

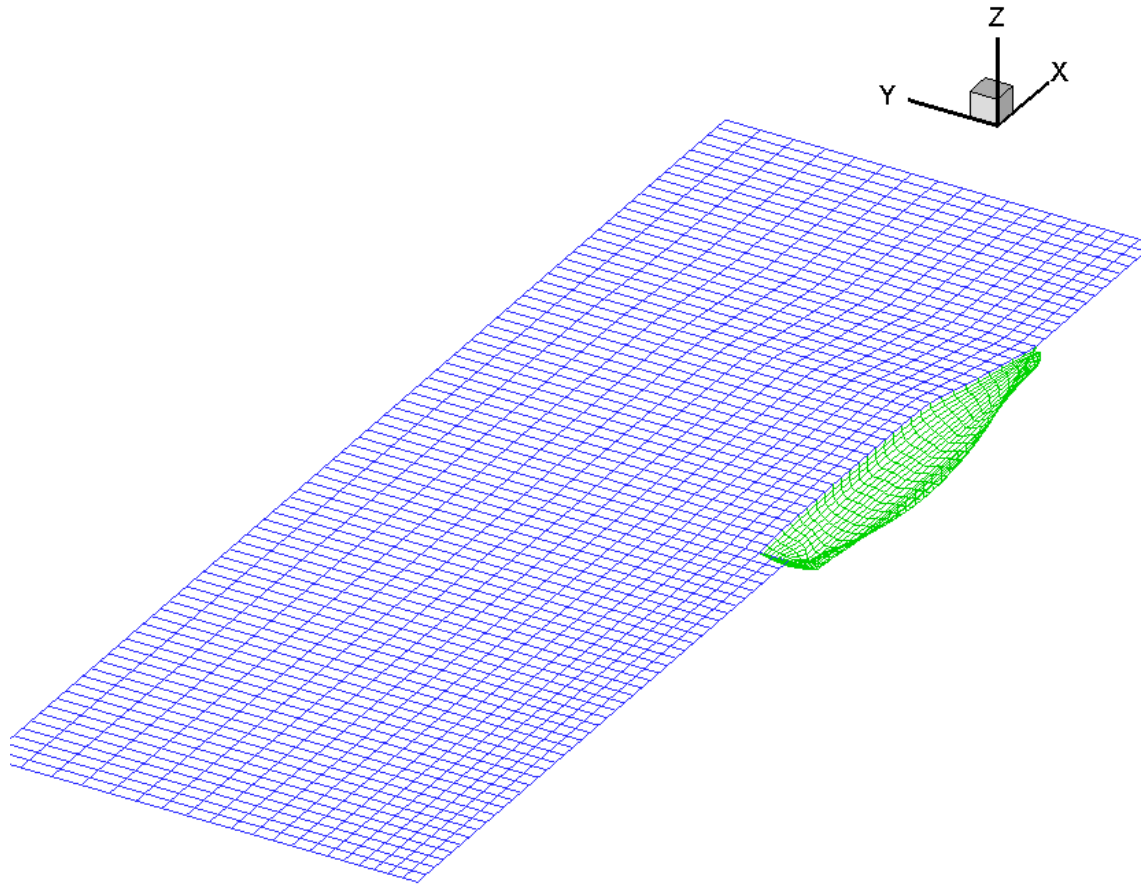
# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ  
ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

*“ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΑΠΟΚΡΙΣΕΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΣΕ  
ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ”*



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Θ. ΠΟΥΛΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΩΣΤΑΣ Ι. ΣΠΥΡΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2008

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |    |
|---|----|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....  | 3  |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ FD-WaveLoad 2006A</b> .....                              | 6  |
| 2.1 Σύντομη περιγραφή του πακέτου λογισμικού FD-WaveLoad 2006A.....                           | 6  |
| 2.2 Το κύριο θεωρητικό υπόβαθρο του WaveLoad.....   | 6  |
| 2.3 Παρουσίαση των κυρίων δυνατοτήτων του FD-WaveLoad 2006A.....                              | 8  |
| 2.4 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε<br>υπό μελέτη πλοίου..... | 10 |
| 2.5 Μοντελοποίηση δυο διαφορετικού τύπου πλοίων με τη βοήθεια του WaveLoad.....               | 12 |
| 2.5.1 Μοντελοποίηση ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων<br>(πλοίο No1).....             | 12 |
| 2.5.2 Μοντελοποίηση ενός επιβατηγού οχηματαγωγού της ελληνικής<br>ακτοπλοΐας (πλοίο No2)..... | 30 |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SWAN2 2002</b> .....                          | 43 |
| 3.1 Η περιγραφή και ο τρόπος λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου SWAN2.....                 | 43 |
| 3.2 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε<br>υπό μελέτη πλοίου..... | 47 |
| 3.3 Εφαρμογή του προγράμματος για το υπό μελέτη πλοίο μεταφοράς<br>εμπορευματοκιβωτίων.....   | 47 |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....  | 58 |
| <b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....  | 60 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....  | 61  |
| Π.1 Το υπολογιστικό μοντέλο του πακέτου λογισμικού WaveLoad.....                                | 61  |
| Π.2 Το υπολογιστικό μοντέλο του πακέτου λογισμικού SWAN2.....                                   | 77  |
| Π.3 Το γραφικό περιβάλλον χρήσης του προγράμματος WaveLoad 2006A.....                           | 82  |
| Π.3.1 Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε<br>υπό μελέτη πλοίου..... | 82  |
| Π.3.2 Διαδικασία ρύθμισης των συνθηκών λειτουργίας του εκάστοτε υπό<br>μελέτη πλοίου.....       | 89  |
| Π.4 Το γραφικό περιβάλλον χρήσης του προγράμματος SWAN2 2002.....                               | 96  |
| Π.4.1 Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε<br>υπό μελέτη πλοίου..... | 96  |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....   | 110 |

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα, αν όχι το πιο σημαντικό, που έχει να αντιμετωπίσει σήμερα ο Ναυπηγός σχεδιαστής ενός σκάφους από λειτουργικής πλευράς, είναι η καλή συμπεριφορά του πλοίου στο περιβάλλον που θα λειτουργεί. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι πάντα ισχυρή η "απαίτηση" από τον χρήστη του σκάφους ώστε αυτό να είναι καλοθάλασσο, αφού κάτι τέτοιο θα καθιστούσε το σκάφος τόσο πιο ανταγωνιστικό όσο και πιο ασφαλές.

Στα νεότερα χρόνια, οι Ναυπηγοί ερευνητές προσπάθησαν να ανακαλύψουν διαδικασίες προκειμένου να μπορούν να αποφανθούν με βεβαιότητα για τη συμπεριφορά του σκάφους πριν αυτό αρχίσει να κατασκευάζεται. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα ήρθε σε πρώτη φάση να δώσει η διαδικασία των πειραμάτων με μοντέλο υπό κλίμακα σε κατάλληλη δεξαμενή όπως του Froude στο Torquay της Αγγλίας και του Denny στο Dumbarton της Σκωτίας που ήταν και οι πρώτες. Αυτή η διαδικασία προβλέψεων απεδείχθη υψηλής αξιοπιστίας και χρησιμοποιείται ευρέως και στις μέρες μας για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς ενός πλοίου. Διαθέτει όμως και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα, όπως ότι είναι χρονοβόρα σαν διαδικασία (αφού απαιτεί την κατασκευή του ισοδύναμου μοντέλου), ότι κοστίζει σχετικά ακριβά, ότι στις πειραματικές δεξαμενές υπάρχουν περιορισμοί όπως ως προς το μέγιστο βάθος, μήκος και πλάτος (που εισάγουν σφάλματα στα αποτελέσματα) καθώς και το γεγονός ότι διαθέτει δύο αξεπέραστα προβλήματα. Αυτά είναι το ότι δεν μπορούμε να έχουμε ακριβή περιγραφή της κυματικής κατάστασης της θάλασσας και το πρόβλημα της κλίμακας. Επιπροσθέτως, είναι δυστυχώς γεγονός ότι, οι δοκιμές στο τεχνητό περιβάλλον του εργαστηρίου πάντα υστερούν ως προς την απουσία της αβέβαιης σκληρής πραγματικότητας του κόσμου που αντιμετωπίζει το πλοίο.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων που εμφανίζουν τα πειράματα με μοντέλο, γίνονται τα τελευταία χρόνια συνεχείς προσπάθειες από την ναυπηγική επιστημονική κοινότητα να αναπτυχθούν νέα εργαλεία τα οποία θα διαθέτει ο μελετητής και τα οποία θα μπορούν πολύ γρήγορα και αξιόπιστα να χρησιμοποιηθούν προκειμένου, να γίνουν προβλέψεις των κινήσεων του πλοίου. Τέτοια εργαλεία είναι εξειδικευμένα υπολογιστικά πακέτα που αναλαμβάνουν να κάνουν προβλέψεις της συμπεριφοράς του σκάφους με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Είναι

δυστυχώς πραγματικότητα πως υπάρχουν περιορισμοί αξιοπιστίας και σε αυτή την διαδικασία από πλευράς ακρίβειας αριθμητικών υπολογισμών και κατά κύριο λόγο, από πλευράς εφαρμογής της χρησιμοποιούμενης θεωρίας που ενσωματώνεται από το εκάστοτε υπολογιστικό πακέτο.

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι να κάνει αξιολογήσει δύο τέτοιων υπολογιστικών πακέτων. Πιο συγκεκριμένα στη πρώτη ενότητα της παρούσας εργασίας θα γίνει μια πρώτη αξιολόγηση του νεοαποκτηθέντος από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, πακέτου λογισμικού FD-WaveLoad 2006A [1] της εταιρείας MARTEC. Η αξιολόγηση αυτού του κώδικα θα γίνει για δύο διαφορετικά πλοία με κριτήριο τα αποτελέσματα τα οποία παράγει. Κρίσιμη παράμετρο αξιολόγησης αποτελεί η απόσβεση σε διατοιχισμό που το πρόγραμμα υπολογίζει, συναρτήσει του μεγέθους της διακριτοποίησης της γάστρας του πλοίου. Στην δεύτερη ενότητα της εργασίας θα μελετήσουμε για ένα δεύτερο υπολογιστικό πακέτο το SWAN2 2002 [2] της εταιρείας BMC, την επίδραση του μεγέθους της διακριτοποίησης της γάστρας του πλοίου στην ικανότητα πρόβλεψης του φαινομένου της παραμετρικής αστάθειας σε διατοιχισμό. Η βαρύτητα αυτού του εγχειρήματος έγκειται στο ότι μέχρι σήμερα η πλειοψηφία των αντίστοιχων υπολογιστικών πακέτων έχει επικεντρωθεί στην βελτιστοποίηση του υπολογισμού-πρόβλεψης των έξι βασικών κινήσεων των πλοίων. Ταυτόχρονα, αδιαφορεί για την ανίχνευση σημαντικών παραμετρικών ασταθειών, οι οποίες οδηγούν στην ανάπτυξη κινήσεων με μεγάλα πλάτη οι οποίες μπορούν τελικά να αποδειχθούν πιο σημαντικές για την απροβλημάτιστη λειτουργία ενός πλοίου και εξακολουθούν να αποτελούν μέχρι σήμερα αντικείμενο θεωρητικής διερεύνησης.

Συγκεντρωτικά, η παρούσα διπλωματική εργασία έχει τους παρακάτω στόχους.

Στην 1<sup>η</sup> Ενότητα:

- Να μελετήσει την συμπεριφορά 2 πλοίων με το πακέτο λογισμικού WaveLoad,
- Να αναλύσει την ευαισθησία των αποτελεσμάτων με τη χρήση απόσβεσης στους υπολογισμούς,

- Να αναλύσει την συμπεριφορά του πακέτου συναρτήσει του μεγέθους των πλαισίων μοντελοποίησης,
- Να κάνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα.

Στην 2<sup>η</sup> Ενότητα:

- Να επιβεβαιώσει την ικανότητα πρόβλεψης του φαινομένου της παραμετρικής αστάθειας σε διατοιχισμό, από το πακέτο λογισμικού SWAN2,
- Να παρουσιάσει την επίδραση του μεγέθους και του αριθμού των “panels” που περιγράφουν την γάστρα του πλοίου, στην ικανότητα πρόβλεψης του παραμετρικού διατοιχισμού.

## 2. ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΚΕΤΟ FD-WaveLoad 2006A

### **2.1 Σύντομη περιγραφή του πακέτου λογισμικού FD-Waveload 2006A.**

Το πακέτο λογισμικού FD-WaveLoad 2006A είναι μέρος του όλου πακέτου λογισμικού TRIDENT, της σουίτας λογισμικού για τρισδιάστατη μοντελοποίηση της εταιρείας MARTEC, και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση υπολογισμών υδροδυναμικής ανάλυσης στο πεδίο των συχνοτήτων προκειμένου κατά κύριο λόγο να γίνει ακριβής προσδιορισμός της κίνησης ενός πλοίου και επιπλέον της κατανομής πιέσεων τόσο πάνω στην γάστρα ενός πλοίου, των φορτίσεων λόγω του θαλασσίου περιβάλλοντος, όσο και σε παραθαλάσσιες κατασκευές. Είναι ένας δυναμικής ροής τρισδιάστατος «πάνελ» κώδικας βασισμένος σε συναρτήσεις Green με διορθώσεις για την πρόσω ταχύτητα του σκάφους στο πεδίο των συχνοτήτων.

### **2.2 Το κύριο θεωρητικό υπόβαθρο του WaveLoad**

Ας θεωρήσουμε ένα πλοίο, το οποίο ταξιδεύει με σταθερή πρόσω ταχύτητα  $U$  κατά τη διεύθυνση του  $ox$ -άξονα και κάνει ταλαντωτικές κινήσεις στη συχνότητα συνάντησης  $\omega_e$  με πλάτη  $x_k$ , όπου  $k = 1, 2, \dots, 6$  και αναφέρονται στις κινήσεις surge, sway, heave, roll, pitch και yaw αντίστοιχα (για αναλυτική περιγραφή, βλέπε Παράρτημα Π.1).

Θεωρώντας ασυμπίεστο, μη συνεκτικό ρευστό και αστρόβιλη ροή, το συνολικό δυναμικό της ταχύτητας της ροής περιγράφεται από τη σχέση

$$\Phi_T(x, y, z; t) = -Ux + \varphi_s(x, y, z) + \Phi(x, y, z; t) \quad (1)$$

όπου μπορούμε να κάνουμε την περαιτέρω ανάλυση για το δυναμικό της μεταβλητής ταχύτητας  $\Phi(x, y, z; t) = \Phi_1 + \Phi_D + \Phi_R = (\varphi_1(x, y, z) + \varphi_D(x, y, z) + \varphi_R(x, y, z))e^{-i\omega_e t}$  (2)

Η συνολική δύναμη που ασκείται πάνω στο πλοίο αποτελείται από τις επιμέρους συνιστώσες της υδροδυναμικής δύναμης  $F_j = \iint_S pn_j ds$  (3)

$$\text{και της υδροστατικής δύναμης } F_j^S = -C_{jk} x_k \quad (4)$$

όπου  $p$  η υδροδυναμική πίεση που ασκείται στο σκάφος και  $C_{jk}$  είναι το μητρώο των δυνάμεων επαναφοράς.

Δεδομένου ότι το πλοίο θεωρείται ως άκαμπτο σώμα οι κινήσεις του μπορούν να περιγραφούν σύμφωνα με το νόμο του Newton από τη σχέση

$$m_{jk} \ddot{x}_k = F_j + F_j^S \quad (5)$$

όπου  $m_{jk}$  είναι το γενικευμένο μητρώο μαζών.

Καθώς το πλοίο κινείται στο νερό με σταθερή ταχύτητα  $U$ , δημιουργεί κυματισμούς και υπόκειται σε αντίσταση λόγω κυματισμών. Η σταθερή πρόσω ταχύτητα επηρεάζει τα ακτινοβολούμενα κύματα και τις ακτινοβολούμενες δυνάμεις λόγω αυτών των κυματισμών. Για να προσεγγιστεί η επίδραση της σταθερής ροής στην ανάλυση των κινήσεων του πλοίου, χρησιμοποιείται η τεχνική γνωστή ως "double-body flow" και το double-body δυναμικό της στρωτής ροής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Phi_s(x, y, z) = -U_x + \varphi_s(x, y, z) \quad (6)$$

Το παραπάνω δυναμικό πρέπει να ικανοποιεί το ακόλουθο οριακό πρόβλημα:

1. Την εξίσωση Laplace σε όλη την έκταση του πεδίου ροής
2. Την οριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας
3. Την οριακή συνθήκη στερεού συνόρου (στη γάστρα του πλοίου, τον πυθμένα και τυχόν άλλα στερεά σύνορα, π.χ. άλλα πλοία)
4. Τη συνθήκη ακτινοβολίας που καθορίζει την επ' άπειρον συμπεριφορά της λύσης μας, ώστε να εξασφαλίζεται μοναδικότητα.

Εφαρμόζοντας την συνάρτηση του Green και επιλύοντας τις εξισώσεις των δυναμικών σύμφωνα με το Theory manual του WaveLoad [3] παίρνουμε:

$$f_j^R = -\ddot{x}_k \rho \left\{ \iint_S \operatorname{Re}[\varphi_k] n_j dS + \frac{U}{\omega_e} \iint_S \operatorname{Im}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS - \frac{1}{\omega_e} \iint_S \operatorname{Im}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_s] n_j dS \right\} - \quad (7)$$

$$\dot{x}_k \rho \left\{ \omega_e \iint_S \operatorname{Im}[\varphi_k] n_j dS - U \iint_S \operatorname{Re}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS + \iint_S \operatorname{Re}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_s] n_j dS \right\}$$

$$f_j^I = -\rho \omega_e \iint_S \operatorname{Im}[\varphi_I] n_j dS + \rho U \iint_S \operatorname{Re}\left[\frac{\partial \varphi_I}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \operatorname{Re}[\nabla \varphi_I \cdot \nabla \varphi_s] n_j dS + \quad (8)$$

$$i \left\{ \rho \omega_e \iint_S \operatorname{Re}[\varphi_I] n_j dS + \rho U \iint_S \operatorname{Im}\left[\frac{\partial \varphi_I}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \operatorname{Im}[\nabla \varphi_I \cdot \nabla \varphi_s] n_j dS \right\}$$

$$f_j^D = -\rho \omega_e \iint_S \operatorname{Im}[\varphi_D] n_j dS + \rho U \iint_S \operatorname{Re}\left[\frac{\partial \varphi_D}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \operatorname{Re}[\nabla \varphi_D \cdot \nabla \varphi_s] n_j dS + \quad (9)$$

$$i \left\{ \rho \omega_e \iint_S \operatorname{Re}[\varphi_D] n_j dS + \rho U \iint_S \operatorname{Im}\left[\frac{\partial \varphi_D}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \operatorname{Im}[\nabla \varphi_D \cdot \nabla \varphi_s] n_j dS \right\}$$



Έχοντας υπολογίσει τις δυνάμεις από τις σχέσεις (8) και (9) μπορούν να υπολογιστούν οι εξισώσεις κίνησης του πλοίου από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega_e^2 (m_{jk} + \mu_{jk}) + (-i\omega_e \lambda_{jk}) + C_{jk}] \bar{x}_k = f_j \quad (10)$$

Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι η ιξώδης απόσβεση σε διατοιχισμό  $\lambda_{44}^v$  θα πρέπει να περιέχεται στη  $\lambda_{44}$ . Δυστυχώς οι προβλέψεις από τη θεωρία δυναμικής ροής δεν κάνουν ικανοποιητικό υπολογισμό του συντελεστή απόσβεσης σε διατοιχισμό. Για το σκοπό αυτό υιοθετείται η εργασία του Schmitke [4]. Ο Schmitke για τον υπολογισμό της ιξώδους απόσβεσης σε διατοιχισμό χρησιμοποιεί την σχέση

$$\lambda_{44}^v = \lambda_{BK} + \lambda_E + \lambda_H + \lambda_F \quad (11)$$

όπου τα  $\lambda_{BK}, \lambda_E, \lambda_H, \lambda_F$  δηλώνουν την συνεισφορά σε αυτό τον συντελεστή από παρατροπία, από τη δημιουργία αντίστασης λόγω δημιουργίας δινών από τη γάστρα του πλοίου, από την αντίσταση τριβής γάστρας και από άλλα στοιχεία όπως το πηδάλιο και το skeg.

### **2.3 Παρουσίαση των κυρίων δυνατοτήτων του *FD-Waveload 2006A***

Σε αυτή την παράγραφο κάνουμε μια περιγραφή των δυνατοτήτων του πακέτου λογισμικού μιας και το συγκεκριμένο πακέτο αποκτήθηκε πρόσφατα από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και ο συγγραφέας της παρούσης διπλωματικής είναι ο πρώτος φοιτητής του Διατμηματικού μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών που ασχολείται με την διαδικασία εφαρμογής μιας μοντελοποίησης και την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου υπολογιστικού εργαλείου στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας. Το WaveLoad παρέχει στο χρήστη πληθώρα δυνατοτήτων τις οποίες αναφέρουμε στη συνέχεια.

Με τη χρήση του κώδικα μπορεί να γίνει μελέτη σε διάφορες κατηγορίες μοντέλων. Αυτά είναι:

- Μοντέλα μονόγαστρων ή πολύγαστρων πλοίων ανεξαρτήτως μεγέθους
- Μοντέλα σταθερών ή επιπλέοντων πλατφορμών
- Μοντέλα υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης.

Μπορεί να κάνει αναλυτική πρόβλεψη κινήσεων:

- Στους έξι βαθμούς ελευθερίας (οριζόντια ταλάντωση, sway, κατακόρυφη ταλάντωση, διατοιχισμό, προνευτασμό, περιστροφική περί κατακόρυφο άξονα),
- Χωρίς περιορισμούς για την κατεύθυνση του πλοίου,
- Για κανονικούς ή τυχαίους κυματισμούς και οποιαδήποτε κατάσταση θάλασσας,
- Χωρίς περιορισμούς όσον αφορά το βάθος του νερού (ρηχό και βαθύ νερό),
- Με δυνατότητα να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις από τις γραμμές αγκύρωσης (εφόσον γίνεται μελέτη κινήσεων πλατφόρμας).

Μπορεί να κάνει υπολογισμό των αναπτυσσόμενων φορτίσεων λόγω συνθηκών λειτουργίας:

- Υπολογισμό φορτίων όπως διατμητικών δυνάμεων, καμπτικών και στρεπτικών ροπών,
- Υπολογισμό κινήσεων και φορτίων υπό την επίδραση διαφορετικών καταστάσεων θάλασσας με την χρήση φασμάτων κυματισμών όπως Pierson-Moskowitz, ISSC, ITTC, JONSWAP, Bretschneider και Ochi-Hubble,
- Υπολογισμό πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς,
- Υπολογισμό συντελεστών ιξώδους απόσβεσης σε διατοιχισμό συμπεριλαμβανομένων παρατροπιδίων, στροβιλισμών, δυναμικής άωσης και συντελεστών ιξώδους απόσβεσης διαφόρων προσαρτημάτων,
- Επιλογή από επαναληπτική, διάσπαση σε άνω και κάτω τριγωνικό πίνακα ή με αλγόριθμο του Gauss διαδικασία επίλυσης,
- Επιλογές παρέχονται για τον υπολογισμό των m-όρων.

Κάνει μοντελοποίηση με πλαίσια:

- Συμπεριλαμβάνει αυτόματη δημιουργία πλαισίων για απλοποιημένη εισαγωγή γεωμετρίας γάστρας,

- Διαφόρων τύπων βολβοειδών σχημάτων συμπεριλαμβανομένων βολβοειδών πρωρών και πρωρών τύπου μάρτζας,
- Δυνατότητα εισαγωγής από το χρήστη έτοιμης γεωμετρίας πλαισίων από άλλο σχεδιαστικό πακέτο όπως για παράδειγμα το Rhinoceros.

Παρέχει δυνατότητες για μετέπειτα επεξεργασία:

- Δυνατότητα ανασκόπησης των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένων αδιάστατων συντελεστών απόκρισης (RAO), πρόσθετης μάζας, συντελεστών απόσβεσης και δυνάμεων δημιουργίας κυματισμών,
- Απεικόνιση της γεωμετρίας του σκάφους και των αποτελεσμάτων σε δυσδιάστατα ή τρισδιάστατα σχήματα,
- Απεικόνιση καμπύλων των αποτελεσμάτων για τις κινήσεις και φορτίων περιβάλλοντος,
- Απεικόνιση με κινούμενη εικόνα της κατανομής της πίεσης και των κινήσεων του πλοίου.

#### ***2.4 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε υπό μελέτη πλοίου.***

Έχοντας κάνει μια γενική περιγραφή των δυνατοτήτων του πακέτου λογισμικού στην συνέχεια παραθέτουμε μια συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας χρήσης του προγράμματος το οποίο στην αρχή φαίνεται σχετικά δύσχρηστο αλλά η εξοικείωση επί του οποίου είναι θέμα προσωπικής ενασχόλησης λίγων ωρών του εκάστοτε χρήστη. Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μαζί με το αντίστοιχο οπτικό υλικό μπορεί να βρει ο αναγνώστης στο παράρτημα της εργασίας (ενότητα Π.3).

Η διαδικασία μοντελοποίησης, απαιτεί αρχικά από τον χρήστη να επιλέξει τον τύπο του πλοίου τον οποίο θέλει να μοντελοποιήσει και μπορεί να επιλέξει ανάμεσα σε μονόγαστρο ή δίγαστρο πλοίο. Εν συνεχεία, απαιτείται η εισαγωγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του πλοίου όπως μήκος, πλάτος και κοίλο και η εισαγωγή συγκεκριμένων αδρανειακών χαρακτηριστικών του πλοίου. Μετέπειτα γίνεται η εισαγωγή των γραμμών της γάστρας του πλοίου, από κατάλληλο για το σκοπό αυτό

αρχείο, υπό τη μορφή σημείων νομέων. Πλέον ο χρήστης είναι σε θέση να προχωρήσει στην παραγωγή του απαραίτητου πλέγματος πλαισίων γάστρας με τη βοήθεια της κατάλληλης για το σκοπό αυτό ενσωματωμένης στο κώδικα ρουτίνας παράγωγής πλαισίων, αφού προηγουμένως έχει δηλώσει το επιθυμητό μέγεθος πλαισίου (“panel size”). Στο σημείο αυτό πρέπει να τονίσουμε πως υπάρχει η δυνατότητα, αντί ο χρήστης να κάνει χρήση της ενσωματωμένης ρουτίνας παραγωγής πλαισίων, να εισάγει στο κώδικα κάποιο έτοιμο πλέγμα πλαισίων, το οποίο προηγουμένως έχει σχεδιάσει με τη βοήθεια άλλου σχεδιαστικού πακέτου όπως για παράδειγμα το Rhinoceros. Προαιρετικά ο χρήστης μπορεί να κάνει εισαγωγή της αναλυτικής κατανομής μαζών του σκάφους οπότε ουσιαστικά έχει ολοκληρώσει τη διαδικασία εισαγωγής του μοντέλου. Στο επόμενο βήμα πρέπει να οριστούν οι συνθήκες της προσομοίωσης. Μπορεί στη συνέχεια να γίνει το απαιτούμενο τρέξιμο του κώδικα επιλέγοντας είτε να ληφθεί υπόψη η ιξώδης απόσβεση σε διατοιχισμό είτε όχι. Προκειμένου η απόσβεση να ληφθεί υπόψη, απαιτείται η δημιουργία του κατάλληλου από το χρήστη αρχείου με κατάληξη “.dmp” το οποίο βασίζεται στην δουλειά που έχει γίνει πάνω στο τομέα της ιξώδους απόσβεσης από τον Schmitke όπως αναφέραμε και παραπάνω. Ιδιαίτερα όσον αφορά αυτό καθεαυτό το αρχείο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ιξώδους απόσβεσης (\*.dmp), από το αντίστοιχο σχήμα του παραρτήματος, είναι προφανές πως για τον υπολογισμό της απόσβεσης παρέχονται άφθονες πληροφορίες γεγονός που προδιαθέτει για ακριβείς υπολογισμούς. Δυστυχώς όμως έτσι απαιτείται από το χρήστη πολύ προεργασία με την χρήση κάποιου σχεδιαστικού προγράμματος με υπολογιστή προκειμένου να συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Προς απόδειξη αυτού του ισχυρισμού, στο ηλεκτρονικό υλικό που συνοδεύει την παρούσα εργασία περιλαμβάνονται και τα βοηθητικά αρχεία που αναπτύχθηκαν με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος AutoCAD.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονίσουμε πως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν για τα υπό-μενού “*M-Term Effect on Potential*”, “*M-Term Effect on Pressure and Force*”, “*Motion Coupling Options*” και “*Solver Type*” και αφορούν τον τρόπο επίλυσης της μοντελοποίησης (βλ. Παράρτημα Π.3).

## ***2.5 Μοντελοποίηση δύο διαφορετικού τύπου πλοίων με την βοήθεια του προγράμματος WaveLoad.***

Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας θα μοντελοποιήσουμε δύο πλοία τα οποία διαφοροποιούνται μεταξύ τους σε πολλά σημεία, έτσι ώστε να έχουμε μια πιο αντικειμενική εικόνα για την συμπεριφορά του προγράμματος. Το πρώτο από αυτά είναι ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων το οποίο όμως διαθέτει απλή μορφή γάστρας με μοναδική σχεδιαστική ιδιαιτερότητα την ύπαρξη βολβοειδούς πλώρας. Το δεύτερο είναι ένα σύγχρονο επιβατηγό-οχηματαγωγό πλοίο που επιχειρεί στην ελληνική ακτοπλοΐα το οποίο διαθέτει αρκετές ιδιομορφίες στη γάστρα του, όπως είναι το skeg, η βολβοειδούς μορφής πλώρη του πλοίου και η ύπαρξη πρύμνης καθρέφτη. Σημαντικό επιπλέον κριτήριο για την επιλογή αυτών των πλοίων, αποτελεί και το γεγονός ότι και τα δύο σκάφη κινούνται σε σχετικά υψηλές ταχύτητες και πιο συγκεκριμένα το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων σε  $F_n=0.275$  και το Ε/Γ-Ο/Γ σε  $F_n=0.28$  οπότε και τα αποτελέσματα σε διατοιχισμό θα εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον κυρίως λόγω της σημαντικής παραμέτρου της απόσβεσης σε διατοιχισμό η οποία επηρεάζεται από την ταχύτητα. Τέλος είναι σημαντικό, να σημειώσουμε πως η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα γίνει για το πρώτο πλοίο με βάση τα αντίστοιχα αποτελέσματα από πειράματα με μοντέλο σε δεξαμενή και για το δεύτερο πλοίο με βάση τα αντίστοιχα στοιχεία από την κατασκευάστρια εταιρεία.

### ***2.5.1 Μοντελοποίηση ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (πλοίο Νο1)***

Θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά ένα πλοίο μεταφοράς containers, τα στοιχεία του οποίου παραθέτουμε στον παρακάτω πίνακα.

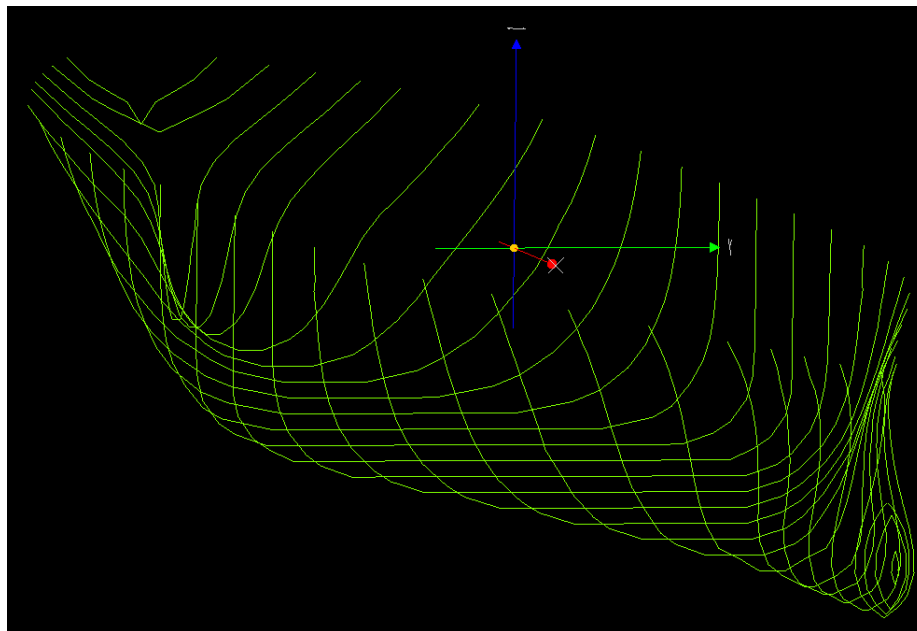
Ιδιαίτερη βαρύτητα στην μελέτη που ακολουθεί αποδίδει το γεγονός ότι για το σκάφος αυτό, θα μπορέσουμε να κάνουμε σύγκριση πλέον σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από πειράματα με μοντέλο σε δεξαμενή, όπως αυτά παρουσιάζονται στην International Towing Tank Committee 1978 [5] και 1981 [6].

Τα χαρακτηριστικά για το εν λόγω πλοίο παραθέτουμε στη συνέχεια.

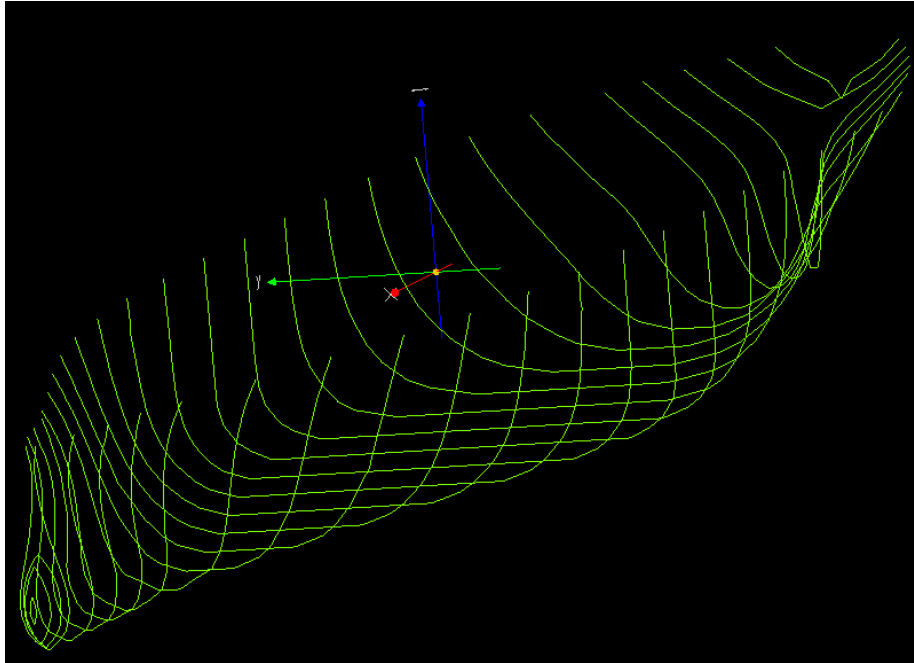
| <b>Στοιχεία πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων</b> |          |           |
|--|----------|-----------|
| Length between perpendiculars                        | $L_{BP}$ | 175 m     |
| Breadth  | $B$      | 25.4 m    |
| Draught  | $T$      | 9.5 m     |
| Depth  | $D$      | 15.40 m   |
| Froude Number  | $Fn$     | 0.275     |
| Displacement   | $\Delta$ | 24742 ton |

**Πίνακας 2.1** : Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του 1<sup>ου</sup> πλοίου που θα μοντελοποιήσουμε.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρήσης του πακέτου λογισμικού με βάση τα βήματα που περιγράφονται από το σχήμα Π.3.1.1 μέχρι και το σχήμα Π.3.1.4 έχουμε εισαγάγει στον κώδικα αρχικά τις γραμμές του πλοίου. Αυτές φαίνονται ξεκάθαρα στο επόμενο σχήμα.

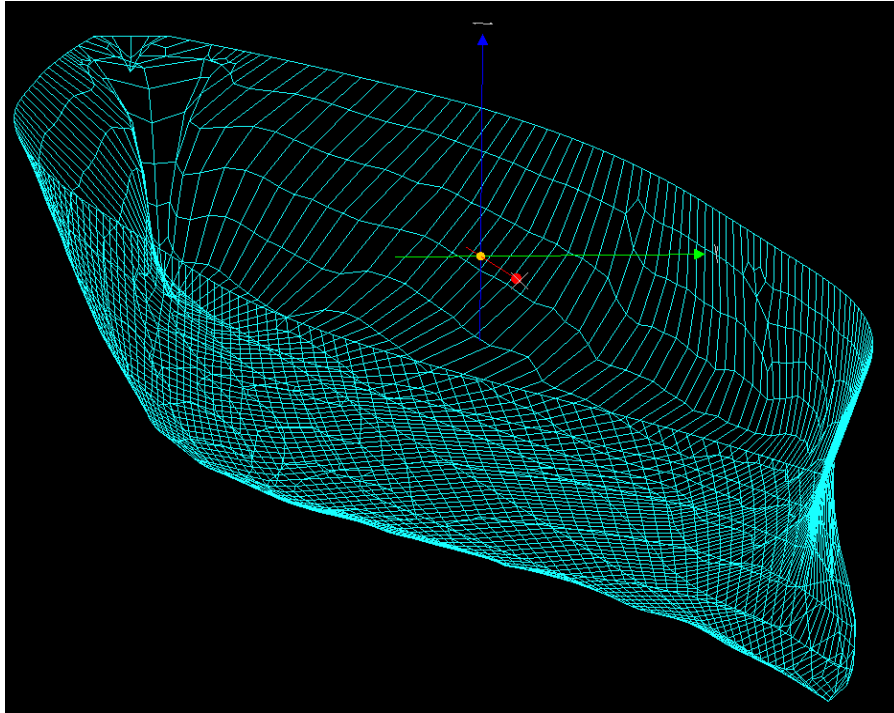


**Σχήμα 2.1** : Γραμμές γάστρας πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μέχρι το κοίλο όπως απεικονίζονται μέσα από το πρόγραμμα (στο αριστερό πάνω άκρο της εικόνας εμφανίζεται ο τελευταίος πρυμναίος νομέας).

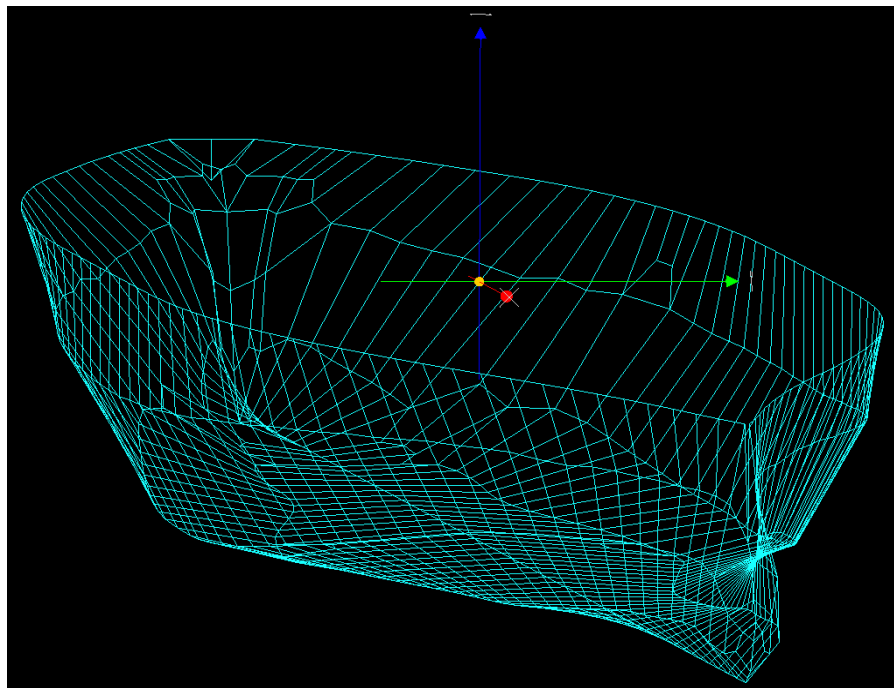


*Σχήμα 2.2 : Γραμμές γάστρας πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μέχρι το κοίλο όπως απεικονίζονται μέσα από το πρόγραμμα (στο δεξί πάνω άκρο της εικόνας εμφανίζεται ο τελευταίος πρυμναίος νομέας).*

Στη συνέχεια κατανέμουμε τα πλαίσια επί της γάστρας του πλοίου οπότε και καθίσταται πιο εμφανής η γεωμετρία της γάστρας του πλοίου, όπως φαίνεται και από τα σχήματα στις επόμενες σελίδες.

