περιγράφεται ενδεικτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε στη περίπτωση του αρμονικού κύματος με $\lambda=1,2 \cdot L$ & $H/\lambda=0,1$. Η ίδια διαδικασία εφαρμοσμένη στις υπόλοιπες περιπτώσεις πιθανού παραμετρικού συντονισμού έδωσε τα αποτελέσματα που συγκεντρωτικά αναγράφονται στο πίνακα Δ-1. Ειδικότερα εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα:

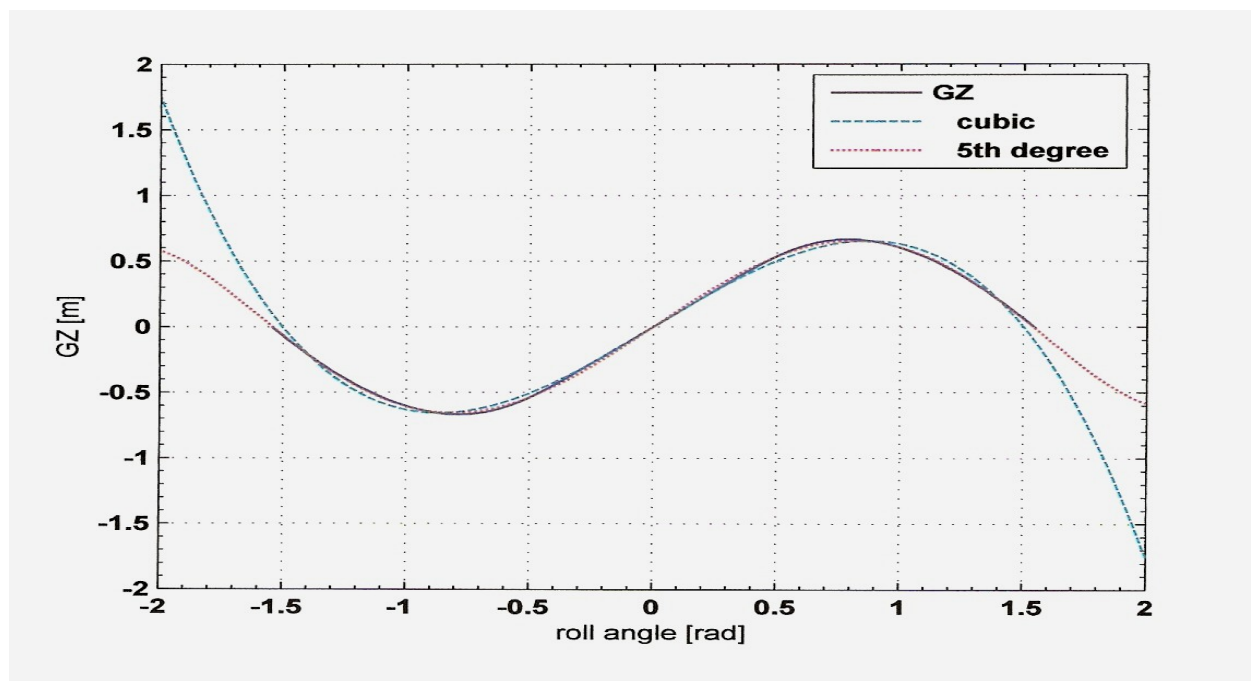
α. Στο περιβάλλον του λογισμικού Hydromax το πλοίο "τοποθετήθηκε" σε αρμονικό κύμα με $\lambda=1,2 \cdot L$ & $H/\lambda=0,1$ οπότε και υπολογίστηκε η καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς $GZ(\varphi)$ για κάθε μία από τις προκαθορισμένες από το λογισμικό θέσεις της κορυφής του κύματος κατά το διάμηκες του σκάφους (κατ' ανάλογο τρόπο με τη παράγραφο 5.1α). Από τις καμπύλες $GZ(\varphi)$ που προέκυψαν υπολογίστηκε στη συνέχεια η καμπύλη ενός μέσου (average) μοχλοβραχίονα επαναφοράς όπως αυτή εμφανίζεται στο ακόλουθο σχήμα Δ-1.



