



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ
ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ»

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση της Μορφολογίας της Πρύμνης του Πλοίου στην
Δυναμική του Συμπεριφορά σε Κυματισμούς

Ιωάννης Βάρσαμος
Α.Μ. MSCNA1802

Επιβλέπων Καθηγητής:
Δρ. Κωνσταντίνος Πολίτης

Αιγάλεω, 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΠΡΟΗΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑ»

Διπλωματική Εργασία

Επίδραση της Μορφολογίας της Πρύμνης του Πλοίου στην Δυναμική του Συμπεριφορά σε Κυματισμούς

Συγγραφέας

Ιωάννης Βάρσαμος (Α.Μ. 1802)

Επιβλέπων

Κωνσταντίνος Πολίτης

Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Ημερομηνία Εξέτασης

22/09/2021

Εξεταστική Επιτροπή

Κωνσταντίνος Πολίτης

Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αλέξανδρος Θεοδοουλίδης

Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Θεόδωρος Γεροστάθης

Αναπλ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ιωάννης Βάρσαμος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 1802, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένες Τεχνολογίες στη Ναυπηγική και Ναυτική Μηχανολογία» του Τμήματος Ναυπηγών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

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

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

Ο Δηλών



Βάρσαμος Ιωάννης

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	11
Abstract.....	11
Ευχαριστίες.....	13
1. Εισαγωγή	15
1.1 Πορεία Εργασίας	15
1.2 Κριτήρια Επιλογής	16
1.3 Επίδραση της Μορφής του Πλοίου στις Αποκρίσεις	16
1.4 Τρόποι Μείωσης Αποκρίσεων.....	17
1.5 Κριτήρια Μέγιστων Αποκρίσεων.....	22
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	26
2.1 Συμπεριφορά Πλοίου σε Αρμονικούς Κυματισμούς.....	26
2.1.1 Βασικοί Ορισμοί.....	27
2.1.2 Αποσύνθεση των δύο γραμμικών προβλημάτων.....	30
2.2 Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (BEM).....	37
2.3 Rankine Panel Method.....	40
2.3.1 Το πρόβλημα συνοριακών τιμών.....	40
2.3.2 Συνοριακή Συνθήκη στην Ελεύθερη Επιφάνεια.....	41
2.3.3 Συνοριακή Συνθήκη στο Σώμα.....	43
2.3.4 Αρμονικές Ροές	44
2.3.5 Η Εφαρμογή της Μεθόδου	46
2.4 Το Θαλάσσιο Περιβάλλον.....	51
2.4.1 Περιγραφή ενός Πραγματικού Κυματισμού	51
2.4.2 Τυπικά Φάσματα Κυματικής Ενέργειας.....	52
2.4.3 Εφαρμογές με Φασματικά Μοντέλα	55
3. Πορεία Υπολογισμών	57
3.1 Η Γεωμετρία της Γάστρας.....	57
3.2 Το Πλέγμα Υπολογισμού	58
3.2.1 Το Πλέγμα του Πατρικού Πλοίου	58
3.2.2 Το Πλέγμα του Πλοίου NEOPYGOS	64

3.2.3 Σύγκριση Γεωμετρίας	69
3.3 Περίοδοι Υπολογισμού.....	76
3.4 Χρόνος Προσομοίωσης	76
3.5 Μη Ομαλά Αποτελέσματα	77
4. Αποτελέσματα των RAOs	78
4.1 Πατρικό Πλοίο.....	79
4.1.1 Heave RAOs	79
4.1.2 Roll RAOs	80
4.1.3 Pitch RAOs	81
4.1.4 Περιγραφή Αποτελεσμάτων	82
4.2 NEOPYGOS.....	83
4.2.1 Heave RAOs	83
4.2.2 Roll RAOs	84
4.2.3 Pitch RAOs	85
4.2.4 Περιγραφή Αποτελεσμάτων	86
4.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	87
4.3.1 Heave RAOs	87
4.3.2 Roll RAOs	88
4.3.3 Pitch RAOs	89
4.3.4 Περιγραφή Αποτελεσμάτων	90
5. Συμπεριφορά των Πλοίων σε Πραγματικούς Κυματισμούς	91
5.1 Πατρικό Πλοίο.....	96
5.1.1 Heave	97
5.1.2 Roll	99
5.1.3 Pitch.....	101
5.2 NEOPYGOS.....	103
5.2.1 Heave	103
5.2.2 Roll	105
5.2.3 Pitch.....	107
5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων	109

5.3.1 Heave.....	110
5.3.2 Roll	111
5.3.3 Pitch.....	112
5.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	113
6. Πραγματοποίηση Αποκρίσεων.....	114
6.1 Διακριτοποίηση Φάσματος.....	114
6.2 Πατρικό Πλοίο.....	118
6.2.1 Heave	119
6.2.2 Roll	122
6.2.3 Pitch.....	125
6.2.4 Υπολογισμός Σημαντικού Ύψους Απόκρισης	128
6.3 NEOPYGOS.....	128
6.3.1 Heave.....	129
6.3.2 Roll	132
6.3.3 Pitch.....	135
6.3.4 Υπολογισμός Σημαντικού Ύψους Απόκρισης	138
6.4 Σύγκριση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	138
7. Υπολογισμός Επιταχύνσεων.....	139
7.1 Εισαγωγή	139
7.2 Υπολογισθείσες Επιταχύνσεις.....	140
8. Συμπεράσματα.....	145
9. Προτάσεις.....	146
10. Βιβλιογραφία	147

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν δύο πλοία ως προς την υδροδυναμική τους συμπεριφορά. Το πρώτο πλοίο, το οποίο αναφέρεται παρακάτω ως «πατρικό πλοίο» είναι υπάρχον και εν λειτουργία σε διαδρομές στα ελληνικά ύδατα. Το δεύτερο πλοίο, το οποίο αναφέρεται ως «NEOPYGOS» σχεδιάστηκε έχοντας ως βάση το πατρικό πλοίο, με την βασική τους διαφορά να είναι η μορφή της πρύμνης. Ενώ το πατρικό πλοίο διαθέτει πρύμνη τύπου «*twin gondola stern*» το δεύτερο σχεδιάστηκε με πρύμνη συμβατικού σκάφους. Τα δύο αυτά πλοία είναι όμοια από τον μέσο νομέα και πώρα, ενώ επίσης έχουν και το ίδιο εκτόπισμα στο βύθισμα λειτουργίας. Στην συνέχεια πραγματοποιείται μελέτη αποκρίσεων και στα δύο πλοία, προκειμένου να υπολογιστεί ποιο από τα δύο έχει την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά στους κυματισμούς, καθώς και το κατά πόσο η μορφολογία της πρύμνης παίζει ρόλο στην υδροδυναμική αυτή συμπεριφορά.

Abstract

In this paper, two vessels were studied for their hydrodynamic responses in waves. The first vessel, mentioned as “Parent Ship”, is an existing ship operating in greek seas. The second vessel, mentioned as “NEOPYGOS”, is a newly designed vessel similar to the parent ship, with their most noticeable difference the form of their stern. The parent ship is constructed with a “twin gondola” stern, while NEOPYGOS is designed with a more conventional stern form. Both vessels are the same from the midship and forward. Moreover, both vessels’ displacement is the same at calculation draft. After the new design is completed, the hydrodynamic responses for both ships are calculated, in order to estimate the effect of the stern form in the results.

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την συμβολή ορισμένων ανθρώπων όπως του Ιωάννη Θωμόγλου, ο οποίος μου παρείχε πολύτιμες συμβουλές σε μαθηματικά προβλήματα που προέκυψαν, τον Δρ. Θεόδωρο Γεροστάθη, ο οποίος φρόντισε για την ομαλή λειτουργία του λογισμικού και τον Δρ. Θωμά Μαζαράκο, ο οποίος με συμβούλεψε στα αρχικά στάδια της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Μπάκα, ο οποίος μου πρόσφερε βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα, και τον Άγγελο Πιλάτη, ο οποίος μου προσέφερε τεχνικές συμβουλές καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Φυσικά, εκτός των παραπάνω, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας, Δρ. Κωνσταντίνο Πολίτη, ο οποίος μου πρόσφερε την βοήθειά και την καθοδήγηση που χρειαζόμουν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

1. Εισαγωγή

1.1 Πορεία Εργασίας

Στην παρούσα εργασία, δύο πλοία *RoRo-Pax* συγκρίνονται ως προς την υδροδυναμική τους συμπεριφορά στους κυματισμούς. Η βασική διαφορά των δύο αυτών πλοίων είναι η μορφή της πρύμνης τους, ενώ από την μέση τομή και πρόρα το πλοίο έχει όμοια μορφή. Ενώ το αρχικό πλοίο (*parent ship*) είναι υπάρχον, το δεύτερο πλοίο δημιουργήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, και ονομάστηκε “*NEOPYGOS*”.