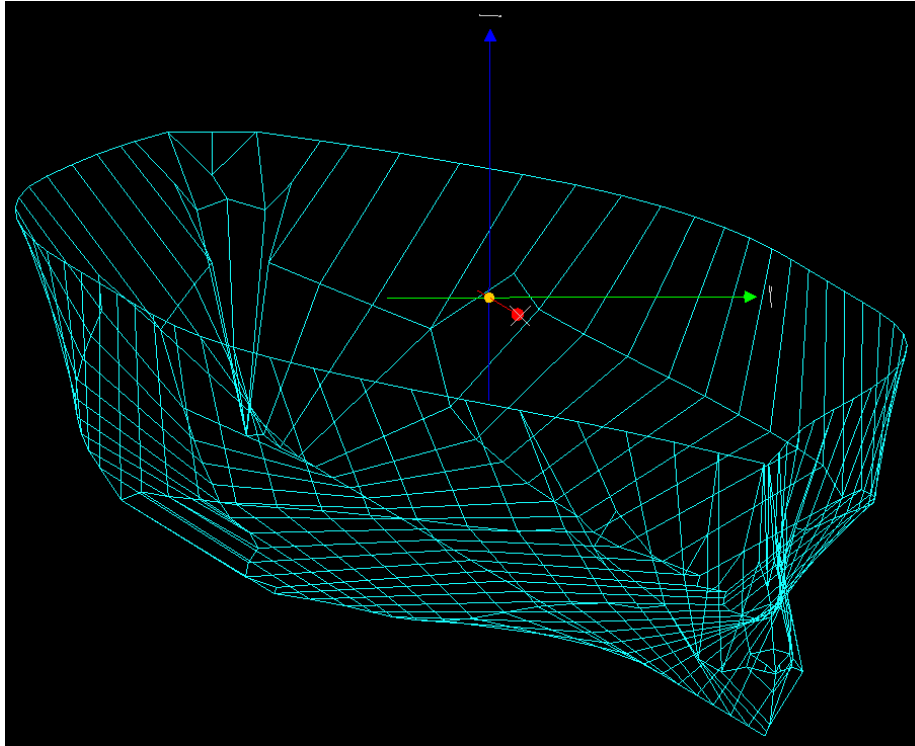


*Σχήμα 2.3 : Η γάστρα του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με καταναμημένα πέρα πολλά πλαίσια πάνω σε αυτή και μέχρι το βύθισμα σχεδίασης.*



*Σχήμα 2.4 : Η γάστρα του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με καταναμημένα αρκετά πλαίσια πάνω σε αυτή και μέχρι το βύθισμα σχεδίασης.*





**Σχήμα 2.5 :** Η γάστρα του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με καταναμημένα λίγα πλαίσια πάνω σε αυτή και μέχρι το βύθισμα σχεδίασης.

Από τα παραπάνω σχήματα είναι άμεσα ορατός ο εκφυλισμός της γεωμετρίας της γάστρας του πλοίου καθώς ο συνολικός αριθμός των πλαισίων μειώνεται.

Είναι απαραίτητο, σε αυτό το σημείο να ορίσουμε τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου, για τις οποίες θέλουμε να κάνουμε τις προβλέψεις μας, όπως αυτό έχει περιγραφεί στα σχήματα Π.3.1.7 έως Π.3.1.10. Αυτές είναι :

| <b>Επιχειρησιακές Συνθήκες πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων</b> |          |         |                   |
|---|----------|---------|-------------------|
|   | Ελάχιστη | Μέγιστη | Αρ. Υποδιαίρέσεων |
| Συχνότητα κυματισμών (rad/sec)                                      | 0.237    | 0.947   | 80                |
| Διεύθυνση πλοίου (deg)  | 0        | 180     | 7                 |
| Ταχύτητα πλοίου (kn)  | 21       | 21      | 1                 |

**Πίνακας 2.2 :** Συνθήκες προσομοίωσης 1<sup>ov</sup> πλοίου μοντέλου.

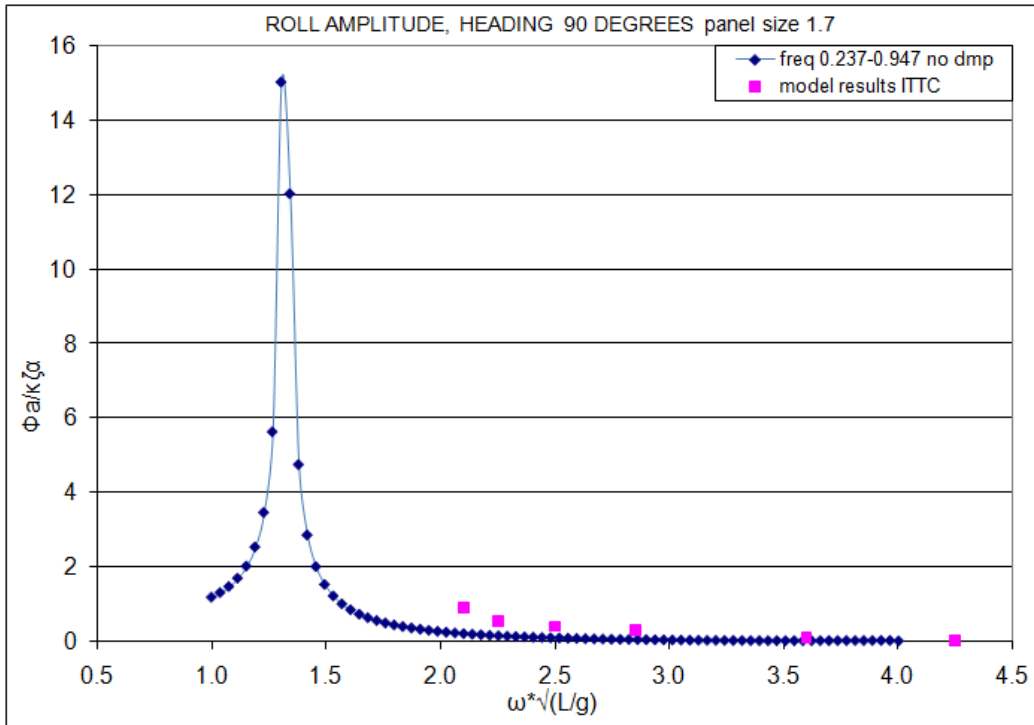
Έχουμε επιλέξει να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του πλοίου για την περιοχή με συχνότητες αρμονικών κυματισμών από 0.237 (rad/sec) έως 0.947 (rad/sec) προκειμένου να συμβαδίσουμε με τα πρότυπα της I.T.T.C. και για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα τα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον εξετάζουμε αυτή για

ένα εύρος γωνιών από  $0^0$  έως  $180^0$  με βήμα ανά  $30^0$ . Όλα τα προηγούμενα υποτίθενται για ταχύτητα πλοίου που αντιστοιχεί σε αριθμό Froude ίσο με 0.275. Όλες οι προσομοιώσεις γίνονται για τις δύο περιπτώσεις όπου η ιξώδης απόσβεση στη μία περίπτωση δεν συμμετέχει στους υπολογισμούς, ενώ στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη.

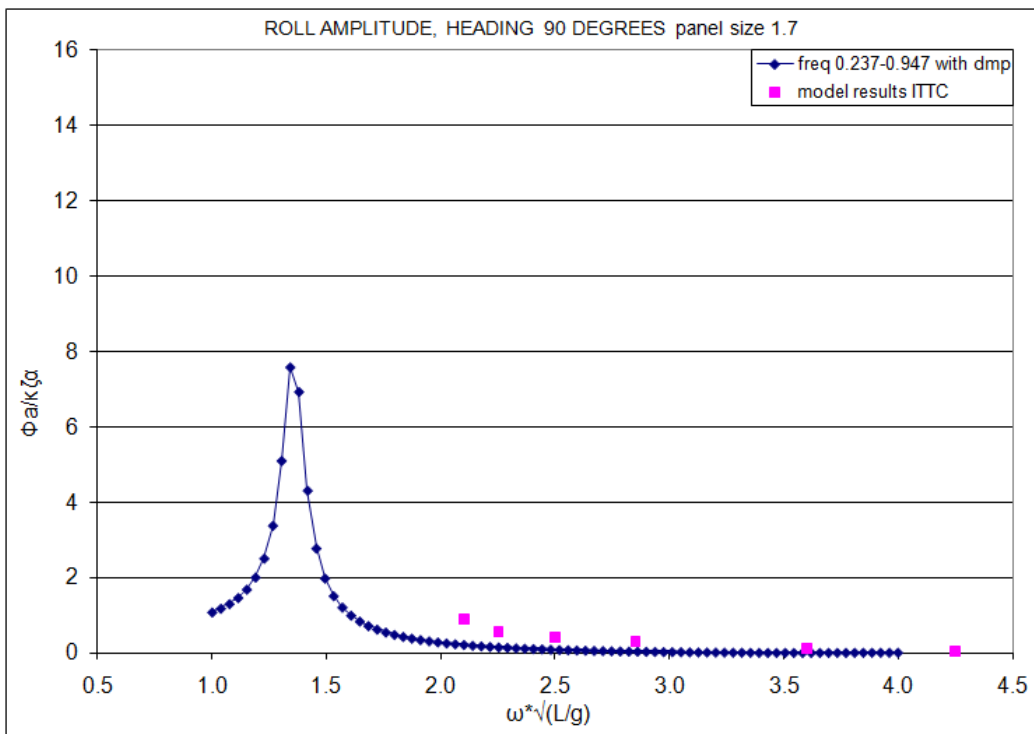
Τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης (για κάθε διαφορετικό "panel size") τα χρησιμοποιήσαμε για να παράγουμε τα αποτελέσματα των επόμενων σχημάτων τα οποία αποτελούν μικρό μέρος του συνόλου των προσομοιώσεων, παρέχονται όμως σαν πλήρες σετ γραφημάτων στο ηλεκτρονικό υλικό που συνοδεύει την παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τον κώδικα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο με την κατάληξη .RAO . Σε αυτό το αρχείο υπάρχουν οι πληροφορίες για την ταχύτητα του σκάφους (knots), την κατεύθυνση των κυμάτων (deg), η συχνότητα του κύματος (rad/sec), η περίοδος του κύματος (sec) και οι συντελεστές απόκρισης (m/m, deg/m).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην I.T.T.C. έχουν αδιαστατοποιηθεί για τον κατακόρυφο άξονα των αποκρίσεων ως προς την κλίση του κύματος ( $\kappa_{za}$ ) για τις στροφικές κινήσεις (προνευτασμό, διατοιχισμό και περιστροφή περί τον κατακόρυφο άξονα), ως προς το πλάτος του κύματος (m/m) για τις μεταφορικές κινήσεις (οριζόντια, κατακόρυφη και εγκάρσια ταλάντωση) και στον οριζόντιο άξονα υπάρχει η αδιαστατοποιημένη με την ποσότητα  $\sqrt{L/g}$ , συχνότητα των κυματισμών.

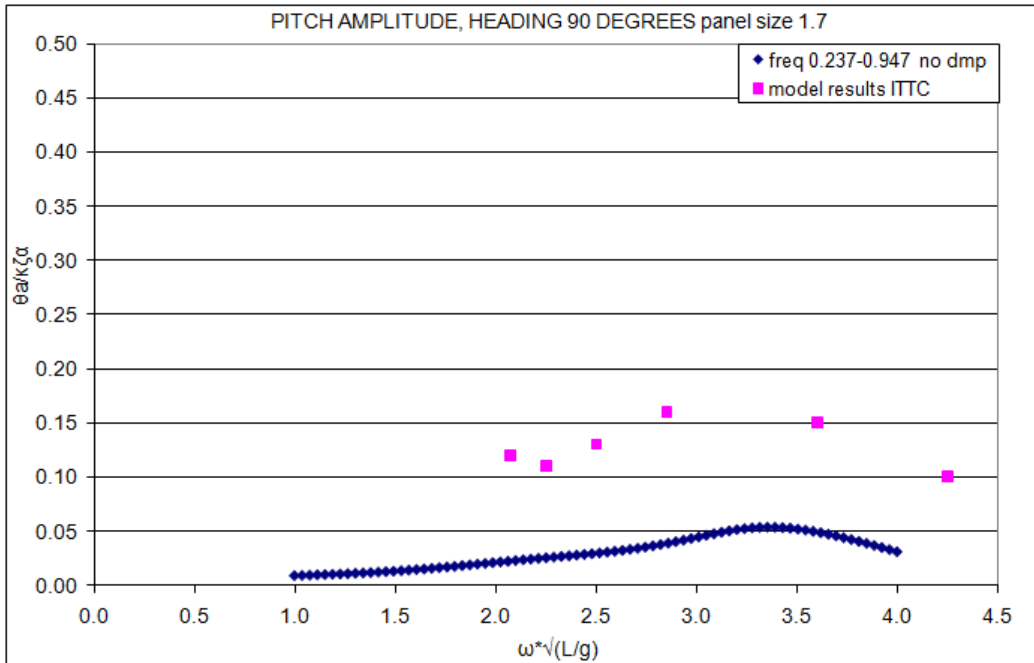
Παρουσιάζουμε λοιπόν παρακάτω τα γραφήματα με τα αποτελέσματα για τις προσομοιώσεις με "panel size" 1.7. Για αυτό το μέγεθος των πλαισίων έχουμε το κατά το δυνατόν περισσότερα στον αριθμό πλαίσια τα οποία είναι 1554 με όριο του προγράμματος τα 1600 οπότε λογικά θα πρέπει να έχουμε τους περισσότερους και πιο αξιόπιστους υπολογισμούς. Στα γραφήματα αυτά φαίνονται όπου υπάρχουν διαθέσιμα και τα πειραματικά αποτελέσματα για το πλοίο όπως αυτά τα πήραμε αυτούσια από την I.T.T.C. '78 :



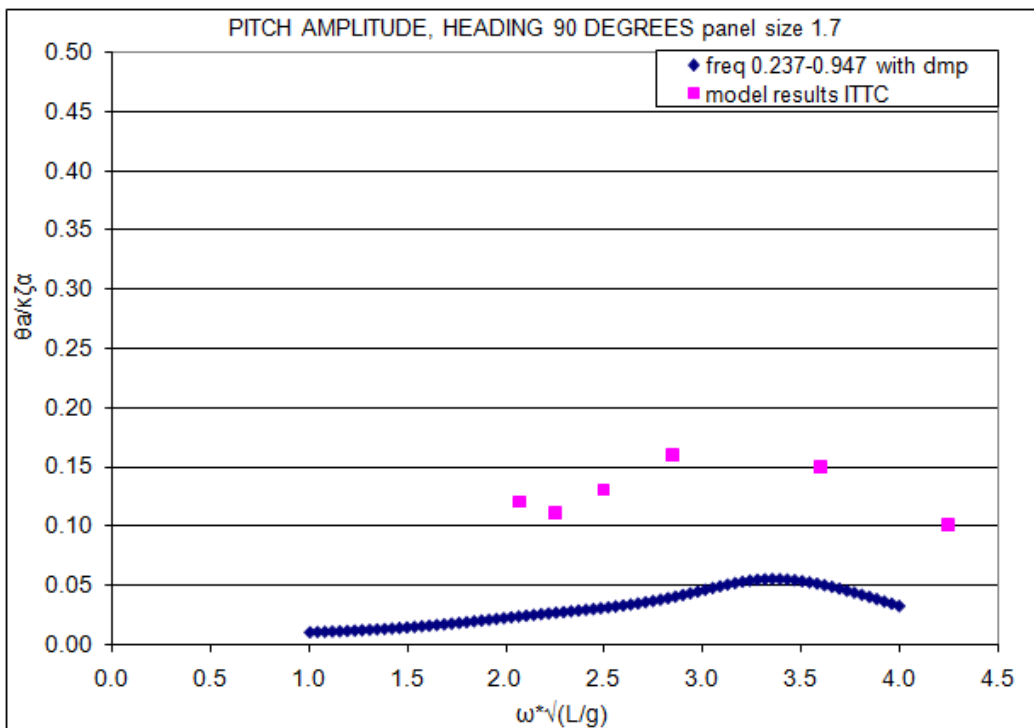
**Σχήμα 2.6 :** Καμπύλη του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό χωρίς απόσβεση και σύγκριση αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα



**Σχήμα 2.7 :** Καμπύλη του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό με απόσβεση και σύγκριση αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα

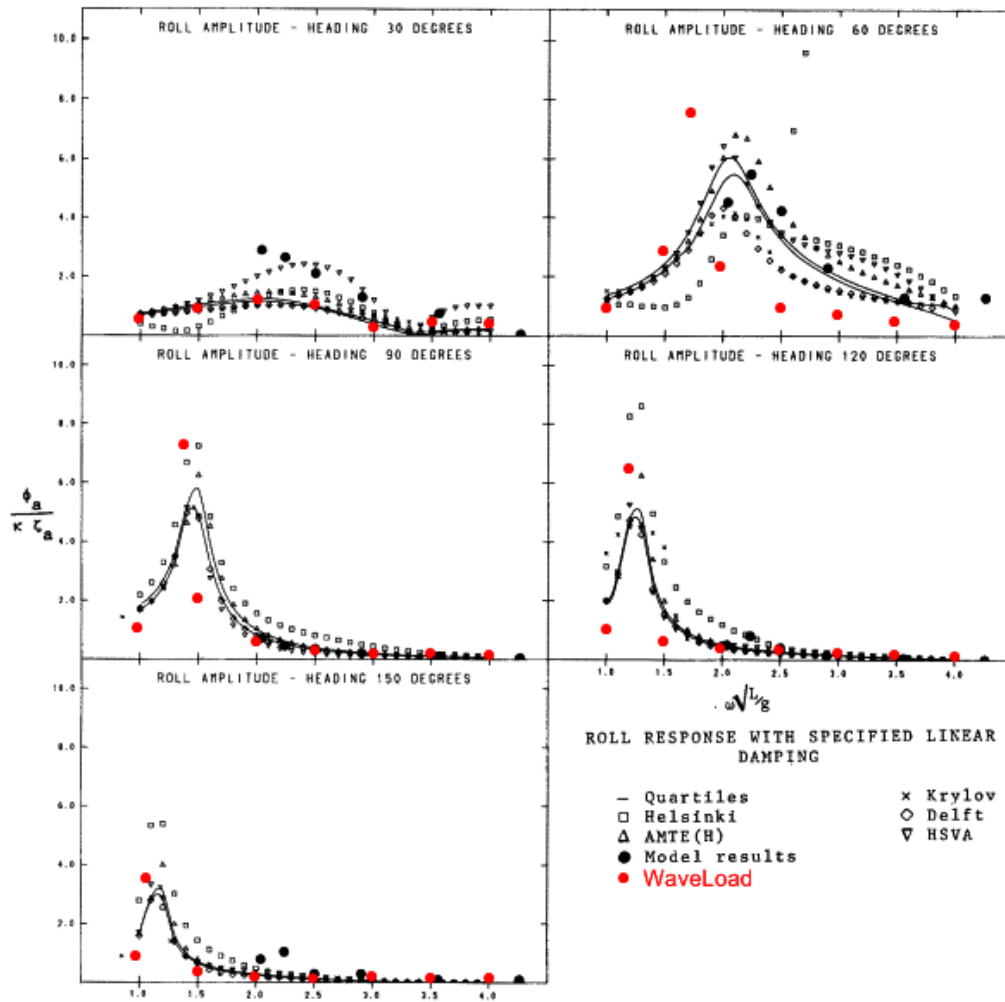


**Σχήμα 2.8 :** Καμπύλη του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε προνευτασμό χωρίς απόσβεση και σύγκριση αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα

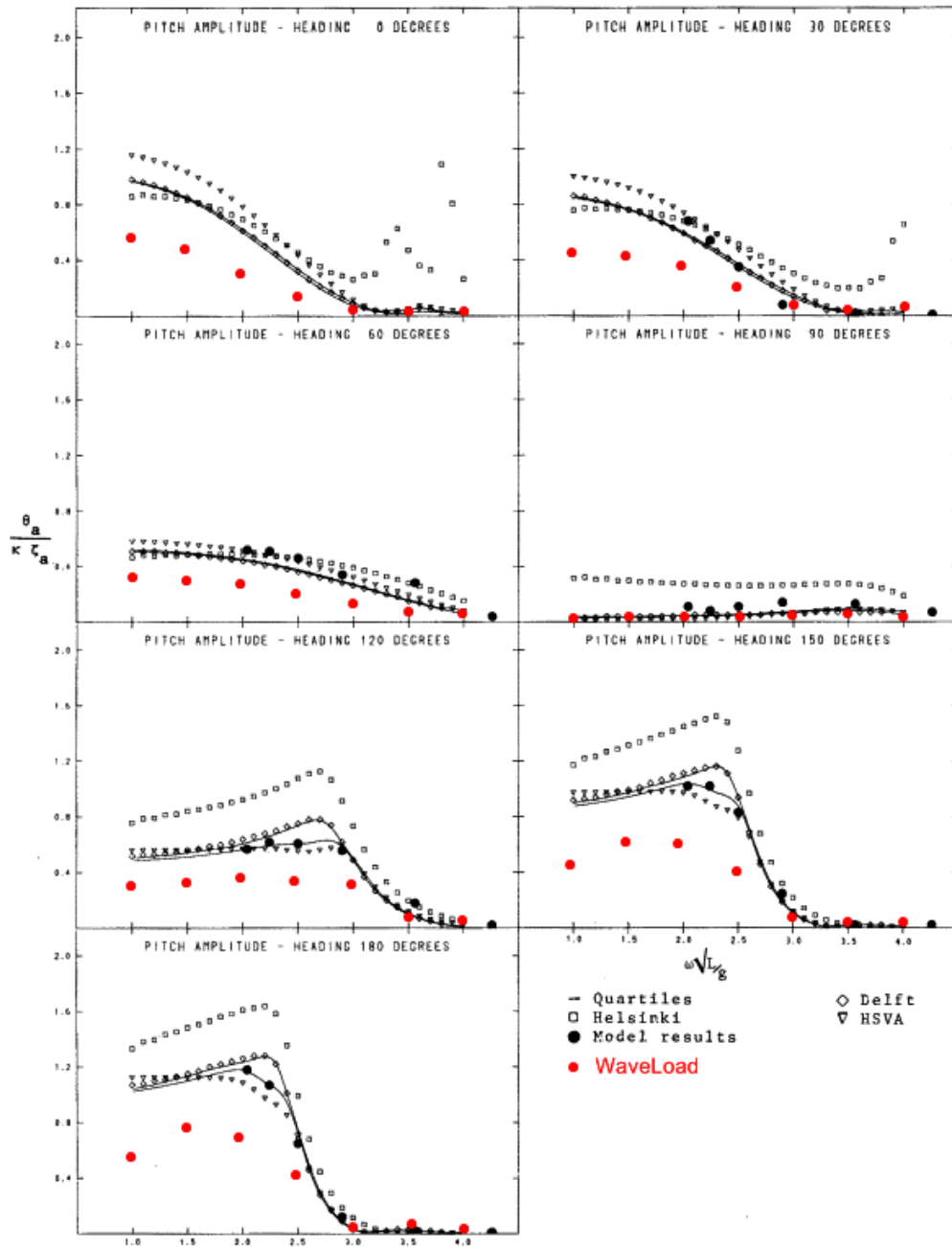


**Σχήμα 2.9 :** Καμπύλη του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε προνευτασμό με απόσβεση και σύγκριση αυτής με τα πειραματικά αποτελέσματα

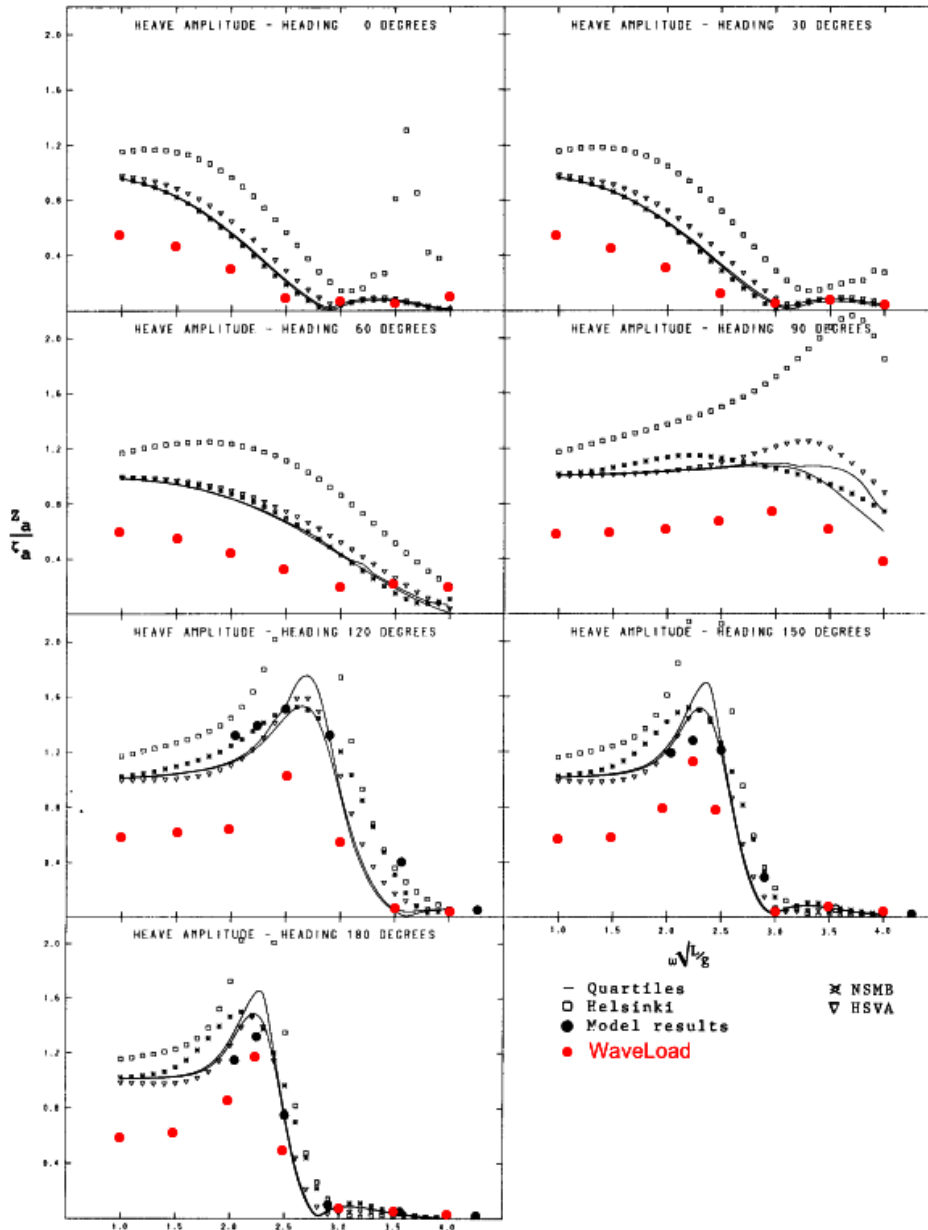
Κατά αντιστοιχία με τα παραπάνω διαγράμματα και προκειμένου να έχουμε μια πιο πλήρη εικόνα για την συμπεριφορά του WaveLoad εμφανίζουμε τα παρακάτω σχήματα τα οποία τα πήραμε αυτούσια από την ITTC '78 και πάνω σε αυτά προσαρμόσαμε τα αποτελέσματα που εμείς λάβαμε από τις προσομοιώσεις με απόσβεση, για “panel size” ίσο με 1.7 που αντιστοιχεί και στον μεγαλύτερο αριθμό πλαισίων (1554 πλαίσια συνολικά)



Σχήμα 2.10 : Καμπύλες του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό από ITTC '78, εμπλουτισμένες με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων από το WaveLoad.



Σχήμα 2.11 : Καμπύλες του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε προνευτασμό από ITTC '78, εμπλουτισμένες με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων από το WaveLoad.



**Σχήμα 2.12 :** Καμπύλες του αδιαστατοποιημένου συντελεστή απόκρισης σε κατακόρυφη ταλάντωση από ITTC '78, εμπλουτισμένες με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων από το WaveLoad.

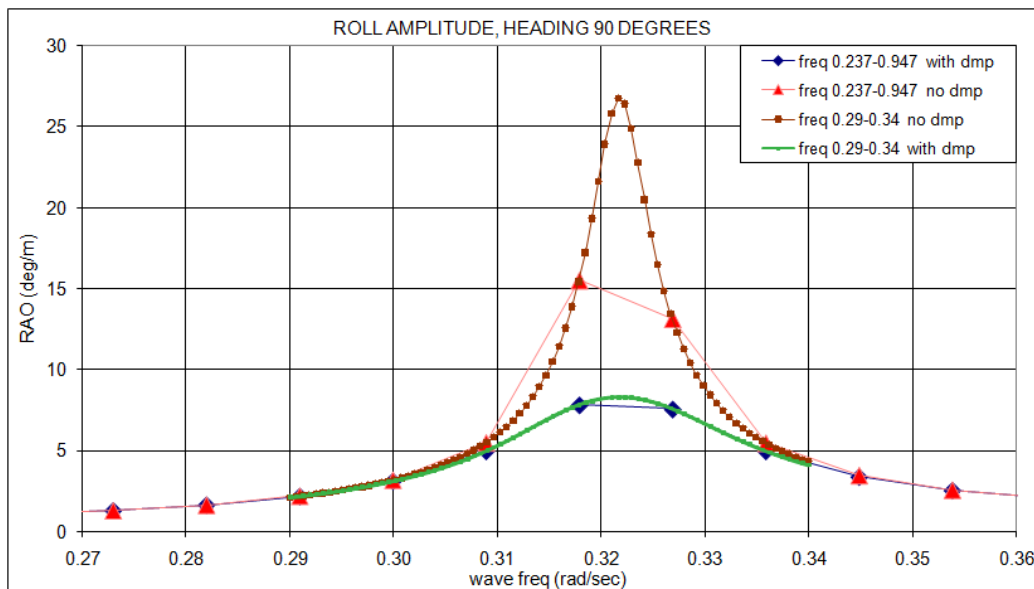
Παρατηρώντας κανείς με λίγο πιο κριτικό πνεύμα τη μορφή της καμπύλης του σχήματος 6 ή 7 παρατηρεί πως για ένα μικρό εύρος τιμών της αδιαστατοποιημένης συχνότητας του κύματος  $\omega^* \sqrt{L/g}$ , από 1.3 έως 1.4 που αντιστοιχεί σε συχνότητα  $\omega$  από 0.308 έως 0.331  $rad/sec$  υπάρχει ραγδαία αύξηση της τιμής του

αδιαστατοποιημένου R.A.O. σε διατοιχισμό και αφήνεται η αίσθηση στον αναγνώστη πώς αν ο αριθμός των υποδιαιρέσεων της συχνότητας ήταν ακόμη μεγαλύτερος τότε και η μέγιστη τιμή του αδιαστατοποιημένου R.A.O. θα ήταν ακόμη μεγαλύτερη. Προκειμένου λοιπόν να διευκρινιστεί το κατά πόσο αυτή η αίσθηση είναι σωστή ή όχι εκτελούμε ξανά τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τις ακόλουθες νέες επιχειρησιακές συνθήκες:

| Νέες Επιχειρησιακές Συνθήκες πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων |          |         |                   |
|---|----------|---------|-------------------|
|   | Ελάχιστη | Μέγιστη | Αρ. Υποδιαιρέσεων |
| Συχνότητα κυματισμών (rad/sec)                                    | 0.29     | 0.34    | 80                |
| Διεύθυνση πλοίου (deg)  | 90       | 90      | 1                 |
| Ταχύτητα πλοίου (kn)  | 21       | 21      | 1                 |

**Πίνακας 2.3 :** Συνθήκες προσομοίωσης 1<sup>ο</sup> πλοίου μοντέλου, για ανάλυση συμπεριφοράς του WaveLoad στην αλλαγή του εύρους των συχνοτήτων.

Στον παραπάνω πίνακα με μπλε χρώμα δηλώνονται οι νέες συνθήκες σε σχέση με τις συνθήκες που αναφέρονται στον Πίνακα 2.2.



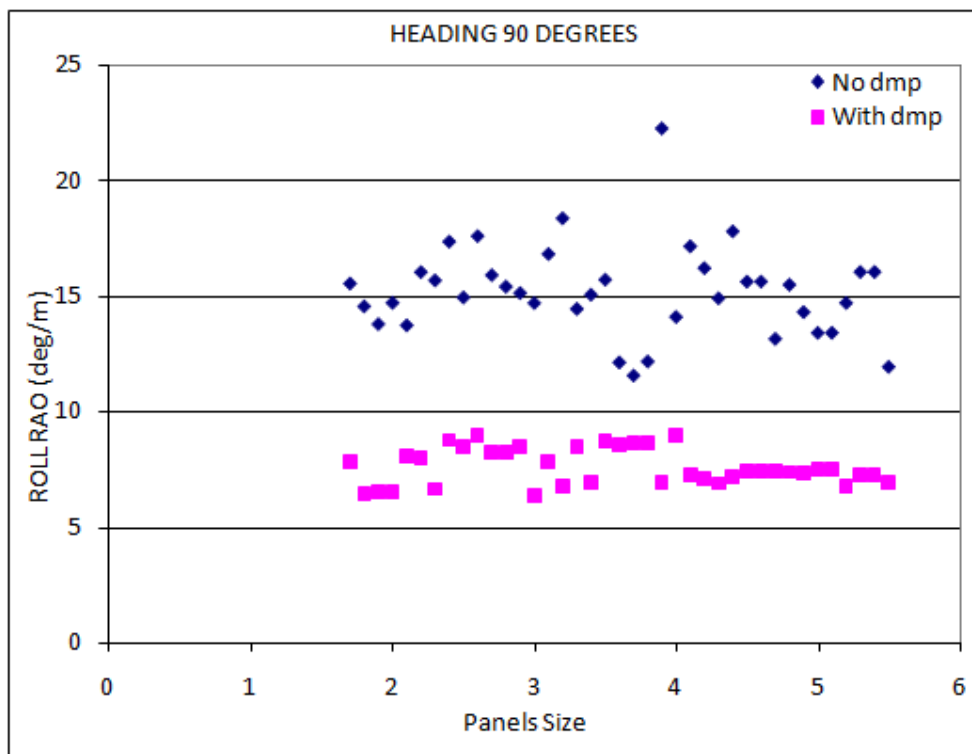
**Σχήμα 2.13 :** Καμπύλη σύγκρισης του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό με και χωρίς απόσβεση συναρτήσει της συχνότητας του κύματος.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται πως αν η ανάλυση μας εστιάζει σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων και στην περιοχή όπου εμφανίζεται η μεγιστοποίηση του

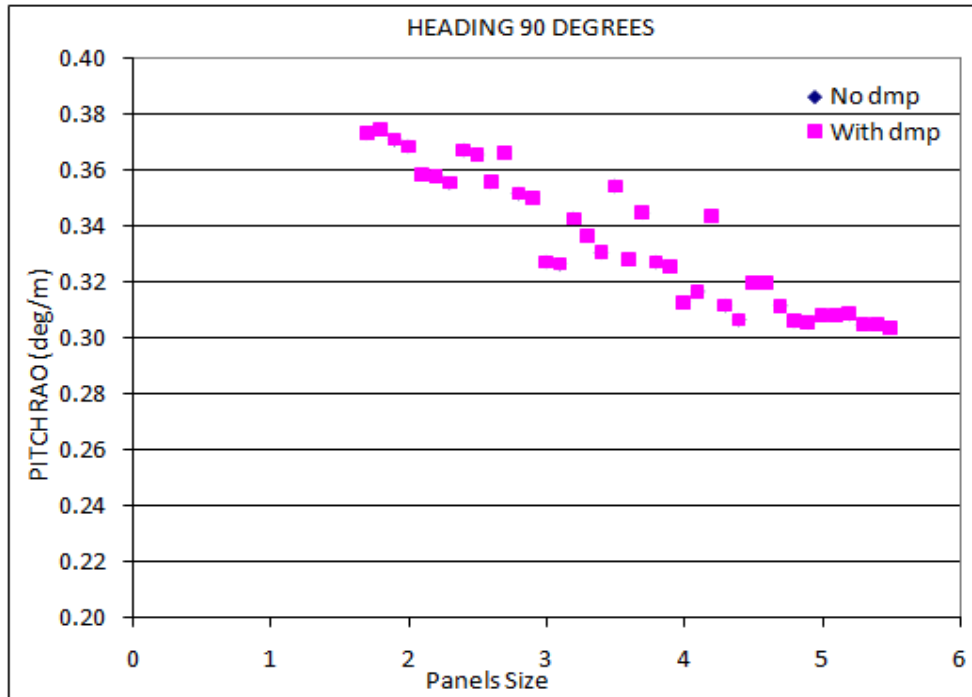


συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό, κάνουμε αρκετά μεγάλη διαμερισματοποίηση, τότε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαφοροποιούνται κυρίως στην περίπτωση που οι προσομοιώσεις γίνονται χωρίς να ληφθεί υπόψη η απόσβεση. Στις περιπτώσεις που η απόσβεση λαμβάνεται υπόψη στις προσομοιώσεις, αυτές οι διαφοροποιήσεις είναι πρακτικά αμελητέες.

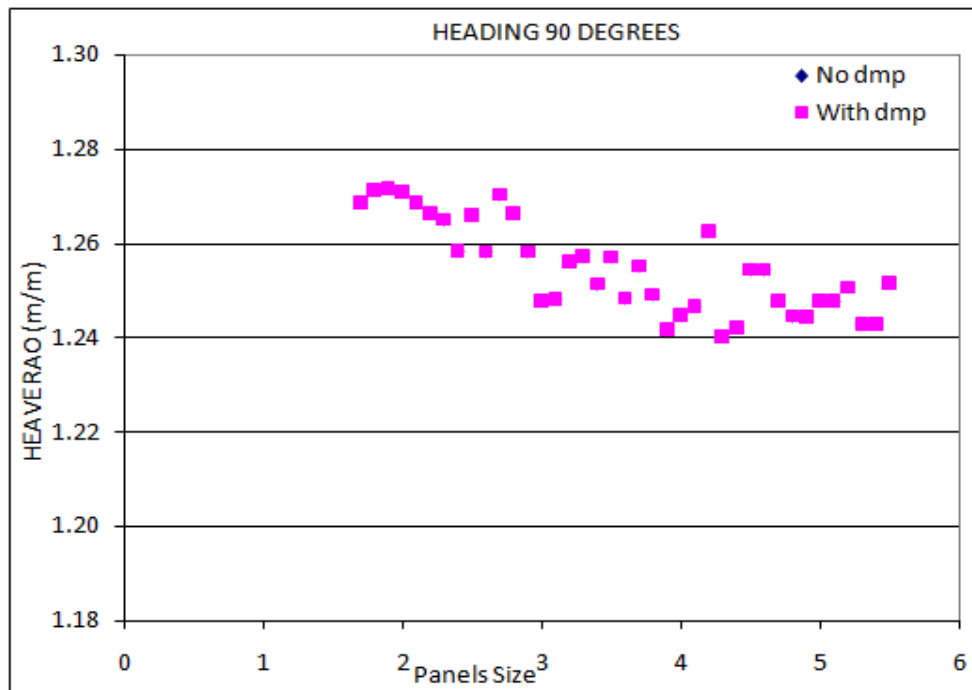
Στη συνέχεια, παρουσιάζουμε τα παρακάτω γραφήματα στα οποία φαίνεται ξεκάθαρα η συμπεριφορά του υπολογιστικού κώδικα για τα διάφορα μεγέθη πλαισίων και για τον αριθμό των πλαισίων αντίστοιχα (τα παρακάτω αποτελέσματα έχουν παραχθεί για τις επιχειρησιακές συνθήκες του πίνακα 2.2).