Σχήμα Δ-1: Καμπύλη του μέσου μοχλοβραχίονα επαναφοράς $GZ(\varphi)$ στο αρμονικό κύμα με $\lambda=1,2 \cdot L$ & $H/\lambda=0,1$. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται η καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς σε ήρεμο νερό και οι εφαπτόμενες των δύο καμπυλών στην αρχή των αξόνων. Είναι προφανές ότι $GM_{\text{ήρεμο νερό}} = 1,31$ και $GM_{\text{wave}} = 1,114$, τιμές που ταυτίζονται με τις αντίστοιχες από Stability book και πίνακα B-4 όπου υπολογίστηκε $GM_m=1,114$.

β. Στη συνέχεια και σύμφωνα με τα αναφερόμενα στη σχετική παράγραφο της βιβλιογραφικής αναφοράς [8] και το κεφάλαιο 4 της βιβλιογραφικής αναφοράς [3], επιχειρείται η προσέγγιση της καμπύλης του μέσου μοχλοβραχίονα επαναφοράς $GZ(\varphi)$ στο αρμονικό κύμα με ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού και ακολούθως με ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού. Στη

δεύτερη περίπτωση με χρήση του λογισμικού Matlab υπολογίσθηκε ότι η καμπύλη του μέσου $GZ(\varphi)$ προσεγγίζεται κατά το βέλτιστο τρόπο από την εξίσωση $GZ(\varphi)=1,25\cdot\varphi-0,732\cdot\varphi^3+0,086\cdot\varphi^5$. Επομένως $C_3=-0,732$ και $C_5=0,086$ οπότε διαιρώντας με τη τιμή $GM_m=1,114$ προκύπτουν οι αδιάστατοι συντελεστές $c_3=-0,657$ και $c_5=0,077$ που περιλαμβάνονται στην εξίσωση υπολογισμού του σταθερού πλάτους διατοιχισμού A που περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 της βιβλιογραφικής αναφοράς [3]. Στο ακόλουθο σχήμα Δ-2 φαίνεται η ως ανωτέρω προσέγγιση του μέσου μοχλοβραχίονα επαναφοράς.