Στο αρχικό πλοίο, η μορφή της πρύμνης είναι όμοια με καταμαράν, δηλαδή υπάρχουν δύο μέρη της γάστρας στα πλαϊνά του πλοίου που βρίσκονται πιο χαμηλά απ’ ότι στην μέση του. Αυτά τα μέρη λειτουργούν παράλληλα και ως οδηγίο για τους ελικοφόρους άξονες του πλοίου, σε αντίθεση με άλλες περιπτώσεις επιβατηγών με συμβατική γάστρα όπου οι άξονες στηρίζονται με ειδικά διαμορφωμένα *V-Brackets*. Αντιθέτως, στο δεύτερο πλοίο, η πρύμνη σχεδιάστηκε όπως συνηθίζεται σε ένα συμβατικό πλοίο. Προκειμένου τα δύο πλοία να είναι συγκρίσιμα, έχουν διατηρηθεί οι βασικές διαστάσεις ίδιες, ενώ στο εκτόπισμα υπάρχει αμελητέα διαφορά. Η υπηρεσιακή τους ταχύτητα λήφθηκε 15 κόμβοι και το βύθισμα για το οποίο μελετήθηκαν είναι $T_{calc} = 3.496 \text{ m (mld)}$.

Οι διαστάσεις των δύο πλοίων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<i>Vessel</i>	<i>Parent Ship</i>	<i>NEOPYGOS</i>
<i>L.O.A.</i>	78.00 m	78.00 m
<i>L.B.P.</i>	68.00 m	68.00 m
<i>Breadth (mld)</i>	12.30 m	12.30 m
<i>Depth (mld)</i>	4.20 m	4.20 m
<i>T_{calc} (mld)</i>	3.496 m	3.496 m
<i>Displacement @ T_{calc}</i>	1634.78 tn	1634.4 tn

Για τον υπολογισμό των αποκρίσεων του πλοίου, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *SWAN*, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την *BMC*.

1.2 Κριτήρια Επιλογής

Προκειμένου να επιλεγεί ποιο από τα δύο πλοία έχει την καλύτερη υδροδυναμική συμπεριφορά, θα συγκριθούν οι αποκρίσεις μεταξύ τους γραφικά, και φυσικά κάνοντας χρήση των *RMS* τιμών τους. Η σύγκριση, καθώς και ο υπολογισμός των φασματικών μεγεθών, θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

1.3 Επίδραση της Μορφής του Πλοίου στις Αποκρίσεις

Δεν είναι εύκολο κανείς να εντοπίσει τα αίτια της συμπεριφοράς του πλοίου σε συγκεκριμένα στοιχεία. Παρόλα' αυτά, χρησιμοποιώντας την εμπειρία έως σήμερα, μπορούν να γίνουν κάποιοι συσχετισμοί. Σχετικές εργασίες και έρευνες έχουν δημοσιευτεί, όπως για παράδειγμα από *Tupper (2004)*, *Cakici and Aydin (2014)* και *Cerowski (2008)*

Σύμφωνα με τον *Tupper (2004)* κατά κανόνα, ένα μεγαλύτερο πλοίο θα παρουσιάζει μικρότερες αποκρίσεις, καθώς το μεγάλο μήκος μειώνει την πιθανότητα πλεύσης σε κυματισμό με συγκρίσιμο μήκος κύματος. Επίσης αναφέρεται πως μεγάλος λόγος μήκος προς βύθισμα οδηγεί σε μικρότερο *pitch* και *heave*, αλλά θα αυξήσει τις πιθανότητες για *slamming*. Τέλος αναφέρεται πως η ύπαρξη βολβού στην πλήρη βοηθά στην μείωση των κινήσεων στα «κοντά» κύματα αλλά αυξάνει τις αποκρίσεις στα «μακρά» κύματα.

Ο *Cerowski (2008)*, προσεγγίζει το θέμα χρησιμοποιώντας παραμετρικά μοντέλα πλοίων *RoRo* ίδιου εκτοπίσματος και *GM* για τον εντοπισμό των τιμών διαφόρων όρων για τις οποίες λαμβάνουμε την καλύτερη δυναμική συμπεριφορά πλοίου. Με αυτόν τον τρόπο συμπεραίνει πως οι καλύτερες επιλογές παραμέτρων είναι $C_B=0.62$, $C_{WL}=0.8$ και λόγο $L/B=5.97-6.04$. Ο ίδιος ερευνητής, σε άλλη δημοσίευσή του (*Cerowski, 2011*) αναφέρει πως οι κάθετες και εγκάρσιες κινήσεις του πλοίου εξαρτώνται από το μήκος του πλοίου, από τον λόγο μήκους προς πλάτους και από τον λόγο πλάτους προς βυθίσματος. Τέλος, σε μία ακόμη δημοσίευση του ίδιου (*Cerowska and Cerowski, 2015*) δημιουργείται λογισμικό όπου γίνεται προσέγγιση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλοίου κάνοντας χρήση μόνο ορισμένων βασικών διαστάσεων, εκ των οποίων το μήκος μεταξύ καθέτων, το πλάτος, το βύθισμα, τον κυβικό συντελεστή και το αρχικό εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος.

Οι *Cakici and Aydin (2014)* ασχολήθηκαν με τον προσδιορισμό των πιο σημαντικών λόγων μεγέθους και συντελεστών μορφής στο πρόβλημα των αποκρίσεων, για ότι αφορά τα πλοία *gulet*, που είναι παραδοσιακά σκάφη της Τουρκίας. Μέσα στους όρους που θεώρησαν ότι ίσως έχουν μεγάλη επίδραση ήταν τα L_{WL}/B_{WL} , B_{WL}/T , $L_{WL}/V^{1/3}$ (συντελεστής λυγηρότητας), LCF/L_{OA} , LCB/L_{OA} , καθώς και οι συντελεστές μορφής C_{WP} , C_P και C_{VP} . Προσεγγίζοντας πολυωνυμικά τα αποτελέσματα που έλαβαν από μελέτες αποκρίσεων 21 σκαφών, κατέληξαν σε αποτελέσματα όπως τα εξής:

- Αυξάνοντας το L_{WL}/B_{WL} και το B_{WL}/T , ενώ παράλληλα μειώνοντας τον συντελεστή λυγηρότητας $L_{WL}/\nabla^{1/3}$, οδηγούμαστε σε μικρότερες κινήσεις *heave* και *pitch*
- Αυξάνοντας C_{WP} και μειώνοντας τα C_P και C_{VP} λαμβάνουμε μικρότερες τιμές για το *heave*
- Μικρότερες τιμές για τα C_P και C_{VP} είναι βοηθούν για το *pitch* και την κατακόρυφη επιτάχυνση γενικότερα
- Γενικότερα καλύτερα αποτελέσματα για το *heave* και τις κάθετες επιταχύνσεις λήφθηκαν όταν το *LCB* έτεινε προς την πρύμνη και το *LCF* προς την πλώρη

Σε κάθε περίπτωση όμως οι ερευνητές καταλήγουν πως, εκτός από το ότι κάθε πλοίο καθώς και το περιβάλλον λειτουργίας του είναι ξεχωριστή περίπτωση, η αυξομείωση πολλών παραγόντων ενώ μπορεί να βοηθά σε κάποιες συνθήκες λειτουργίας, να επιβαρύνουν σε άλλες.

1.4 Τρόποι Μείωσης Αποκρίσεων

Σε περίπτωση όπου οι αποκρίσεις ενός πλοίου προβλέπεται πως θα είναι μεγάλες και ότι θα προκαλούν πρόβλημα στους επιβάτες του ή στις εργασίες που εκτελούνται, τότε θα πρέπει να τοποθετηθούν συστήματα μείωσης τους. Οι αποκρίσεις οι οποίες δημιουργούν ταλαντωτικές κινήσεις είναι αυτές το *heave*, το *roll* και το *pitch*., γιατί αυτές είναι οι κινήσεις στις οποίες το πλοίο «αντιστέκεται» και τείνει να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση, δηλαδή την όρθια θέση. Από τις παραπάνω τρεις κινήσεις, συστήματα μείωσης έχουν υλοποιηθεί μόνο για το *roll* και το *pitch*. Ενώ τα συστήματα μείωσης του διατοιχισμού (*roll*) συναντώνται συχνά, τα συστήματα μείωσης του *pitch* δεν συνηθίζονται. Παρακάτω θα γίνει μια μικρή εισαγωγή στους τρόπους που χρησιμοποιούνται για να μειωθεί ο διατοιχισμός του πλοίου καθώς και στην αρχή λειτουργίας τους. Μπορεί κανείς να διαχωρίσει τα συστήματα αυτά σε δύο κατηγορίες, τα «παθητικά» συστήματα¹ και τα «ενεργά» συστήματα². Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τον τρόπο λειτουργίας τους, εάν χρειάζονται πηγή ενέργειας ή κάποιο σύστημα ελέγχου.