**Σχήμα 2.14 :** Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για μεγέθη πλαισίων από 1.7 έως 5.5

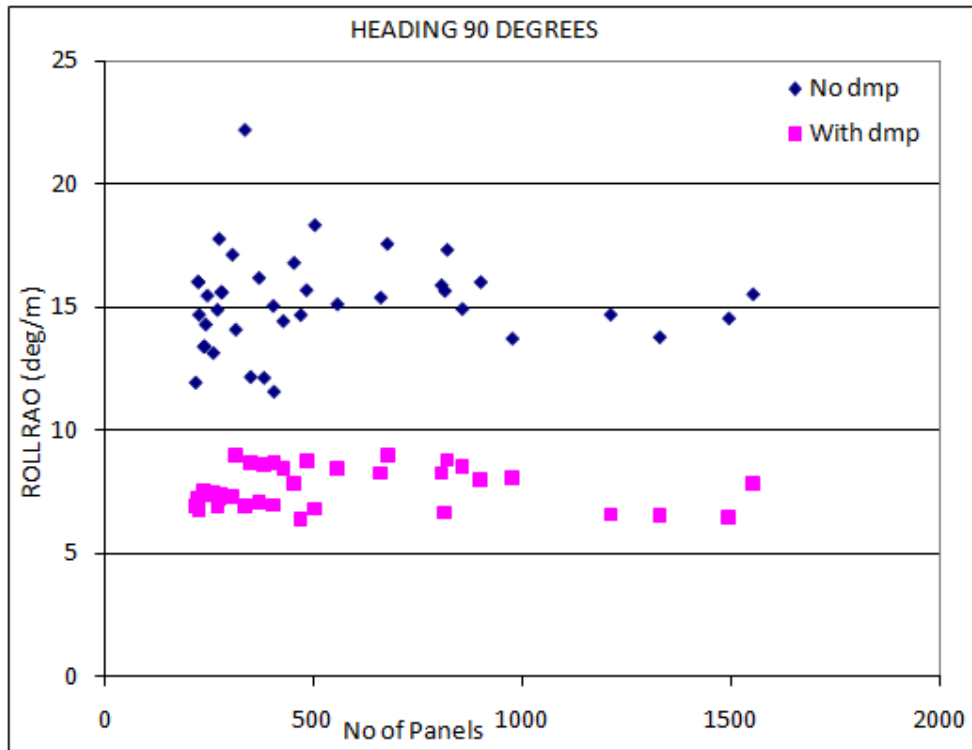


*Σχήμα 2.15 : Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε προνευτασμό με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για μεγέθη πλαισίων από 1.7 έως 5.5*

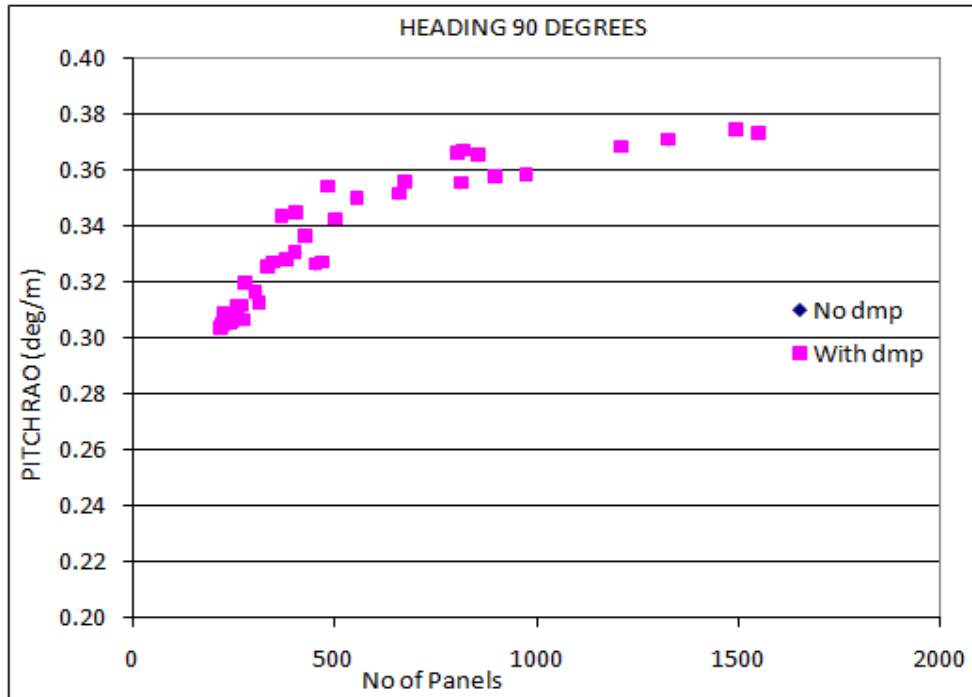


*Σχήμα 16 : Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε κατακόρυφη ταλάντωση με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για μεγέθη πλαισίων από 1.7 έως 5.5*

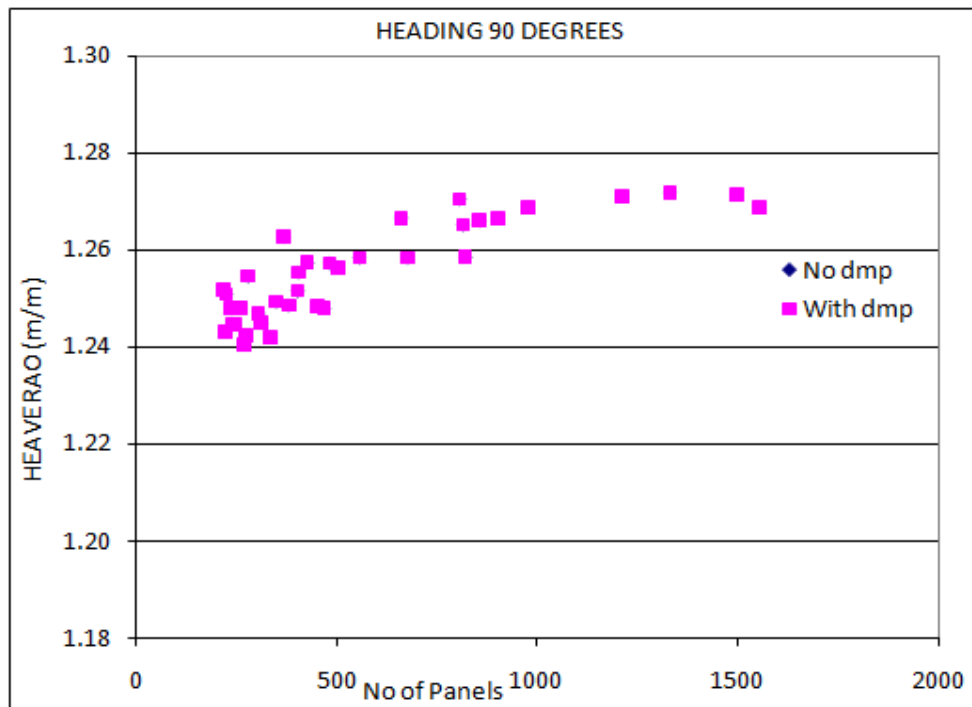
Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω, στη συνέχεια παρουσιάζουμε τα ακόλουθα γραφήματα στα οποία φαίνεται ξεκάθαρα η συμπεριφορά του υπολογιστικού κώδικα συναρτήσει του αριθμού των πλαισίων.



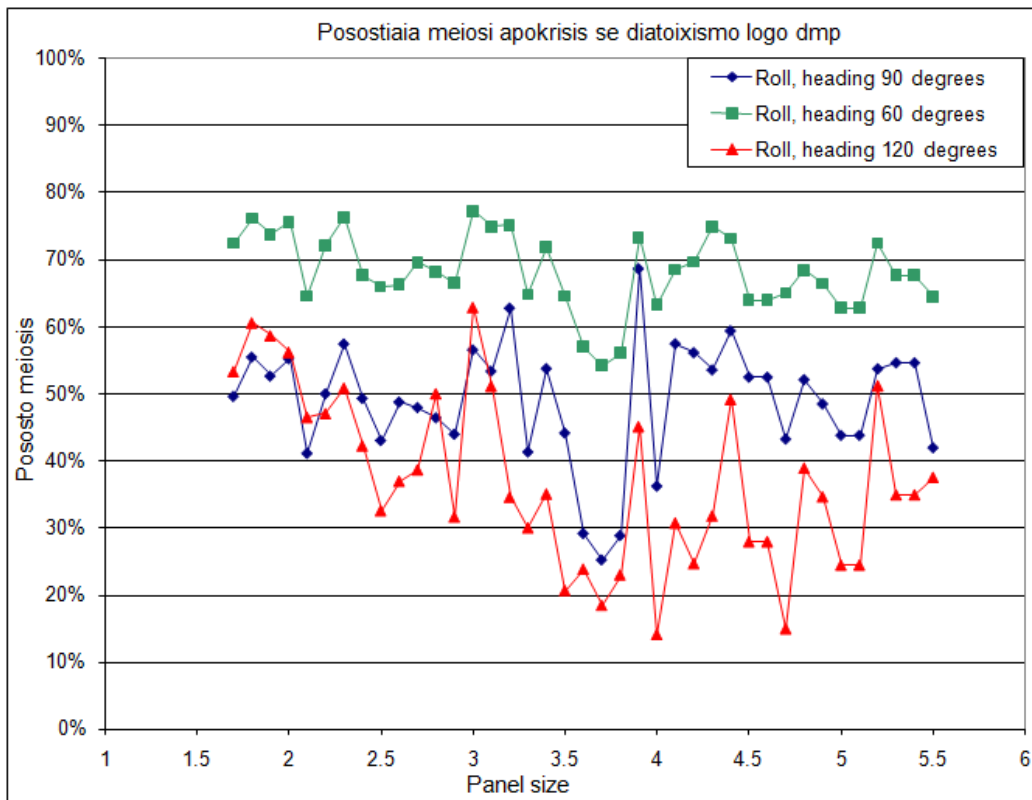
**Σχήμα 2.17 :** Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για αριθμό πλαισίων από 216 έως 1554



**Σχήμα 2.18** : Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε προνευτασμό με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για αριθμό πλαισίων από 216 έως 1554



**Σχήμα 2.19** : Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε κατακόρυφη ταλάντωση με και χωρίς χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για αριθμό πλαισίων από 216 έως 1554

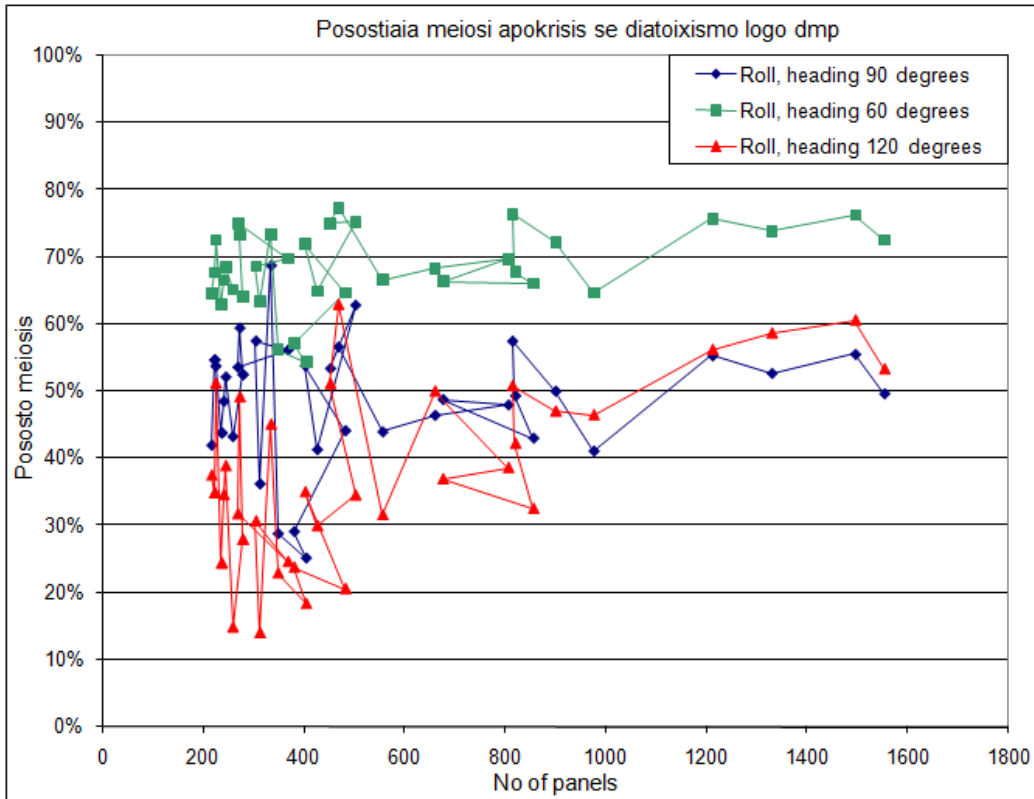


**Σχήμα 2.20 :** Ποσοστιαία μείωση του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό λόγω χρήσης της απόσβεσης στους υπολογισμούς, συναρτήσει του μεγέθους των πλαισίων και για διαφορετικές γωνίες συνάντησης κυματισμών.

Από τα παραπάνω γραφήματα (Σχήματα 2.15, 2.16, 2.18, 2.19) είναι αμέσως κατανοητό πως η απόσβεση δεν παίζει κανένα απολύτως ρόλο στις κινήσεις του προνευτασμού και της κατακόρυφης ταλάντωσης.

Αντίθετα παίζει ουσιαστικό ρόλο στην κίνηση του διατοιχισμού αφού είναι ικανή να αποφέρει μείωση μέχρι και 78% (Σχήμα 2.20). Είναι αξιοπερίεργη η σημαντική αυξομείωση του ποσοστού της απόσβεσης συναρτήσει του μεγέθους των “panels” η οποία ιδιαίτερα για την περίπτωση κατεύθυνσης των κυματισμών 120<sup>0</sup> εμφανίζεται να κυμαίνεται από 14% μέχρι και 63% , απόκλιση που δεν είναι εύλογη.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μια παραλλαγή του προηγούμενου σχήματος όπου αυτή τη φορά στον οριζόντιο άξονα έχουμε σαν μέγεθος αντί για το μέγεθος των “panels”, τον συνολικό αριθμό των “panels”.



*Σχήμα 2.21 : Ποσοστιαία μείωση του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό λόγω χρήσης της απόσβεσης στους υπολογισμούς, συναρτήσε του αριθμού των πλαισίων και για διαφορετικές γωνίες συνάντησης κυματισμών.*

Στο παραπάνω σχήμα επιλέξαμε να ενώσουμε τα διάφορα σημεία με γραμμή κατά αντιστοιχία της ανάλυσης του προηγούμενου πλοίου. Παρατηρώντας πιο προσεκτικά το γράφημα, διαπιστώνει κανείς πώς και για αυτό το πλοίο υπάρχουν σημεία τομής μεταξύ των διαφόρων ευθύγραμμων τμημάτων. Αυτό δηλώνει πως για κάποια μεγέθη πλαισίων (panels size) η ενσωματωμένη στον κώδικα του WaveLoad μηχανή παραγωγής πλαισίων παράγει λιγότερα τον αριθμό πλαίσια σε σχέση με κάποιο μικρότερο μέγεθος πλαισίου. Δηλαδή ενώ μικρότερο “panel size” σημαίνει μεγαλύτερος αριθμός πλαισίων, αυτό δεν συμβαίνει πάντα, όπως φαίνεται άλλωστε και από το παραπάνω σχήμα. Αυτή η ιδιομορφία-ιδιοτροπία μπορεί κάλλιστα να οδηγήσει σε αμφιβολίες για το κατά πόσο τα αποτελέσματα που έχουμε εξαγάγει είναι κοντά στα πραγματικά και κατά πόσο ο κώδικας είναι ορθό να χρησιμοποιείται για το υπό μελέτη πλοίο.

### 2.5.2 Μοντελοποίηση ενός επιβατηγού οχηματαγωγού της ελληνικής ακτοπλοΐας (πλοίο No2)

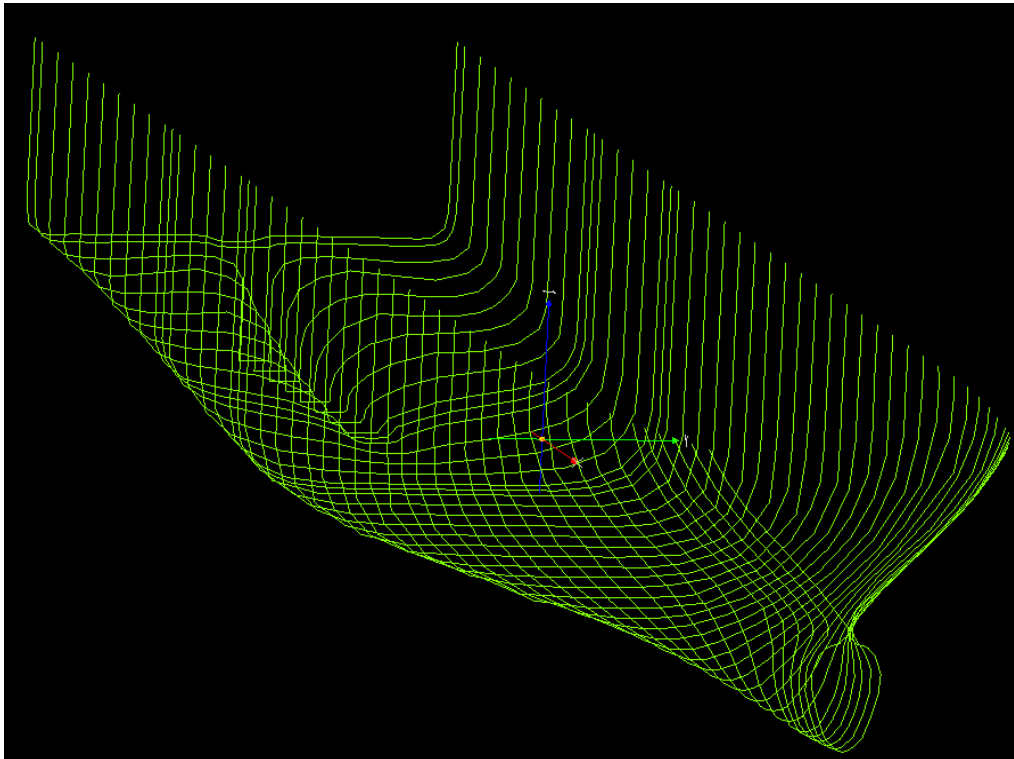
Δεδομένης της "μέτριας" συμπεριφοράς του προγράμματος WaveLoad με το πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, δημιουργούνται υποψίες σε σχέση με το κατά πόσο το πακέτο λογισμικού μπορεί να "αντιμετωπίσει" μοντελοποιήσεις πλοίων με αρκετά σημαντικές ιδιαιτερότητες της γάστρας του πλοίου, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη μεγάλης έκτασης skeg και η ύπαρξη έντονου flair στους προραίους νομείς. Για το σκοπό αυτό αποφασίσαμε να μοντελοποιήσουμε ένα Ε/Γ-Ο/Γ πλοίο, το οποίο διαθέτει όλες τις παραπάνω ιδιαιτερότητες και το οποίο έχει προβληματίσει με τη συμπεριφορά του το συγγραφέα κατά την μοντελοποίηση του και σε άλλο κώδικα στο παρελθόν. Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου αυτού, φαίνονται παρακάτω:

| <i>Στοιχεία Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου</i> |          |             |
|--------------------------------|----------|-------------|
| Μήκος μεταξύ καθέτων           | $L_{BP}$ | 111.80 m    |
| Πλάτος                         | $B$      | 18.9 m      |
| Βύθισμα                        | $T$      | 4.9 m       |
| Κοίλο                          | $D$      | 7.25 m      |
| Ταχύτητα                       | $V_S$    | 18 kn       |
| Εκτόπισμα                      | $\Delta$ | 6588.51 ton |

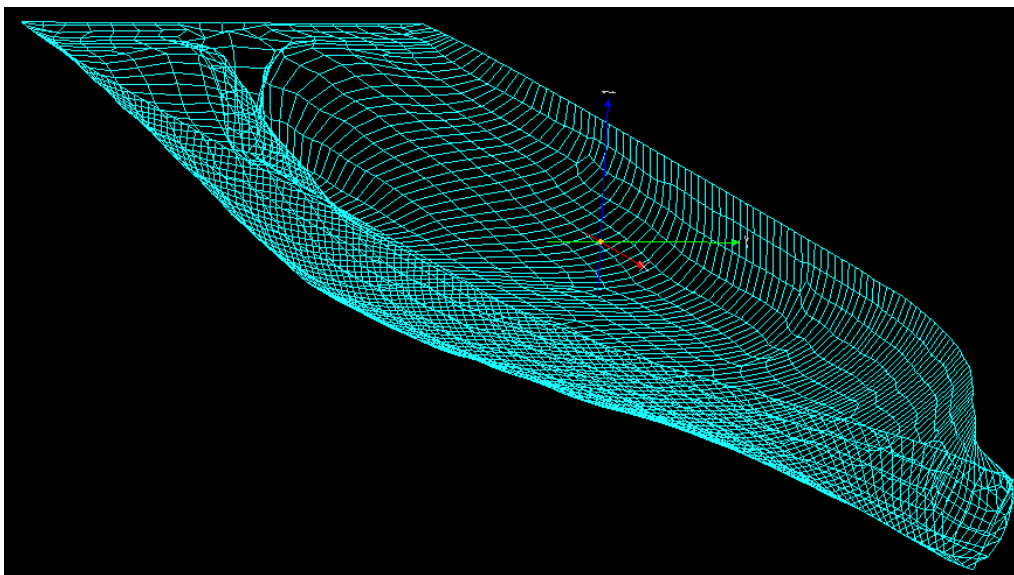
**Πίνακας 2.4 :** Παρουσίαση των χαρακτηριστικών του πλοίου που θα χρησιμοποιήσουμε.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του παραπάνω πλοίου όπως αναφέραμε προηγουμένως θα τα χρησιμοποιήσουμε για να κάνουμε σύγκριση με τα δεδομένα που γνωρίζουμε από το εγχειρίδιο "SEAKEEPING CALCULATION" [7] το οποίο διατίθεται από την κατασκευάστρια εταιρία του πλοίου και η οποία είναι η DAEWOO HEAVY INDUSTRIES LTD.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας χρήσης του πακέτου λογισμικού με βάση τα βήματα που περιγράφονται με αναφορά από το Π.3.1.1 μέχρι και το σχήμα Π.3.1.4 έχουμε εισαγάγει αρχικά τις γραμμές και στη συνέχεια έχουμε καταναίμει τα πλαίσια επί της γάστρας του υπό μελέτη πλοίου όπως φαίνεται και από τα παρακάτω σχήματα.

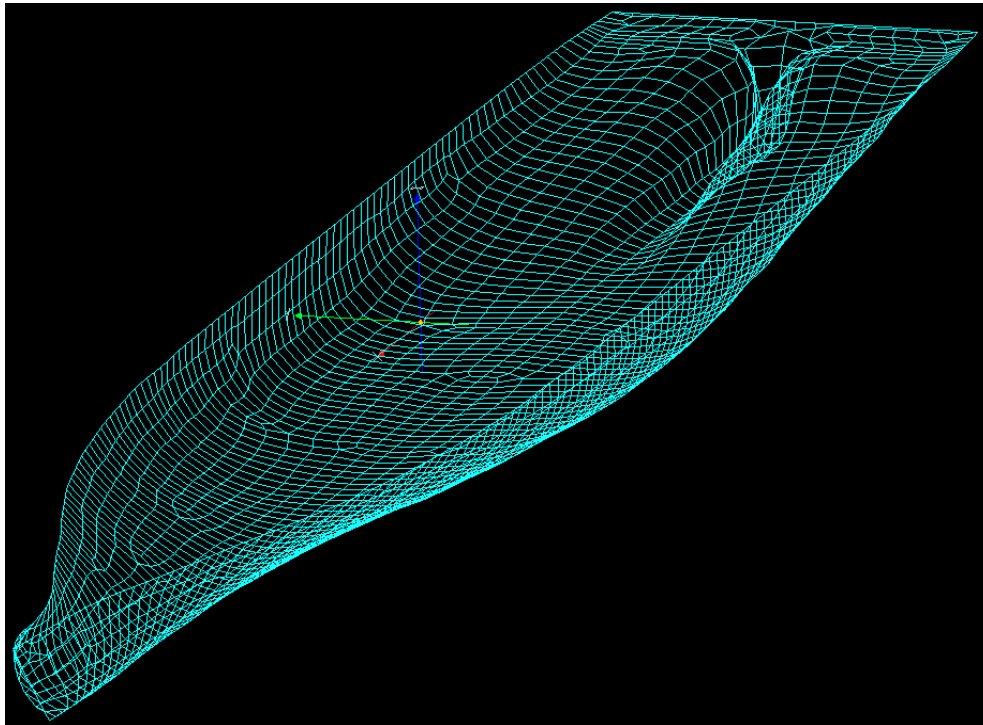


*Σχήμα 2.22 : Γραμμές γάστρας E/Γ-O/Γ πλοίου μέχρι το κοίλο όπως απεικονίζονται μέσα από το πρόγραμμα.*



*Σχήμα 2.23 : Η γάστρα του E/Γ-O/Γ πλοίου όπως αυτή παρουσιάζεται μετά την κατανομή πλαισίων πάνω σε αυτή και μέχρι το βύθισμα σχεδίασης (upper view). Με κόκκινο, μπλε και πράσινο χρώμα είναι οι  $\chi$ ,  $\psi$  και  $z$  άξονες αντίστοιχα.*





**Σχήμα 2.24 :** Η γάστρα του Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου όπως αυτή παρουσιάζεται μετά την κατανομή πλαισίων πάνω σε αυτή και μέχρι το βύθισμα σχεδίασης (bottom view). Με κόκκινο, μπλε και πράσινο χρώμα είναι οι  $x$ ,  $y$  και  $z$  άξονες αντίστοιχα.

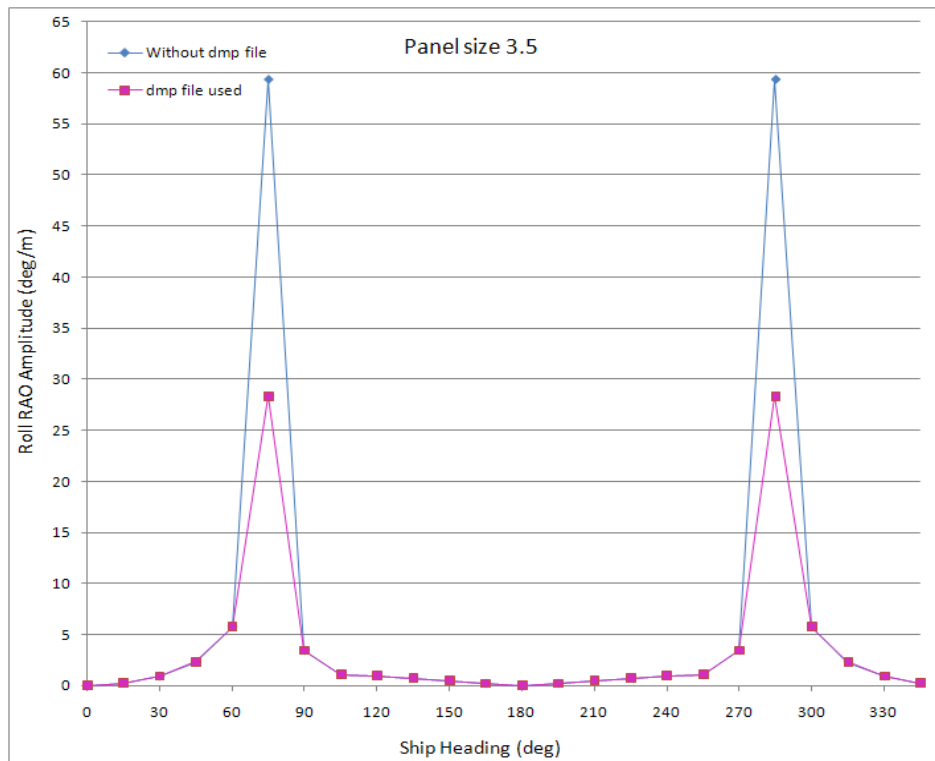
Στο σημείο αυτό παραθέτουμε τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου για τις οποίες θέλουμε να κάνουμε τις προβλέψεις μας όπως αυτό έχει περιγραφεί στα σχήματα Π.3.1.7 έως Π.3.1.10. Αυτές είναι :

| <b>Επιχειρησιακές συνθήκες Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου</b> |          |         |                   |
|---|----------|---------|-------------------|
|   | Ελάχιστη | Μέγιστη | Αρ. Υποδιαίρεσεων |
| Συχνότητα κυματισμών (rad/sec)                | 0.66     | 0.66    | 1                 |
| Διεύθυνση πλοίου (deg)                        | 0        | 345     | 24                |
| Ταχύτητα πλοίου (kn)                          | 18       | 18      | 1                 |

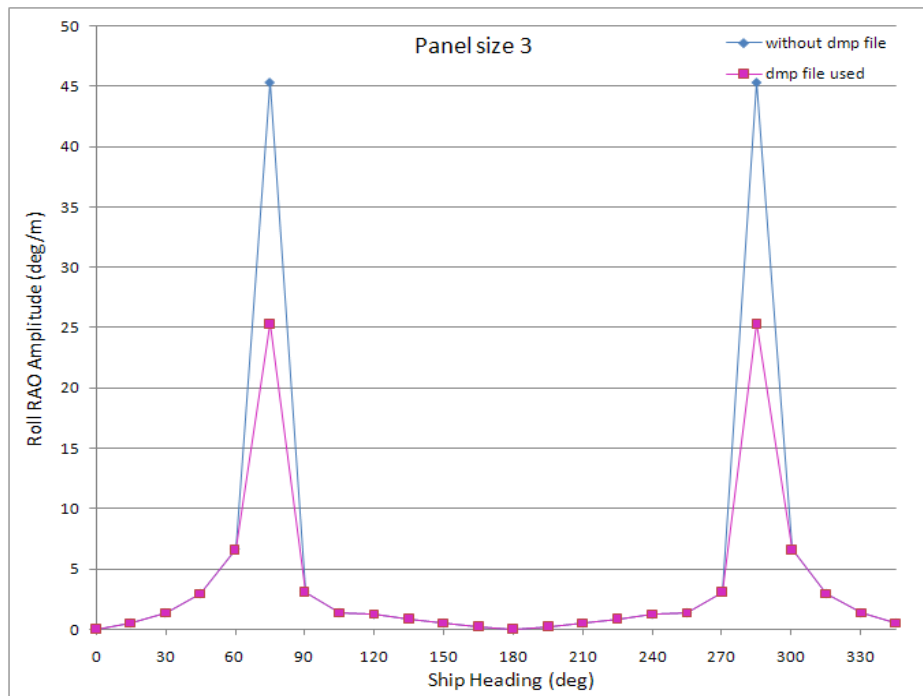
**Πίνακας 2.5 :** Συνθήκες προσομοίωσης μοντέλου.

Έχουμε επιλέξει δηλαδή να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του πλοίου για τη συχνότητα κυματισμών  $0.66 \text{ rad/sec}$  που αντιστοιχεί σε κυματισμό με περίοδο  $T_w = 9.52 \text{ sec}$ . Επιπλέον εξετάζουμε αυτή για ένα εύρος γωνιών από  $0^\circ$  έως  $345^\circ$  με βήμα ανά  $15^\circ$ . Όλα τα προηγούμενα υποτίθενται για απόλυτη ταχύτητα πλοίου ίση με  $18 \text{ kn}$ . Όλες οι προσομοιώσεις γίνονται για δύο περιπτώσεις που έχει ιδιαίτερο

ενδιαφέρον να γίνει μεταξύ τους σύγκριση. Στην πρώτη η απόσβεση δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς ενώ στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη προκειμένου να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων. Επιπλέον όλα τα τρεξίματα γίνονται για 26 διαφορετικά μεγέθη πλαισίων. Στο σύνολο λοιπόν απαιτούνται από το χρήστη για την συγκεκριμένη μελέτη να κάνει 52 (=26\*2) διαφορετικά τον αριθμό τρεξίματα. Τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης (για κάθε διαφορετικό "panel size") τα χρησιμοποιήσαμε για να παράγουμε τα αποτελέσματα των παρακάτω σχημάτων τα οποία αποτελούν μικρό μέρος του συνόλου των προσομοιώσεων παρέχονται όμως σαν πλήρες σετ γραφημάτων στο Ηλεκτρονικό Παράρτημα της εργασίας. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε τα παρακάτω:



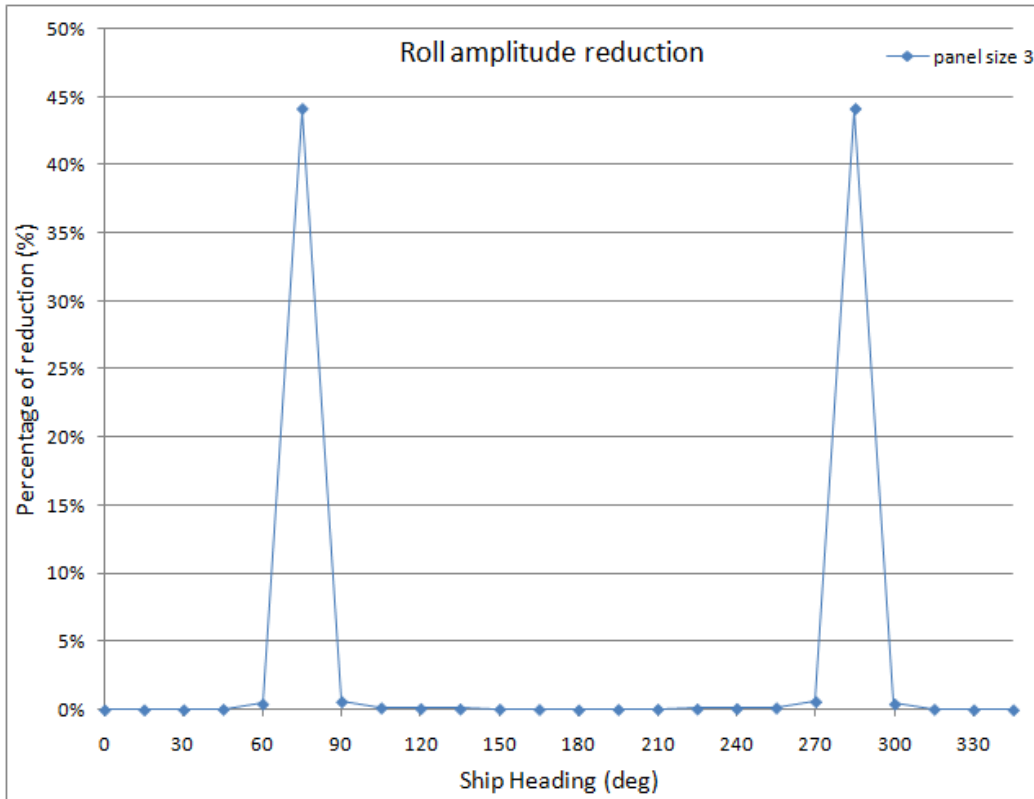
**Σχήμα 2.25 :** Διάγραμμα σύγκρισης συντελεστών απόκρισης σε διατοιχισμό με ή χωρίς απόσβεση συναρτήσει της κατεύθυνσης κομάτων και για μέγεθος πλαισίων ίσο με 3.5



**Σχήμα 2.26 :** Διάγραμμα σύγκρισης συντελεστών απόκρισης σε διατοιχισμό με ή χωρίς απόσβεση συναρτήσει της κατεύθυνσης κυμάτων και για μέγεθος πλαισίων ίσο με 3

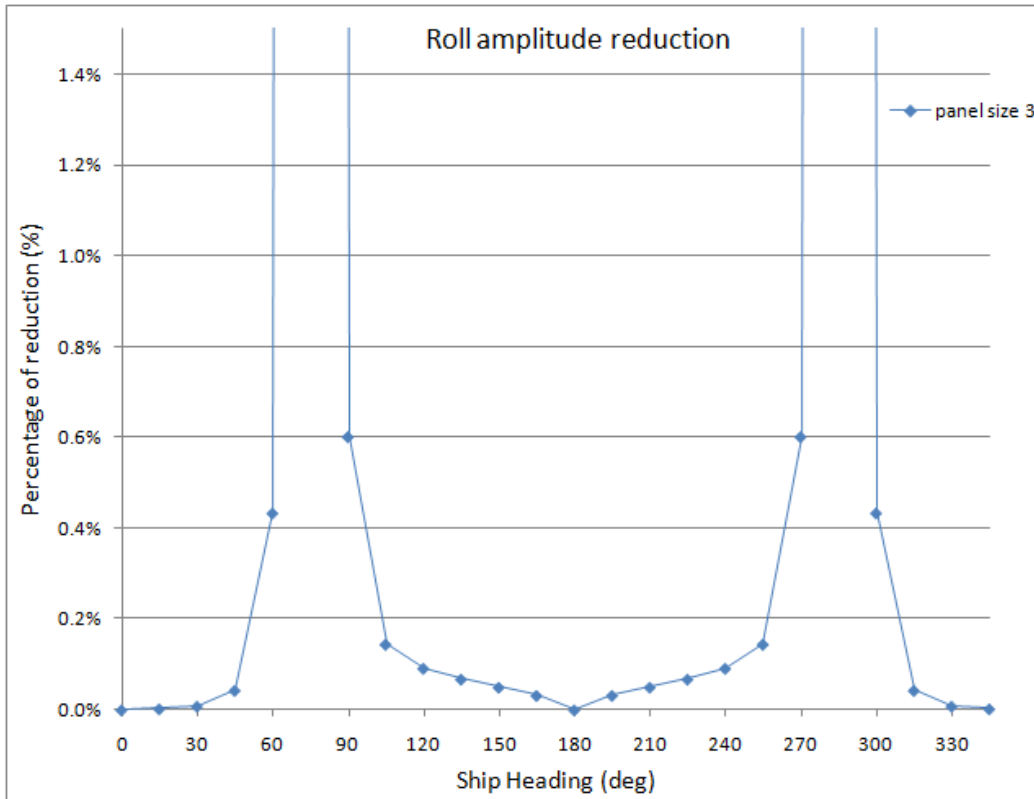
Από τα δύο παραπάνω σχήματα είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα έχουν αρκετά υψηλές τιμές τα οποία σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μπορεί να είναι ρεαλιστικά.