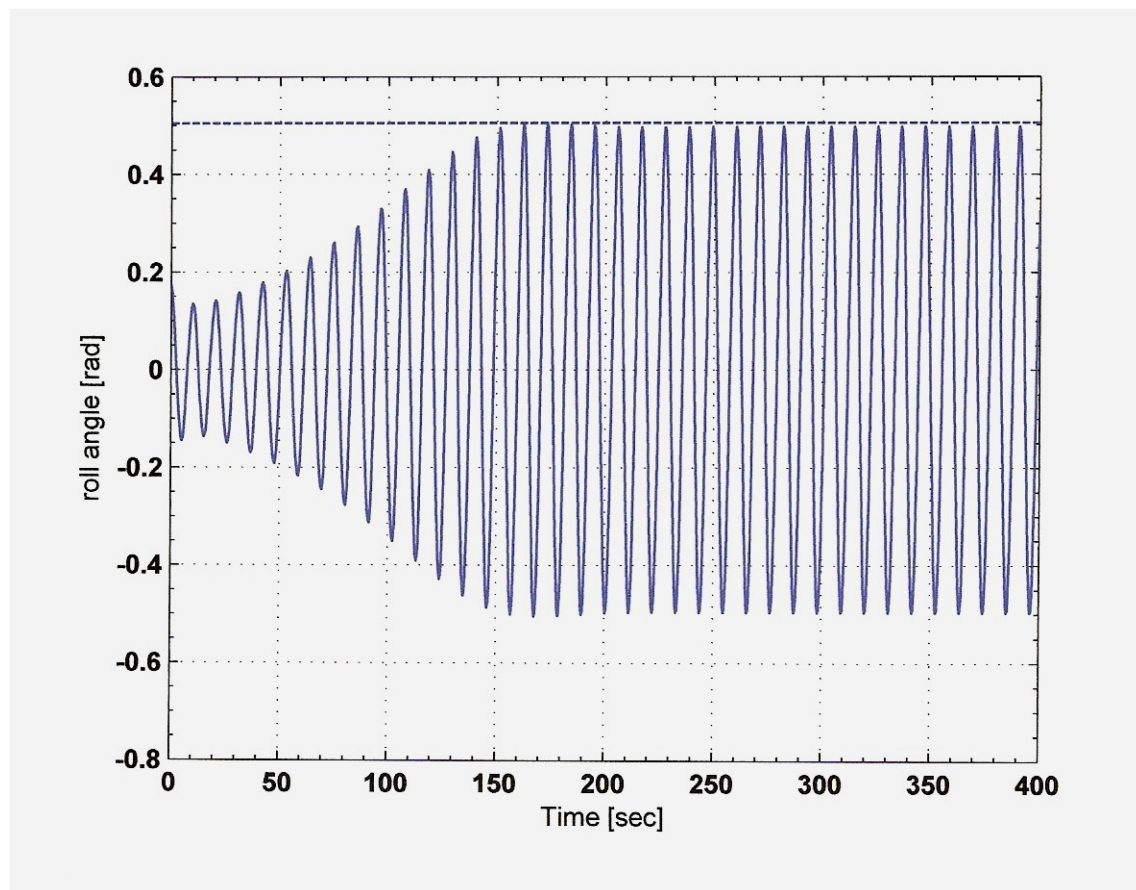


Σχήμα Δ-2: Προσέγγιση της καμπύλης του μέσου μοχλοβραχίονα επαναφοράς με πολυώνυμα 3^{ου} και 5^{ου} βαθμού.

γ. Η εφαρμογή της σχετικής εξίσωσης της βιβλιογραφικής αναφοράς [3] έδωσε σταθερό πλάτος διατοιχισμού $A=0.48$ [rad]= $27,5$ [deg]. Παράλληλα η αριθμητική επίλυση (σε περιβάλλον Matlab με χρήση της κατάλληλης συνάρτησης "ode45") της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τον παραμετρικό συντονισμό και η οποία διαμορφώνεται πλέον ως:

$$\ddot{\varphi} + 2\cdot\zeta\cdot\omega_{\varphi}\cdot\dot{\varphi} + \omega_{\varphi}^2\cdot\varphi\cdot[1+h\cdot\cos(\omega_e\cdot t)] + \omega_{\varphi}^2\cdot c_3\cdot\varphi^3 + \omega_{\varphi}^2\cdot c_5\cdot\varphi^5 = 0$$

με $\zeta=0,074$, $\omega_{\varphi}=0,578$, $h=0,374$, $\omega_e=2\cdot\omega_{\varphi}$, $c_3=-0,657$, $c_5=0,077$, έδωσε $A=0,5$ [rad], λύση που εμφανίζεται στο σχήμα Δ-3. Σημειώνεται ότι η εν λόγω λύση προέκυψε για συγκεκριμένο αρχικό πλάτος διατοιχισμού $\varphi_a=10$ [deg] για το οποίο έχει υπολογισθεί και η αντίστοιχη τιμή του αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης $\zeta=0.074$. Με εφαρμογή της ίδιας διαδικασίας υπολογίσθηκαν και οι τιμές του πίνακα Δ-1, όλες με κοινό αρχικό πλάτος διατοιχισμού $\varphi_a=10$ [deg].



Σχήμα Δ-3: Αριθμητική επίλυση της διαφορικής εξίσωσης του παραμετρικού συντονισμού με προσέγγιση του μοχλοβραχίονα επαναφοράς με πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ II				
ΜΟΡΦΗ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΛΑΤΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ			ΧΡΟΝΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΔΙΑΤΟΙΧΙΣΜΟΥ
	προσέγγιση με πολυώνυμο 3 ^{ου} βαθμού	προσέγγιση με πολυώνυμο 5 ^{ου} βαθμού	αριθμητική επίλυση	
$\lambda=0,8 \cdot L$ & $H=0,05 \cdot \lambda$	0,29 [rad]	0,26 [rad]	0,27 [rad]	≥ 1400 [sec]
$\lambda=0,8 \cdot L$ & $H=0,1 \cdot \lambda$	0,27 [rad]	0,22 [rad]	0,23 [rad]	≥ 1400 [sec]
$\lambda=L$ & $H=0,05 \cdot \lambda$	0,25 [rad]	0,23 [rad]	0,23 [rad]	≥ 4000 [sec]
$\lambda=L$ & $H=0,1 \cdot \lambda$	0,51 [rad]	0,42 [rad]	0,42 [rad]	≥ 220 [sec]
$\lambda=1,4 \cdot L$ & $H=0,1 \cdot \lambda$	0,41 [rad]	0,34 [rad]	0,35 [rad]	≥ 800 [sec]

Πίνακας Δ-1: Υπολογισμός του σταθερού πλάτους παραμετρικού διατοίχισμού στις διάφορες περιπτώσεις εμφάνισης του στη κατάσταση φόρτωσης II του πλοίου.