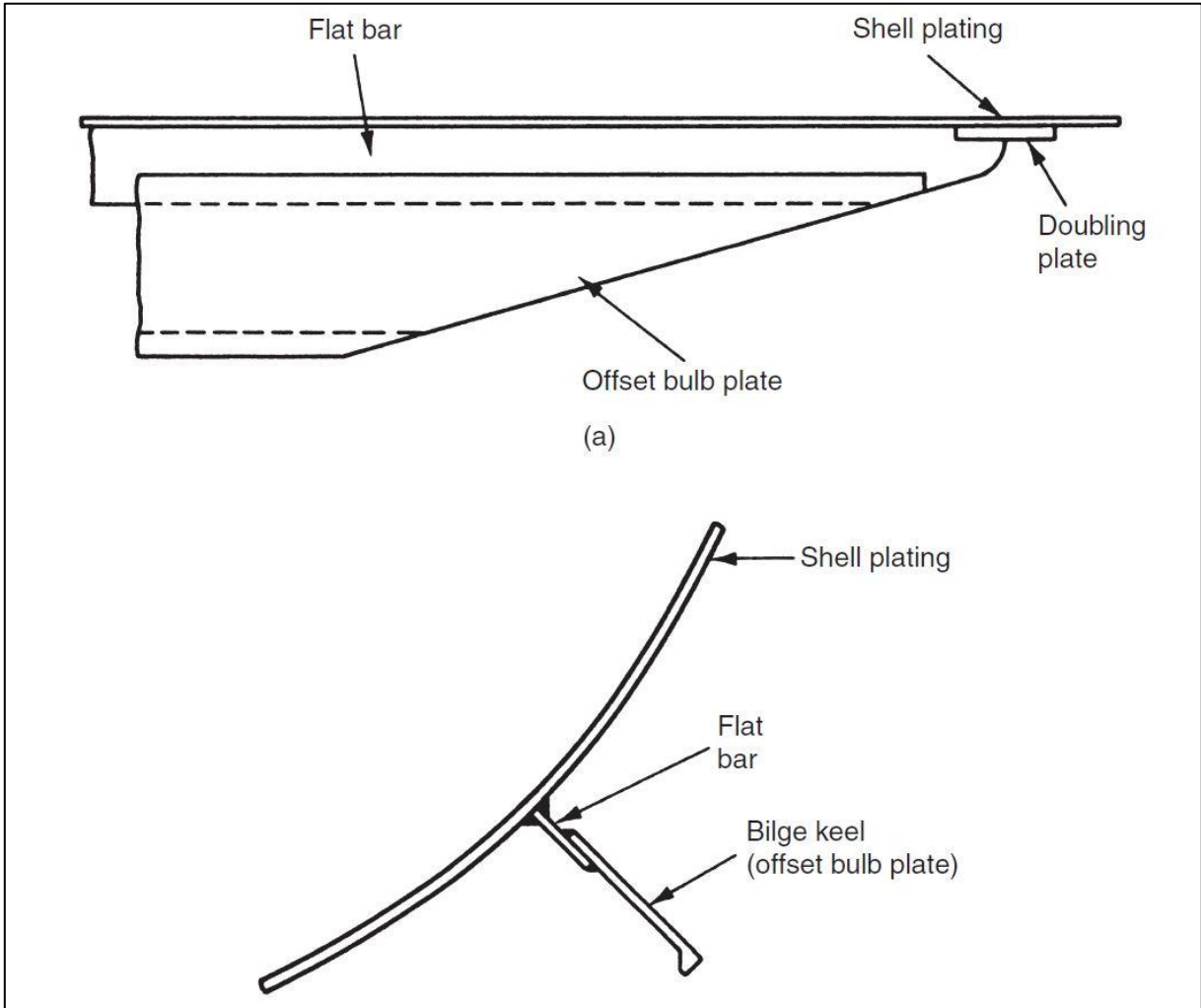
Τα παθητικά συστήματα διόρθωσης διατοιχισμού είναι αυτά που δεν χρειάζονται πηγή ενέργειας ή κάποιο σύστημα ελέγχου για την λειτουργία τους. Τα παθητικά συστήματα μπορεί να αποτελούνται και από κινούμενα μέρη ή μόνο από σταθερά μέρη.

Το πιο συνηθισμένο σύστημα διόρθωσης διατοιχισμού γενικότερα, είναι παθητικό, και είναι τα παρατροπίδια (*bilge keels*). Ένα πολύ μεγάλο ποσοστό σκαφών όλων των μεγεθών διαθέτει παρατροπίδια, καθώς είναι αρκετά αποτελεσματικά στην διόρθωση του διατοιχισμού είτε όταν το πλοίο κινείται, είτε όταν είναι σταθερό, με πολύ μικρό κόστος κατασκευής. Τα

¹ *Passive Systems*

² *Active Systems*

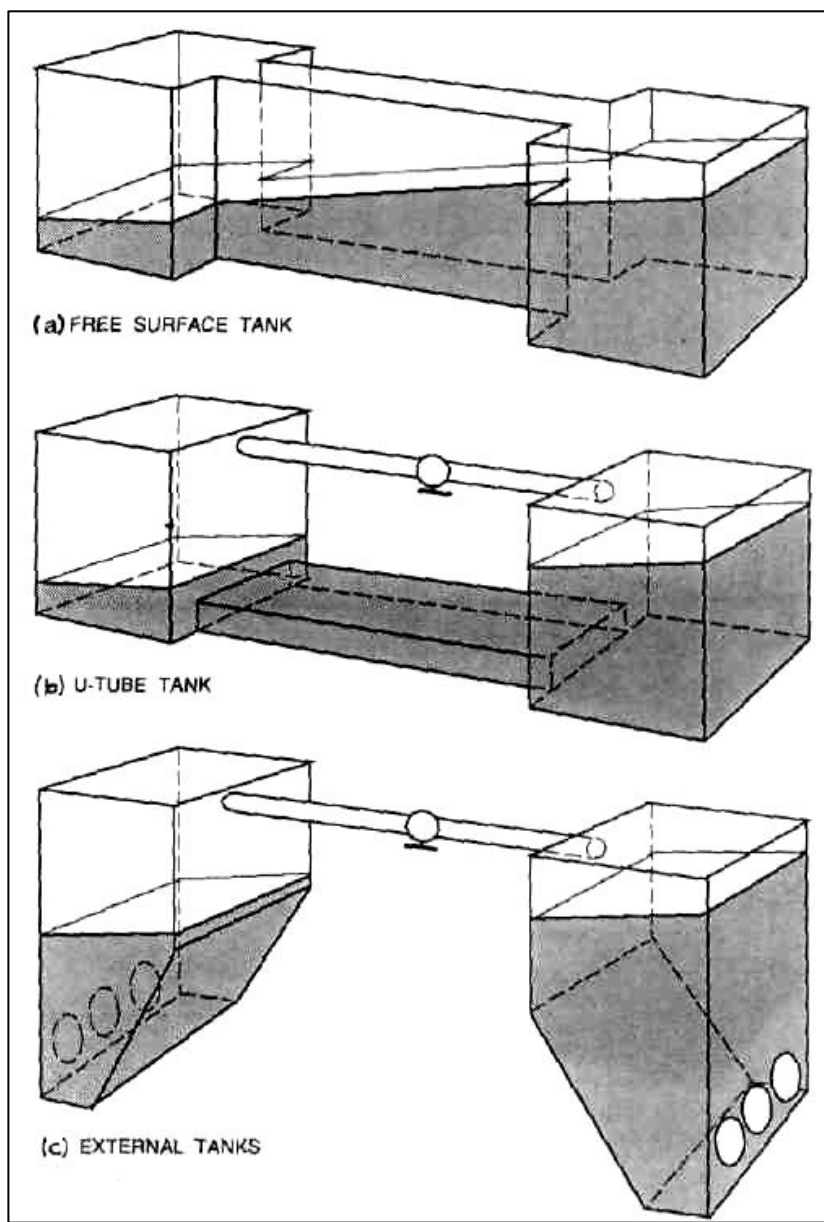
παρατροπίδια τοποθετούνται και στις δύο πλευρές, στο σημείο όπου υπάρχει η μετάβαση από το έλασμα του πυθμένα στο πλευρικό έλασμα και έχουν μήκος περίπου το μισό με τα 2/3 του μήκους του πλοίου. Η αποδοτικότητά τους οφείλεται στο γεγονός ότι δημιουργούν ένα στρώμα ροής το οποίο κινείται μαζί με το πλοίο και δημιουργεί τύρβη, μειώνοντας έτσι την ενέργεια που σε διαφορετική περίπτωση θα γινόταν διατοιχισμός. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται το μέγεθος του διατοιχισμού καθώς και η περίοδος του. Παρόλο το μικρό μέγεθός τους, μπορούν να μειώσουν έως και 1/3 το πλάτος του διατοιχισμού (Tupper, 2004a).