Πέραν τούτου, παρατηρούμε ότι ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος που έχει η απόσβεση στο πλάτος του διατοιχισμού και μάλιστα σε υψηλό βαθμό κάτι το οποίο έχει διαπιστωθεί και από τον Pesman [8]. Παραδόξως όμως, αυτό φαίνεται να συμβαίνει μόνο για την περίπτωση όπου η κατεύθυνση του κυματισμού σχηματίζει γωνία  $75^{\circ}$  με τον διαμήκη άξονα της γάστρας του πλοίου. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάζουμε το διάγραμμα του παρακάτω σχήματος όπου παρουσιάζουμε την ποσοστιαία μείωση του συντελεστή απόκρισης λόγω της απόσβεσης συναρτήσει της γωνίας συνάντησης πλοίου-κύματος για μέγεθος πλαισίου (panel size) ίσο με 3.



*Σχήμα 2.27 : Ποσοστιαία μείωση του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό λόγω απόσβεσης*

Με μια προσεκτική ματιά στο παραπάνω σχήμα διαπιστώνουμε πως η απόσβεση παίζει ρόλο και για γωνίες διαφορετικής αυτής των  $75^{\circ}$  και για να καταστεί πιο σαφές σε τι ακριβώς αναφερόμαστε, κατασκευάζουμε το παρακάτω σχήμα όπου πλέον εστιάζουμε περισσότερο στα μικρότερα ποσοστά επίδρασης της απόσβεσης.



**Σχήμα 2.28 :** Λεπτομερέστερη παρουσίαση (αναφορικά με το Σχήμα 2.27) της ποσοστιαίας μείωσης του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό λόγω απόσβεσης

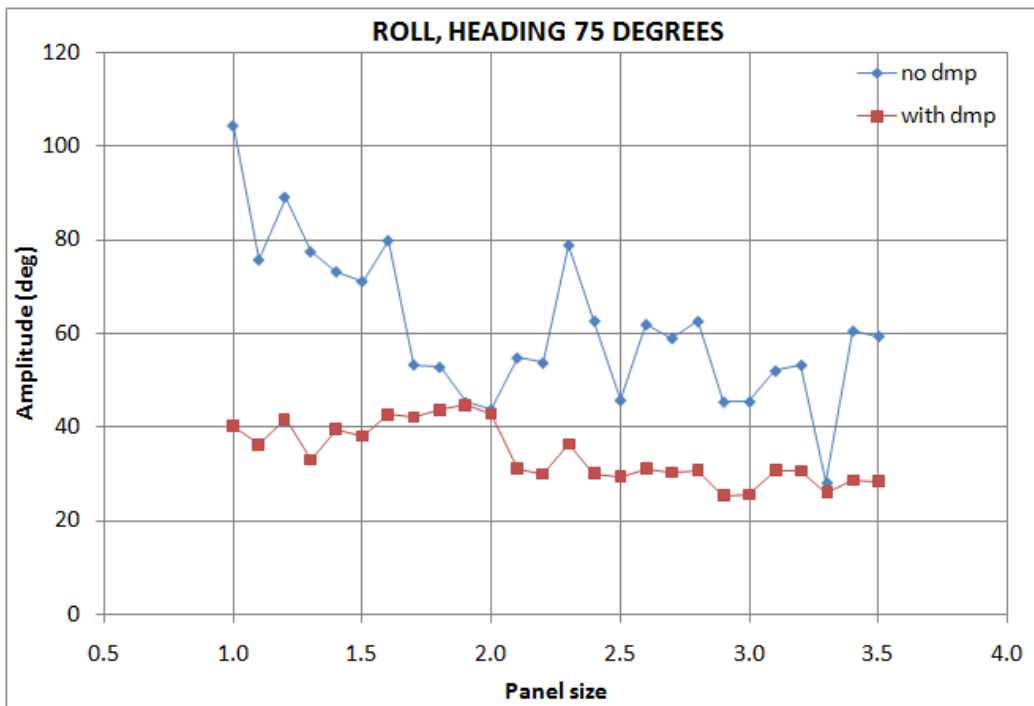
Από το παραπάνω σχήμα εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως η απόσβεση σε διατοιχισμό είναι υπαρκτή (όπως άλλωστε ισχύει και στην πραγματικότητα) σε όλες τις γωνίες συνάντησης πλοίου-κύματος. Είναι ξεκάθαρο όμως από το παραπάνω σχήμα, πως μακριά από την γωνία των  $75^{\circ}$  όπου και φαίνεται να έχουμε μεγιστοποίηση σε διατοιχισμό, τα πλάτη απόκρισης είναι αρκετά μικρά και η απόσβεση σε διατοιχισμό δεν παίζει κάποιο ιδιαίτερο ρόλο, γεγονός που δημιουργεί κάποια ερωτηματικά όσον αφορά τη λειτουργία του WaveLoad. Απεναντίας, η απόλυτη συμμετρία των αποτελεσμάτων περί τις  $180^{\circ}$  είναι ένα δείγμα ορθής λειτουργίας.

Εν συνεχεία, προκειμένου να δούμε κατά πόσο αυτή η “περίεργη” συμπεριφορά με το πολύ μεγάλο συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό είναι κάποια ιδιομορφία του υπολογιστικού πακέτου ως προς το μέγεθος των πλαισίων που επιλέξαμε για να κάνουμε την μοντελοποίηση, εκτελέσαμε μια ομάδα από αντίστοιχα “τρεξίματα” του WaveLoad με μοναδική παράμετρο διαφοροποίησης κάθε φορά το μέγεθος των

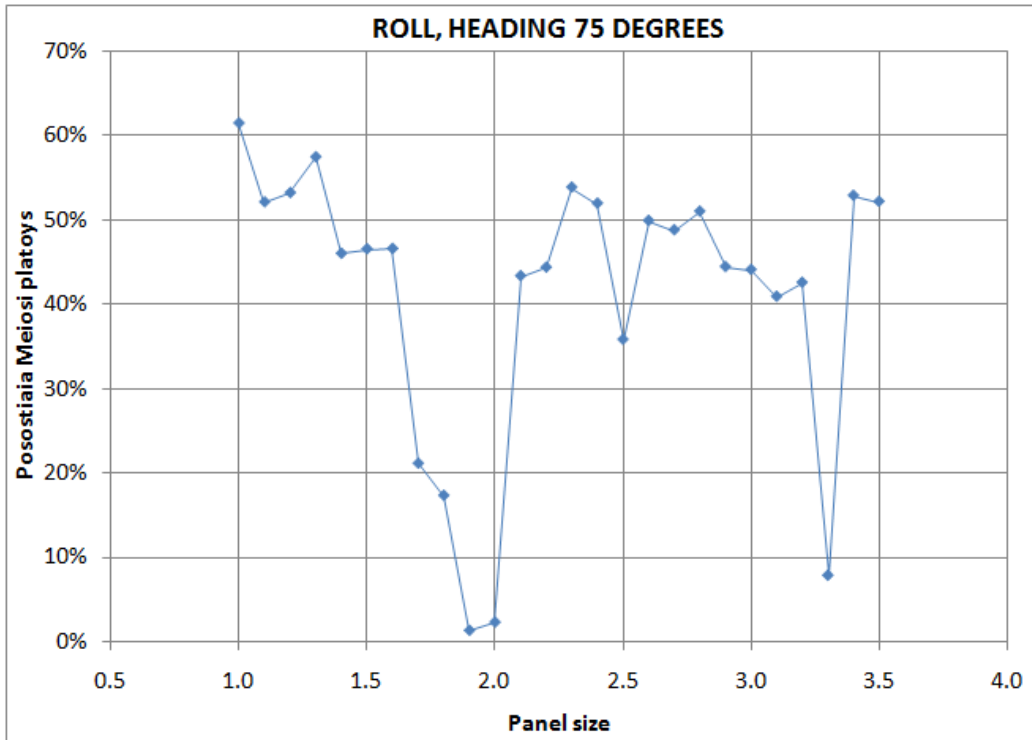
πλαισίων. Η μετέπειτα επεξεργασία των αποτελεσμάτων αποτέλεσε μια σχετικά επίπονη διεργασία μιας και ο αριθμός των προσομοιώσεων ήταν μεγάλος.

Προκειμένου αυτό να γίνει πιο κατανοητό, αρκεί κάποιος να παρατηρήσει τα ακόλουθα σχήματα. Αυτά δημιουργήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη για όλες τις τιμές της παραμέτρου "panel size" την μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό (Roll R.A.O.) ανεξάρτητα από το σε ποια γωνία αυτή εμφανίστηκε, αν και αυτό προέκυπτε πάντα στις  $75^0$  και στις  $285^0$  κάτι το οποίο επιβεβαιώνει τη συμμετρική συμπεριφορά του WaveLoad ως προς την παράμετρο της κατεύθυνσης των κυμάτων.

Στη συνέχεια φαίνεται ξεκάθαρα η συμπεριφορά του υπολογιστικού κώδικα για τα διάφορα μεγέθη πλαισίων.



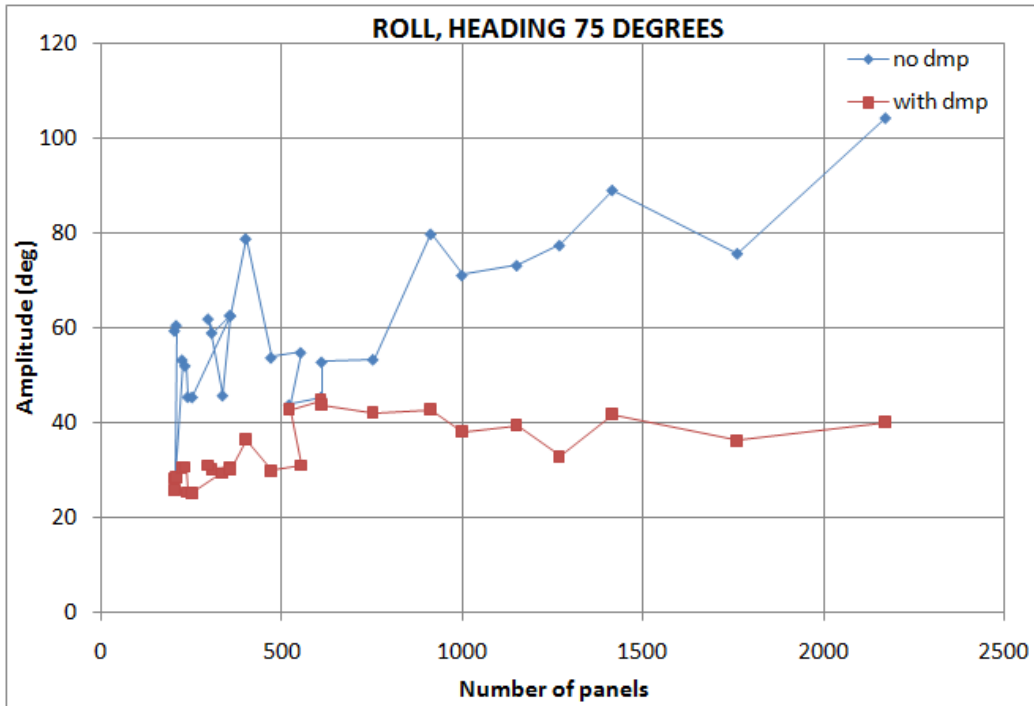
**Σχήμα 2.29 :** Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για μεγέθη πλαισίων από 1 έως 3.5



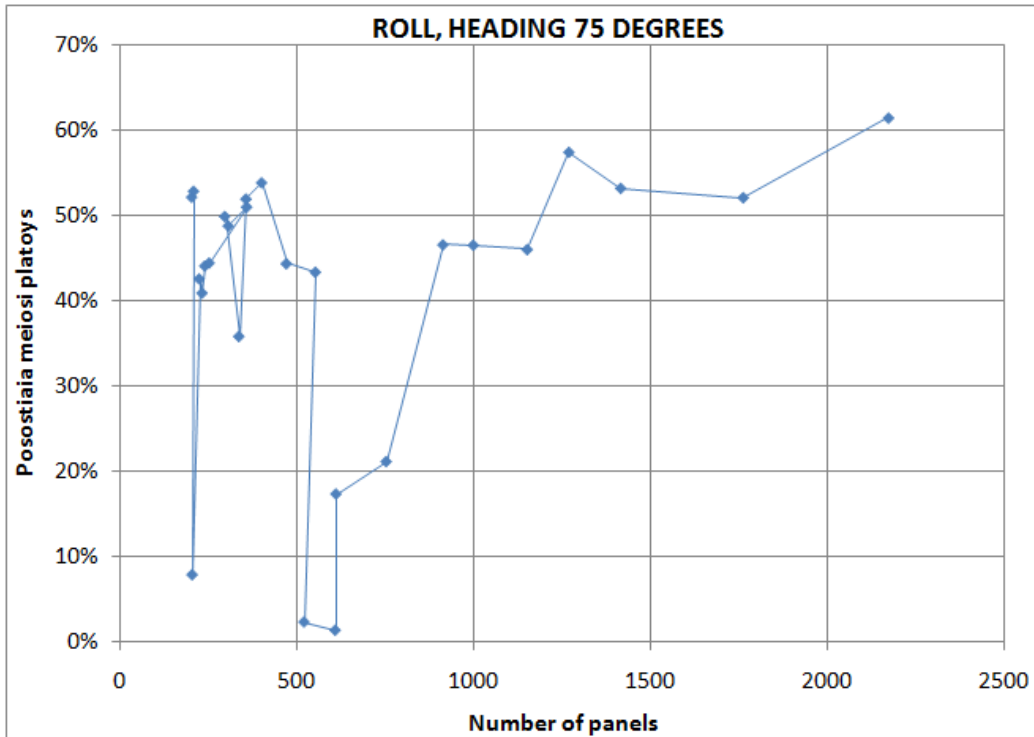
*Σχήμα 2.30 : Ποσοστιαία μείωση του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό λόγω χρήσης της απόσβεσης στους υπολογισμούς, για μεγέθη πλαισίων από 1 έως 3.5*

Από τα παραπάνω σχήματα μπορεί κάποιος να κάνει δυο σημαντικές διαπιστώσεις. Η πρώτη είναι πως ανεξάρτητα από το “panel size” η τιμή του συντελεστή απόκρισης είναι πάντοτε ιδιαίτερα υψηλή και κυρίως, παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις. Η δεύτερη διαπίστωση είναι πως για όλα τα “panel size” με εξαίρεση τα 1.9, 2 και 3.3, η απόσβεση παίζει ουσιαστικό ρόλο αφού φαίνεται να κυμαίνεται κατά μέσο όρο σε τιμές 45% – 50%. Για τα 3 μεγέθη πλαισίων που αναφέρουμε παραπάνω, ο κώδικας εμφανίζει αδικαιολόγητα περίεργη συμπεριφορά και ουσιαστικά φαίνεται να αγνοεί την απόσβεση χωρίς κάποιο προφανή λόγο.

Για λόγους πληρότητας, κατά αντιστοιχία με την μελέτη για το πρώτο πλοίο παρουσιάζουμε το παρακάτω γράφημα που δείχνει τον ρόλο της απόσβεσης συναρτήσει του αριθμού των “panels” που χρησιμοποιείται κάθε φορά στις μοντελοποιήσεις.



*Σχήμα 2.31 : Μέγιστη τιμή του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό με χρήση και χωρίς τη χρήση της απόσβεσης στους υπολογισμούς, συναρτήσει του αριθμού των πλαισίων.*

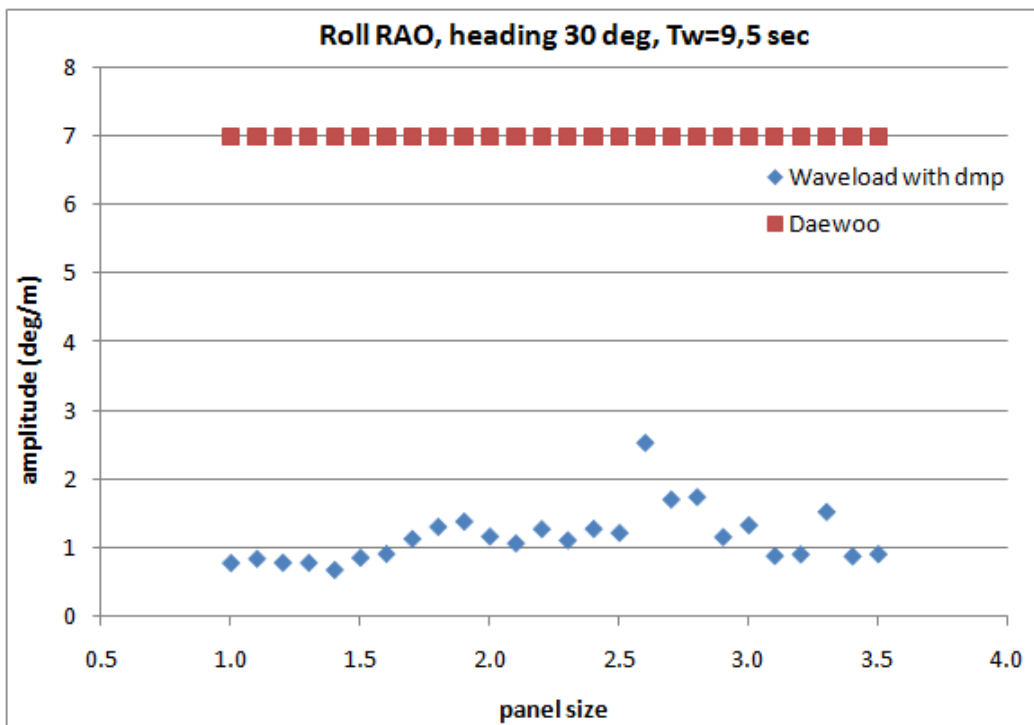


*Σχήμα 2.32 : Ποσοστιαία μείωση του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό λόγω χρήσης της απόσβεσης στους υπολογισμούς, συναρτήσει του αριθμού των πλαισίων.*

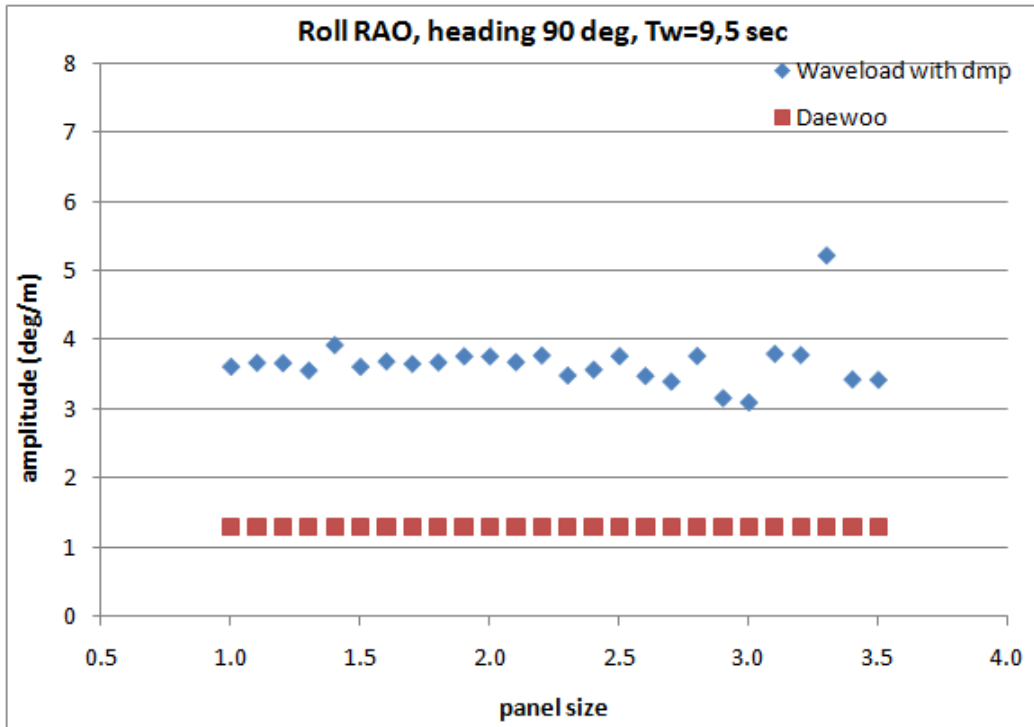


Με μια πιο προσεκτική ματιά στα δύο τελευταία σχήματα, παρατηρούμε πως υπάρχουν περιοχές όπου ευθύγραμμα τμήματα τέμνονται μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως για κάποια μεγέθη πλαισίων (panels size) η ενσωματωμένη στον κώδικα του WaveLoad, μηχανή παραγωγής πλαισίων παράγει λιγότερα τον αριθμό πλαίσια σε σχέση με κάποιο μικρότερο μέγεθος πλαισίου. Δηλαδή, ενώ μικρότερο panel size σημαίνει μεγαλύτερος αριθμός πλαισίων, αυτό είναι κάτι που δεν φαίνεται να ισχύει πάντα. Κατά αυτό τον τρόπο επιβεβαιώνονται οι αρχικές μας υποψίες, πως αυτό το πρόβλημα δεν οφείλεται στις ιδιαιτερότητας της γάστρας του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (πλοίο No1), αλλά αποτελεί ιδιομορφία-αδυναμία της μηχανής παραγωγής και κατανομής των πλαισίων πάνω στη γάστρα του πλοίου.

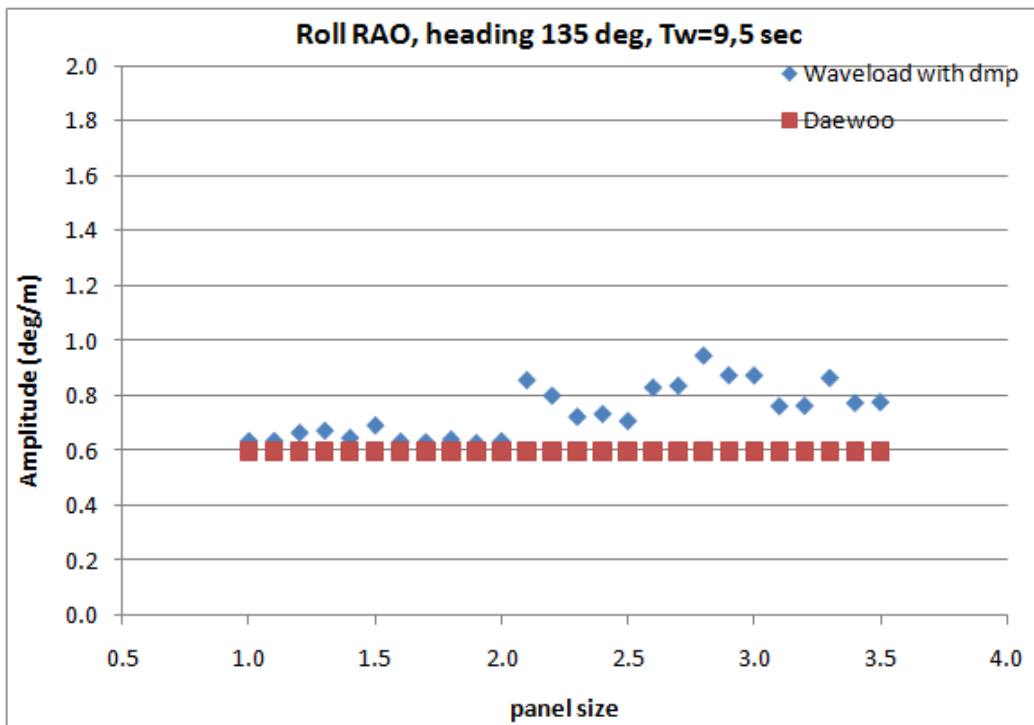
Ως τελικό στάδιο αξιολόγησης του κώδικα WaveLoad, ανατρέχουμε τώρα στο εγχειρίδιο “SEAKEEPING CALCULATION” του πλοίου και για την συχνότητα των  $0.66 \text{ rad/sec}$ , που εκτελέσαμε τις προσομοιώσεις, εξαγάγουμε τις τιμές του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό για τις γωνίες των  $35^\circ$ ,  $90^\circ$  και  $135^\circ$  και κατασκευάζουμε τα παρακάτω σχήματα.



**Σχήμα 2.33 :** Σύγκριση μεταξύ της τιμής του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό από το WaveLoad και της πραγματικής για πλάγιους-ακολουθούντες κυματισμούς.



Σχήμα 2.34 : Σύγκριση μεταξύ της τιμής του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό από το WaveLoad και της πραγματικής για πλάγιους κυματισμούς.



Σχήμα 2.35 : Σύγκριση μεταξύ της τιμής του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό από το WaveLoad και της πραγματικής για πλάγιους-μετωπικούς κυματισμούς.

Στα παραπάνω σχήματα δεν συμπεριλαμβάνονται εκείνα που αντιστοιχούν στις προσομοιώσεις για τις γωνίες των  $0^{\circ}$  και των  $180^{\circ}$  όπου αναμενόμενα ο συντελεστής απόκρισης σε διατοιχισμό είναι μηδέν τόσο από τις προσομοιώσεις όσο και από τα πειραματικά αποτελέσματα. Η μοναδική στην ουσία γωνία για την οποία φαίνεται τα αποτελέσματα να συντρέχουν για την συγκεκριμένη συχνότητα είναι αυτή των  $135^{\circ}$ . Για όλες τις άλλες γωνίες τα αποτελέσματα δυστυχώς δεν είναι ικανοποιητικά. Συμπερασματικά λοιπόν, τα αποτελέσματα που λάβαμε από τις προσομοιώσεις για το συγκεκριμένο πλοίο με τη χρήση του πακέτου λογισμικού WaveLoad δεν είναι ικανοποιητικά μιας και οι αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερες από 40%, κάτι το οποίο δεν είναι αποδεκτό για κανένα αντίστοιχο υπολογιστικό πακέτο.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώσαμε την αξιολόγηση του υπολογιστικού πακέτου WaveLoad και ολοκληρώνεται η πρώτη ενότητα της εργασίας.

### **3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΠΑΚΕΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ SWAN2 2002**

#### ***3.1 Η περιγραφή και ο τρόπος λειτουργίας του υπολογιστικού πακέτου SWAN2.***

Το πακέτο λογισμικού SWAN2 2002 είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για την ανάλυση της κίνησης του πλοίου σε νερό απείρου ή πεπερασμένου βάθους. Αυτό γίνεται με την επίλυση της ροής του υγρού στην ελεύθερη επιφάνεια, χρησιμοποιώντας την τρισδιάστατη μέθοδο “Rankine Panel”, στο πεδίο του χρόνου, κατανέμοντας τετράπλευρα πλαίσια με μη-ιδιόμορφες απλές πηγές Rankine πάνω στη γάστρα του πλοίου και στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Οι συνθήκες ελεύθερης επιφανείας που εισάγονται στο πρόγραμμα, γραμμικοποιούν τις κυματικές διαταραχές της ροής γύρω από το πλοίο. Οι ροές της ελεύθερης επιφανείας επιλύονται περί ένα σύστημα αναφοράς επί του πλοίου καθώς μια ομοιόμορφη ροή με ταχύτητα, την ταχύτητα του πλοίου  $U$ , κατευθύνεται προς τις αρνητικές τιμές του  $x$ -άξονα (αναλυτικότερη περιγραφή στο Παράρτημα Π.2 για το SWAN2). Τα κύματα σχηματίζουν τη γωνία συνάντησης  $\beta$  σε σχέση με τις θετικές τιμές του  $x$ -άξονα (Σχήμα 3.1). Το απαιτούμενο πλέγμα παράγεται από «ρουτίνες» οι οποίες είναι ενσωματωμένες στο πρόγραμμα και είναι σχεδιασμένες κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η ικανοποίηση όλων των κριτηρίων ευστάθειας. Έτσι, καμία ειδική συνθήκη δεν είναι απαραίτητο να επιβληθεί στο εγκάρσιο σύνορο και η πυκνότητα του παραγόμενου πλέγματος μειώνεται καθώς κινούμαστε στο εξωτερικό εγκάρσιο σύνορο. Χρησιμοποιείται η μέθοδος του κατοπτρικού σώματος “Double-Body” (χωρίς την ύπαρξη ελεύθερης επιφανείας) για τον υπολογισμό της μόνιμης ροής. Η μέθοδος λύνει απευθείας ως προς το δυναμικό. Σαν πρώτο βήμα επίλυσης, λύνεται το πρόβλημα του πλοίου σε κατάσταση ισορροπίας. Το πλοίο επιταχύνει από στάση σε ήρεμο νερό και σταδιακά φτάνει στην τελική του ταχύτητα. Αφού επιτραπεί στο πλοίο να κινηθεί με σταθερή ταχύτητα για κάποιο χρονικό διάστημα, επιτυγχάνεται μια κατάσταση ισορροπίας. Η λύση δίνει την μόνιμη ροή. Στο δεύτερο βήμα επιβάλλεται στο πλοίο μια ταλάντωση και η μέθοδος λύνει για τις άγνωστες εντάσεις των πηγών Rankine. Για το βήμα του χρόνου επίλυσης χρησιμοποιείται μια τέταρτης τάξης Runge-Kutta-Fehlberg μέθοδος. Το πεδίο των υπολογισμών πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια κινείται μαζί με το σώμα. Σε κάθε χρονικό βήμα, μια σειρά από σημεία εφαρμογής των συνθηκών στο κατάντι της ροής απορρίπτεται και σειρά

καινούργιων σημείων στο κατάντι της ροής με καθορισμένο δυναμικό προστίθενται κατά το ανάντι. Στο τέλος της ροής προδιαγράφεται μηδενική διαταραχή και μηδενική κλίση της ελεύθερης επιφάνειας.

Η χρήση του προγράμματος SWAN2 2002, όπως ήδη αναφέραμε, δεν απαιτεί προηγουμένως την χρήση κάποιου προγράμματος “Σχεδίασης με την Χρήση Υπολογιστή” (Computer Aided Design C.A.D.) για την παραγωγή του πλέγματος πλαισίων της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας. Όσον αφορά την γεωμετρία της γάστρας του πλοίου, αυτή εισάγεται στο πρόγραμμα υπό την μορφή σημείων νομέων οι οποίοι έχουν προηγουμένως σχεδιαστεί σε κάποιο πρόγραμμα C.A.D. Το βάθος του νερού μπορεί να είναι είτε πεπερασμένο είτε άπειρο. Η κυματική κατάσταση της θάλασσας προσομοιώνεται με τη χρήση κανονικών κυματισμών. Όσον αφορά τα αρχεία εξόδου, όλες οι πληροφορίες που έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του panel-mesh, με τα βασικά υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου, και αδρανειακά χαρακτηριστικά, συμπεριλαμβάνονται σε αυτά. Οι υποστηριζόμενοι τύποι πλοίων είναι μονόγαστρα πλοία (monohulls), δίγαστρα πλοία (catamarans), τρίγαστρα πλοία (trimarans) και πλοία επιφανείας (SES). Ιδιαίτερα, όσον αφορά τα μονόγαστρα πλοία αυτά υποτίθεται ότι είναι συμμετρικά ως προς τον διαμήκη άξονα τους. Στα πλαίσια των δυνατοτήτων του συγκεκριμένου πακέτου λογισμικού ο κώδικας μπορεί:

Να κάνει αναλυτική πρόβλεψη κινήσεων:

- Στους έξι βαθμούς ελευθερίας (οριζόντια ταλάντωση, sway, κατακόρυφη ταλάντωση, διατοιχισμό, προνευτασμό, περιστροφική περί κατακόρυφο άξονα) και σε διαφορετικές θέσεις επί του πλοίου,
- Χωρίς περιορισμούς για την κατεύθυνση του πλοίου,
- Για κανονικούς μόνο κυματισμούς και οποιαδήποτε κατάσταση θάλασσας,
- Χωρίς περιορισμούς όσον αφορά το βάθος του νερού (ρηχό και βαθύ νερό),
- Με δυνατότητα να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις από την ύπαρξη διαφόρων διατάξεων του πλοίου που συντελούν στην απόσβεση των κινήσεων.

Να κάνει υπολογισμό φορτίων λόγω περιβάλλοντος:

- Υπολογισμό φορτίων όπως διατμητικών δυνάμεων, καμπτικών και στρεπτικών ροπών,
- Υπολογισμό πρόσθετης αντίστασης σε κυματισμούς,
- Υπολογισμό συντελεστών απόσβεσης και για τις έξι κινήσεις του πλοίου.

Να κάνει μοντελοποίηση με τετράπλευρα πλαίσια :

- Συμπεριλαμβάνει αυτόματη δημιουργία πλαισίων για απλοποιημένη εισαγωγή γεωμετρίας γάστρας με δυνατότητα έμμεσης παρέμβασης από το χρήστη όσον αφορά το μέγεθος αυτών και τον λόγο των πλευρών τους,
- Διαφόρων τύπων βολβοειδών σχημάτων συμπεριλαμβανομένων βολβοειδών πρωρών.

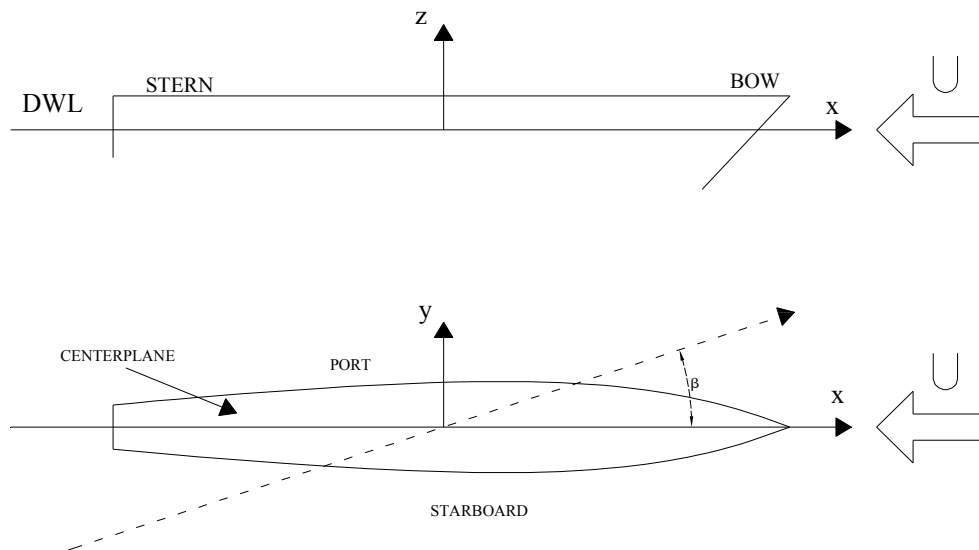
Επιπλέον με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος απεικόνισης παρέχεται η δυνατότητα για μετέπειτα επεξεργασία:

- Δυνατότητα ανασκόπησης των αποτελεσμάτων, συμπεριλαμβανομένων αδιάστατων συντελεστών απόκρισης (RAO), πρόσθετης μάζας, συντελεστών απόσβεσης και δυνάμεων δημιουργίας κυματισμών,
- Απεικόνιση της γεωμετρίας του σκάφους και των αποτελεσμάτων σε δυσδιάστατα ή τρισδιάστατα σχήματα,
- Απεικόνιση καμπύλων των αποτελεσμάτων για τις διάφορες κινήσεις και φορτίων περιβάλλοντος,
- Απεικόνιση με κινούμενη εικόνα της κατανομής της πίεσης και των κινήσεων του πλοίου.

Στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας θα κάνουμε χρήση του παραπάνω λογισμικού για το υπό μελέτη πλοίο, του οποίου τα χαρακτηριστικά γνωρίζουμε και για το οποίο έχει ενδιαφέρον να δούμε τα αποτελέσματα τα οποία το συγκεκριμένο πρόγραμμα παράγει. Για να κάνουμε αυτό, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τα δύο απαραίτητα από τα τρία συνολικά αρχεία τα οποία το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ως

είσοδο προκειμένου να λειτουργήσει. Αυτά είναι τα αρχεία με κατάληξεις \*.inp και \*.pln. Το τρίτο αρχείο (που έχει την κατάληξη \*.pms) και το οποίο περιέχει πληροφορίες για την κατανομή σημειακών μαζών, απαιτείται μόνο όταν θέλουμε να εκτελέσουμε υπολογισμούς αντοχής για τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου.

Το αρχείο \*.pln (Hull Offsets) είναι αυτό που περιέχει την γεωμετρία της γάστρας του πλοίου υπό την μορφή σημείων νομέων. Οι συντεταγμένες της γεωμετρίας της γάστρας καθορίζονται ως προς το σύστημα αξόνων του παρακάτω σχήματος.



**Σχήμα 3.1 :** Ορισμός θετικής φοράς αξόνων και συστήματος αναφοράς.

Οι θετικές δηλαδή τιμές του  $x$ -άξονα είναι προς την πλώρη του πλοίου, οι θετικές τιμές του  $y$ -άξονα είναι προς τα αριστερά και του  $z$ -άξονα είναι προς τα πάνω.

Το αρχείο \*.inp, το οποίο χαρακτηρίζεται από τους δημιουργούς του SWAN ως “Job Control Parameters”, είναι το αρχείο το οποίο ουσιαστικά καθορίζει τις παραμέτρους τις οποίες θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε κατά τη διαδικασία προσομοίωσης των κινήσεων του πλοίου. Αυτό το αρχείο, κατά κύριο λόγο περιέχει γεωμετρικά στοιχεία του πλοίου όπως  $L_{pp}(m)$ ,  $B(m)$ ,  $T(m)$ , το εκτόπισμα του πλοίου  $\Delta(tons)$ , στοιχεία που αφορούν τις συνθήκες πλεύσης του πλοίου όπως  $V(m/sec)$ , ύψος κύματος  $H(m)$ , περίοδος κύματος  $T(sec)$ , γωνία και κατεύθυνση κυματισμού σε σχέση με το διαμήκη άξονα του πλοίου καθώς και τους ενεργούς για την προσομοίωση βαθμούς ελευθερίας κίνησης του πλοίου.

### ***3.2 Συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε υπό μελέτη πλοίου.***

Έχοντας κάνει μια γενική περιγραφή των δυνατοτήτων του πακέτου λογισμικού στην συνέχεια κάνουμε μια συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης προκειμένου να δώσουμε στον αναγνώστη μια πρώτη εικόνα αυτής της διαδικασίας.

Ο χρήστης με την έναρξη του υπολογιστικού πακέτου, έρχεται αμέσως αντιμέτωπος με μια σειρά από μενού-καρτέλες από όπου μετά από μια βηματική διαδικασία εισαγωγής δεδομένων δημιουργεί το αρχείο \*.inp που περιέχει όλες τις πληροφορίες για τη διαδικασία εκτέλεσης της προσομοίωσης (αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας παρέχεται στην ενότητα Π4 του Παραρτήματος). Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία, σε πρώτη φάση ορίζεται ο τύπος του πλοίου από τις διαθέσιμες επιλογές και ορίζεται παράλληλα και το μέγεθος της εικονικής ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας. Στο επόμενο βήμα, ορίζεται από τον χρήστη ο αριθμός των νομέων του πλοίου, ο αριθμός των κόμβων ανά νομέα, το βύθισμα του πλοίου και η διαγωγή του πλοίου αν υπάρχει. Μετέπειτα ορίζεται το βάθος του νερού που θα επιχειρεί το πλοίο και αποδίδεται η ονοματολογία στα αρχεία εξόδου. Στη συνέχεια γίνεται επιλογή των βαθμών ελευθερίας κίνησης που ο χρήστης επιθυμεί να είναι ενεργοί στις προσομοιώσεις. Τέλος ορίζεται η κατάσταση της θάλασσας και ο χρόνος επίλυσης της προσομοίωσης που ορίσαμε.