Εικόνα 1.1: Παρατροπίδια (πηγή:Tupper, 2004)

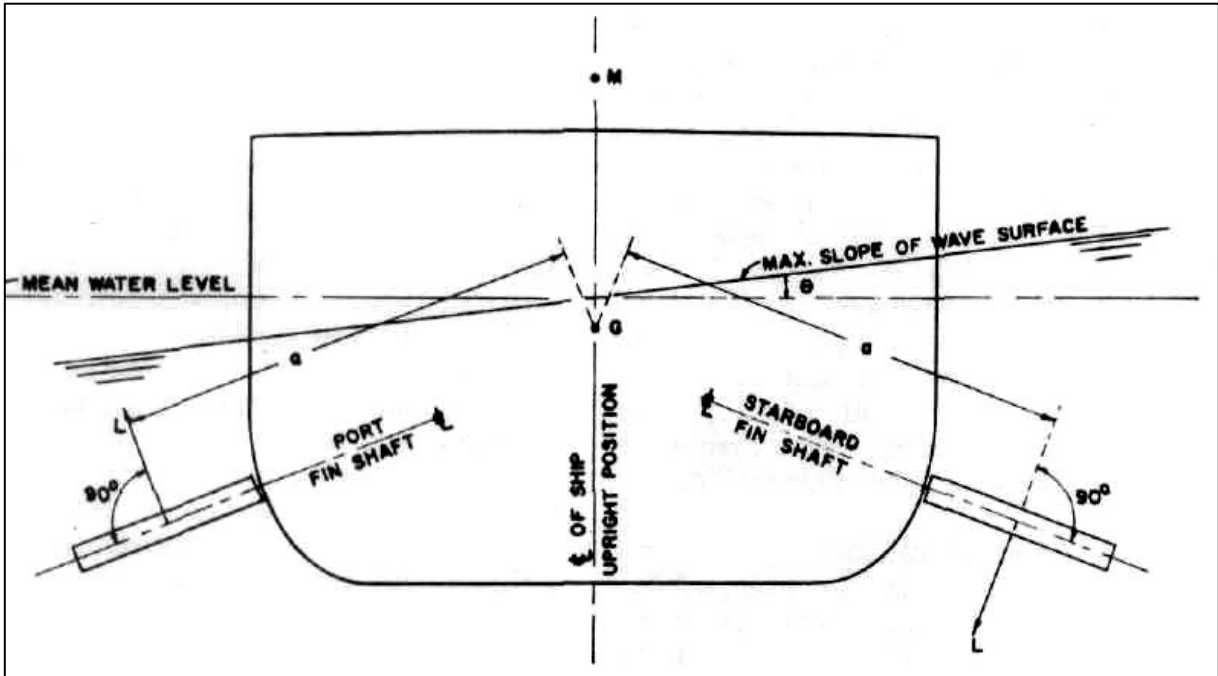
Ένας άλλος τρόπος ελέγχου του διατοιχισμού είναι η εγκατάσταση δεξαμενών *Antiroll*. Αυτό το σύστημα ελέγχου αποτελείται από δύο δεξαμενές έρματος τοποθετημένες στα άκρα του πλοίου κατά το πλάτος, οι οποίες ενώνονται με σωλήνα ή ένα κοινό διαμέρισμα. Η κίνηση του έρματος που διαθέτουν γίνεται με τέτοιον τρόπο έτσι ώστε να είναι σε αντίθετη φάση με την κίνηση του διατοιχισμού, έτσι μειώνοντας το πλάτος του. Αυτού του είδους οι δεξαμενές όμως μπορούν να μελετηθούν για να αποσβένουν μόνο τις κινήσεις μίας

συχνότητας, η οποία επιλέγεται να είναι η συχνότητα συντονισμού του πλοίου. Επίσης, επιδρούν αρνητικά στην συνολική ευστάθεια του πλοίου καθώς διαθέτουν ελεύθερες επιφάνειες. Τέλος, στην περίπτωση που εγκατασταθούν εξωτερικές δεξαμενές, όπως αυτές της περίπτωσης (c) στην *Εικόνα* οδηγούμαστε σε αυξημένη αντίσταση πρόωσης. Αυτού του είδους οι δεξαμενές χρησιμοποιούνταν κυρίως σε παλαιότερα πλοία. Πλέον, συναντώνται τέτοιου είδους συστήματα, αλλά δεν είναι παθητικά. Διαθέτουν συστήματα ελέγχου τα οποία αναλύουν την κίνηση του πλοίου μέσω γυροσκοπίου, και αμφίδρομες αντλίες που ελέγχουν την ποσότητα του έρματος μέσα στις δεξαμενές ανά πάσα στιγμή, έτσι ώστε να διατηρείται το πλοίο σε όρθια θέση όσο το δυνατόν περισσότερο.

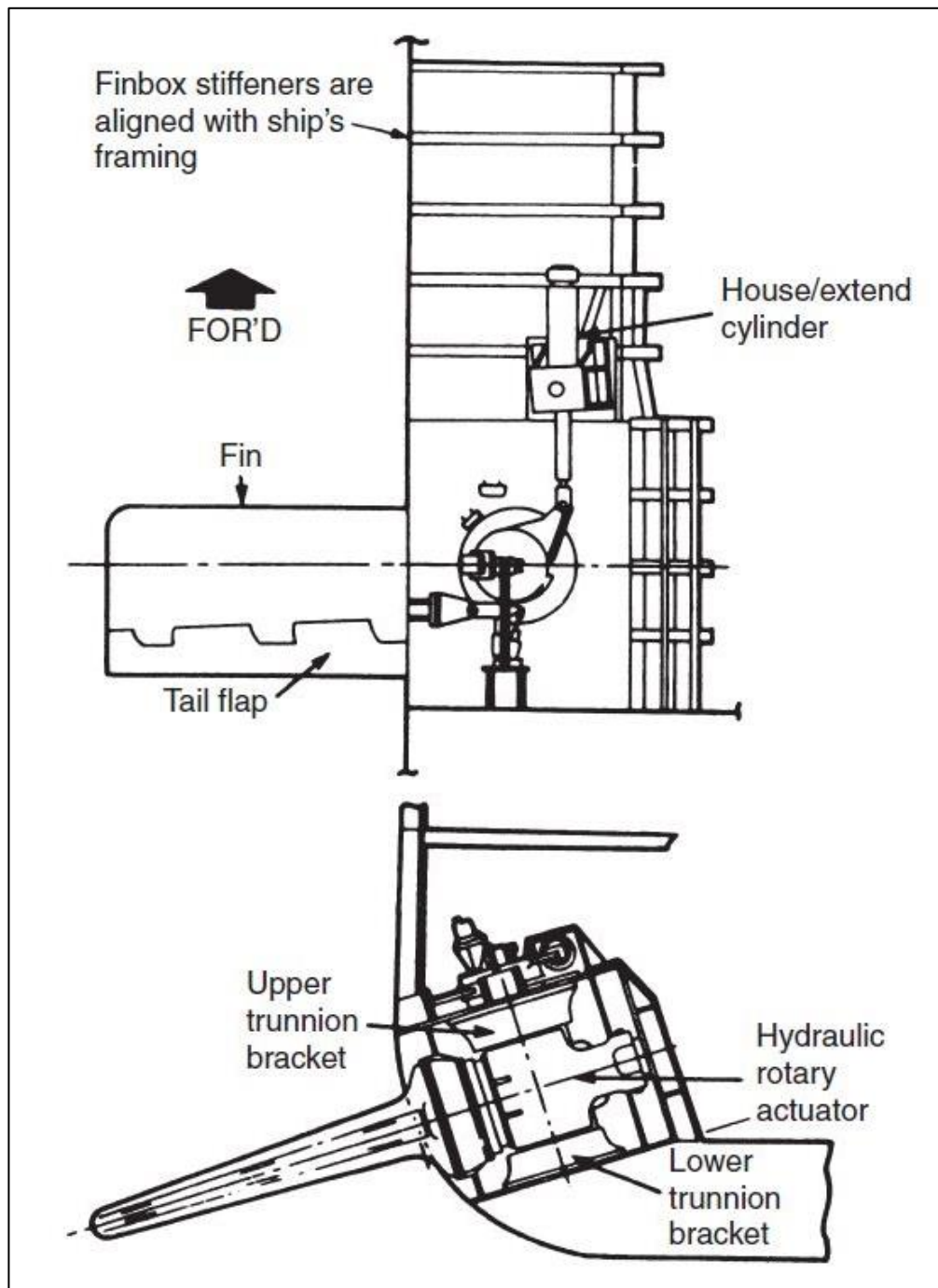


Εικόνα 1.2: Διάφοροι τύποι παθητικών Antirolling δεξαμενών (πηγή: Lewis, 1988)

Ένας ακόμα πολύ διαδεδομένος τρόπος μείωσης του διατοιχισμού είναι τα ενεργά πτερύγια. Τα πτερύγια λειτουργούν με όμοιο τρόπο πως τα παρατροπίδια, αλλά έχουν πολύ μικρότερο μήκος. Για να έχουν ικανοποιητική απόδοση, ελέγχονται από ένα σύστημα το οποίο προσδιορίζει την απαραίτητη κλίση που θα πρέπει να έχουν έτσι ώστε να δημιουργούν την απαραίτητη δύναμη επαναφοράς. Υπάρχουν περιπτώσεις επίσης όπου αυτά τα πτερύγια σχεδιάζονται να μπορούν να εισέλθουν μέσα στην γάστρα, έτσι ώστε να μην δημιουργούν επιπλέον αντίσταση.