### ***3.3 Εφαρμογή του προγράμματος για το υπό μελέτη πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.***

Στα πλαίσια της παρούσης δουλειάς, επιλέχθηκε να γίνει η χρήση ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χαρακτηριστικά αυτά που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:



|  |             |
|--|-------------|
| <b>Μήκος μεταξύ καθέτων (L<sub>BP</sub>)</b>       | 288.87 m    |
| <b>Πλάτος (B)</b>                                  | 42.80 m     |
| <b>Κοίλο (D)</b>                                   | 24.40 m     |
| <b>Μέσο βύθισμα (T<sub>d</sub>)</b>                | 14.00 m     |
| <b>Εκτόπισμα (Δ)</b>                               | 113956 tons |
| <b>Ιδιοπερίοδος σε διατοιχισμό (T<sub>0</sub>)</b> | 30.26 sec   |
| <b>Ταχύτητα υπηρεσίας (V)</b>                      | 20 kn       |

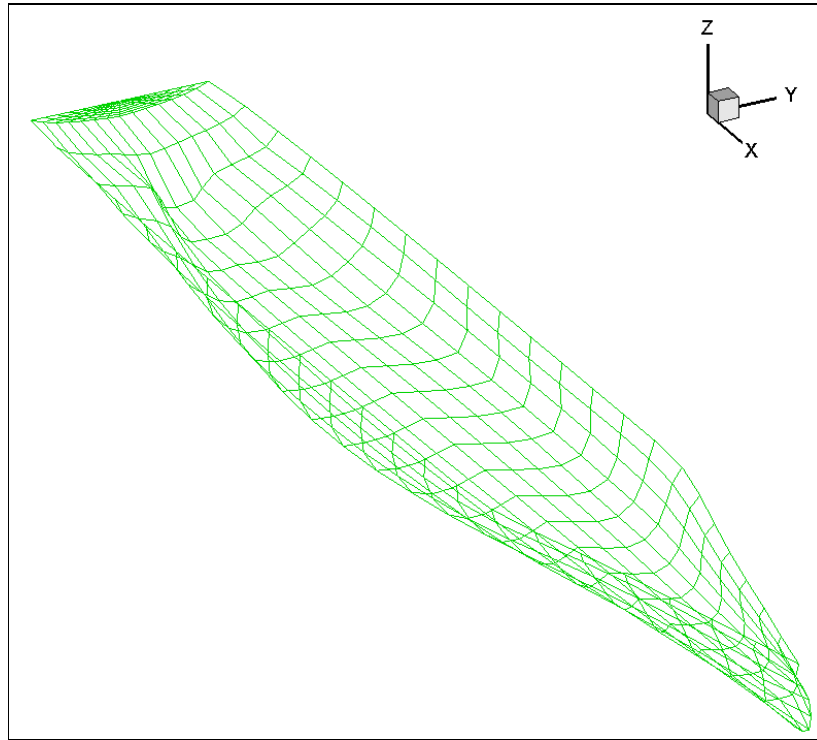
***Πίνακας 3.1 :** Χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου*

Προκειμένου να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε το κατά πόσο ο υπολογιστικός κώδικας αντιλαμβάνεται το φαινόμενο της παραμετρικής αστάθειας σαν φαινόμενο και όχι σαν μαθηματική ιδιαιτερότητα-σφάλμα επιλέξαμε αρχικά ως κριτήριο αξιολόγησης, να μοντελοποιήσουμε την επιφάνεια της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας με τους παρακάτω διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων.

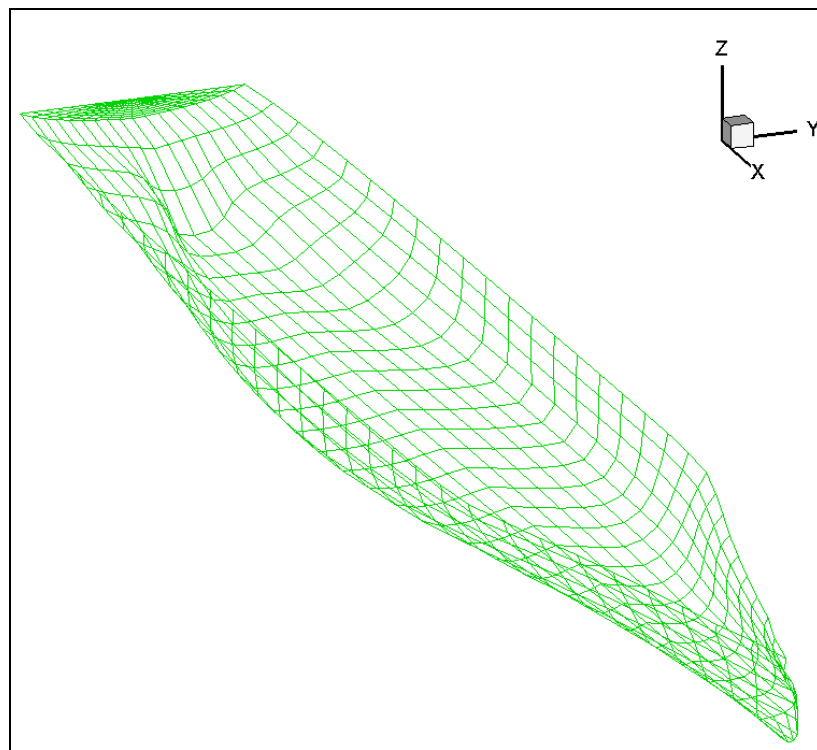
| <b>Αριθμός πλαισίων γάστρας</b> | <b>Συνολικός αριθμός πλαισίων (γάστρα + ελεύθερη επιφάνεια)</b> |
|---------------------------------|---|
| 216                             | 1593  |
| 341                             | 2402  |
| 385                             | 2961  |
| Περιορισμός SWAN (-)            | Περιορισμός SWAN (3000)   |

***Πίνακας 3.2 :** Αριθμός πλαισίων των τριών διαφορετικών μοντελοποιήσεων γάστρας και ελεύθερης επιφάνειας*

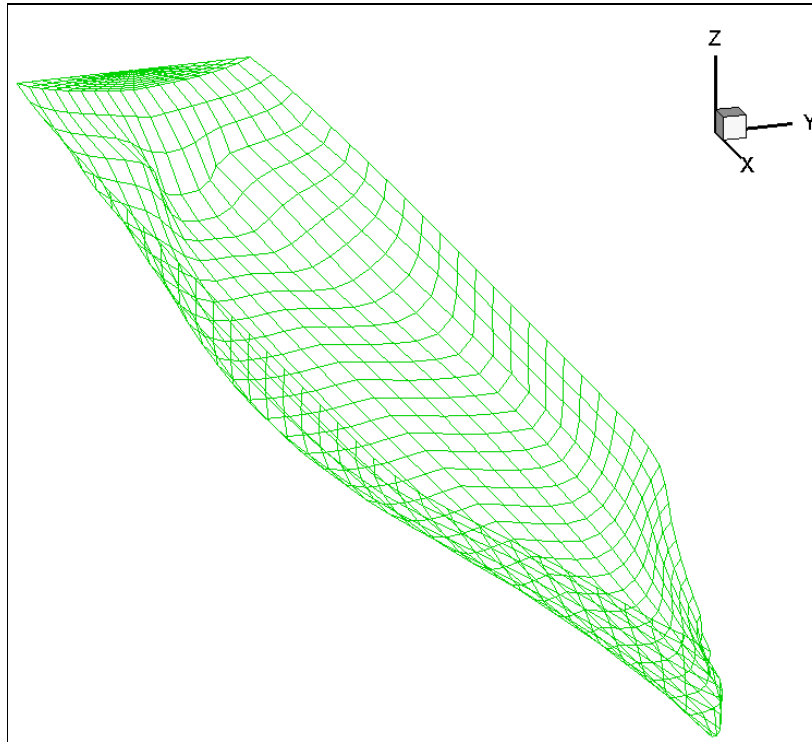
Για να γίνει πιο κατανοητή η διαφορά που υπάρχει ανάμεσα στις μοντελοποιήσεις με τους διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων γάστρας, παραθέτουμε στη συνέχεια τα τρία παρακάτω σχήματα που αντιστοιχούν στις παραπάνω περιπτώσεις αριθμών πλαισίων γάστρας αντίστοιχα.



*Σχήμα 3.2 : Γάστρα μοντελοποιημένη με 216 πλαίσια.*

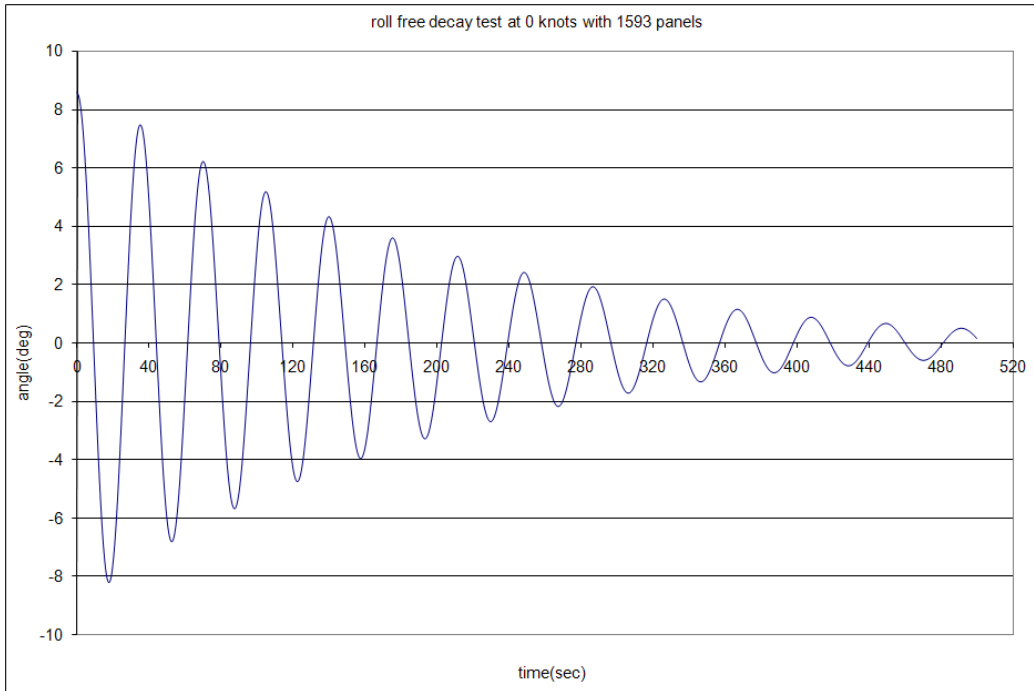


*Σχήμα 3.3 : Γάστρα μοντελοποιημένη με 341 πλαίσια.*

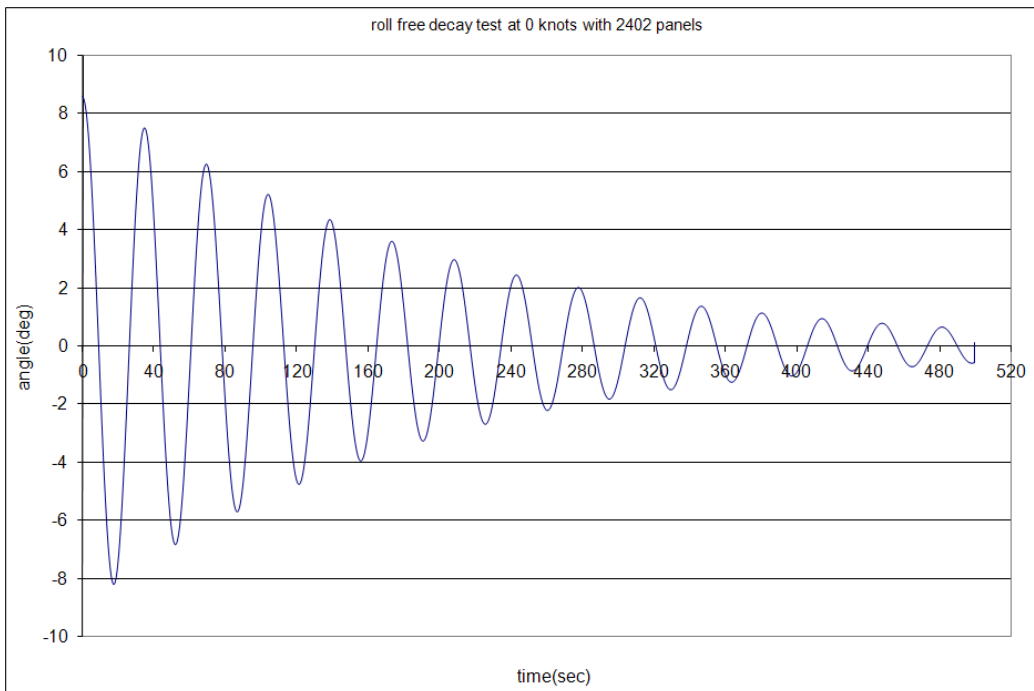


**Σχήμα 3.4 :** *Γάστρα μοντελοποιημένη με 385 πλαίσια.*

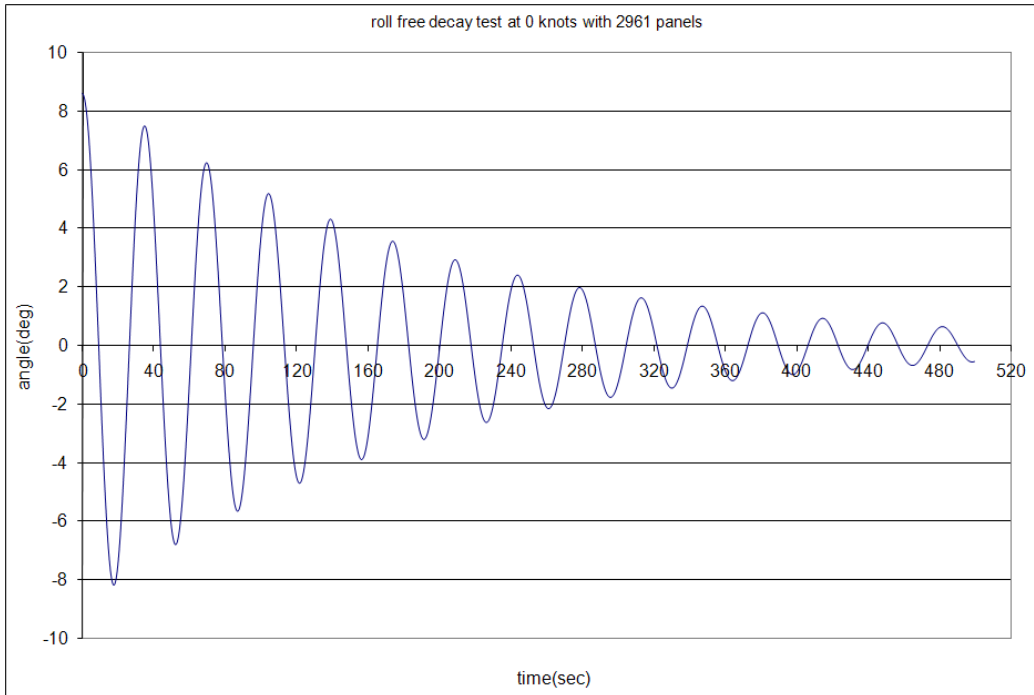
Ακολουθώντας την διαδικασία μοντελοποίησης που περιγράψαμε συνοπτικά παραπάνω (και πολύ πιο αναλυτικά στο παράρτημα), έχουμε πλέον την δυνατότητα να προχωρήσουμε στις εκτελέσεις των διαφόρων προσομοιώσεων. Αρχικά εκτελέσαμε κατάλληλες δοκιμές προσομοιώσεων, προκειμένου να κάνουμε τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου σε διατοιχισμό του πλοίου και για τις 3 παραπάνω μοντελοποιήσεις. Προκειμένου να είμαστε βέβαιοι για την, στα πλαίσια αξιοπιστίας του εκάστοτε υπολογιστικού πακέτου και στη συγκεκριμένη περίπτωση του SWAN2, ορθότητα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, επιλέξαμε αυτές να γίνονται για διάρκεια χρόνου επίλυσης ίση με 15 φορές την πραγματική ιδιοσυχνότητα που αναφέρει ο κατασκευαστής. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε οι προσομοιώσεις σε αυτό το στάδιο να γίνονται για χρόνο  $t = 15 \cdot 30.26 = 453,9 \rightarrow 500 \text{ sec}$ , δηλαδή 500 δευτερολέπτων. Τα αντίστοιχα σχήματα από αυτές τις προσομοιώσεις παρατίθενται στην επόμενη σελίδα.



**Σχήμα 3.5 :** Εκτέλεση προσομοίωσης ελεύθερου διατοιχισμού για μοντελοποίηση με συνολικό αριθμό πλαισίων 1593 (πλαίσια γάστρας + πλαίσια ελεύθερης επιφάνειας) .



**Σχήμα 3.6 :** Εκτέλεση προσομοίωσης ελεύθερου διατοιχισμού για μοντελοποίηση με συνολικό αριθμό πλαισίων 2402 (πλαίσια γάστρας + πλαίσια ελεύθερης επιφάνειας) .



**Σχήμα 3.7 :** Εκτέλεση προσομοίωσης ελεύθερου διατοιχισμού για μοντελοποίηση με συνολικό αριθμό πλαισίων 2961 (πλαίσια γάστρας + πλαίσια ελεύθερης επιφάνειας).

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει άμεσα η ιδιοπερίοδος σε διατοιχισμό, αρκεί να κάνουμε τον υπολογισμό του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών της καμπύλης απόκρισης του πλοίου, οπότε και θα έχουμε μια πλήρη ταλάντωση σε διατοιχισμό. Αυτή ύστερα από την απαραίτητη διεργασία, προκύπτει ότι είναι κάθε φορά:

| Συνολικός αριθμός πλαισίων | Αριθμός πλαισίων γάστρας | Ιδιοπερίοδος σε διατοιχισμό |
|----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1593                       | 216                      | 40,95                       |
| 2402                       | 341                      | 33,95                       |
| 2961                       | 385                      | 33,89                       |

**Πίνακας 3.3 :** Αποτελέσματα υπολογισμού ιδιοπεριόδου σε διατοιχισμό

Εν συνεχεία, με την βοήθεια των γραφημάτων της απόκρισης σε ελεύθερο διατοιχισμό μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του συντελεστής απόσβεσης σε διατοιχισμό. Ως γνωστόν, αυτός μπορεί να υπολογιστεί με λύση της ακόλουθης διαφορικής εξίσωσης, η οποία περιγράφει την κίνηση διατοιχισμού που εκτελεί ένα πλοίο όταν βρίσκεται σε ήρεμο νερό με μηδενική ταχύτητα και αφήνεται από αρχική γωνία  $A_0$ . Η κίνηση περιγράφεται από την γραμμική εξίσωση διατοιχισμού η οποία στην αδιάστατη μορφή της είναι  $z'' + 2\zeta z' + z = 0$  με αρχικές

συνθήκες  $z = A_0, z' = 0, \tau = 0$ . Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι  $z = A_0 e^{-\zeta \tau} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \tau - \theta)$ , όπου  $\theta$  είναι η διαφορά φάσης της απόκρισης. Μετά

από μία ταλάντωση το πλάτος της απόκρισης είναι ίσο με  $A_1 = A_0 e^{-\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$  και από αυτή προκύπτει ότι ο αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης είναι ίσος με  $\zeta = -\frac{1}{2\pi} \ln \frac{A_1}{A_0}$ . Την παραπάνω διαδικασία την εφαρμόζουμε για τις έξι τελευταίες

διαδοχικές κορυφές κάθε καμπύλης, υπολογίζουμε πέντε διαφορετικές τιμές του  $\zeta$  και στην συνέχεια παίρνουμε τον μέσο όρο αυτών. Χρησιμοποιώντας λοιπόν την προηγούμενη σχέση γίνεται ο υπολογισμός του μέσου αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης.

Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών φαίνονται παρακάτω:

| Συνολικός αριθμός πλαισίων | Αριθμός πλαισίων γάστρας | Αδιάστατος συντελεστής απόσβεσης |
|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 1593                       | 216                      | 0,042400                         |
| 2402                       | 341                      | 0,029982                         |
| 2961                       | 385                      | 0,030125                         |

**Πίνακας 3.4 :** Αποτελέσματα υπολογισμού του αδιάστατου συντελεστή απόσβεσης

Είναι άμεσα ορατό από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στους δύο προηγούμενους πίνακες ότι, ο αριθμός πλαισίων της γάστρας και κατά επέκταση ο συνολικός αριθμός πλαισίων που χρησιμοποιείται κατά την μοντελοποίηση, διαφοροποιεί τόσο την ιδιοπερίοδο που προκύπτει από τις προσομοιώσεις όσο και τον συντελεστή απόσβεσης που υπολογίζεται με βάση το πλάτος της κίνησης του πλοίου. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε πως αντίστοιχοι υπολογισμοί για τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου διατοιχισμού έγιναν και για ταχύτητα σκάφους ίση με 14 κόμβους και έγινε αμέσως ορατή η σημαντική αύξηση του συντελεστή απόσβεσης και για τις 3 διαφορετικές μοντελοποιήσεις όπως φαίνεται και από τα σχήματα που παρατίθενται στο ηλεκτρονικό υλικό που συνοδεύει την εργασία. Αυτή η αύξηση για την ταχύτητα των 14 κόμβων είχε εμφανιστεί σε αντίστοιχους υπολογισμούς που έγιναν για το ίδιο πλοίο από τους Spyrou K.J. et al [9]. Επιλέχθηκε για το λόγο αυτό οι υπολογισμοί του ελάχιστου απαιτούμενου ύψους κύματος να γίνουν για μικρή ταχύτητα πλοίου ίση με 2 κόμβους, προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε κατά το δυνατόν την αύξηση και κατ' επέκταση την επίδραση της απόσβεσης λόγω της πρόσω

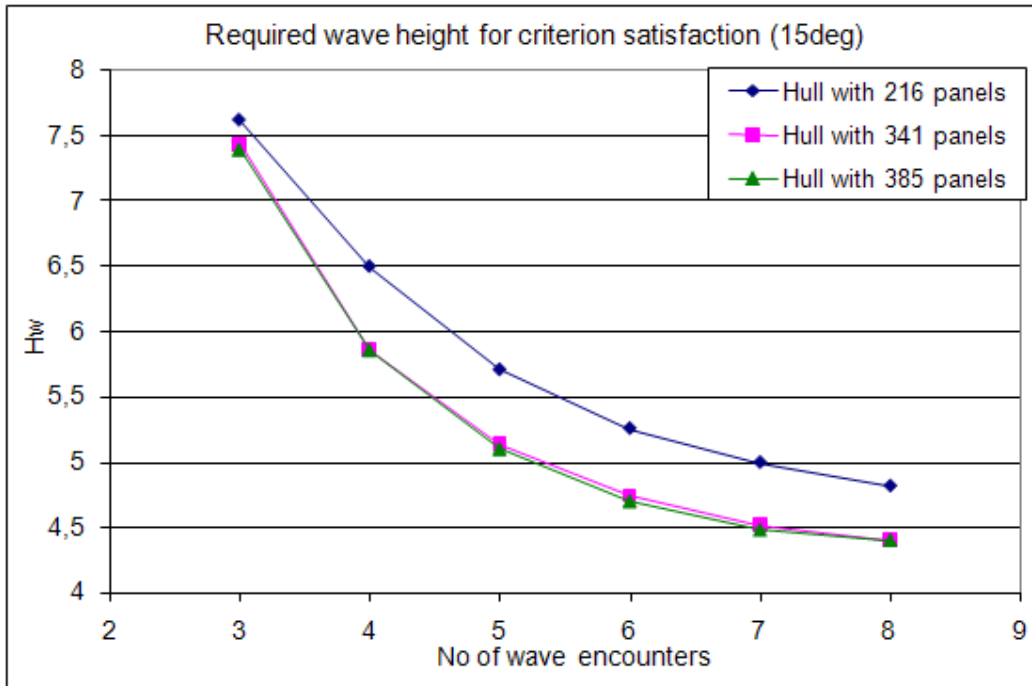
ταχύτητας του σκάφους. Στο σημείο αυτό είναι κρίσιμο να αναφέρουμε πως όλες οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για περίοδο κυματισμών που προκύπτει βασισμένη στην από τον σχεδιαστή υπολογισμένη ιδιοπερίοδο διατοιχισμού  $T_0 = 30.26\text{sec}$  και όχι για την ιδιοπερίοδο που προκύπτει από τους υπολογισμούς με βάση τα σχήματα 3.5 έως 3.7. Από την γνωστή σχέση η οποία πρέπει να ισχύει για να έχουμε κύριο παραμετρικό συντονισμό  $a^2 = \frac{4\omega_0^2}{\omega_e^2}$ , για  $a = 1$  προκύπτει η περίοδος συνάντησης  $T_e$ .

Αυτή τη θεωρούμε στη συνέχεια ως  $T_e \equiv T_0'$  και την αντικαθιστούμε στην ακόλουθη σχέση  $\omega_e' = \omega_0' + \frac{\omega_0'^2}{g} U \cos \beta$  με  $\beta = 180$  τη γωνία συνάντησης πλοίου-κυματισμών

και προκύπτει μετά από τους απαραίτητους υπολογισμούς  $T_e' = 15.76\text{sec} \equiv T_w$ . Υπολογίσαμε δηλαδή πως η απαιτούμενη περίοδος του κυματισμού, προκειμένου το πλοίο να υποστεί κύριο παραμετρικό συντονισμό, πρέπει να είναι ίση με 15.76 sec στην περίπτωση που αυτό κινείται με τη χαμηλή ταχύτητα των 2 κόμβων και συναντά μετωπικούς κυματισμούς. Μπορούμε λοιπόν τώρα να προχωρήσουμε στην ανάλυση μας η οποία σαν πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον υπολογισμό του απαιτούμενου ύψους κύματος, για αρχική γωνία διέγερσης σε διατοιχισμό ίση με  $5^0$ , και έχει ως κριτήριο την αύξηση του πλάτους κίνησης του πλοίου κατά ένα συντελεστή 3 σε σχέση με τη διέγερση έως ότου δηλαδή το πλάτος της απόκρισης του διατοιχισμού γίνει ίσο με  $15^0$ . Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για συνάντηση του πλοίου με διαφορετικούς αριθμούς συνεχόμενων κυμάτων. Μετά από την ανάλυση αυτή, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

|                            | Αριθμός πλαισίων γάστρας    | 216                         | 341                         | 385                         |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                            | Συνολικός αριθμός πλαισίων  | 1593                        | 2402                        | 2961                        |
| ταλαντώσεις σε διατοιχισμό | αριθμός συνεχόμενων κυμάτων | Απαιτούμενο ύψος κυματισμών | Απαιτούμενο ύψος κυματισμών | Απαιτούμενο ύψος κυματισμών |
| 1,5                        | 3                           | 7,62                        | 7,44                        | 7,4                         |
| 2                          | 4                           | 6,5                         | 5,86                        | 5,86                        |
| 2,5                        | 5                           | 5,71                        | 5,14                        | 5,1                         |
| 3                          | 6                           | 5,26                        | 4,74                        | 4,7                         |
| 3,5                        | 7                           | 5                           | 4,52                        | 4,48                        |
| 4                          | 8                           | 4,82                        | 4,40                        | 4,4                         |

**Πίνακας 3.5 :** Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για τους διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων.



**Σχήμα 3.8 :** Σύγκριση των αποτελεσμάτων του απαιτούμενου ύψους κύματος για τους διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων.

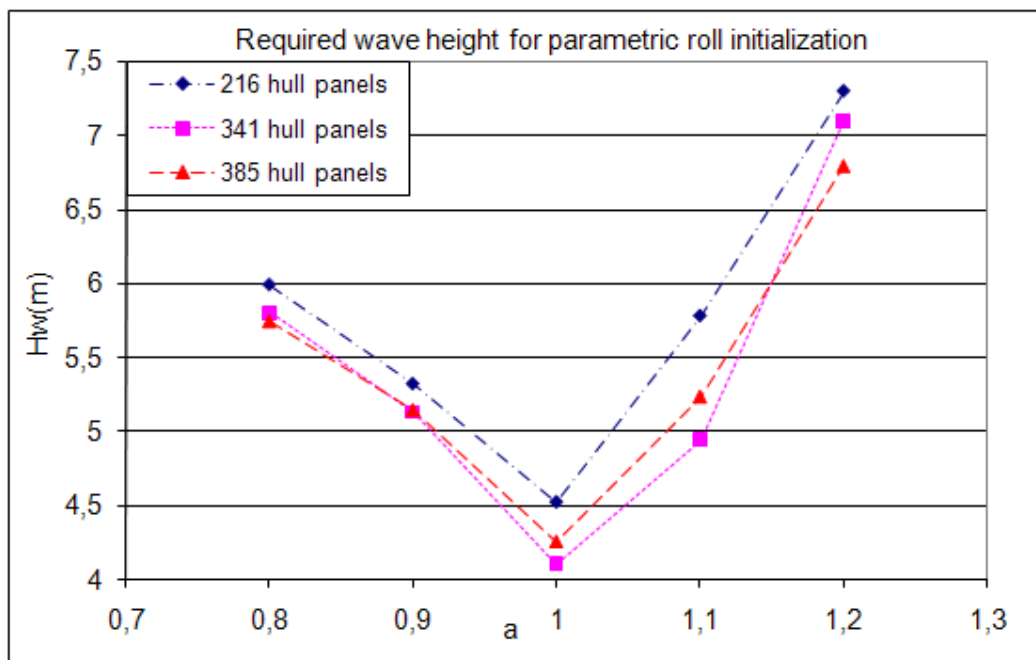
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε πώς ο κώδικας SWAN2 παρουσιάζει σχετικά μια σταθερή τάση εμφανίζοντας όμως ελαφριά απόκλιση ως προς το απαιτούμενο ύψος κύματος για τους διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων γάστρας, γεγονός που υποδηλώνει την ιδιαίτερη ευαισθησία του κώδικα ως προς τον αριθμό των πλαισίων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Σε συνέχεια της μελέτης μας και προκειμένου να βεβαιωθούμε για την αξιόπιστη συμπεριφορά του κώδικα ως προς τα αποτελέσματα σε παραμετρικό διατοιχισμό εκτελέσαμε, για τις τρεις μοντελοποιήσεις, υπολογισμούς προσδιορισμού του ελαχίστου απαιτούμενου ύψους κύματος σε συνάφεια με την εργασία των Spyrou K.J. et al [10], για τις οποίες το πλοίο εκτελούσε την κίνηση του διατοιχισμού λόγω παραμετρικής αστάθειας στο βάθος του χρόνου για τις τιμές της παραμέτρου  $a = \frac{2\omega_0}{\omega_e}$  ίσες με 0.8, 0.9, 1, 1.1 και

1.2, οι οποίες και αντιστοιχούν σε περιόδους κυματισμών, αυτούς που φαίνονται στον ακόλουθο συγκεντρωτικό πίνακα. Είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να τονίσουμε πως η διερεύνηση ως προς το ύψος του κύματος έχει γίνει με ακρίβεια 2 εκατοστών προκειμένου η ανάλυση μας να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη.



|     | Αριθμός πλαισίων γάστρας | 216                                  | 341                                  | 385                                  |
|-----|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| a   | Περίοδος κυματισμών      | Ελάχιστο απαιτούμενο ύψος κυματισμών | Ελάχιστο απαιτούμενο ύψος κυματισμών | Ελάχιστο απαιτούμενο ύψος κυματισμών |
| 0.8 | 14.14                    | 5.99                                 | 5.80                                 | 5.75                                 |
| 0.9 | 14.98                    | 5.32                                 | 5.13                                 | 5.15                                 |
| 1   | 15.76                    | 4.52                                 | 4.10                                 | 4.26                                 |
| 1.1 | 16.50                    | 5.78                                 | 4.94                                 | 5.24                                 |
| 1.2 | 17.21                    | 7.3                                  | 7.10                                 | 6.8                                  |

**Πίνακας 3.6 :** Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για τους διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων.



**Σχήμα 3.9 :** Σύγκριση των αποτελεσμάτων του ελαχίστου απαιτούμενου ύψους κύματος για τους διαφορετικούς αριθμούς πλαισίων και για διάφορες τιμές του λόγου a.

Από τον παραπάνω πίνακα είναι προφανές πως ο υπολογιστικός κώδικας αποκρίνεται σε παραμετρικό διατοιχισμό και για τιμές περιόδων κυματισμών που αποκλίνουν σημαντικά από αυτή που προκαλεί κύριο παραμετρικό διατοιχισμό ( $a = 0.8, 0.9, 1.1, 1.2 \neq 1$ ). Κάτι τέτοιο σημαίνει πως το φαινόμενο της παραμετρικής αστάθειας σε διατοιχισμό γίνεται πράγματι αντιληπτό σαν φαινόμενο αφού αναπαράγεται από τον κώδικα SWAN κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που προβλέπεται από την θεωρία. Αξίζει να σημειωθεί πως ο κώδικας SWAN2 2002,

είναι κατά πάσα πιθανότητα ο πρώτος κώδικας ο οποίος αντιλαμβάνεται το φαινόμενο του παραμετρικού διατοιχισμού.

#### **4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Αντικειμενικός στόχος της εργασίας ήταν η αξιολόγηση της συμπεριφοράς δύο υπολογιστικών πακέτων προβλέψεων κινήσεων πλοίων, με σκοπό να διαπιστώσουμε το κατά πόσο αυτά εμφανίζουν σταθερή συμπεριφορά όσον αφορά παραμέτρους στους υπολογισμούς, όπως είναι η απόσβεση (WaveLoad 2006A) καθώς και την ικανότητα πρόβλεψης εξεζητημένων φαινομένων-κινήσεων όπως αυτή του παραμετρικού διατοιχισμού (SWAN2 2002). Από την εμπειρία που αποκτήσαμε κατά την ενασχόληση μας με αυτά τα πακέτα καταλήξαμε στις παρακάτω διαπιστώσεις.

##### WaveLoad 2006A

Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά του πακέτου ήταν μέτρια. Ειδικότερα έχουμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις :

- Όταν χρησιμοποιείται η απόσβεση, ο βαθμός διακριτοποίησης του πεδίου των συχνοτήτων για το οποίο κάνουμε υπολογισμούς, δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο στα εξεγόμενα αποτελέσματα του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό.
- Η συμπεριφορά του πακέτου λογισμικού με χρήση της απόσβεσης εμφανίζει αρκετά πιο σταθερή συμπεριφορά από όταν η απόσβεση δεν χρησιμοποιείται ακόμα και με σημαντική αλλαγή του συνολικού αριθμού χρησιμοποιούμενων πλαισίων στη μοντελοποίηση.
- Παραμένει απροσδιόριστη η ερμηνεία του όρου "panel size" μιας και δεν δίνεται καμία εξήγηση του όρου στο συνοδευτικό ηλεκτρονικό υλικό του πακέτου. Αυτό είναι ακόμη πιο επιβαρυντικό αν αναλογιστεί κανείς ότι ο όρος δεν απαντάται συχνά (ίσως και καθόλου) σε άλλα πακέτα λογισμικού της ίδιας κατηγορίας.
- Στα αρνητικά του πακέτου λογισμικού συγκαταλέγεται ο χρόνος και η διαδικασία που απαιτείται για την συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών για τη δημιουργία του αρχείου απόσβεσης (\*.dmp), ιδιαίτερα αν οι γραμμές του εκάστοτε υπό μελέτη πλοίου δεν υπάρχουν σε ηλεκτρονική μορφή.
- Όσον αφορά την μοντελοποίηση του πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τα αποτελέσματα, που λάβαμε από τις προσομοιώσεις

για μεγάλο αριθμό πλαισίων μοντελοποίησης, είναι σχετικά κοντά στα πειραματικά αποτελέσματα.

- Στην περίπτωση μοντελοποίησης του Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου υπάρχει σημαντικά μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις τιμές του συντελεστή απόκρισης σε διατοιχισμό (Roll R.A.O.) από τις προσομοιώσεις και από τα αποτελέσματα του κατασκευαστή του πλοίου.
- Η ιξώδης απόσβεση σε διατοιχισμό εμφανίζεται να παίζει ουσιαστικό ρόλο μιας και μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του πλάτους σε διατοιχισμό μέχρι της τάξεως του 78%.

### SWAN2 2002

Σε γενικές γραμμές η συμπεριφορά του πακέτου ήταν ικανοποιητική. Ειδικότερα έχουμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Παρουσιάστηκε ιδιαίτερα σταθερή η συμπεριφορά του κώδικα, με μικρές αποκλίσεις ακόμη και για μεγάλη διαφοροποίηση του αριθμού των πλαισίων μοντελοποίησης της γάστρας του πλοίου.
- Η αύξηση της ταχύτητας στις προσομοιώσεις, οδήγησε σε αύξηση και της απόσβεσης σε διατοιχισμό όπως άλλωστε προβλέπεται και από την αντίστοιχη θεωρία.
- Το πακέτο αντιλαμβάνεται τον παραμετρικό διατοιχισμό σαν φαινόμενο κατά τρόπο αντίστοιχο με αυτόν που προβλέπεται από την θεωρία, για σημαντικό εύρος του συντελεστή εμφάνισης διατοιχισμού  $a$  και για τις 3 περιπτώσεις μοντελοποιήσεων με διαφορετικό αριθμό πλαισίων.
- Στα αρνητικά της χρήσης του SWAN2 συμπεριλαμβάνεται η αδυναμία χρήσης όλων των βαθμών ελευθερίας κίνησης στις μοντελοποιήσεις, αφού η απόπειρα επίλυσης του προβλήματος με τους βαθμούς ελευθερίας των κινήσεων sway και roll ενεργοποιημένους ταυτόχρονα, καθιστούσε αδύνατη την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Σπύρου Κ. για την άψογη συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Η συμβολή του ήταν ουσιαστική σε όλους τους τομείς.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Θεμελή Ν. υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Μελέτης Πλοίου για την βοήθεια του, η οποία ήταν ουσιαστική κατά την επικοινωνία με την κατασκευάστρια εταιρία του λογισμικού WaveLoad, MARTEC.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω και το εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής για την προσφορά του όσον αφορά την παροχή του λογισμικού SWAN2 2002.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### *Π.1 Το υπολογιστικό μοντέλο του πακέτου λογισμικού WaveLoad*

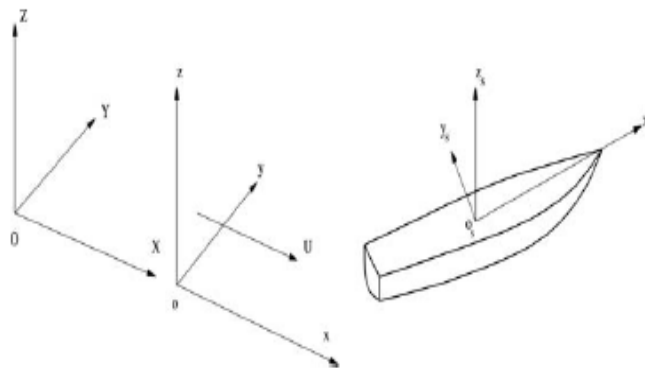
Στο εδάφιο αυτό του παραρτήματος παρουσιάζεται το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιεί το WaveLoad .

Για την επίλυση του προβλήματος γίνονται οι παρακάτω βασικές υποθέσεις:

- Ασυμπίεστο, μη συνεκτικό ρευστό και αστρόβιλη ροή
- Γραμμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας και μικρό πλάτος κινήσεων του πλοίου
- Κατοπτρικό σώμα χωρίς ελεύθερη επιφάνεια για τον υπολογισμό μόνο της μόνιμης ροής
- Κανονικοί κυματισμοί

Το γενικό πρόβλημα της κίνησης του πλοίου επιλύεται πιο εύκολα κάνοντας τη θεώρηση 3 διαφορετικών συστημάτων αναφοράς.