Εικόνα 1.3: Σύστημα ενεργών πτερυγίων σε εγκάρσια τομή (πηγή: Lewis, 1988)



Εικόνα 1.4: Σύστημα ενεργών πτερυγίων (πηγή: Tupper, 2004)

1.5 Κριτήρια Μέγιστων Αποκρίσεων

Για να θεωρηθεί πως ένα πλοίο έχει επιτύχει στην μελέτη αποκρίσεων, θα πρέπει τα αποτελέσματα που λήφθηκαν να πληρούν κάποια κριτήρια. Αυτά τα κριτήρια διαφοροποιούνται αναλόγως την εργασία του πλοίου καθώς και τους παράγοντες που μελετώνται (άνεση επιβατών, ασφάλεια εμπορεύματος, ασφαλής λειτουργία εξοπλισμού κλπ). Ένα πλοίο δεν απαιτείται να πληροί τα κριτήρια αυτά προκειμένου να θεωρηθεί αξιόπλοο, παρόλα αυτά εάν χρειάζεται να χαρακτηριστεί με συγκεκριμένα *class notations*, θα πρέπει να συμμορφωθεί, αναλόγως τις οδηγίες του εκάστοτε νηογνώμονα. Άλλος ένας λόγος που μπορεί ένας πλοιοκτήτης να θέλει το πλοίο του να έχει μικρές αποκρίσεις είναι για να θεωρείται ασφαλές για το πλήρωμα ή / και τους επιβάτες, και να είναι σίγουρος πως οι εργασίες επί του πλοίου δεν θα παρεμποδίζονται όταν οι συνθήκες της θάλασσας που επικρατούν είναι δυσμενείς. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτά τα κριτήρια είναι μεταξύ άλλων η ταχύτητα του πλοίου στους κυματισμούς, η σφυρόκρουση, η διαβροχή του καταστρώματος, η έξοδος της έλικας από το νερό και η άνεση του πληρώματος και των επιβατών. (Tupper, 2004a) Αυτού του είδους τα κριτήρια μπορούν να βρεθούν από εργασίες και βιβλία των Lewis (1988), Karppinen, (1987) και Bergdahl (2008).

Σφυρόκρουση (*slamming*) ονομάζεται το φαινόμενο όπου η πλώρη του πλοίου βγαίνει από την επιφάνεια του νερού λόγω του κυματισμού και επανέρχεται στο νερό λόγω της βαρύτητας, έτσι καταπονώντας την κατασκευή. Η περιοχή του πλοίου όπου είναι πιο ευάλωτη σε αυτό το φαινόμενο είναι 10 με 25% του μήκους από την πλώρη. Το φαινόμενο της σφυρόκρουσης επιδεινώνεται με την ταχύτητα, και εξαρτάται και από την διεύθυνση του κυματισμού.

Διαβροχή του καταστρώματος (*green water*) ονομάζεται το φαινόμενο όπου το θαλασσινό νερό εισέρχεται πάνω στο κατάστρωμα. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει οι κινήσεις του πλοίου να είναι τέτοιες έτσι ώστε σε κάποια σημεία το κατάστρωμα να βρίσκεται σε μικρότερο ύψος απ' ότι το νερό. Η περιοχή της πλώρης πλήττεται περισσότερο και σε αυτή την περίπτωση, για αυτόν τον λόγο το φαινόμενο λαμβάνεται υπ' όψιν και στην *International Load Line Convention* όπου απαιτείται ένα ελάχιστο ύψος πλώρας. Η διαβροχή του καταστρώματος οδηγεί σε επικίνδυνες συνθήκες εργασίας, διαβροχή του φορτίου και, εάν συνδυαστεί και με κάποια τοπική αστοχία της μεταλλικής κατασκευής, σε κατάκλιση διαμερίσματος.

Η έξοδος ή «ξενέρισμα» της έλικας από το νερό (*propeller emergence*) είναι άλλο ένα φαινόμενο που μπορεί αν οδηγήσει σε άσχημα αποτελέσματα. Εκτός από το προφανές, ότι μειώνει την απόδοση της έλικας και της μηχανής, οδηγώντας σε μικρότερες ταχύτητες, η απότομη απουσία της δύναμης της άντωσης δημιουργεί καμπτικές δυνάμεις στον άξονα οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στην αστοχία του.

Η άνεση του πληρώματος και των επιβατών είναι και αυτή ένας κύριος παράγοντας. Αρχικά, όταν ένα επιβατηγό πλοίο δεν συμπεριφέρεται καλά στους κυματισμούς μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των επιβατών, καθώς το ταξίδι δεν θα είναι άνετο. Επίσης, ένας παράγοντας που ισχύει και για τα επιβατηγά αλλά και για τα φορτηγά πλοία είναι η άνεση του πληρώματος. Το πλήρωμα καθ' όλη την διάρκεια του ταξιδιού εκτελεί εργασίες επί του πλοίου με σκοπό την συντήρησή του.

Εάν υπάρχει ανάγκη μείωσης των αποκρίσεων για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, οι πιο δραστικοί τρόποι είναι η αλλαγή πορείας και η μείωση της ταχύτητας, κάτι που έχουν άμεση επίπτωση στον προγραμματισμό του πλοίου.

Γενικότερα, εκτός των παραπάνω υπάρχουν και άλλοι λόγοι που θα ήθελε κανείς οι αποκρίσεις του πλοίου να είναι ελεγχόμενες. Κάποιοι από αυτούς τους λόγους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα συγκεντρωτικά από τον τόμο III του *Principles of Naval Architecture*:

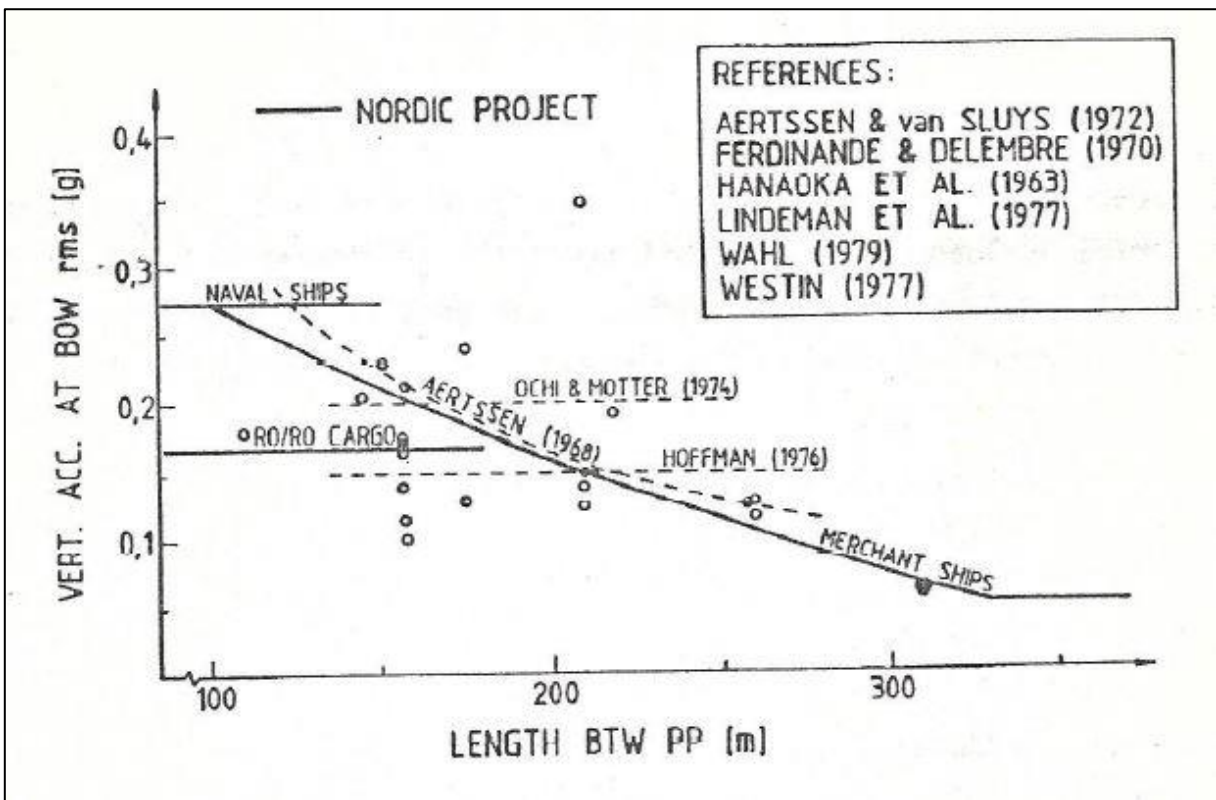
No.	Seaway Performance Criteria	Affected Elements	Performance Degradations
(a)	Absolute Motion Amplitudes		
1.	Roll angle	People, Mission and Platform Systems	{ Personnel injury, reduced task proficiency, and mission and hull system degradation.
2.	Pitch angle		
3.	Vertical displacement of points on flight deck	{ People Mission Systems	Injury to personnel handling aircraft. Inability to safely launch or recover aircraft.
(b)	Absolute Velocities and Accelerations		
4.	Vertical acceleration	People and Mission Systems	{ Personnel fatigue, reduced task proficiency and mission system degradation
5.	Lateral acceleration		
6.	Motion sickness incidence (MSI)	People	Reduced task proficiency.
7.	Slam acceleration (vibratory, vertical)	People, Mission and Platform Systems	{ Personnel fatigue, injury, reduced task proficiency and mission and hull system degradation. Preclusion of towed sonar operation.
(c)	Motions Relative to Sea		
8.	Frequency of slamming. (Simultaneous bow reimmersion & exceedance of a threshold vertical velocity.)	{ Mission Systems Platform System	Hull Whipping stresses and damage to sensors on the masts Slamming damage to bottom forward hull structure.
9.	Frequency of emergence of a sonar dome	Mission Systems	Reduced efficiency of sonar.
10.	Frequency of deck wetness (submergence of the main deck forward.)	{ People Mission Systems	Injury or drowning of personnel. Damage to deck-mounted equipment.
11.	Probability of propeller emergence	Platform System	Damage to the main propulsion plant.
(d)	Motions relative to aircraft		
12.	Vertical velocity of aircraft relative to the flight deck	Mission Systems	Damage to aircraft landing gear and/or loss of aircraft.