1. Το σταθερό στο χώρο σύστημα αναφοράς (OXYZ)
2. Το με σταθερή ταχύτητα κινούμενο σύστημα (oxyz) και
3. Το σταθερό στο πλοίο σύστημα αναφοράς ( $o_s, x_s, y_s, z_s$ )



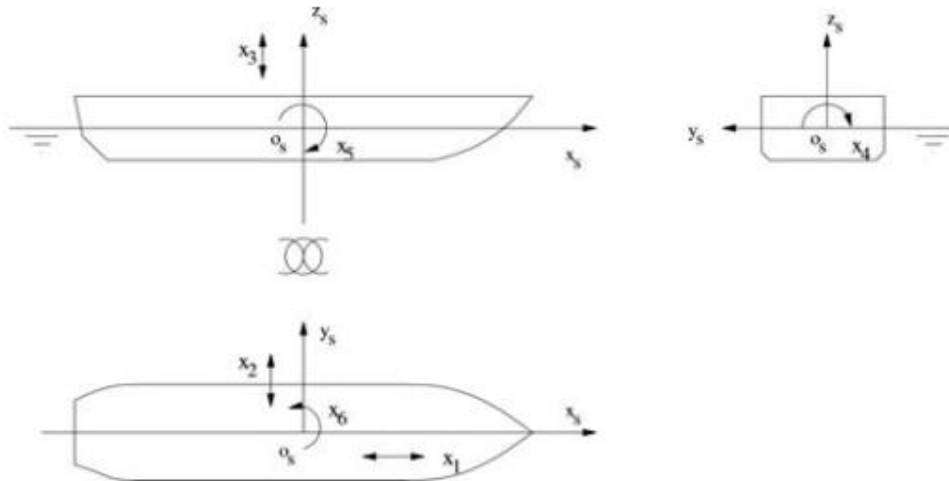
**Σχήμα Π.1.1 :** Αναπαράσταση των τριών συστημάτων αξόνων

Το σύστημα (1.) είναι σταθερό στο χώρο κατά τέτοιο τρόπο ώστε το O-XY επίπεδο να συμπίπτει με την επιφάνεια του αδιατάραχτου νερού, ο άξονας OZ είναι ο προς τα

πάνω άξονας και ο άξονας OY έχει επιλεγεί κατάλληλα ώστε να δημιουργεί ένα δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων. Στο σύστημα (2.) το o-xy επίπεδο συμπίπτει με την επιφάνεια του αδιατάραχτου νερού και ο άξονας oz είναι ο προς τα πάνω άξονας. Το πλοίο έχει πρόσω ταχύτητα U στη διεύθυνση του ox άξονα και όλο το σύστημα κινείται με την ίδια ταχύτητα κατά τη διεύθυνση ox. Το σύστημα (3.) είναι ένα σωματοπαγές στο πλοίο σύστημα συντεταγμένων, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το σημείο  $o_s$  να βρίσκεται στο σημείο τριπλής τομής της ελεύθερης επιφάνειας, του διαμήκους επιπέδου αναφοράς και του κατακόρυφου επιπέδου που περνά από το μέσο του πλοίου.

Οι κινήσεις του πλοίου μετρώνται στο oxyz σύστημα. Οι υδροστατικές, οι υδροδυναμικές και οι αδρανειακές ροπές του σκάφους και παράγωγα αυτών, υπολογίζονται περί το κέντρο του βάρους του σκάφους. Οι κινήσεις των κυμάτων και του πλοίου υποτίθενται να είναι αρμονικές με το χρόνο και με μικρά πλάτη.

Ας θεωρήσουμε ένα πλοίο, το οποίο ταξιδεύει με σταθερή πρόσω ταχύτητα U κατά τη διεύθυνση του ox-άξονα και κάνει ταλαντωτικές κινήσεις στη συχνότητα συνάντησης  $\omega_e$  με πλάτη  $x_k$ , όπου  $k = 1, 2, \dots, 6$  και αναφέρονται στις κινήσεις surge, sway, heave, roll, pitch και yaw αντίστοιχα, όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα Π.1.2:** Απεικόνιση των βαθμών ελευθερίας κίνησης του πλοίου

Θεωρώντας πως το ρευστό είναι ασυμπίεστο, μη συνεκτικό και ότι η ροή είναι αστρόβιλη, το συνολικό δυναμικό της ταχύτητας είναι:

$$\Phi_T(x, y, z; t) = -Ux + \varphi_s(x, y, z) + \Phi(x, y, z; t) \quad (1)$$

όπου

$-Ux$  είναι το δυναμικό της ταχύτητας της ομοιόμορφης ροής

$\varphi_s(x, y, z)$  είναι το δυναμικό της διαταραχής

$-Ux + \varphi_s(x, y, z)$  είναι το δυναμικό της σταθερής ροής

$\Phi(x, y, z; t)$  είναι το δυναμικό της μεταβλητής ταχύτητας το οποίο ορίζεται ως:

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_1 + \Phi_D + \Phi_R = (\varphi_1(x, y, z) + \varphi_D(x, y, z) + \varphi_R(x, y, z))e^{-i\omega_e t} \quad (2)$$

όπου  $\Phi_1, \Phi_D$  και  $\Phi_R$  είναι δυναμικό της ταχύτητας των προσπιπτόντων, διαθλασμένων και ακτινοβολούμενων κυμάτων αντίστοιχα.

### Υδροδυναμικές δυνάμεις

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις που επιδρούν πάνω σε ένα πλοίο μπορούν να εκφραστούν ως:

$$F_j = \iint pn_j ds, \text{ για } j = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

όπου  $S$  είναι η μέση βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας του σκάφους και  $n_j$  είναι η γενικευμένη μοναδιαία σταθερά με:

$$n_j = \bar{n}, \text{ για } j = 1, 2, 3 \text{ ή } n_j = (\vec{r} - \vec{r}_g) \times \bar{n} \text{ για } j = 4, 5, 6 \quad (4)$$

όπου  $\bar{n}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με φορά προς την γάστρα του πλοίου και  $p$  είναι η υδροδυναμική πίεση που δρα στο σκάφος:

$$p = -\rho \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + W \cdot \nabla \Phi \right), \quad (5)$$

$$\text{όπου } W = \nabla(-Ux + \varphi_s) \quad (6)$$

Αντικαθιστώντας την (5) στην (3) προκύπτει ότι οι υδροδυναμικές δυνάμεις είναι:



$$F_j = -\rho \iint_S n_j \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla(-Ux + \varphi_s) \cdot \nabla \Phi \right] ds, \text{ για } j = 1, 2, \dots, 6 \quad (7)$$

Η συνολική υδροδυναμική δύναμη ή οποιαδήποτε συνιστώσα αυτής, μπορεί να υπολογιστεί από την τελευταία εξίσωση.

### Υδροστατικές δυνάμεις

Οι υδροστατικές δυνάμεις που επενεργούν πάνω σε ένα πλοίο μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$F_j^S = -C_{jk} x_k, \text{ για } j = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

όπου  $x_k$ , για  $k = 1, 2, \dots, 6$  είναι τα γενικευμένα εκτοπίσματα των κινήσεων του πλοίου:

$$x_k = \text{Re}[\bar{x}_k e^{-i\omega_e t}] = \text{Re}[\bar{x}_k | e^{-i(\omega_e t + \beta_k)}] \quad (9)$$

Στην παραπάνω εξίσωση,  $x_k$  είναι το χρονικά εξαρτώμενο πλάτος της κίνησης του πλοίου. Στην εξίσωση (8),  $C_{jk}$  είναι το μητρώο των δυνάμεων επαναφοράς το οποίο είναι:

$$C_{jk} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_w & 0 & \rho g A_w \bar{x}_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho g (A_w R_1^2 + z_B \Delta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho g A_w \bar{x}_j & 0 & \rho g (A_w R_1^2 + z_B \Delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

όπου  $A_w$  είναι το εμβαδό της ελεύθερης επιφάνειας,  $x_j$  είναι η  $\chi$ -συντεταγμένη του κέντρου πλευστότητας του πλοίου,  $\Delta$  είναι το εκτόπισμα του πλοίου,  $R_1, R_2$  είναι οι ακτίνες περιστροφής της επιφάνειας του ρευστού περί τους  $o_s x_s, o_s y_s$  άξονες αντίστοιχα και  $z_B$  είναι η κατακόρυφη συντεταγμένη του κέντρου άντωσης του πλοίου.

### Οι κινήσεις του πλοίου

Δεδομένου ότι θεωρείται το πλοίο ως άκαμπτο σώμα, οι κινήσεις του πλοίου μπορούν να περιγραφούν με το νόμο του Newton ως:

$$m_{jk}x_k = F_j + F_j^S, \text{ για } j = 1, 2, \dots, 6 \quad (11)$$

όπου  $m_{jk}$  είναι το γενικευμένο μητρώο μαζών όπως φαίνεται παρακάτω:

$$m_{jk} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ 0 & 0 & 0 & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ 0 & 0 & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

όπου  $M$  είναι η μάζα του πλοίου και  $I_{mn}$  είναι οι ροπές αδράνειας του πλοίου.

Για την επίλυση του προβλήματος της κίνησης του πλοίου απαιτείται η υδροστατική δύναμη  $F_j^S$  που δίνεται από την εξίσωση (8) και η υδροδυναμική δύναμη που θα δούμε παρακάτω.

### Η στρωτή ροή

#### 1. Η ροή διπλού σώματος (Double-Body Flow)

Το πρόβλημα της στρωτής ροής αφορά τη σταθερή πρόσω ταχύτητα του πλοίου. Ένα πλοίο το οποίο κινείται στο νερό με σταθερή ταχύτητα  $U$ , δημιουργεί κυματισμούς και υπόκειται σε αντίσταση λόγω κυματισμών. Η αντίσταση αυτή δεν θα ληφθεί υπόψη. Παρόλα αυτά η σταθερή πρόσω ταχύτητα επιπλέον επηρεάζει τα ακτινοβολούμενα κύματα και τις ακτινοβολούμενες δυνάμεις λόγω αυτών των κυματισμών. Για να προσεγγιστεί η επίδραση της σταθερής ροής στην ανάλυση των κινήσεων του πλοίου, χρησιμοποιείται η τεχνική γνωστή ως "double-body flow" για να γίνει επεξεργασία του δυναμικού της διαταραχής.

Το double-body δυναμικό της στρωτής ροής μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Phi_s(x, y, z) = -U_x + \varphi_s(x, y, z) \quad (13)$$

Το δυναμικό της διαταραχής  $\varphi_s$  ικανοποιεί τις παρακάτω σχέσεις-συνθήκες:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi_s = 0 \\ \frac{\partial \varphi_s}{\partial z} = 0, \quad \text{on } z = 0 \\ \frac{\partial \varphi_s}{\partial n} = U \cdot n_1 \\ \nabla \varphi_s = 0, \quad \text{at } \infty \end{cases} \quad (14)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Green, το  $\varphi_s$  γράφεται στην μορφή

$$\varphi_s(P) = \iint_S \sigma_s(Q) \hat{G}(P;Q) dS(Q) \quad (15)$$

όπου:  $P = P(x, y, z)$  είναι σημείο του πεδίου

$Q = Q(x, y, z)$  είναι το σημείο της πηγής

$\sigma_s(Q)$  είναι η πυκνότητα της πηγής της στρωτής ροής και

$\hat{G}(P;Q)$  είναι μια πηγή Rankine η οποία περιγράφεται από τη σχέση:

$$\hat{G}(P;Q) = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \quad (16)$$

όπου:

$$\begin{aligned} r_1 &= [(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\xi)^2]^{1/2} \\ r_2 &= [(x-\zeta)^2 + (y-\eta)^2 + (z+\xi)^2]^{1/2} \end{aligned} \quad (17)$$

Εφαρμόζοντας την οριακή συνθήκη σώματος για το δυναμικό της διαταραχής στην εξίσωση (14) παίρνουμε:

$$2\pi\sigma_s(P) + \iint_S \sigma_s(Q) \frac{\partial \hat{G}(P;Q)}{\partial n_p} dS(Q) = U \cdot n_1(P) \quad (18)$$

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να λυθεί για την πυκνότητα  $\sigma_s$  και στη συνέχεια από την εξίσωση (15) μπορεί να γίνει ο υπολογισμός του δυναμικού της διαταραχής  $\varphi_s(P)$ .

## 2. Η επίδραση της στρωτής ροής - m-terms

Η επίδραση της στρωτής ροής στη συνθήκη ακτινοβολίας του στερεού συνόρου του σώματος, μπορεί να αναπαρασταθεί με την χρήση των  $m$ -όρων, οι οποίοι ορίζονται ως:

$$\begin{aligned}
 (m_1, m_2, m_3) &= -(\vec{n} \cdot \nabla) \vec{W} = -(\vec{n} \cdot \nabla) \Phi_s \\
 &= -(n_1 \Phi_{sxx} + n_2 \Phi_{sxy} + n_3 \Phi_{sxz}, n_1 \Phi_{syx} + n_2 \Phi_{syy} + n_3 \Phi_{syz}, n_1 \Phi_{szx} + n_2 \Phi_{szy} + n_3 \Phi_{szz}) \\
 (m_4, m_5, m_6) &= \vec{r}_g \times (m_1, m_2, m_3) - \vec{n} \times \nabla \Phi_s \\
 &= \vec{r}_g \times (m_1, m_2, m_3) + (n_3 \Phi_{sy} - n_2 \Phi_{sz}, n_1 \Phi_{sz} - n_3 \Phi_{sx}, n_2 \Phi_{sx} - n_1 \Phi_{sy})
 \end{aligned} \tag{19}$$

όπου  $\vec{r}_g = (x - x_g, y - y_g, z - z_g)$  είναι το διάνυσμα θέσης από το κέντρο βάρους του πλοίου προς ένα σημείο  $(x, y, z)$  στην γάστρα του σκάφους. Αν θεωρήσουμε ομοιόμορφη μόνο ροή, τότε μπορούμε να κάνουμε χρήση των παρακάτω απλοποιημένων  $m$ -όρων:

$$m_k = 0, \quad k = 1, 2, 3, 4 \tag{20}$$

$$m_5 = -Un_3 \tag{21}$$

$$m_6 = Un_2 \tag{22}$$

### Κύματα ακτινοβολίας

Το δυναμικό των κυμάτων ακτινοβολίας μπορεί να εκφραστεί ως

$$\Phi_R(x, y, z; t) = \text{Re}[\varphi_R(x, y, z) e^{-i\omega_e t}] \tag{23}$$

Το δυναμικό των ακτινοβολουμένων κυμάτων ανά μονάδα πλάτους κίνησης του  $k^{\text{th}}$  βαθμού ελευθερίας κίνησης του πλοίου μπορεί να ευρεθεί με την λύση των ακολουθών σχέσεων-συνθηκών:

$$\begin{cases}
\nabla^2 \varphi_k = 0 \\
(g \frac{\partial}{\partial z} + U^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2i\omega U \frac{\partial}{\partial x} - \omega_e^2) \varphi_k = 0 \quad \text{στο } z = 0 \\
\frac{\partial \varphi_k}{\partial n} \Big|_{s=n_k} = n_k - \frac{m_k}{i\omega_e} \\
\frac{\partial \varphi_k}{\partial n} \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0
\end{cases} \quad (24)$$

Συνθήκη ακτινοβολίας: κύματα που απομακρύνονται

όπου  $n_k$  είναι η γενικευμένη νόρμα που έχει φορά προς τη βρεχόμενη γάστρα,  $U$  είναι η πρόσω ταχύτητα του σκάφους,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $m_k$  είναι ο  $m$ -όρος του εκάστοτε βαθμού ελευθερίας κίνησης λόγω της επίδρασης της πρόσω ταχύτητας.

Για τη περίπτωση αλληλεπίδρασης μεταξύ πλοίων, το μοντέλο θα είναι  $6 \times M$  βαθμών ελευθερίας όπου  $M$  ο αριθμός των πλοίων. Τότε η συνθήκη πάνω στη γάστρα του πλοίου  $S$  λόγω του δυναμικού ακτινοβολίας ανά μονάδα πλάτους του  $k^{\text{οστού}}$  βαθμού ελευθερίας του πλοίου  $T$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{\partial \varphi_k^T}{\partial n} \Big|_{s_s} = \begin{cases} 0, T \neq S \\ n_k^T - \frac{m_k^T}{i\omega_e}, T = S \end{cases}$$

Εφαρμόζοντας την συνάρτηση του Green στην εξίσωση (24), το δυναμικό των κυμάτων ακτινοβολίας μπορεί να γραφεί ως

$$\varphi_k(P) = \iint_S \sigma_k(Q) G(P; Q) dS(Q) \quad (25)$$

όπου  $\sigma_k$  είναι η πυκνότητα της ενέργειας της πηγής.

$G(P; Q)$  είναι η συνάρτηση του Green για μηδενική ταχύτητα:

$$G(P; Q) = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + 2\nu \int_0^\infty \frac{e^{k(z+\zeta)}}{K-\nu} J_0(\nu R) dk + i2\pi\nu e^{\nu(\zeta+z)} J_0(\nu R) \quad (26)$$

όπου  $\nu = \frac{\omega^2}{g}$  είναι ο κυματικός αριθμός,  $J_0$  είναι η πρώτου είδους συνάρτηση Bessel

$$\text{μηδενικής τάξεως και } R = [(x - \zeta)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2} \quad (27)$$

εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες στην εξίσωση (24) παίρνουμε:

$$2\pi\sigma_k(P) + \iint_S \sigma_k(Q) \frac{\partial G(P; Q)}{\partial n_p} dS(Q) = \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} = n_k - \frac{m_k}{i\omega_e} \quad (28)$$

Η πυκνότητα της πηγής  $\sigma_k(Q)$  μπορεί να υπολογιστεί επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση. Γνωρίζοντας λοιπόν και τις συναρτήσεις Green, τα δυναμικά ακτινοβολίας μπορούν να υπολογιστούν με επίλυση της σχέσης (25).

Η δύναμη του ακτινοβολούμενου κύματος του  $j^{\text{th}}$  βαθμού ελευθερίας κίνησης που ασκείται πάνω στο πλοίο είναι

$$F_j^R(x, y, z; t) = \text{Re}[f_j^R e^{-i\omega_e t}] \quad (29)$$

όπου  $f_j^R(x, y, z)$  είναι η χρονικά ανεξάρτητη δύναμη του κύματος ακτινοβολίας.

Αντικαθιστώντας το δυναμικό του κύματος ακτινοβολίας στις εξισώσεις (3) και (5), παίρνουμε

$$\begin{aligned} f_j^R = & \rho\omega_e^2 \sum_{k=1}^6 \bar{x}_k \left\{ \iint_S \text{Re}[\varphi_k] n_j dS + \frac{U}{\omega_e} \iint_S \text{Im}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS - \frac{1}{\omega_e} \iint_S \text{Im}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS \right\} + \\ & + i\rho\omega_e^2 \sum_{k=1}^6 \bar{x}_k \left\{ \iint_S \text{Im}[\varphi_k] n_j dS - U \iint_S \text{Re}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS + \iint_S \text{Re}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS \right\} \end{aligned} \quad (30)$$

όπου  $\bar{x}_k$  είναι το πλάτος του  $k^{\text{th}}$  βαθμού λειτουργίας με:

$$x_k = \text{Re}[x_k e^{-i\omega_e t}] \quad (31)$$

### **Πρόσθετη μάζα και απόσβεση**

Σύμφωνα με την εξίσωση (30), η εξίσωση κίνησης του πλοίου μπορεί να γραφεί ως

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= \text{Re}[-i\omega_e \bar{x}_k e^{-i\omega_e t}] \\ \ddot{x}_k &= \text{Re}[-\omega_e^2 \bar{x}_k e^{-i\omega_e t}] \end{aligned} \quad (32)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην (30) παίρνουμε τη νέα μορφή αυτής, που είναι:

$$f_j^R = -\ddot{x}_k \rho \left\{ \iint_S \operatorname{Re}[\varphi_k] n_j dS + \frac{U}{\omega_e} \iint_S \operatorname{Im}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS - \frac{1}{\omega_e} \iint_S \operatorname{Im}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS \right\} - \dot{x}_k \rho \left\{ \omega_e \iint_S \operatorname{Im}[\varphi_k] n_j dS - U \iint_S \operatorname{Re}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS + \iint_S \operatorname{Re}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS \right\} \quad (33)$$

όπου οι συντελεστές της πρόσθετης μάζας  $\mu_{jk}$  και οι συντελεστές απόσβεσης  $\lambda_{jk}$  είναι:

$$\mu_{jk} = \rho \left\{ \iint_S \operatorname{Re}[\varphi_k] n_j dS + \frac{U}{\omega_e} \iint_S \operatorname{Im}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS - \frac{1}{\omega_e} \iint_S \operatorname{Im}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS \right\} \quad (34)$$

και

$$\lambda_{jk} = \rho \left\{ \omega_e \iint_S \operatorname{Im}[\varphi_k] n_j dS - U \iint_S \operatorname{Re}\left[\frac{\partial \varphi_k}{\partial x}\right] n_j dS + \iint_S \operatorname{Re}[\nabla \varphi_k \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS \right\} \quad (35)$$

### **Προσπίπτοντες κυματισμοί**

Δεδομένου ότι οι προσπίπτοντες κυματισμοί είναι κανονικοί κυματισμοί το δυναμικό τους μπορεί να εκφραστεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\Phi_1(x, y, z; t) = \operatorname{Re}[\varphi_1(x, y, z) e^{-i\omega_e t}] \quad (36)$$

όπου  $\varphi_1 = \varphi_1(x, y, z)$  είναι η χρονικά ανεξάρτητη συνάρτηση δυναμικού του προσπίπτοντος κυματισμού και η οποία εκφράζεται από τη σχέση:

$$\varphi_1 = \frac{g \zeta_a}{i\omega} e^{yz + i\nu(x \cos \beta + y \sin \beta)} \quad (37)$$

εάν η συνεισφορά του δυναμικού διάθλασης  $\varphi_D$  και του δυναμικού ακτινοβολίας  $\varphi_R$  στη πίεση που ασκείται πάνω στη γάστρα του πλοίου αμεληθούν και μόνο η συνεισφορά του δυναμικού  $\varphi_1$  θεωρηθεί σημαντική, τότε η δύναμη του κύματος θα είναι η δύναμη *Froude-Krylov* (ουσιαστικά δηλαδή η δύναμη του κύματος, θεωρώντας ότι το πλοίο δεν υπάρχει). Τότε η δύναμη αυτή μπορεί να γραφεί ως

$$F_j^I = \operatorname{Re}[f_j^I e^{-i\omega_e t}] \quad (38)$$

όπου

$$f_j^I = -\rho\omega_e \iint_S \text{Im}[\varphi_I] n_j dS + \rho U \iint_S \text{Re}\left[\frac{\partial\varphi_I}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \text{Re}[\nabla\varphi_I \cdot \nabla\varphi_S] n_j dS + \quad (39)$$

$$i\{\rho\omega_e \iint_S \text{Re}[\varphi_I] n_j dS + \rho U \iint_S \text{Im}\left[\frac{\partial\varphi_I}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \text{Im}[\nabla\varphi_I \cdot \nabla\varphi_S] n_j dS\}$$

### Κύματα διάθλασης

Η ύπαρξη της γάστρας του πλοίου στα κύματα επηρεάζει τους προσπίπτοντες κυματισμούς και δημιουργεί ένα νέο σύστημα κυματισμών. Το κύμα διάθλασης είναι ένα περιοδικό κύμα με δυναμικό ταχύτητας

$$\Phi_D = \text{Re}[\varphi_D e^{-i\omega_e t}] \quad (40)$$

Το δυναμικό του παραπάνω συστήματος κυματισμών μπορεί να ευρεθεί με επίλυση των ακόλουθων σχέσεων-συνθηκών:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi_D = 0 \\ (g \frac{\partial}{\partial z} + U^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2i\omega_e U \frac{\partial}{\partial x} - \omega_e^2) \varphi_D = 0, \quad z = 0 \\ \left. \frac{\partial \varphi_D}{\partial n} \right|_S = \left. \frac{\partial \varphi_I}{\partial n} \right|_S \\ \left. \frac{\partial \varphi_D}{\partial n} \right|_{z \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (41)$$

Εφαρμόζοντας την συνάρτηση του Green (σχέση (26)) στο δυναμικό του διαθλασμένου κύματος, το δυναμικό αυτό μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\varphi_D(P) = \iint_S \sigma_D(Q) G(P; Q) dS(Q) \quad (42)$$

όπου  $\sigma_D(Q)$  είναι η πυκνότητα της πηγής.

Εφαρμόζοντας την οριακή συνθήκη του σώματος στην παραπάνω σχέση, παίρνουμε:

$$2\pi\sigma_D(P) + \iint_S \sigma_D(Q) \frac{\partial G(P; Q)}{\partial n_p} dS(Q) = -\left. \frac{\partial \varphi_I}{\partial n} \right|_p \quad (43)$$

Υπολογίζοντας αριθμητικά την πυκνότητα της πηγής  $\sigma_D$ , εν συνεχεία υπολογίζεται το δυναμικό  $\varphi_D(P)$  από την εξίσωση (42).



Η δύναμη του διαθλασμένου κύματος της  $j^{th}$  κίνησης του πλοίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$F_j^D(x, y, z; t) = \text{Re}[f_j^D(x, y, z)e^{-i\omega_e t}] \quad (44)$$

Αντικαθιστώντας το δυναμικό από την εξίσωση (42) στις εξισώσεις (3) και (5) καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση για τη δύναμη που ασκείται στο πλοίο λόγω του διαθλασμένου κύματος:

$$f_j^D = -\rho\omega_e \iint_S \text{Im}[\varphi_D] n_j dS + \rho U \iint_S \text{Re}\left[\frac{\partial \varphi_D}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \text{Re}[\nabla \varphi_D \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS + \quad (45)$$

$$i\{\rho\omega_e \iint_S \text{Re}[\varphi_D] n_j dS + \rho U \iint_S \text{Im}\left[\frac{\partial \varphi_D}{\partial x}\right] n_j dS - \rho \iint_S \text{Im}[\nabla \varphi_D \cdot \nabla \varphi_S] n_j dS\}$$

### Εξισώσεις κίνησης του πλοίου

Οι εξισώσεις κίνησης του πλοίου μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega_e^2 (m_{jk} + \mu_{jk}) + (-i\omega_e \lambda_{jk}) + C_{jk}] \bar{x}_k = f_j \quad (46)$$

$$\text{με } f_j = f_j^I + f_j^D, \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (47)$$

όπου:

$\bar{m}_{jk}$  είναι το μητρώο μάζας

$\mu_{jk}$  είναι το μητρώο πρόσθετης μάζας

$\lambda_{jk}$  είναι το μητρώο απόσβεσης και

$C_{jk}$  είναι το μητρώο του συντελεστή δύναμης επαναφοράς

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι η ιξώδης απόσβεση σε διατοιχισμό  $\lambda_{44}^V$  θα πρέπει να περιέχεται στη  $\lambda_{44}$ . Για το σκοπό αυτό η απόσβεση σύμφωνα με την εργασία του Schmitke υιοθετείται.

### Ιξώδης απόσβεση σε διατοιχισμό

Είναι αληθές το γεγονός πως η κίνηση του διατοιχισμού ενός πλοίου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιχειρησιμότητα του. Δυστυχώς οι θεωρητικές προβλέψεις χρησιμοποιώντας τη θεωρία δυναμικής ροής δεν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για την κίνηση του διατοιχισμού. Σύμφωνα με διάφορες μελέτες αυτό οφείλεται στην ύπαρξη της ιξώδους απόσβεσης σε διατοιχισμό. Ανεπαρκής αξιολόγηση των παρελκόμενων της γάστρας και άλλων φαινομένων όπως για παράδειγμα της δυναμικής άνωσης λόγω των παρελκόμενων όλα συνεισφέρουν στο λαθεμένο υπολογισμό της απόσβεσης διατοιχισμού. Προκειμένου να λυθεί αυτό το πρόβλημα, το WaveLoad υιοθετεί την μέθοδο του Schmitke για τον υπολογισμό της απόσβεσης σε διατοιχισμό. Σύμφωνα με αυτή ο συντελεστής ιξώδους απόσβεσης σε διατοιχισμό, μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda_{44}^v = \lambda_{BK} + \lambda_E + \lambda_H + \lambda_F \quad (48)$$

όπου  $\lambda_{BK}, \lambda_E, \lambda_H$  δηλώνουν την συνεισφορά σε αυτό τον συντελεστή από παρατροπίδια, από τη δημιουργία αντίστασης λόγω δημιουργίας δινών από τη γάστρα του πλοίου, από την αντίσταση τριβής γάστρας αντίστοιχα. Ο συντελεστής  $\lambda_F$  δηλώνει την απόσβεση από άλλα στοιχεία πλην των παρατροπιδίων όπως για παράδειγμα το πηδάλιο, το skeg κ.α. σε μηδενική ταχύτητα. Κάθε ένας από αυτούς τους επιμέρους παράγοντες μπορεί να υπολογιστεί από τις παρακάτω εμπειρικές σχέσεις.

### Παρατροπίδια

Η επίδραση τους δηλώνεται με το συντελεστή

$$\lambda_{BK} = \frac{1}{\pi^3} \rho l b_k r^3 \omega \eta^4 C_0 C_a C_k C_n B F^{-a} \quad (49)$$

όπου είναι:

$l$  είναι το μήκος του παρατροπιδίου,

$b_k$  είναι το πλάτος του παρατροπιδίου,

$r$  είναι η απόσταση από το κέντρο του παρατροπιδίου μέχρι το κέντρο βάρους του πλοίου,

$\omega_e$  είναι η συχνότητα συνάντησης,

$\eta_4$  είναι το πλάτος του διατοιχισμού,

$\alpha$  είναι η foil γωνία συνάντησης και

$C_0, C_a, C_k, C_n, B, F$  είναι συντελεστές που εξαρτώνται από τη μορφή του πλοίου και τον αριθμό Reynolds.

### Δημιουργία στροβιλισμών

$$\text{Η επίδραση τους δηλώνεται με το συντελεστή } \lambda_E = \frac{4}{3\pi} \rho \omega \eta_4 r^3 S C \quad (50)$$

όπου είναι:

$S$  η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας,

$C$  είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας και εξαρτάται από τη μορφή της γάστρας.

### Τριβή γάστρας

Η επίδραση της δηλώνεται με το συντελεστή

$$\lambda_H = \frac{4}{3\pi} \rho \omega \eta_4 C_{FD} \int_L dx \int_{C_x} r (y n_2 + z n_3)^2 dl \quad (51)$$

όπου είναι:

$C_{FD}$  είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας λόγω τριβής,

$C_x$  είναι hull cross section και

$dl$  είναι το girth-wise length element

### Άλλα παρελκόμενα (πηδάλιο, πτερύγια κ.α.)

Η επίδραση τους δηλώνεται με το συντελεστή

$$\lambda_F = \frac{4}{3\pi} \rho \omega \eta_4 \sum (y_2 + z^2)^{3/2} S C_n \quad (52)$$

όπου  $C_n$  είναι ο μοναδιαίος συντελεστής της δύναμης για μια επίπεδη πλάκα που βρίσκεται με μεγάλη γωνία μέσα στη ροή.

### Υδροδυναμικές Πιέσεις

Η κίνηση του πλοίου σε κυματισμούς εγείρει υδροδυναμικές πιέσεις στο περιβάλλον ρευστό. Η υδροδυναμική πίεση λόγω των προσπιπτόντων, των διαθλασμένων και των ακτινοβολούμενων κυματισμών είναι:

$$p_{hd} = \rho [i\omega_e (\varphi_1 + \varphi_D) + \vec{W} \cdot \nabla (\varphi_1 + \varphi_D) + \omega_e^2 \sum_{k=1}^6 \bar{x}_k \varphi_k - i\omega_e \sum_{k=1}^6 \bar{x}_k (\vec{W} \cdot \nabla \varphi_k)] \quad (53)$$

### Φορτίο λόγω κυμάτων σε Cross Section

Καθώς ένα πλοίο κινείται μέσα στα κύματα, τα φορτία λόγω κυμάτων που αυτό δέχεται, οφείλονται τόσο στους προσπίπτοντες, στους διαθλασμένους, στους ακτινοβολούντες κυματισμούς, στην δύναμη αδράνειας και στην αύξηση της υδροστατικής και υδροδυναμικής πίεσης λόγω κινήσεων του πλοίου. Οι έξι συνιστώσες των φορτίων λόγω κυματισμών πάνω στα cross-section  $X_C$  μπορούν να υπολογιστούν με ολοκλήρωση της δύναμης αδράνειας της μάζας του πλοίου πρόωραθεν της θέσης  $X_C$  προσαυξημένη με την αύξηση της υδροστατικής και υδροδυναμικής πίεσης πάνω στη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας πρόωραθεν της θέσης  $X_C$ .

$$F_j^W = \text{Re}[f_j^{WLD} e^{-i\omega_e t}], \quad j = 2, 3, \dots, 6 \quad (54)$$

όπου:

$$f_j^{WLD} = I_j - \iint_{S_x} (p_{hd} + \Delta p_{st}) N_j dS \quad (55)$$

$S_x$  είναι η βρεχόμενη επιφάνεια πρόωραθεν της θέσης  $X_C$

$$N_j = n_j \text{ για } j = 1, 2, 3, 4 \quad (56)$$

$$N_5 = -xn_3 \quad (57)$$

$$N_6 = xn_2 \quad (58)$$

$$I_2 = -\omega_e^2 (A_1 \bar{x}_2 + A_2 \bar{x}_6 - A_4 \bar{x}_4) \quad (59)$$

$$I_3 = -\omega_e^2 (A_1 \bar{x}_3 - A_2 \bar{x}_5) \quad (60)$$

$$I_4 = -\omega_e^2 (I_{fx} \bar{x}_4 - A_4 \bar{x}_2 - A_5 \bar{x}_6) \quad (61)$$

$$I_5 = (x - x_s) I_3 \quad (62)$$

$$I_6 = (x - x_s) I_2 \quad (63)$$

$$I_{fx} = \int_{Lx} di_x \quad (64)$$

$$A_1 = \int_{Lx} dm' \quad (65)$$

$$A_2 = \int_{Lx} (x - x_g) dm' \quad (66)$$

$$A_4 = \int_{Lx} (z - z_g) dm' \quad (67)$$

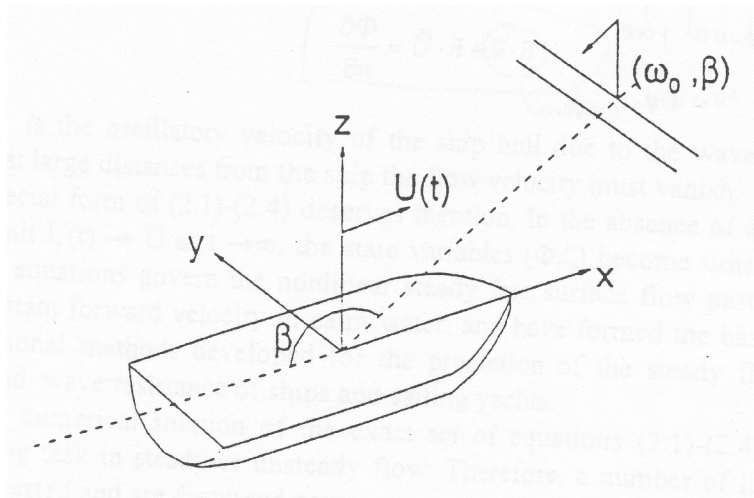
$$A_5 = \int_{Lx} (x - x_g)(z - z_g) dm' \quad (68)$$

με  $m'$  την sectional mass κατανομή κατά μήκος του πλοίου,  $x_s$  την διαμήκη συντεταγμένη του section,  $i_x$  την sectional ροπή αδράνειας περί τον  $x$ -άξονα και  $L_x$  την απόσταση μεταξύ του  $X_C$  και της προωραίας καθέτου του πλοίου.

## Π.2 Το υπολογιστικό μοντέλο του πακέτου λογισμικού SWAN2

Στο εδάφιο αυτό του παραρτήματος παρουσιάζεται το υπολογιστικό μοντέλο που χρησιμοποιεί το SWAN2 2002 [11].

Θεωρούμε ένα πλοίο το οποίο κινείται με χρονικά εξαρτώμενη ταχύτητα  $U(t)$  σε κύματα όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα Π.2.1:** Το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων

Οι εξισώσεις κίνησης του ρευστού θα δηλωθούν σύμφωνα με ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων  $x = (x, y, z)$  το οποίο κινείται με ταχύτητα  $U(t)$  στην θετική κατεύθυνση του  $x$ -άξονα. Η αρχή του συστήματος αξόνων θεωρείται στην επιφάνεια του ήρεμου νερού η οποία συμπίπτει με την επιφάνεια όπου  $z = 0$ . Θεωρώντας δυναμική ροή, η ταχύτητα της διαταραγμένης ροής  $v = (x, t)$  ορίζεται ως το βαθμωτό διάνυσμα του δυναμικού της ταχύτητας  $\Phi(x, t)$ , δηλαδή  $v = \nabla\Phi$ . Για λόγους συνέχειας, το δυναμικό  $\Phi$  υπακούει στην εξίσωση Laplace στο πεδίο της ροής οπότε θα ισχύει

$$\nabla^2\Phi = 0. \quad (1)$$

Η θέση της ελεύθερης επιφάνειας καθορίζεται από την ανύψωση του κύματος οι οποίες μαζί με το δυναμικό της ταχύτητας είναι οι μεταβλητές που πρέπει να προσδιοριστούν από την μέθοδο RPM (Rankine Panel Method).

Οι παραπάνω δύο μεταβλητές συνδέονται με δυο συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια. Η κινηματική συνθήκη απαιτεί ότι ένα σωματίδιο ρευστού στη διεπιφάνεια αέρα-ρευστού που βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση κατά την χρονική στιγμή  $t = 0$  θα παραμείνει στην θέση αυτή για πάντα. Η αντίστοιχη εξίσωση που εκφράζει την αντίστοιχη συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού παίρνει την μορφή

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} - (\bar{U} - \nabla\Phi) \cdot \nabla \right] \zeta = \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \text{ όπου } z = \zeta(x, y, t) \quad (2)$$

Η δυναμική αυτή συνθήκη ουσιαστικά δηλώνει, ότι η πίεση του ρευστού στην ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση, η οποία θεωρείται ίση με το μηδέν. Προκύπτει από την εξίσωση του Bernoulli ότι

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} - \bar{U} \cdot \nabla \right] \Phi + \frac{1}{2} \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi = -g\zeta, \text{ όπου } z = \zeta(x, y, t) \quad (3)$$

Στην επιφάνεια της γάστρας του σκάφους, η κανονική ταχύτητα της ροής ισοδυναμεί με την ταχύτητα στο στερεό σύνορο. Θεωρώντας ως  $n$  το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στη στιγμιαία θέση της γάστρας του πλοίου, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = \bar{U} \cdot \bar{n} + \bar{v} \cdot \bar{n} \quad (4)$$

η οποία αποτελεί την συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος. Στην παραπάνω εξίσωση ο παράγοντας  $\bar{v}$  είναι η μεταβολή της ταχύτητας του πλοίου λόγω των από τα κύματα παραγόμενων κινήσεων. Για αποστάσεις μακριά από το πλοίο η ταχύτητα της ροής θα πρέπει να είναι μηδενική.

Η μαθηματική επίλυση των παραπάνω εξισώσεων είναι πολύ δύσκολη να γίνει τόσο σε σταθερή όσο και σε ασταθή ροή. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η εισαγωγή αριθμού γραμμικοποιήσεων.