Πίνακας 1.1: Δώδεκα παραδείγματα κριτηρίων Seakeeping (πηγή:Lewis, 1988)

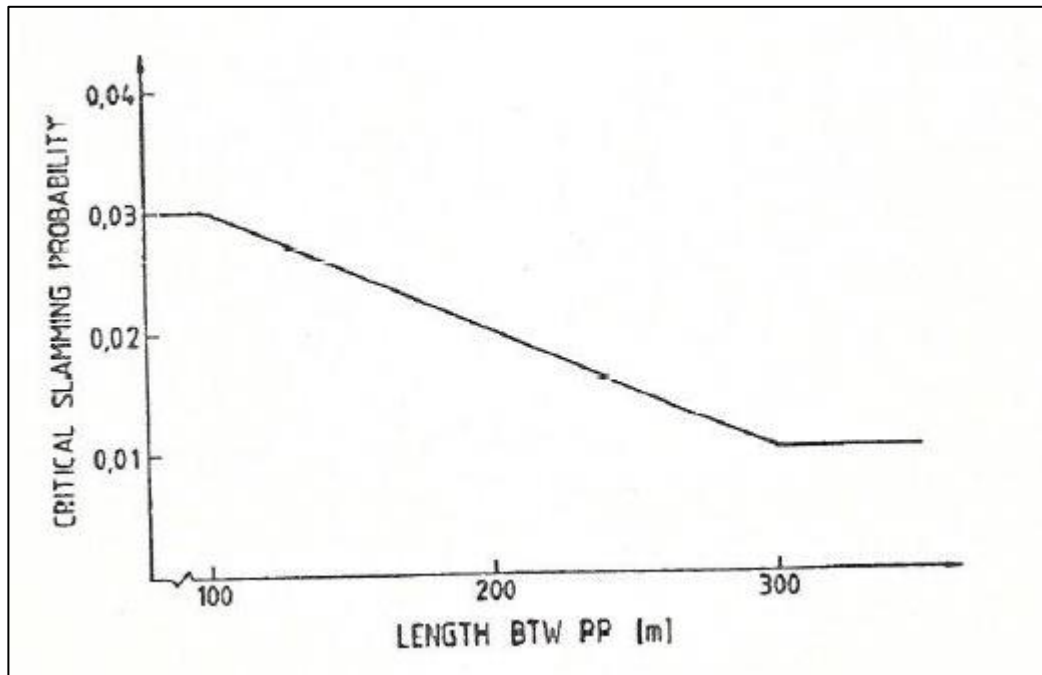
Ορισμένα κριτήρια παρουσιάζονται από τον *Karppinen (1987)* όσον αναφορά τις επιταχύνσεις και τις *RMS* τιμές των κινήσεων:

	Merchant Ships	Naval Ships	Fast Small Craft
Vert. Acc. RMS (F.P.)	Acc. to Figure Below	0.275g	0.65g
Vert. Acc. RMS (Bridge)	0.15g	0.2g	0.275g
Lat. Acc. RMS (Bridge)	0.12g	0.1g	0.1g
Roll RMS	6.0 deg	4.0 deg	4.0 deg
Slamming Crit. Prop.	Acc. to Figure Below	0.03	0.03
Deck Wetn. Crit. Prop.	0.05	0.05	0.05

Πίνακας 1.2: Γενικά κριτήρια αποκρίσεων (αναπαραγωγή από *Karppinen, 1987*)



Γράφημα 1.5: Κριτήρια για την κάθετη επιτάχυνση στην πλώρη (πηγή: *Karppinen, 1987*)



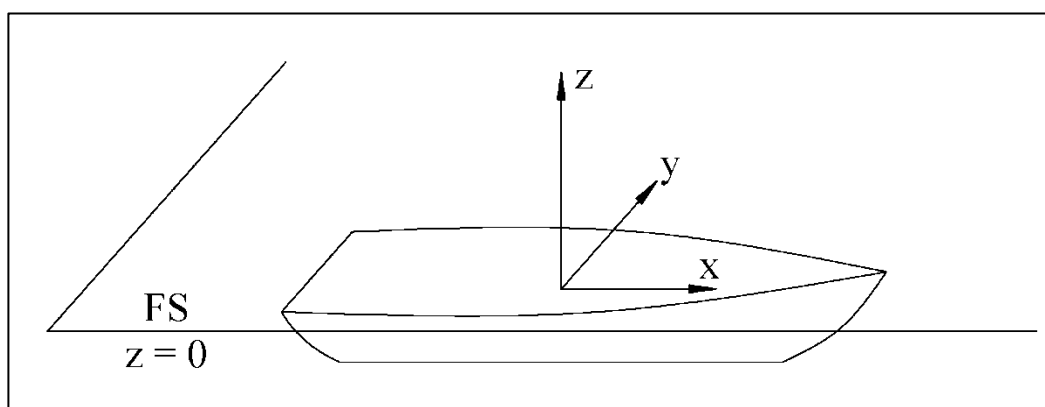
Γράφημα 1.6: Κρίσιμη τιμή της πιθανότητας σφοδρόκρουσης (πηγή: Karrienen, 1987)

όπου $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία παρουσίαση της θεωρίας δυναμικού (*Potential Theory*) η οποία χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του προβλήματος των αποκρίσεων του πλοίου καθώς και μια σύντομη εισαγωγή στην μέθοδο των συνοριακών στοιχείων (*Boundary Element Method - BEM*) καθώς και της *Rankine Panel Method* που χρησιμοποιεί το SWAN2.

Για όλα τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω, εκτός και εάν αναφέρεται διαφορετικά, ισχύει το παρακάτω καρτεσιανό σύστημα αξόνων:



Εικόνα 2.1: Το σύστημα συντεταγμένων

όπου το επίπεδο yx αντιπροσωπεύει την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού ($z=0$), και το επίπεδο xz βρίσκεται στο μέσο του πλοίου.

2.1 Συμπεριφορά Πλοίου σε Αρμονικούς Κυματισμούς

Ένα σώμα το οποίο πλέει ελεύθερο σε κυματισμούς, παρουσιάζει αποκρίσεις οι οποίες εξαρτώνται από την μορφή του καθώς και την ενέργεια που λαμβάνει από το θαλάσσιο περιβάλλον. Αυτές τις αποκρίσεις μπορούμε να τις προσεγγίσουμε χρησιμοποιώντας την θεωρία δυναμικού (*Potential Theory*), μορφοποιώντας το πρόβλημα κατάλληλα και κάνοντας παραδοχές όπου οδηγούν στην γραμμικοποίηση του. Παρακάτω ακολουθεί μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος, η οποία βοηθά στην κατανόηση της διαδικασίας που ακολουθείται για την επίλυσή του³.

Η πρώτη βασική υπόθεση που γίνεται προκειμένου να επιτευχθεί η γραμμικοποίηση του προβλήματος είναι πως το πλάτος του προσπίπτοντος κυματισμού είναι μικρό, δηλαδή:

$$\frac{\alpha}{\lambda} \ll 1 \quad (2.1.1)$$

³ (Πολίτης, 2019)

όπου a το πλάτος του κυματισμού και λ το μήκος κύματος.

Ένα μικρό πλάτος κυματισμού οδηγεί κατά κανόνα σε μικρές αποκρίσεις του σώματος που διεγείρεται, διατηρώντας τις κινήσεις γραμμικές. Καθώς το πρόβλημα που θα μελετήσουμε είναι γραμμικό, θεωρούμε πως το δυναμικό της ροής επαληθεύει την εξίσωση του *Laplace*.

2.1.1 Βασικοί Ορισμοί

Αρχικά, θα παρουσιαστούν κάποιοι βασικοί ορισμοί σχετικά με το υδροδυναμικό πρόβλημα των αποκρίσεων ενός πλοίου, πάντα έχοντας υπόψη την βασική μορφή του (συμμετρία κατά το διάμηκες επίπεδο άρα και η θέση του κέντρου βάρους κατά το εγκάρσιο είναι μηδέν, μεγάλη σχέση μήκους προς πλάτους). Στοιχεία για την αδράνεια του πλοίου παρουσιάζονται σε ένα μητρώο μάζας, ουσιαστικά παρουσιάζοντας την επίδραση που έχει σε κάθε κίνησή του. (Πολίτης, 2019)

$$\tilde{m} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mx_{3G} & 0 \\ 0 & m & 0 & -mx_{3G} & 0 & mx_{1G} \\ 0 & 0 & m & 0 & -mx_{1G} & 0 \\ 0 & -mx_{3G} & 0 & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mx_{3G} & 0 & mx_{1G} & 0 & I_{22} & 0 \\ 0 & mx_{1G} & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

όπου m η μάζα του πλοίου

x_{iG} η θέση του κέντρου βάρους κατά την i κατεύθυνση

I_{ij} η ροπή αδράνειας του πλοίου κατά τους άξονες i, j

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον δεύτερο νόμο του *Newton*, για ένα σώμα που επιπλέει στην επιφάνεια ενός ρευστού και εκτελεί μικρές κινήσεις γύρω από την μέση θέση ισορροπίας του, έχουμε:

$$F_i = \tilde{m} x \ddot{\xi}_i \quad (2.1.3)$$

όπου $\ddot{\xi}_i$ η επιτάχυνση γραμμικής κίνησης, $\ddot{\theta}_i$ επιτάχυνση περιστροφικής κίνησης, F η συνολική δύναμη πάνω στο σώμα. Αντικαθιστώντας από την (2.1.2) τότε θα έχουμε:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mx_{3G} & 0 \\ 0 & m & 0 & -mx_{3G} & 0 & mx_{1G} \\ 0 & 0 & m & 0 & -mx_{1G} & 0 \\ 0 & -mx_{3G} & 0 & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mx_{3G} & 0 & mx_{1G} & 0 & I_{22} & 0 \\ 0 & mx_{1G} & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \\ \ddot{\xi}_3 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.1.5)$$

Στην περίπτωση όπου ένα σώμα κινείται μέσα σε ρευστό, το σώμα καλείται να εκτοπίσει ορισμένο όγκο ρευστού κατά την κίνησή του. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται στις σχέσεις ως μία πρόσθετη μάζα, και ονομάζεται «υδροδυναμική μάζα». Στην μάζα του σώματος, όταν θέλουμε να υπολογίσουμε τις αποκρίσεις που πραγματοποιεί, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και την υδροδυναμική μάζα (*added mass*). Η υδροδυναμική μάζα, ομοίως με την μάζα που παρουσιάστηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται σε μητρική μορφή, καθώς το μέγεθός της εξαρτάται από την μελετώμενη κίνηση που πραγματοποιείται. Στην περίπτωση πλοίου με επίπεδο συμμετρίας το xz , το μητρώο της υδροδυναμικής μάζας είναι ως εξής: (Πολίτης, 2019)

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{13} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

Για σώματα που επιπλέουν στην επιφάνεια του ρευστού ή κοντά στην επιφάνεια, τότε η υδροδυναμική μάζα είναι συνάρτηση της συχνότητας ταλάντωσης. Επίσης, όταν η συχνότητα του κυματισμού τείνει στο άπειρο, όπου και δεν σχηματίζονται πλέον κύματα, τότε η υδροδυναμική μάζα γίνεται ανεξάρτητη της συχνότητας. (Bergdahl, 2008)

Λόγω της κίνησης μέσα στο ρευστό, παρατηρείται στο σώμα μία υδροδυναμική απόσβεση, η οποία ομοίως παρουσιάζεται σε μητρική μορφή και έχει τις ίδιες μηδενικές θέσεις με τον πίνακα της υδροδυναμικής μάζας: (Πολίτης, 2019)

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{13} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \quad (2.1.7)$$

Για σώματα που επιπλέουν στην επιφάνεια ενός ρευστού, η απόσβεση είναι συνάρτηση της συχνότητας ταλάντωσης. Παρόλα αυτά, όταν η συχνότητα κυματισμού τείνει στο άπειρο, η απόσβεση μηδενίζεται. Ομοίως η απόσβεση είναι μηδενική όταν και η συχνότητα κυματισμού είναι μηδενική. (Bergdahl, 2008)

Τέλος, όταν ένα σώμα εκτελεί κινήσεις γύρω από την θέση ισορροπίας του μέσα σε ρευστό, αναπτύσσονται ορισμένες δυνάμεις οι οποίες τείνουν να επαναφέρουν το σώμα στην αρχική του θέση, ομοίως με τον συντελεστή επαναφοράς ενός ελατηρίου που εκτελεί ταλάντωση: (Πολίτης, 2019)

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1.8)$$

Όλα τα παραπάνω μεγέθη σχετίζονται μεταξύ τους όταν επιχειρούμε να υπολογίσουμε τις δυνάμεις ή τις ροπές που ασκούνται πάνω στο πλεούμενο σώμα, και αναλύονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \tilde{m} x \ddot{\xi} &= F \\ \tilde{m} x \ddot{\xi} &= -F_I - F_D - F_R - F_{HS} \\ \tilde{m} x \ddot{\xi} &= -F_I - F_D - (A_{ij} x \ddot{\xi}_i + B_{ii} x \dot{\xi}_i) - (C_{ij} x \xi_i) \\ \tilde{m} x \ddot{\xi} &= -F_I - F_D - A_{ij} x \ddot{\xi}_i - B_{ii} x \dot{\xi}_i - C_{ij} x \xi_i \\ F_I + F_D &= -A_{ij} x \ddot{\xi}_i - \tilde{m} x \ddot{\xi} - B_{ii} x \dot{\xi}_i - C_{ij} x \xi_i \\ F_I + F_D &= -(A_{ij} + \tilde{m}) x \ddot{\xi}_i - B_{ii} x \dot{\xi}_i - C_{ij} x \xi_i \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

Όπου: F_I : η δύναμη *Froude-Krylov*

F_D : η δύναμη περίθλασης (*Diffraction Force*)

$F_R = A_{ij} x \ddot{\xi}_i + B_{ii} x \dot{\xi}_i$: η δύναμη ακτινοβολίας (*Radiation Force*)

$F_{HS} = C_{ij} x \xi_i$: η υδροστατική δύναμη (*Hydrostatic Force*)

$F_I + F_D$: η δύναμη διέγερσης (*Exciting Force*)

Επίσης όπου ζ η ταλάντωση που εκτελεί το σώμα, και αντίστοιχα $\xi, \ddot{\xi}$, η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της ταλαντωτικής κίνησης ως προς τον χρόνο (ταχύτητα και επιτάχυνση). (Bergdahl, 2008)

Από την παραπάνω σχέση, μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει πως για να υπολογιστούν οι δυνάμεις που ασκούνται στο επιπλέον σώμα θα πρέπει να είναι γνωστές οι αποκρίσεις του πλοίου, και το αντίθετο, δηλαδή για να υπολογιστούν οι αποκρίσεις θα πρέπει να είναι γνωστές οι ασκούμενες δυνάμεις. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται «*συζευγμένο*» και παρακάτω θα παρουσιαστεί η διαδικασία που ακολουθείται για να αποσυντεθεί το πρόβλημα σε δύο διαφορετικά προβλήματα, εκμεταλλευόμενοι την γραμμική φύση τους.

2.1.2 Αποσύνθεση των δύο γραμμικών προβλημάτων

Έστω επιφάνεια νερού απείρου⁴ βάθους όπου πλέει σώμα μορφής πλοίου, στην οποία επιφάνεια διαδίδεται κυματισμός κατεύθυνσης β . Σε αυτή την περίπτωση, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας αναπαριστάται από την σχέση (Πολίτης, 2019):

$$\eta_I(x_1, x_2, t) = \text{Re}\{\tilde{\eta}_I(x_1, x_2)e^{i\omega t}\} \quad (2.1.10)$$

$$\tilde{\eta}_I = \alpha * \exp(-ikx_1 \cos(\beta) - ikx_2 \sin(\beta)) \quad (2.1.11)$$

όπου με τον τονισμό $\tilde{\quad}$ συμβολίζεται μιγαδική συνάρτηση, μία συνάρτηση δηλαδή που έχει και πραγματικό και φανταστικό μέρος.