### **Γραμμικοποίηση της Οριακής Συνθήκης Ελεύθερης επιφάνειας**

Η πρώτη γραμμικοποίηση αφορά τις συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας. Η συνέπεια των γραμμικοποιημένων εξισώσεων είναι ικανοποιητική εάν ισχύει ότι η κλίση του κύματος είναι μικρή και αν η γάστρα του πλοίου είναι λεπτόγραμμη. Η γραμμικοποίηση μάλιστα είναι λιγότερο εμφανής αν το πλοίο κινείται με πρόσω

ταχύτητα. Το αποτέλεσμα της υπόθεσης ότι το πλοίο είναι λεπτόγραμμο έχει να κάνει με το γεγονός ότι η ταχύτητα διαταραχής του ρευστού λόγω κίνησης του σκάφους είναι μικρή συγκρινόμενη με την ταχύτητα του σκάφους  $U$ . Τότε από τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός του δυναμικού  $\Phi$  σε δύο μέρη. Στο δυναμικό της βασικής ροής  $\varphi_0$  και στο δυναμικό της ροής της διαταραχής  $\varphi_1$  όπως φαίνεται παρακάτω

$$\Phi = \varphi_0 + \varphi_1 \quad (5)$$

$$|\nabla \varphi_1| \ll |\nabla \varphi_0| \quad (6)$$

και αντίστοιχα έχουμε για την ανύψωση του κύματος  $\zeta$ ,

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1 \quad (7)$$

$$\zeta_1 \ll \zeta_0 \quad (8)$$

Το SWAN από τις διάφορες μεθόδους γραμμικοποίησης που υπάρχουν διαθέσιμες κάνει χρήση της γνωστής Double-Body Linearization μεθόδου. Βάσει αυτής, η ροή κατάντη του πλοίου και το θετικό της κομμάτι πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια θεωρείται ως η βασική ροή (basis flow). Το αποτέλεσμα της γραμμικοποίησης για την βασική ανύψωση του κύματος (basis wave elevation) προκύπτει από την εξίσωση του Bernoulli (3) στη μορφή

$$\zeta_0 = \frac{U}{g} \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} - \frac{1}{2g} \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0, \quad z = 0 \quad (9)$$

Αντικαθιστώντας στη μη-γραμμική συνθήκη επιφανείας και κάνοντας χρήση των υποθέσεων (6), (8), οδηγούμαστε στις ακόλουθες συνθήκες για τα  $(\varphi_1, \zeta_1)$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} - (U - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 = \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} \zeta_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad z = 0 \quad (10)$$

$$\left[ \frac{\partial}{\partial t} - (U - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = -g \zeta_1 - [U \cdot \nabla \varphi_0 - \frac{1}{2} \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0], \quad z=0 \quad (11)$$



Οι παραπάνω εξισώσεις προέκυψαν έχοντας πάντοτε κατά νου την προϋπόθεση ότι η βασική ανύψωση του κύματος  $\zeta_0$  είναι μια μικρή ποσότητα. Αυτό βέβαια μπορεί να μην ισχύει πάντα και ιδιαίτερα στην περίπτωση που βρισκόμαστε κοντά στην γραμμή σχεδίασης του πλοίου και τη πλώρη του. Επιπλέον οι (10) και (11) είναι αδύναμες στις περιοχές αυτές, όπου σημαντικά μη-γραμμικά φαινόμενα λαμβάνουν χώρα και μάλιστα είναι τα κυρίαρχα φαινόμενα.

### Γραμμικοποίηση της Οριακής Συνθήκης Γάστρας

Η επόμενη γραμμικοποίηση είναι αυτή της οριακής συνθήκης του στερεού συνόρου του σώματος. Αυτή γίνεται γύρω από τη μέση βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας θεωρώντας κατά συνέπεια ότι η μεταβολή της γύρω από αυτή την τιμή είναι μικρή. Κατά την παρουσία των κυμάτων, θεωρείται ότι το πλοίο υπόκειται σε ταλαντωτικές κινήσεις με εκτοπίσματα  $\xi_j(t)$ ,  $j=1,2,\dots,6$  για κάθε ένα από τους έξι βαθμούς ελευθερίας του. Υιοθετώντας την υπόθεση για το δυναμικό  $\Phi$ , ότι μπορεί να αναλυθεί στα επιμέρους δυναμικά  $\varphi_0$  και  $\varphi_1$  παίρνουμε τις παρακάτω εκφράσεις

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial n} = \bar{U} \cdot \bar{n} = U \cdot n_1, \quad \text{για } \bar{S} \quad (12)$$

$$\text{και } \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial n}, \quad \text{για } \bar{S} \quad (13)$$

και η εξίσωση (4) παίρνει πλέον την μορφή

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \left( \frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right), \quad \text{για } \bar{S} \quad (14)$$

όπου

$$(n_4, n_5, n_6) = \bar{x} \times \bar{n} \quad (15)$$

$$(m_1, m_2, m_3) = (\bar{n} \cdot \nabla)(\bar{U} - \nabla \varphi_0) \quad (16)$$

$$(m_4, m_5, m_6) = (\bar{n} \cdot \nabla) [\bar{x} \times (U - \nabla \varphi_0)] \quad (17)$$

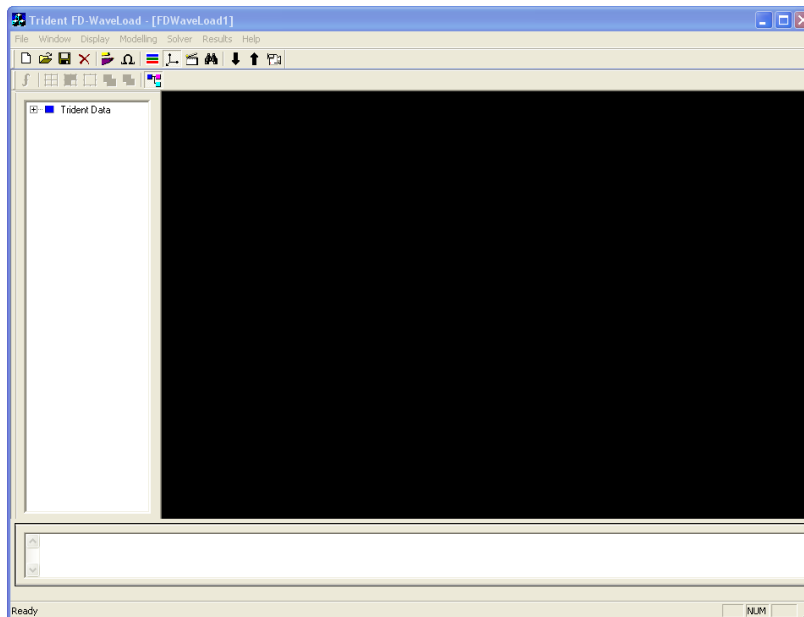
Από τις παραπάνω προκύπτει ότι η εφαρμογή της συνθήκης του στερεού συνόρου του σώματος στο πρόβλημα της ακτινοβολίας απαιτεί την γνώση των ανυσμάτων δευτέρας τάξεως της βασικής ροής του δυναμικού (basis flow potential) τα οποία δεν είναι καθόλου εύκολο να υπολογιστούν. Είναι αναγκαία λοιπόν η γραμμικοποίηση και μάλιστα αυτή γίνεται με την μέθοδο Double-Body Linearization. Σε αυτή την περίπτωση η βασική ροή μοντελοποιείται από τη δυναμική διπλού σώματος η οποία ικανοποιεί την ακριβή οριακή συνθήκη στο σύνορο της γάστρας του πλοίου λόγω της πρόσω μετακίνησης του και μια συνθήκη στερεού συνόρου στην επιφάνεια όπου  $z = 0$ .

Στις εξισώσεις (16) και (17) παρατηρούμε τους αποκαλούμενους m-όρους. Οι όροι αυτοί προκύπτουν λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ της σταθερής δυναμικής ροής και της ασταθούς ροής που αποτελεί το κομμάτι της ακτινοβολίας. Στην ουσία παρέχουν τον τρόπο με τον οποίο το κομμάτι της σταθερής ροής και το κομμάτι της ροής λόγω πρόσω ταχύτητας, επηρεάζουν το κομμάτι της ακτινοβολίας της ροής που δεν είναι άλλο από τα ακτινοβολούμενα κύματα.

Από το σημείο αυτό και έπειτα γίνεται η δημιουργία και κατανομή των πλαισίων επί της ελεύθερης επιφάνειας και της γάστρας του σκάφους με την γνωστή για αυτό το σκοπό διαδικασία γνωστή ως Rankine Panel Method, η οποία κατανέμει πλαίσια με πηγές Rankine και αρχίζει η επίλυση στο πεδίο του χρόνου.

### *Π.3 Το γραφικό περιβάλλον χρήσης του προγράμματος WaveLoad 2006A*

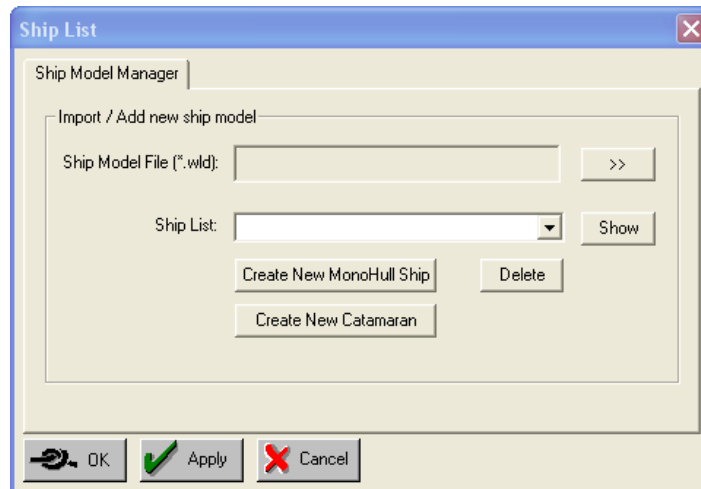
#### *Π.3.1 Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε υπό μελέτη πλοίου.*



*Σχήμα Π.3.1.1 : Αρχική εικόνα έναρξης του πακέτου λογισμικού FD-Waveload 2000A.*

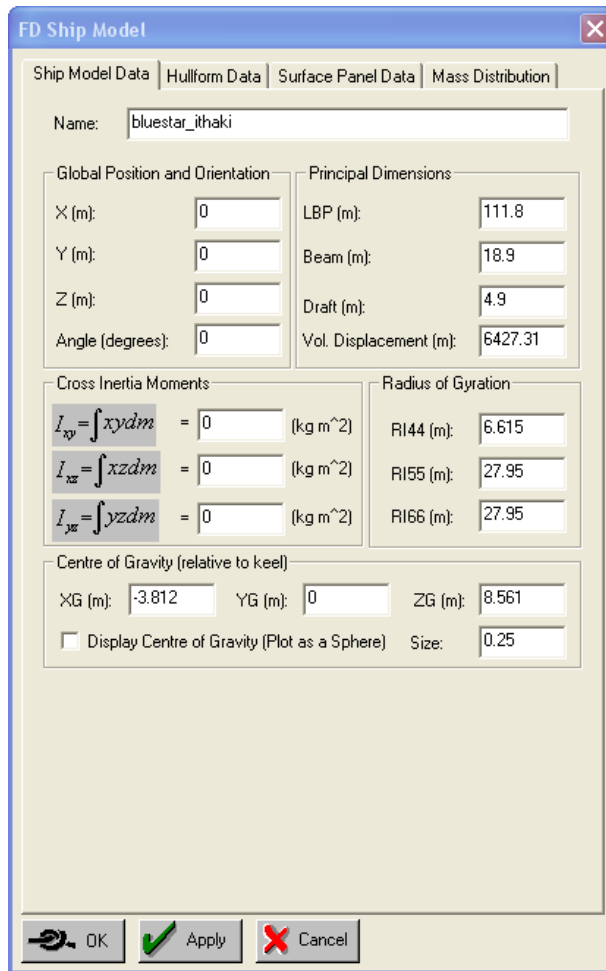
Η παραπάνω εικόνα αποτελεί την πρώτη εικόνα του προγράμματος που θα δει ο χρήστης και περιέχει τα κύρια μενού **“File”**, **“Window”**, **“Display”**, **“Modeling”**, **“Solver”**, **“Results”** και **“Help”** για τα οποία θα μιλήσουμε αναλυτικά παρακάτω με εξαίρεση το τελευταίο μενού, με το οποίο δεν θα ασχοληθούμε καθόλου.

Ανατρέχοντας στο μενού **“modeling”** → **“ship manager”** προκύπτει το ακόλουθο παράθυρο.



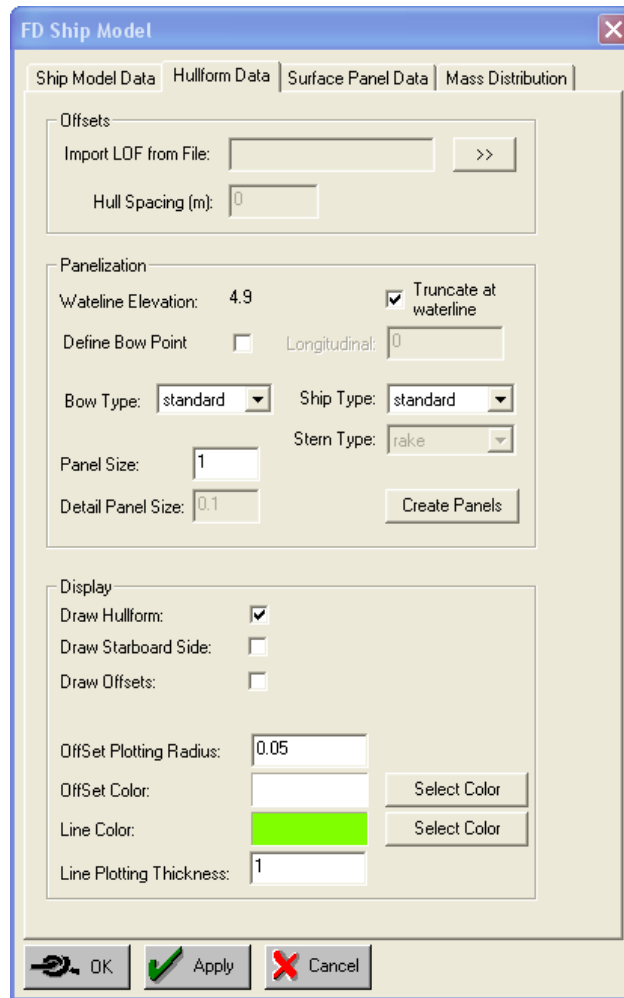
*Σχήμα Π.3.1.2 : Μενού δημιουργίας του υπό μελέτη πλοίου-μοντέλου.*

Από αυτό το μενού εισάγουμε όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη δημιουργία του μοντέλου του υπό μελέτη πλοίου. Από αυτό το μενού παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα για τη δημιουργία ενός μονόγαστρου ή ενός δίγαστρου πλοίου από τις επιλογές **“Create New MonoHull Ship”** και **“Create New Catamaran”** αντίστοιχα. Στη συνέχεια για την λειτουργία του προγράμματος απαιτείται η εισαγωγή των γεωμετρικών διαστάσεων του πλοίου και συγκεκριμένων αδρανειακών χαρακτηριστικών, όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα. Αυτό το σχήμα προέκυψε από την επιλογή **“Show”** του προηγούμενου μενού.



*Σχήμα Π.3.1.3 : Μενού εισαγωγής δεδομένων και διαχείρισης του μοντέλου.*

Μετέπειτα απαιτείται να δώσουμε την διαδρομή στην οποία βρίσκεται το αρχείο με κατάληξη “.lof” το οποίο, έχει δημιουργηθεί προηγουμένως από το χρήστη σχετικά γρήγορα αν οι γραμμές του πλοίου έχουν σχεδιαστεί σε κάποιο πρόγραμμα σχεδίασης με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή, και περιέχει την περιγραφή της γεωμετρίας της γάστρας του πλοίου υπό την μορφή σημείων νομέων. Η εισαγωγή του αρχείου γίνεται με την βοήθεια της επιλογής “> >” όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα.

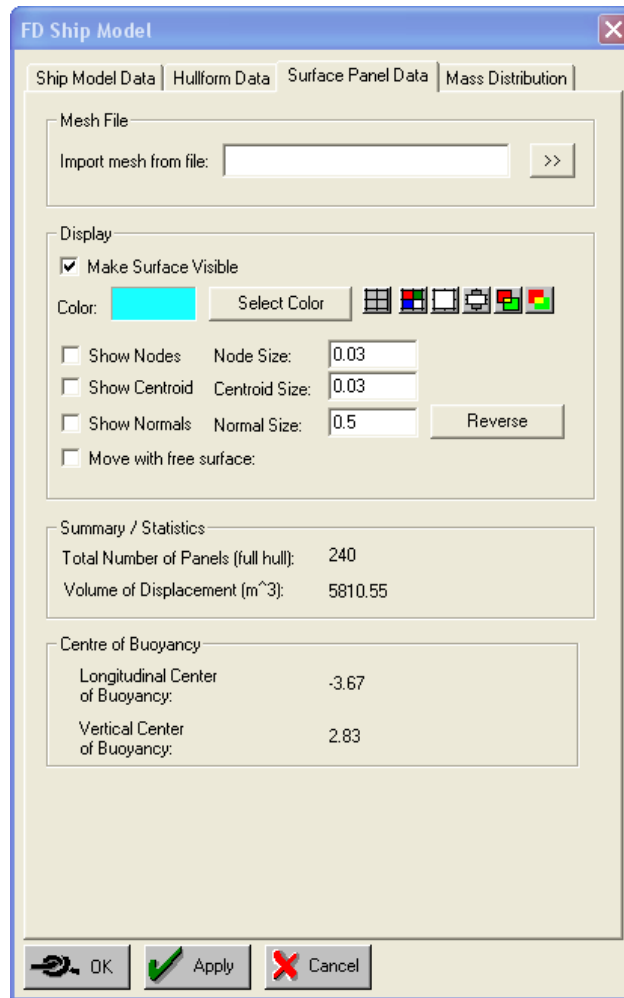


*Σχήμα Π.3.1.4 : Μενού εισαγωγής χαρακτηριστικών των γραμμών της γάστρας και δημιουργίας τετράπλευρων πλαισίων επί αυτής.*

Από το μενού του σχήματος Π.3.1.4 επιλέγουμε επιπλέον διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως ο τύπος πλώρας, ο οποίος μπορεί να είναι είτε **“standard”** είτε **“bulbous”**. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως για το υπό μελέτη επιβατηγό-οχηματογωγό πλοίο με την επιλογή **“bulbous”**, το πρόγραμμα εμφάνιζε κάποιο μήνυμα απρόσμενου σφάλματος και μετέπειτα η εφαρμογή τερμάτιζε. Ο συγγραφέας της παρούσης διπλωματικής εργασίας ακολουθώντας πιστά τις οδηγίες του εγχειριδίου του προγράμματος δεν μπόρεσε να χρησιμοποιήσει την επιλογή **“bulbous”**, κάτι πάνω στο οποίο έδωσε μεγάλη βαρύτητα και το οποίο ύστερα και από επαφή με την τεχνική υποστήριξη της εταιρείας Martec Ltd δεν μπόρεσε να αντιμετωπίσει ως πρόβλημα ακόμα και εφαρμόζοντας πιστά τις παρεχόμενες σε αυτόν από την τεχνική υποστήριξη οδηγίες. Επιπλέον σε αυτό το μενού παρέχονται

από το χρήστη οι ρυθμίσεις για τον τύπο της γάστρας του πλοίου από τις οποίες μπορεί να επιλεγεί μια από τις δύο διαθέσιμες επιλογές των **“standard”** και **“barge”**. Εν συνεχεία προχωρούμε στον καθορισμό του μεγέθους των πλαισίων με τα οποία θα μοντελοποιηθεί η γάστρα του πλοίου από την επιλογή **“Panel Size”** όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω σχήμα. Δυστυχώς στο πολύ ουσιαστικό σημείο του καθορισμού της μορφής και του αριθμού των “πλαισίων”, οι δυνατότητες παρέμβασης του χρήστη είναι από πολύ περιορισμένες έως ελάχιστες αφού την διαδικασία κατανομής των πλαισίων στη γάστρα του πλοίου αναλαμβάνει να ολοκληρώσει κατάλληλη για το σκοπό αυτό ενσωματωμένη στο πακέτο υπό-ρουτίνα για τον τρόπο λειτουργίας της οποίας δεν παρέχονται από το κατασκευαστή καθόλου διαθέσιμες πληροφορίες.

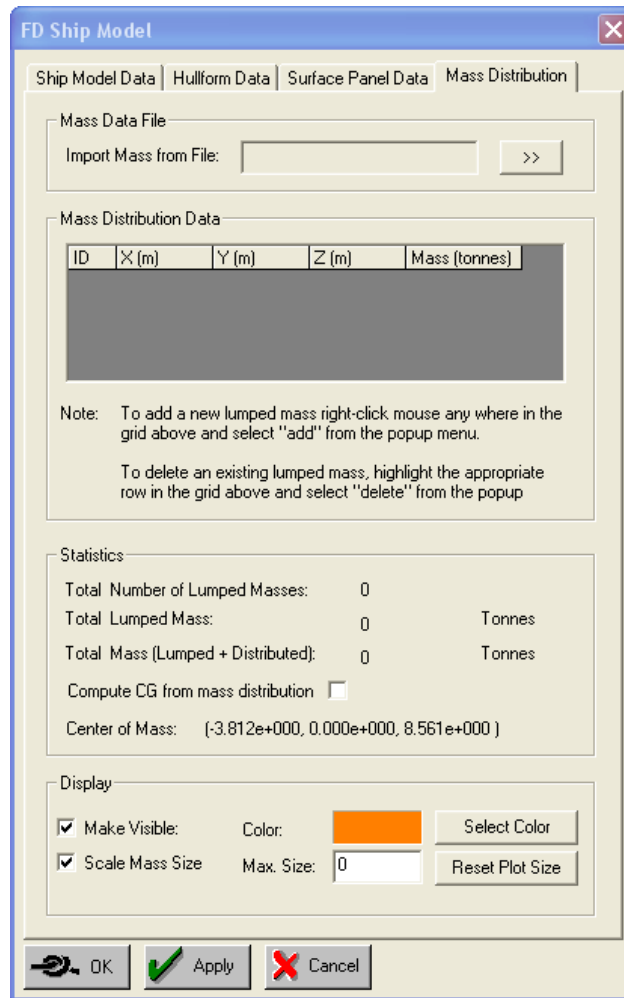
Αφού έχουμε ολοκληρώσει την διαδικασία παροχής πληροφοριών για την γάστρα του πλοίου, προχωράμε στην συνέχεια στην επόμενη καρτέλα εισαγωγής δεδομένων στο πρόγραμμα με τίτλο **“Surface Panel Data”** η οποία παρουσιάζεται ακολούθως. Στη καρτέλα αυτή παρέχεται η δυνατότητα να κάνουμε εισαγωγή της υπό μορφής πλαισίων γάστρας του πλοίου, εφόσον αυτή όπως έχουμε ήδη αναφέρει έχει δημιουργηθεί προηγουμένως με τη βοήθεια κάποιου άλλου σχεδιαστικού πακέτου όπως για παράδειγμα το Rhinoceros. Σε μία τέτοια περίπτωση πρέπει να τονίσουμε πως δεν πρέπει να έχει προηγηθεί χρήση του μενού **“Hullform Data”**. Επιπλέον στην υπό επεξήγηση καρτέλα υπάρχουν διαθέσιμες στον χρήστη διάφορες επιλογές για την μορφή απεικόνισης της επιφάνειας της γάστρας, οι οποίες όμως δεν θα μας απασχολήσουν περαιτέρω. Επιπλέον, αναφέρονται στον χρήστη συγκεντρωτικές πληροφορίες όπως ο συνολικός αριθμός των πλαισίων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της γάστρας, ο όγκος εκτοπίσματος και η θέση του κέντρου άντωσης.



**Σχήμα Π.3.1.5 :** Μενού εισαγωγής τετράπλευρων πλαισίων γάστρας και οπτική διαχείριση αυτών.

Εν συνεχεία, προχωράμε στο μενού **“Mass Distribution”** όπως φαίνεται παρακάτω. Από το μενού αυτό παρέχεται η δυνατότητα να κάνουμε εισαγωγή αναλυτικής κατανομής βαρών του πλοίου εφόσον βέβαια η πληροφορία αυτή είναι διαθέσιμη κάθε φορά για το υπό μελέτη πλοίο.



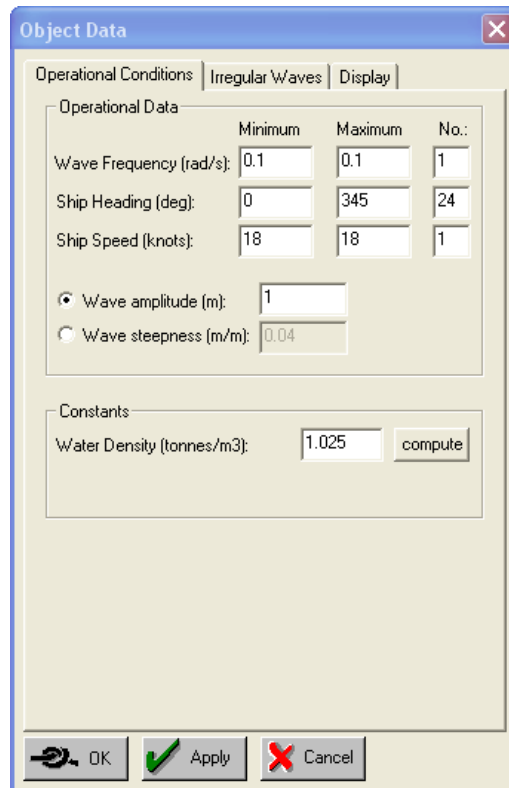


*Σχήμα Π.3.1.6 : Μενού εισαγωγής πληροφοριών για την κατανομή μάζας του μοντέλου.*

Με την διαδοχική χρήση των παραπάνω καρτελών όπως τις περιγράψαμε, έχουμε σε αυτό το σημείο ολοκληρώσει τη διαδικασία εισαγωγής και μοντελοποίησης του πλοίου σύμφωνα πάντα με τις απαιτήσεις του προγράμματος. Αυτό που απομένει στην συνέχεια είναι να ορίσουμε τις συνθήκες λειτουργίας κάτω από τις οποίες θα θέλαμε το πλοίο μας να λειτουργεί προκειμένου να προχωρήσουμε στην διεξαγωγή των προσομοιώσεων και την συγκομιδή των αναμενόμενων αποτελεσμάτων.

### Π.3.2 Διαδικασία ρύθμισης των συνθηκών λειτουργίας του εκάστοτε υπό μελέτη πλοίου.

Έχοντας ολοκληρώσει τη διαδικασία εισαγωγής του υπό μελέτη πλοίου στο πρόγραμμα FD-WaveLoad 2006A και πριν προχωρήσουμε στους υπολογισμούς πρέπει, όπως ήδη αναφέραμε, να ορίσουμε τις συνθήκες λειτουργίας υπό τις οποίες θέλουμε να κάνουμε την πρόβλεψη συμπεριφοράς του σκάφους. Σε αυτή την παράγραφο λοιπόν κάνουμε περιγραφή της διαδικασίας με την οποία καθορίζουμε τις συνθήκες λειτουργίας του σκάφους. Αφετηρία αυτής της διαδικασίας αποτελεί το μενού “*Modeling*” → “*Operational Profile*” οπότε και προκύπτει το ακόλουθο παράθυρο του προγράμματος.

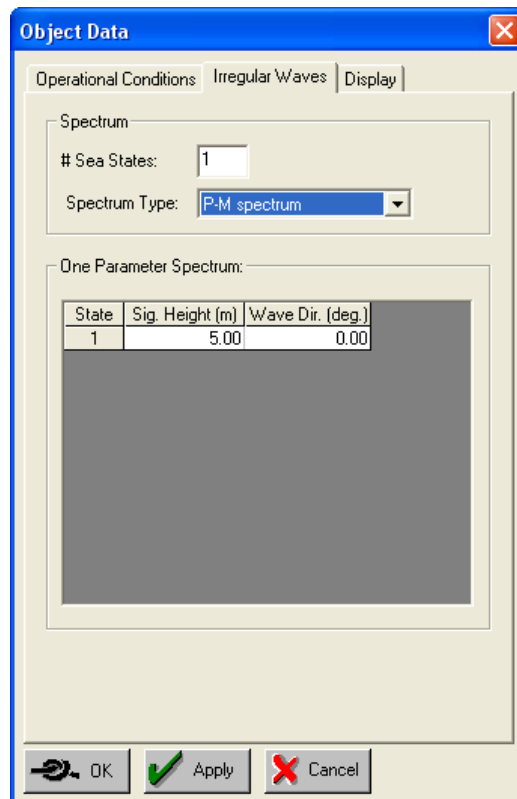


**Σχήμα Π.3.1.7 :** Μενού επιλογής συνθηκών προσομοίωσης με κανονικούς κυματισμούς.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης διαφόρων κύριων παραμέτρων προσομοίωσης. Μπορούμε να ορίσουμε τη συχνότητα του κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού και τη ταχύτητα του σκάφους. Επιπλέον ορίζουμε το πλάτος του κύματος ή την οξύτητα του κύματος. Η πυκνότητα

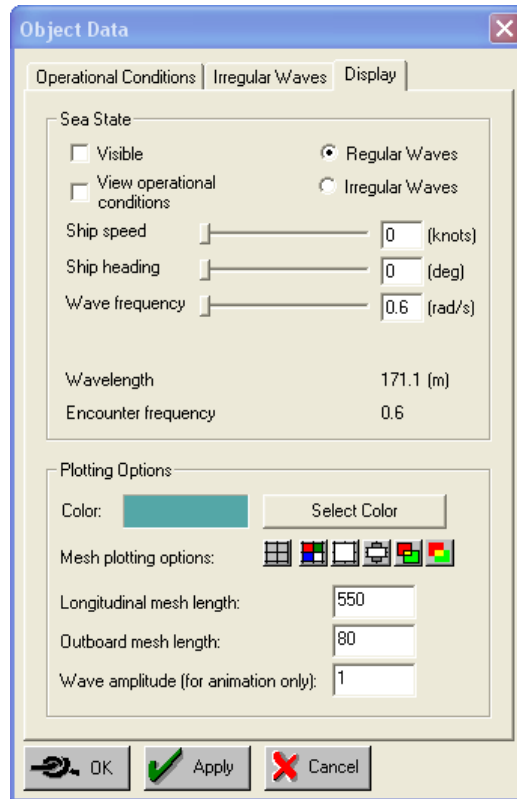
του νερού μπορεί επίσης να οριστεί από το χρήστη ή να υπολογιστεί από το κώδικα αυτόματα με την εντολή “*compute*”. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να τονίσουμε ότι υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν ταυτόχρονα πολλές τιμές για καθεμία από τις τρεις παραπάνω παραμέτρους και να επιλυθεί το πρόβλημα σε μια και μόνο εκτέλεση του κώδικα, κάτι το οποίο παρέχει μεγάλη ευελιξία στον χρήστη.

Αφού δηλώσουμε λοιπόν όλα τα χαρακτηριστικά λειτουργίας προχωράμε στην επόμενη καρτέλα του προγράμματος με τίτλο “*Irregular Waves*” η οποία και φαίνεται παρακάτω. Τη καρτέλα αυτή τη χρησιμοποιούμε αν θέλουμε να επιλέξουμε στην προσομοίωση αντί για κανονικούς κυματισμούς, που είναι και το πιο σύνηθες σε αυτή την κατηγορία προγραμμάτων, να κάνουμε χρήση κάποιας φασματικής κατανομής κυματισμών όπως Pierson-Moskowitz, ISSC, ITTC, JONSWAP, Bretschneider και Ochi-Hubble και να ορίσουμε τις παραμέτρους της κατανομής αυτής.



**Σχήμα Π.3.1.8 :** Μενού επιλογής συνθηκών προσομοίωσης του μοντέλου με τη χρήση φασματικής περιγραφής κατάστασης θάλασσας.

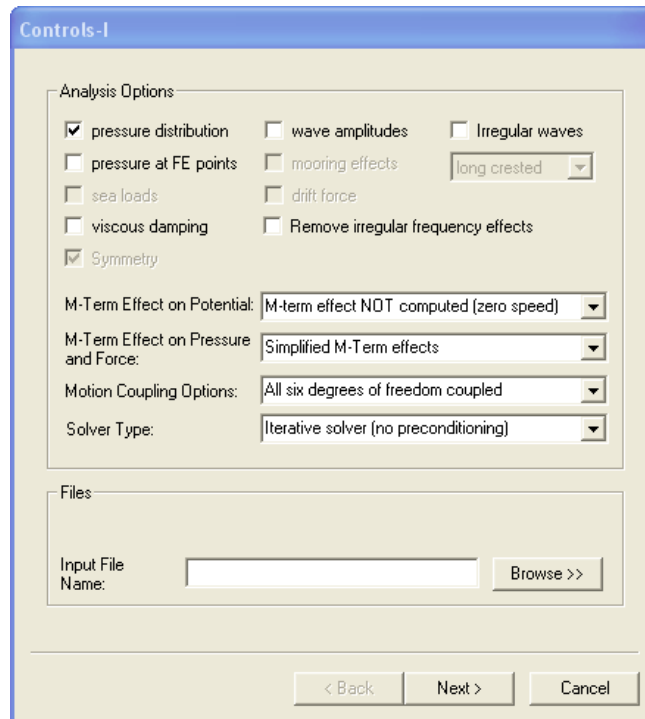
Εν συνεχεία προχωράμε στο τελευταίο μενού της διαδικασίας καθορισμού των συνθηκών λειτουργίας του πλοίου και το οποίο ουσιαστικά αφορά το “pre-processing”, οπτικό κομμάτι της προσομοίωσης.



**Σχήμα Π.3.1.9 :** Μενού οπτικοποίησης των συνθηκών λειτουργίας που επιλέξαμε.

Από εδώ, μπορεί ο χρήστης να επιλέξει να κάνει προεπισκόπηση των επιλογών του όσο αφορά τη συχνότητα και το πλάτος του κυματισμού. Επιλογές προβολής όπως το “*Longitudinal Mesh Length*” και “*Outboard Mesh Length*” ρυθμίζουν απλά το μέγεθος της προβαλλόμενης ελεύθερης επιφάνειας και καθορίζονται με μονάδα μέτρησης το «μέτρο». Κάνοντας τελικά μια προεπισκόπηση του μοντέλου και των παραμέτρων προσομοίωσης του, έχουμε ουσιαστικά ολοκληρώσει την απαιτούμενη διαδικασία μοντελοποίησης και ρύθμισης των συνθηκών λειτουργίας και μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στο τελικό στάδιο της παρούσης ενότητας της διπλωματικής εργασίας που είναι η εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών και η λήψη των αποτελεσμάτων προκειμένου να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας του πακέτου λογισμικού.

Για την εκτέλεση των υπολογισμών κάνουμε χρήση του μενού “**Solver**” → “*Analyze Model*” οπότε και ερχόμαστε αντιμέτωποι με τη καρτέλα του παρακάτω σχήματος.



**Σχήμα Π.3.1.10 :** Μενού ρύθμισης των επιθυμητών προς υπολογισμό μεγεθών και των παραμέτρων επίλυσης-προσομοίωσης

Σε αυτό το μενού μπορούμε να επιλέξουμε από τα : “*viscous damping*”, και τα δευτερευούσης σημασίας “*pressure distribution*”, “*pressure at FE points*”, “*sea loads*”, “*Symmetry*” κ.α. για τον υπολογισμό των κινήσεων του πλοίου επιλογές. Με την επιλογή “*viscous damping*” ο χρήστης ζητά από το πρόγραμμα να γίνει ο υπολογισμός των λόγω ιξώδους απόσβεσης σε διατοιχισμό συντελεστών, εφόσον βέβαια προηγουμένως έχει δημιουργήσει το με κατάληξη “.dmp” κατάλληλο αρχείο στο οποίο περιέχονται απαραίτητα για τον υπολογισμό της απόσβεσης στοιχεία και για το οποίο λεπτομέρειες θα αναφέρουμε παρακάτω. Με την επιλογή “*pressure distribution*” ο χρήστης ζητά να γίνει ο υπολογισμός της κατανομής της πίεσης πάνω στα πλαίσια, κάτι το οποίο δεν αφορά την παρούσα μελέτη αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ των υστέρων για κατασκευαστική ανάλυση. Με την επιλογή “*Symmetry*” δίνουμε στον κώδικα πληροφορία για το αν χρησιμοποιήσαμε ή όχι την ενσωματωμένη στο πρόγραμμα μηχανή παραγωγής πλαισίων στο μοντέλο. Αν την

έχουμε χρησιμοποιήσει, πρέπει να ενεργοποιήσουμε αυτή την επιλογή ενώ αν έχουμε εισάγει τα πλαίσια (model mesh) από κάποιο άλλο πρόγραμμα την απενεργοποιούμε.

Στο σημείο αυτό, ο εκάστοτε χρήστης του πακέτου λογισμικού θα πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή στις διαθέσιμες επιλογές που υπάρχουν για τα υπό-μενού “*M-Term Effect on Potential*”, “*M-Term Effect on Pressure and Force*”, “*Motion Coupling Options*” και “*Solver Type*”.

Για το υπό-μενού “*M-Term Effect on Potential*” υπάρχουν διαθέσιμες οι εξής επιλογές:

- “*M-term effect not computed (zero speed)*”, η οποία χρησιμοποιείται αν θέλουμε να αγνοήσουμε την επίδραση της πρόσω ταχύτητας στις κινήσεις του πλοίου,
- “*Computation of simplified m-term effect*”, επιλογή η οποία προτείνεται από την κατασκευάστρια εταιρεία του κώδικα για λεπτόγραμμα πλοία,
- “*M-term effect based on Green’s function*”, το οποίο προτείνεται από τον κατασκευαστή για «γεμάτα» πλοία (full form body ship).

Για το υπό-μενού “*M-Term Effect on Pressure and Force*” υπάρχουν διαθέσιμες οι εξής επιλογές:

- “*Use same option selected for potential*”, το οποίο χρησιμοποιείται για τυπική ανάλυση,
- “*No m-term effects*”, το οποίο επιλέγουμε προκειμένου να γίνει υπολογισμός των δυνάμεων και των πιέσεων χωρίς να ληφθούν υπόψη τα “m-term effects”.
- “*Simplified m-term effects*”, προκειμένου να γίνει υπολογισμός των δυνάμεων και των πιέσεων λαμβάνοντας υπόψη “simplified m-term effects”.
- “*Full m-term effects*”, προκειμένου να γίνει υπολογισμός των δυνάμεων και των πιέσεων λαμβάνοντας υπόψη “full m-term effects”.

Για το υπό-μενού “*Motion Coupling Options*” υπάρχουν διαθέσιμες οι εξής επιλογές:

- “*All six degrees of freedom coupled*”, το οποίο χρησιμοποιούμε για να κάνουμε τυπική ανάλυση,

- “*Surge, sway and yaw are uncoupled*”, το οποίο προτείνεται από το κατασκευαστή του κώδικα για την περίπτωση που έχουμε χαμηλές συχνότητες συνάντησης σε ακολουθούντες κυματισμούς,
- “*Surge, sway and yaw are not computed*”, το οποίο χρησιμοποιείται για την περίπτωση που έχουμε χαμηλές συχνότητες συνάντησης σε ακολουθούντες κυματισμούς, για απεικόνιση των κινήσεων του πλοίου και της κατανομής των πιέσεων πάνω στη γάστρα.

Για το υπό-μενού “*Solver Type*” υπάρχουν διαθέσιμες οι εξής επιλογές:

- “*Iterative solver (no preconditioning)*”, το οποίο προτείνεται από τον κατασκευαστή για την περίπτωση που έχουμε καταναίμει περισσότερα από 200 πλαίσια στην γάστρα και την ελεύθερη επιφάνεια,
- “*Gaussian elimination*”, στην περίπτωση που έχουμε λιγότερα από 200 πλαίσια,
- “*LU decomposition*”, στην περίπτωση που έχουμε λιγότερα από 200 πλαίσια.

Στο σημείο αυτό έχουμε πλέον ολοκληρώσει και τις επιλογές του μενού “*Controls-I*”.

Προχωράμε εν συνεχεία στο μενού “*Controls-II*” όπου και το μόνο που χρειάζεται να κάνουμε είναι να ορίσουμε στο πρόγραμμα που βρίσκεται το αρχείο με κατάληξη “.dmp” το οποίο περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για να γίνει ο υπολογισμός της απόσβεσης.

Αυτού του τύπου το αρχείο περιέχει διάφορες πληροφορίες οι οποίες ομαδοποιούνται σε 8 κύριες κατηγορίες. Στη πρώτη κατηγορία με τίτλο &b44controls παρέχονται πληροφορίες για το κατά πόσο επιθυμούμε ή όχι να ληφθεί υπόψη ο υπολογισμός της απόσβεσης από bilge keels του σκάφους και άλλων τύπων παρελκόμενων (πηδάλιο ή πτερύγιο τρόπιδας (skeg)) και ο συνολικός αριθμός των νομέων. Στη δεύτερη κατηγορία με τίτλο &bilgegeom παρέχονται διάφορα στοιχεία που αφορούν την γεωμετρία των bilge keel. Στη τρίτη κατηγορία με τίτλο &viscosity δίνεται η κινηματική συνεκτικότητα του νερού. Στη τέταρτη, πέμπτη και έκτη κατηγορία με τίτλους &sectionparameter\_a, &sectionparameter\_b και &sectionparameter\_c

αντίστοιχα παρέχονται πληροφορίες για τη γεωμετρία των νομέων και την δημιουργία δινών λόγω της κίνησης του διατοιχισμού. Στην έβδομη κατηγορία με τίτλο &rudderparameter παρέχονται πληροφορίες για τη γεωμετρία του πηδαλίου. Στην όγδοη και τελευταία κατηγορία με τίτλο &appendages παρέχονται πληροφορίες για την γεωμετρία και την θέση των υπολοίπων παρελκόμενων. Παρακάτω, παραθέτουμε για λόγους πληρότητας την μορφή ενός τέτοιου αρχείου.

```

# Data generated by Wizard

# Input data for estimation of roll damping coefficients

# Control data

$b44controls
IBK=1
IBE=1
IBF=1
IBA=0
IBL=1
ns=29
/end($b44controls)

$bilgegeom
ns0 = 10
ns1 = 14
bilgeb = 0.45
ratioib = 0.012857
/end($bilgegeom)

$viscosity
viscoef=1.19e-06
/end($viscosity)

$sectionparameter_a
ship_i = 3.00 3.00 3.00 3.00 3.00 1.00 1.00 1.00 1.00 1.00 2.00 2.00 2.00 2.00
ship_s = 9.22 43.49 82.50 102.48 217.34 237.95 262.19 285.88 308.68
ship_b = 3.24 6.24 9 11.58 13.88 18.18 21.34 23.38 24.64 25.28 25.4 25.4 25.38 24.84
ship_ky = 0.24 1.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54 9.54
ship_d = 0.22 1.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52 9.52
/end($sectionparameter_a)

$sectionparameter_b
ship_rhat = 0.25 1.40 8.53 8.56 8.65 8.88 9.32 11.47 15.88 15.88 15.88 15.88 15.88 12.88
ship_a = 59.00 52.00 50.00 48.00 45.00 41.00 30.00 20.00 9.00 5.00 1.00 0.00 0.00 1.00
ship_r = 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 14.28 14.70 15.12 15.08 14.89
ship_rb = 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 13.98 7.65 6.41 4.13 3.06 2.87 3.44
ship_lk = 2.19 4.38 4.38 4.38 8.75 8.75 8.75 8.75 8.75 8.75 8.75 8.75 8.75 8.75
/end($sectionparameter_b)

$sectionparameter_c
ship_g = 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.64 0.64 0.64 0.64 0.64 0.00
ship_ss = 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 8.23 8.62 9.03 8.98 8.75 0.00
ship_fr = 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.99 1.73 1.43 1.49 1.39 1.73 1.54
ship_ag = 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 5.00 5.00 5.00 5.00 5.00 0.00
/end($sectionparameter_c)

$rudderparameter
skegspan = 0
vcg = 0.02
rudderspan = 7.5
skegangle = 0.0
ruddersarea = 31.5002
/end($rudderparameter)

$appendages
numapp = 0
nfccoef = 0
app_y(1) = 0
app_z(1) = 0
app_g(1) = 0
app_c_e(1) = 0
app_c_r(1) = 0
app_b(1) = 0
/end($appendages)

```

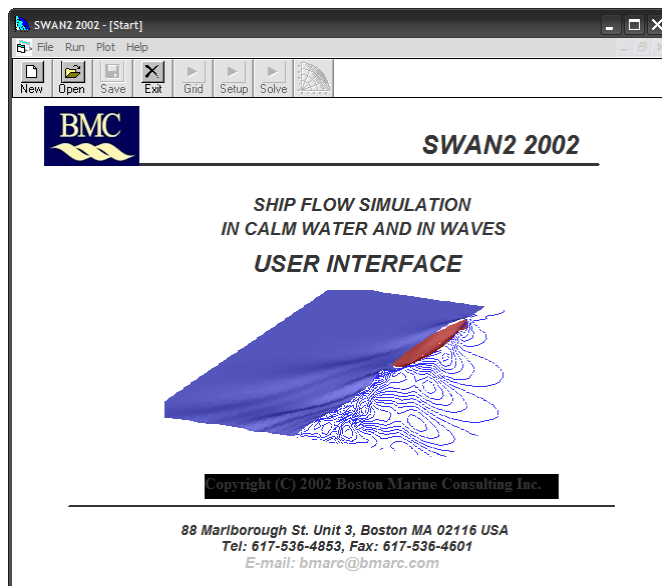
**Σχήμα Π.3.1.11 :** Παρουσίαση των περιεχομένων του αρχείου με κατάληξη “.dmp” το οποίο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της απόσβεσης.



## Π.4 Το γραφικό περιβάλλον χρήσης του προγράμματος SWAN2 2002

### Π.4.1 Αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης του εκάστοτε υπό μελέτη πλοίου.

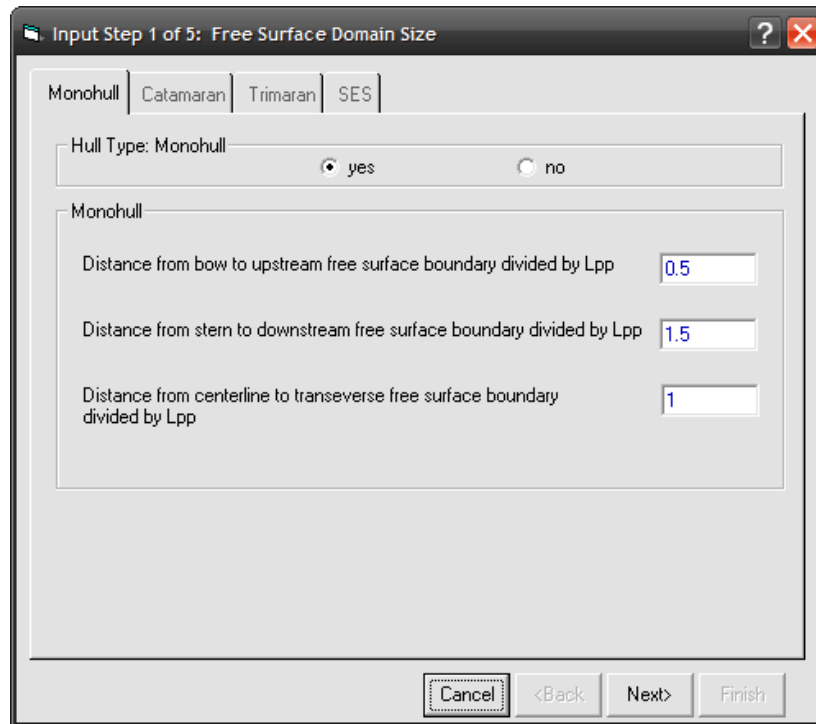
Στην συνέχεια παραθέτουμε μια ομάδα σχημάτων με αντίστοιχη συνοπτική περιγραφή προκειμένου να φέρουμε τον αναγνώστη σε μια πρώτη επαφή με το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος.



Σχήμα Π.4.1.1 : Εικόνα εκκίνησης του λογισμικού SWAN2 2002

Η παραπάνω εικόνα αποτελεί την πρώτη εικόνα του πακέτου που θα δει ο χρήστης και περιέχει τα κύρια μενού “*File*”, “*Run*”, “*Plot*” και “*Help*” με τις αντίστοιχες συντομεύσεις τους ακριβώς από κάτω με την ύπαρξη κουμπιών συντόμευσης.

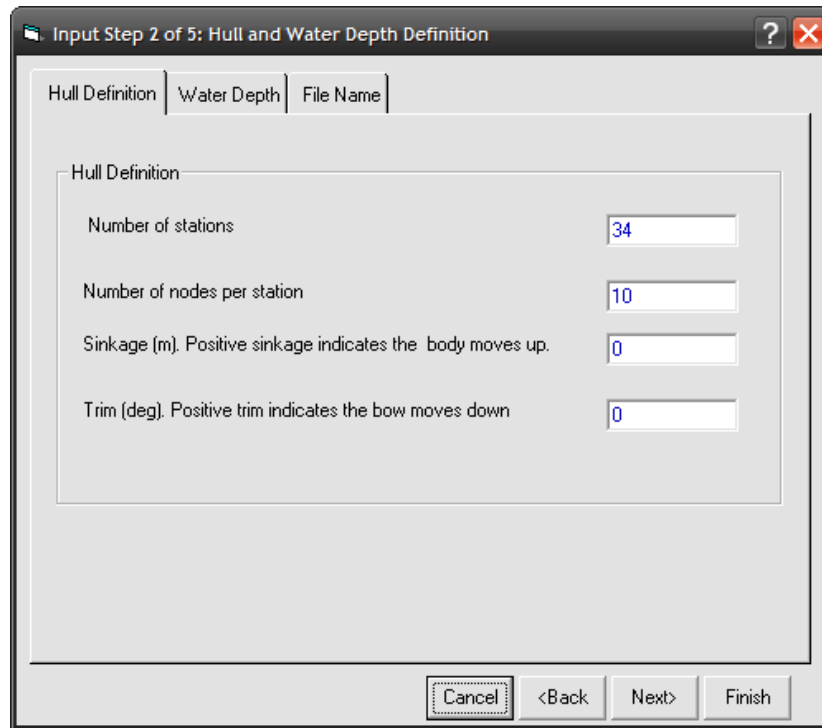
Ανατρέχοντας στο μενού “*File*” → “*New*” προκύπτει η καρτέλα της επόμενης σελίδας.



**Σχήμα Π.4.1.2 :** Μενού επιλογής της κατηγορίας του υπό μελέτη πλοίου-μοντέλου.

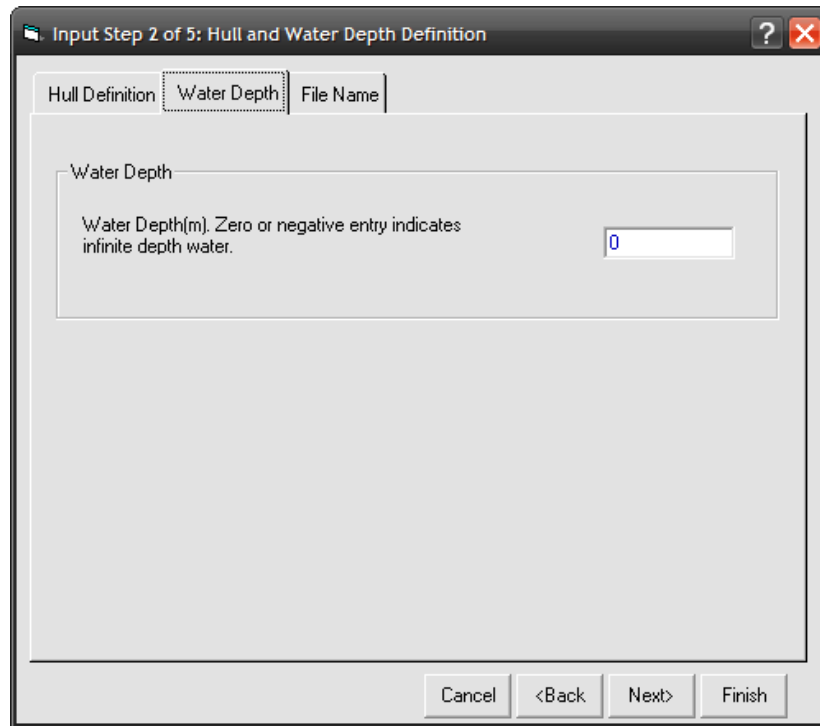
Από αυτό το μενού το οποίο αποτελείται από 5 διαφορετικά βήματα εισαγωγής δεδομένων, παρέχουμε όλα τα απαραίτητα για τη δημιουργία του υπολογιστικού μοντέλου του υπό μελέτη πλοίου. Στο παραπάνω σχήμα γίνεται επιλογή του τύπου του πλοίου ( μονόγαστρο, δίγαστρο, τρίγαστρο ή SES ) καθώς και των γεωμετρικών διαστάσεων της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού. Όταν αναφερόμαστε σε γεωμετρικές διαστάσεις της ελεύθερης επιφάνειας, εννοούμε την απόσταση της ελεύθερης επιφάνειας από την πλώρη του πλοίου και προς τα εμπρός (κατά τις θετικές τιμές του  $\chi$ -άξονα), από την πρύμνη του πλοίου και προς τα πίσω (κατά τις αρνητικές τιμές του  $\chi$ -άξονα) καθώς και από τον διαμήκη άξονα του πλοίου και εγκάρσιως (κατά τις θετικές τιμές του  $\psi$ -άξονα).

Εν συνεχεία πατώντας το κουμπί “*Next*” οδηγούμαστε στο επόμενο βήμα της διαδικασίας μοντελοποίησης και ερχόμαστε “αντιμέτωποι” με το ακόλουθο μενού το οποίο περιέχει τρία υπό-μενού όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα



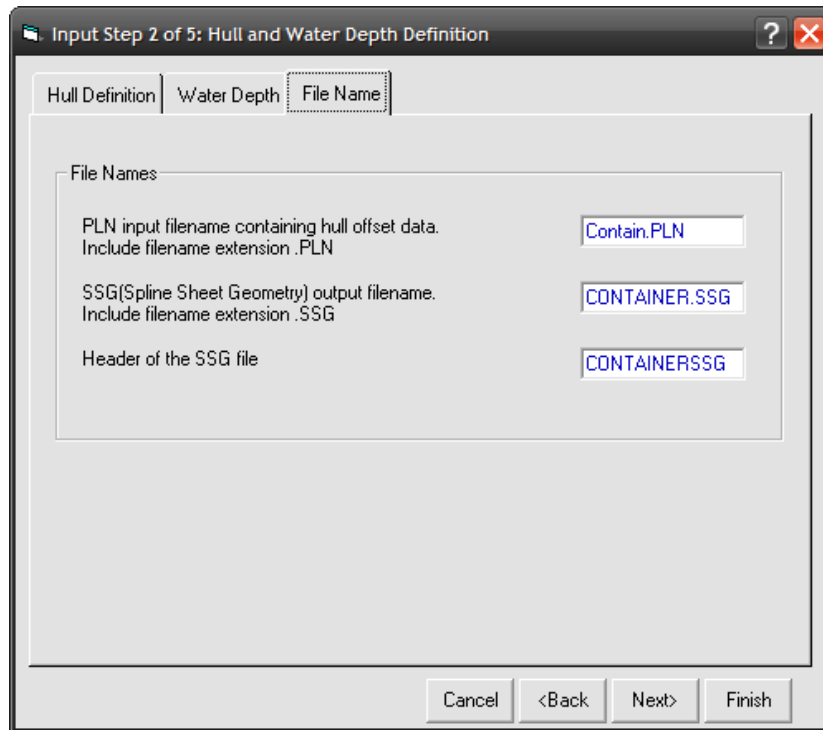
*Σχήμα Π.4.1.3 : Μενού ορισμού αριθμού σταθμών γάστρας, κόμβων ανά σταθμό, μεταβολής του βυθίσματος και της διαγωγής.*

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται ο καθορισμός του αριθμού των νομέων και των κόμβων ανά νομέα. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται εν συνεχεία από το πακέτο λογισμικού για τον καθορισμό του συνολικού αριθμού των πλαισίων που θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση της γάστρας (ουσιαστικά καθορίζει τον αριθμό των πλαισίων που θα δημιουργηθούν). Επιπλέον, παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη για άμεση μεταβολή του μέσου βυθίσματος του σκάφους και της διαγωγής αυτού.



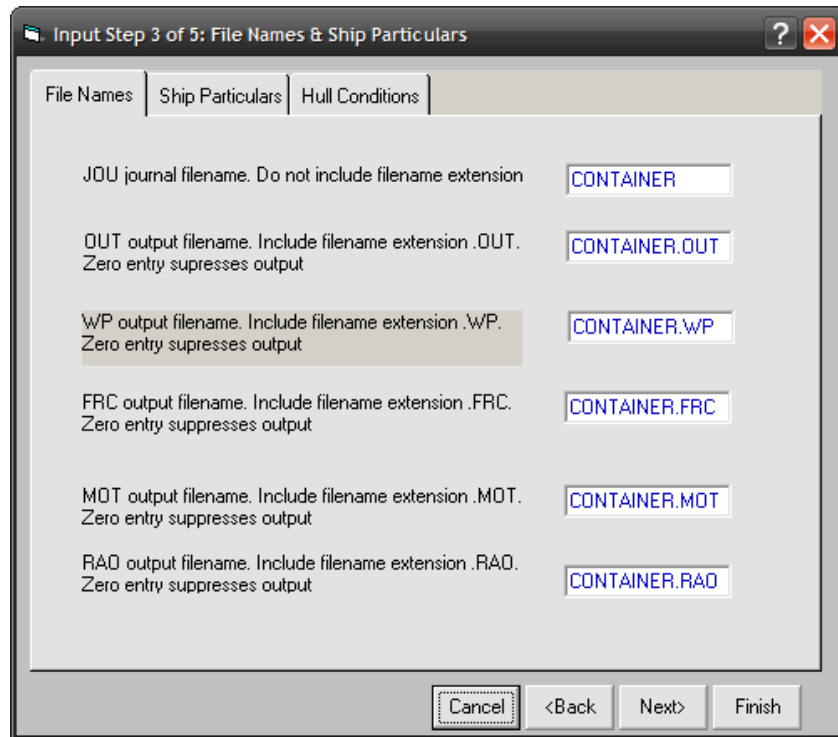
**Σχήμα Π.4.1.4 :** Μενού καθορισμού του βάθους του νερού.

Εν συνεχεία επιλέγουμε το βάθος του νερού στο οποίο θέλουμε να γίνει η προσομοίωση. Μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε πεπερασμένο και άπειρο βάθος νερού.



*Σχήμα Π.4.1.5 : Μενού απόδοσης ονοματολογιών αρχείων εισόδου-εξόδου, που αφορούν την γεωμετρία του μοντέλου.*

Στο παραπάνω σχήμα δηλώνουμε την ακριβή ονομασία του αρχείου το οποίο περιέχει την γάστρα του σκάφους υπό την μορφή σημείων νομέων, το οποίο αρχείο έχουμε προηγουμένως δημιουργήσει με την βοήθεια κάποιου C.A.D. πακέτου λογισμικού όπως αναφέραμε και νωρίτερα. Επιπλέον παρέχουμε το όνομα που επιθυμούμε να έχει το αρχείο εξόδου με την κατάληξη \*.ssg (Spline Sheet Geometry).



**Σχήμα Π.4.1.6 :** Μενού απόδοσης ονοματολογίων αρχείων εισόδου-εξόδου, που αφορούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Στο παραπάνω μενού, γίνεται απόδοση των ονομάτων που επιθυμεί ο χρήστης να έχουν κάποια βασικά αρχεία εξόδου του προγράμματος.

Input Step 3 of 5: File Names & Ship Particulars

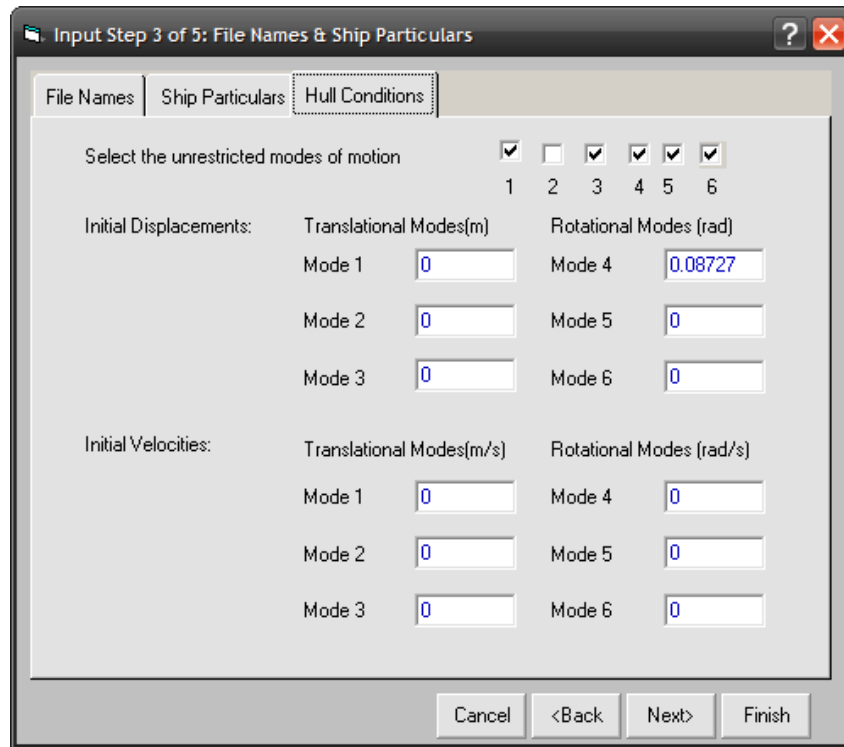
File Names | **Ship Particulars** | Hull Conditions

|   |             |
|---|-------------|
| Ship Design Waterline Length (m)                | 286.87      |
| Ship Speed(m/s)                                 | 1.029       |
| Ship Mass (kg)                                  | 1.13956E+08 |
| Longitudinal Center of Gravity ( m )            | -9.356      |
| Transverse Center of Gravity (m)                | 0           |
| Vertical Center of Gravity (m)                  | 4.827       |
| Roll Radius of Gyration (m)                     | 14.98       |
| Pitch Radius of Gyration (m)                    | 71.718      |
| Yaw Radius of Gyration (m)                      | 71.718      |
| Roll-Pitch Radius of Gyration (m <sup>2</sup> ) | 0           |

Cancel <Back Next> Finish

**Σχήμα Π.4.1.7** : Μενού εισαγωγής διαφόρων χαρακτηριστικών (των γραμμοσκιασμένων μόνο) του υπό μελέτη πλοίου, τόσο φυσικών όσο και αδρανειακών .

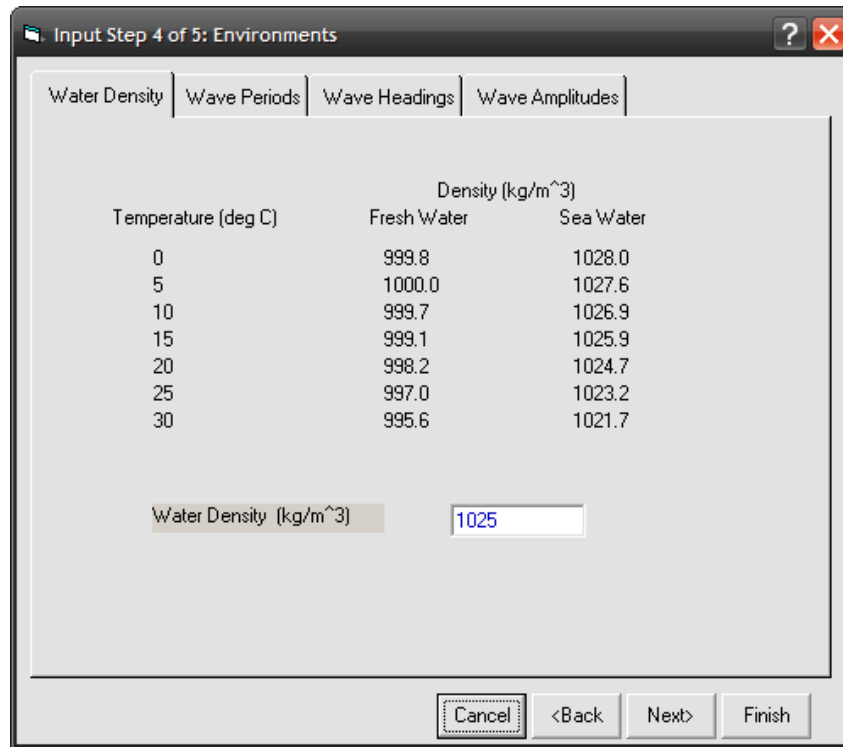
Από το παραπάνω σχήμα δηλώνουμε διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως το μήκος του πλοίου, λειτουργικά όπως η ταχύτητα αυτού και καθώς και αδρανειακά χαρακτηριστικά όπως το βάρος και το κέντρο αυτού και η ακτίνα αδράνειας σε διατοιχισμό, προνευτασμό και περιστροφική κίνηση περί τον κατακόρυφο άξονα.



*Σχήμα Π.4.1.8 : Μενού επιλογής των βαθμών ελευθερίας κίνησης του πλοίου και αρχικών συνθηκών.*

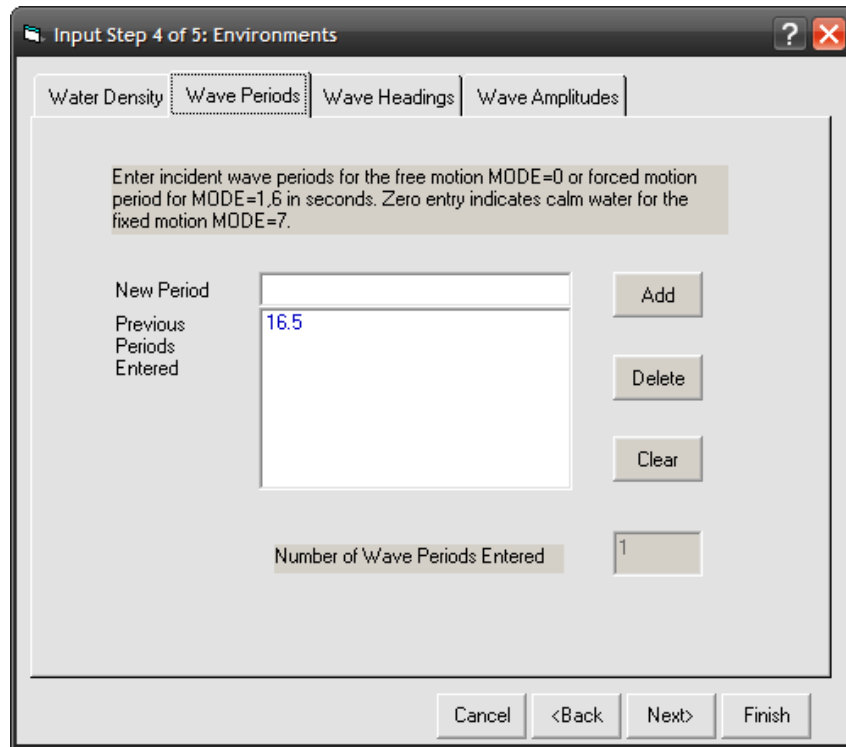
Στη παραπάνω καρτέλα καθορίζεται από τον χρήστη, ποιούς από τους βαθμούς ελευθερίας θέλει να ενεργοποιήσει και αντιστρόφως κατά την προσομοίωση των κινήσεων του πλοίου. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα να ορίσει αρχικές συνθήκες είτε με την μορφή αρχικών μετατοπίσεων από την όρθια θέση του πλοίου είτε με την μορφή αρχικών ταχυτήτων. Κατά αυτό τον τρόπο παρέχεται πλέον η δυνατότητα στο χρήστη να εκτελέσει προχωρημένου επιπέδου προσομοιώσεις, που δεν συνηθίζονται σε άλλα αντίστοιχα πακέτα. Παράδειγμα τέτοιου τύπου προσομοιώσεων, αποτελούν οι προσομοιώσεις πειραμάτων ελεύθερου διατοιχισμού (Free Roll Decay Test) για τον υπολογισμό για παράδειγμα της ιδιοσυχνότητας του πλοίου στη κίνηση του διατοιχισμού.





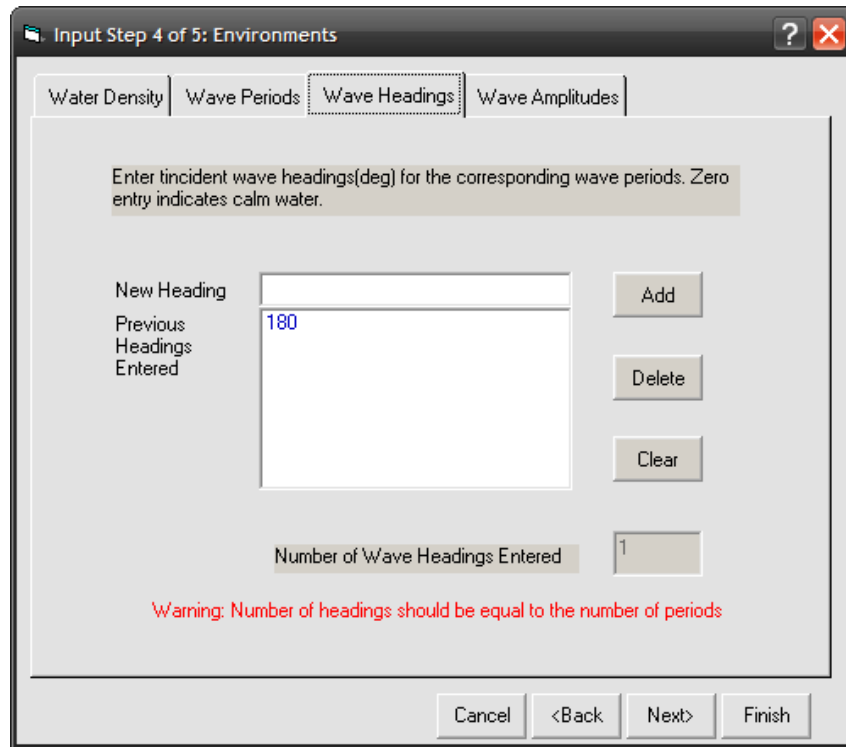
**Σχήμα Π.4.1.9 :** Μενού επιλογής της πυκνότητας του νερού.

Σε αυτή την κατηγορία καρτελών του SWAN ο χρήστης καθορίζει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θέλει να υποθέσει ότι θα λειτουργεί το σκάφος του. Αρχικά ορίζεται η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (ανάλογα με την θερμοκρασία και την περιοχή) που θα κινείται το σκάφος.



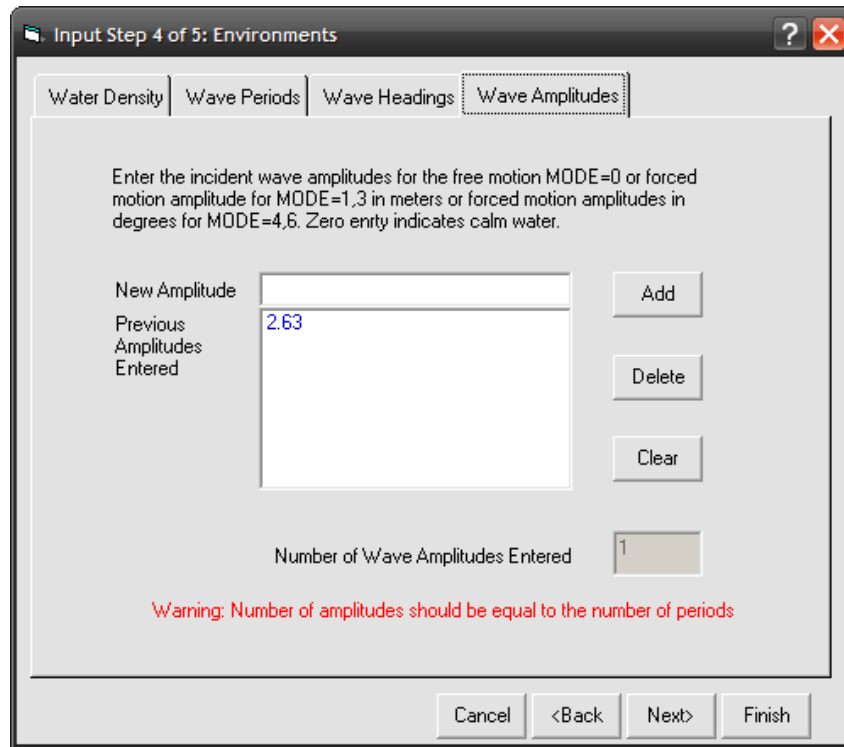
*Σχήμα Π.4.1.10 : Μενού ορισμού της περιόδου των κυματισμών.*

Στη παραπάνω καρτέλα καθορίζεται η περίοδος των κυματισμών όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα. Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να υπογραμμίσουμε πως το SWAN2 2002 υποστηρίζει, δυστυχώς για όλες τους τύπους προσομοιώσεων, την εισαγωγή χαρακτηριστικών μόνο κανονικών κυματισμών και όχι φασματική περιγραφή της κατάστασης θάλασσας χαρακτηριστικό το οποίο ήταν διαθέσιμο σε προηγούμενη έκδοση του.



*Σχήμα Π.4.1.11 : Μενού ορισμού της κατεύθυνσης των κυματισμών.*

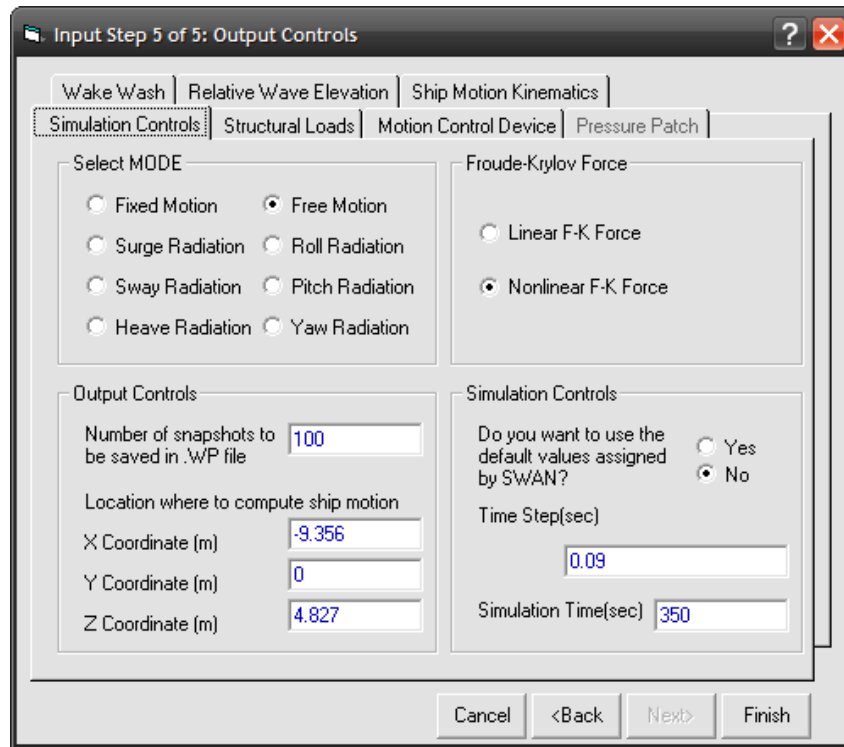
Κατόπιν προσδιορίζεται η διεύθυνση των κυματισμών όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα. Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι  $0^0$  αντιστοιχούν σε ακολουθούντες κυματισμούς και οι  $180^0$  σε μετωπικούς.



**Σχήμα Π.4.1.12 :** Μενού ορισμού του πλάτους των κυματισμών .

Τέλος, καθορίζεται το πλάτος των κυματισμών (κανονικών) που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε στην προσομοίωση μας από την καρτέλα που φαίνεται παραπάνω.

Με το πέρας όλων των προηγούμενων βημάτων έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία καθορισμού του τρόπου προσομοίωσης και των συνθηκών αυτής. Στην πράξη έχουν ορισθεί όλες οι κύριες παράμετροι της προσομοίωσης με εξαίρεση μόνο δύο. Αυτές είναι ο χρόνος προσομοίωσης και το βήμα μεταξύ των υπολογισμών. Αυτές θα συναντήσουμε στο τελευταίο πακέτο καρτελών του προγράμματος όπως θα δούμε και στην συνέχεια.



*Σχήμα Π.4.1.13 : Μενού ορισμού του τρόπου λειτουργίας και της διάρκειας της μοντελοποίησης .*

Στην ομάδα των μενού που ανήκει και το παραπάνω σχήμα (Ομάδα 5) υπάρχουν και επιπλέον μενού τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσης δουλειάς.

Έχοντας ολοκληρώσει την διαδικασία που περιγράφουμε στην παράγραφο αυτή, δημιουργείται το αρχείο με κατάληξη \*.inp (Job Control Parameters) μια ενδεικτική μορφή του οποίου παραθέτουμε στη συνέχεια.

```
1
"Contain.PLN"
0,0
34,10
0
.5,1.5,1
"CONTAINER.SSG"
"CONTAINERSSG"
"CONTAINER"
286.87,1025
1,0
1.029
1,0,1,1,1,1
0,0,0,.08727,0,0
0,0,0,0,0,0
1
15.76
180
2.38
1.13956E+08,-9.356,0,4.827
14.98,71.718,71.718,0
-9.356,0,4.827
"CONTAINER.OUT"
"CONTAINER.WP",100
"CONTAINER.FRC", "CONTAINER.MOT", "CONTAINER.RAO"
.09,105
0
0
0
1
24.8 8.5 2.3
0
```

**Σχήμα Π.4.1.14 :** Παρουσίαση των περιεχομένων ενός αρχείου με κατάληξη “.inp”

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] FD-WaveLoad 2006A, 2006, MARTEC Smart solutions for engineering, Science and Computing, User's Guide.
- [2] SWAN2, 2002 Boston Marine Consulting, Ship flow simulation in Calm Water and in Waves. User Manual
- [3] FD-WaveLoad 2006A, 2006, MARTEC Smart solutions for engineering, Science and Computing, Theory Manual.
- [4] Schmitke, R.T. 1978, Ship sway, roll and yaw motion in oblique seas, Transactions SNAME, Vol. 86.
- [5] ITTC 1978, 15th ITTC seakeeping committee report, Proceedings of the 15th ITTC, Hague, The Netherlands.
- [6] ITTC 1981, 16th ITTC seakeeping committee report, Proceedings of the 16th ITTC, Leningrad, Russia
- [7] Daewoo Heavy Industries Ltd., 2000, Seakeeping Calculation of ship BlueStar Ithaki.
- [8] Pesman, E. Bayraktar, D. & Taylan, M., Influence of damping on the roll motion of ships, Istanbul Technical University, Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering.
- [9] Spyrou, K.J. Themelis, N. & Niotis, S., Probabilistic assessment of parametric rolling: Comparative study of detailed and simplified models, Proceedings of the 9th International Ship Stability Workshop
- [10] Spyrou, K.J. Tigkas, I. Scanferla, N. Pallikaropoulos, N. & Themelis, N. 2008, Prediction potential of the parametric rolling behavior of a post-panamax containership, Ocean engineering (to be published).
- [11] Sclavounos, P.D. 1996, Computation of wave ship Interactions, Computational mechanics publications.