Το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού θα δίνεται από την σχέση (Με έντονα σύμβολα συμβολίζονται τα διανύσματα):

$$\Phi_I(\mathbf{x}, t) = \text{Re}\{\tilde{\Phi}_I(\mathbf{x})e^{i\omega t}\} \quad (2.1.12)$$

$$\tilde{\Phi}_I(\mathbf{x}) = \frac{iga}{\omega} \exp(kx_3 - ikx_1 \cos(\beta) - ikx_2 \sin(\beta)) \quad (2.1.13)$$

όπου a το πλάτος του κυματισμού

k ο κυματαριθμός, όπου για νερό απείρου βάθους ισχύει: $k = \omega^2/g$ (εξίσωση διασποράς)

⁴ Απείρου βάθους ρευστό θεωρείται εκείνο όπου ισχύει $h > \frac{\lambda}{2}$, όπου h το ύψος του κυματισμού ($h = 2a$), και λ το μήκος κύματος, για το οποίο ισχύει $\lambda = 2\pi k$.

Λόγω του προσπίπτοντος κυματισμού, το σώμα εκτελεί ταλαντωτικές κινήσεις γύρω από το σημείο ισορροπίας του, κατά τους έξι βαθμούς ελευθερίας του:

$$\xi^{\Gamma} = Re\{\check{\xi}^{\Gamma} e^{i\omega t}\} \quad (2.1.14)$$

Το δυναμικό της ροής που προσπίπτει στο πλεύομένο σώμα θα εξαρτάται επίσης από την συχνότητα κυματισμού:

$$\Phi(\mathbf{x}, t) = Re\{\check{\Phi}(\mathbf{x}) e^{i\omega t}\} \quad (2.1.15)$$

$$P(\mathbf{x}, t) = Re\{\check{P}(\mathbf{x}) e^{i\omega t}\} \quad (2.1.16)$$

Τέλος, προκειμένου να ολοκληρώσουμε το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος, θα πρέπει να οριστεί η συμπεριφορά του ρευστού καθώς και οι συνθήκες που επικρατούν στα όρια του (οριακές συνθήκες – *boundary conditions*). Για την ιδανική συμπεριφορά του ρευστού στα άκρα και στο πεδίο Ω που μελετάται, θα πρέπει να πληρούνται τα παρακάτω:

1) Εξίσωση συνέχειας του ρευστού (η ροή μέσα στο πεδίο παραμένει σταθερή ως προς τον χρόνο):

$$\Delta\Phi(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (2.1.17)$$

2) Η μικτή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας:

$$\frac{\partial^2\Phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} + g \frac{\partial\Phi(\mathbf{x}, t)}{\partial x_3} = 0, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_F (x_3 = 0) \quad (2.1.18)$$

Η μικτή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας προέρχεται από την κινηματική συνθήκη, που ορίζει πως η ταχύτητα των στοιχείων πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια θα πρέπει να έχει το ίδιο μέτρο και την ίδια φορά με την ελεύθερη επιφάνεια, και την δυναμική συνθήκη, όπου ορίζει πως η πίεση πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια θα πρέπει να είναι παντού ίδια, ήτοι η ατμοσφαιρική πίεση.

3) Συνθήκη μη εισχώρησης στο σώμα, που ουσιαστικά επιβάλλει το γεγονός πως το ρευστό δεν μπορεί να εισέλθει μέσα στο πλεύομένο σώμα ορίζοντας την κάθετη σε αυτό ταχύτητα του ρευστού ίση με την ταχύτητα του σώματος σε αυτό το σημείο:

$$\frac{\partial\Phi(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{n}_p} = (\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n}_p = \sum_1^6 \dot{\xi}_i(t) \boldsymbol{\eta}_i, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_B \quad (2.1.19)$$

4) Συνθήκη ροής στον πυθμένα, όπου ορίζουμε πως σε άπειρο βάθος, δεν υπάρχει – ουσιαστικά-ροή:

$$\|\nabla\Phi(\mathbf{x}, t)\| \rightarrow 0, \quad \mathbf{x} \in \partial\Omega_\pi (x_3 = -\infty) \quad (2.1.20)$$

5) Συνθήκη ακτινοβολίας στο άπειρο, που ορίζει την συμπεριφορά των κυματισμών στο άπειρο, δηλαδή πως στο άπειρο οι κυματισμοί θα έχουν αποσβεστεί και θα επικρατεί ηρεμία στην επιφάνεια του ρευστού:

$$\|\nabla\Phi(\mathbf{x}, t)\| \rightarrow 0, \quad \text{όταν } R = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \rightarrow \infty \quad (2.1.21)$$

Στα παραπάνω ισχύει:

όπου Φ το δυναμικό της ροής

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ (διάνυσμα)

\sim συμβολίζει μιγαδική συνάρτηση

Ω το πεδίο ροής

\mathbf{n}_p το μοναδιαίο κανονικό διάνυσμα πάνω στο σώμα, με $\partial\Omega_B$ η επιφάνεια του σώματος

\mathbf{n}_π το μοναδιαίο κανονικό διάνυσμα πάνω στον πυθμένα, με $\partial\Omega_\pi$ το όριο του πυθμένα

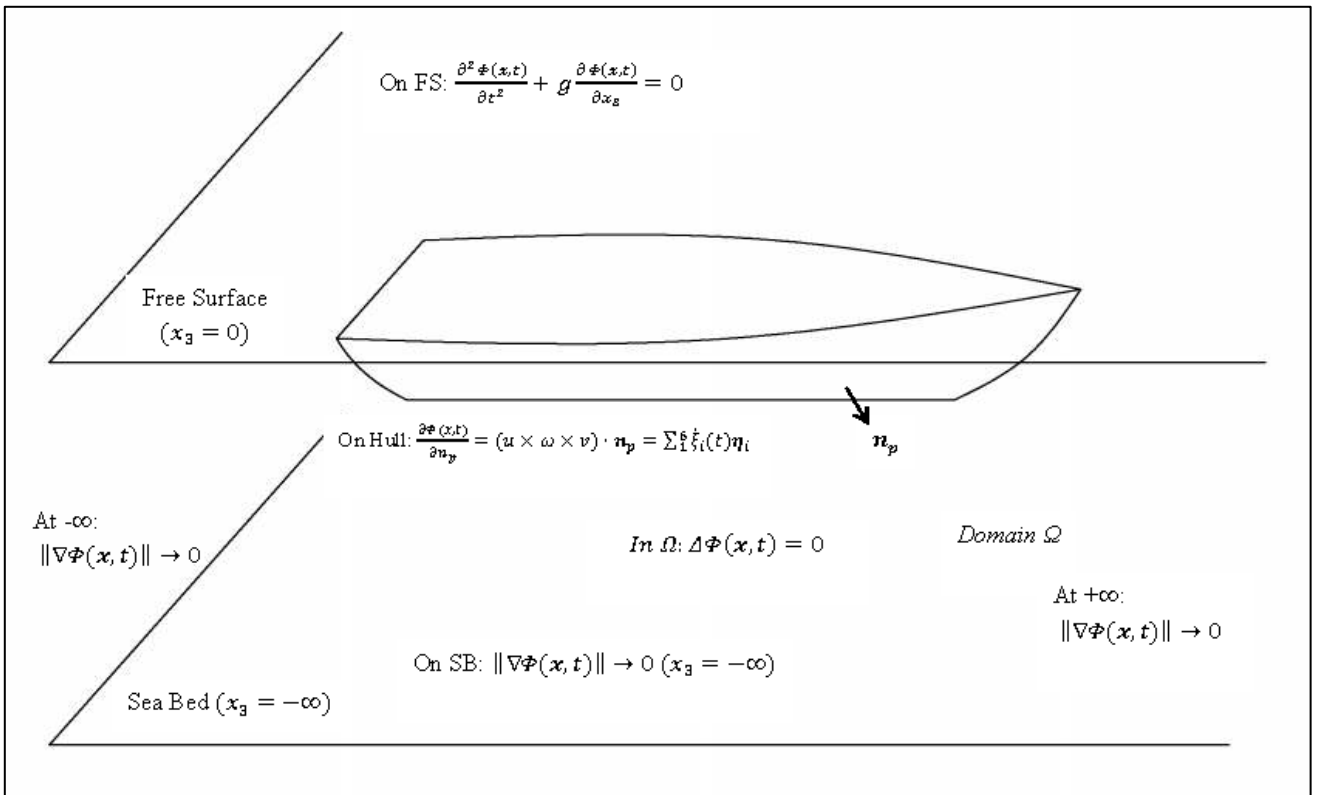
$\boldsymbol{\eta}_i$ το μοναδιαίο διάνυσμα προς την κατεύθυνση (άξονα) i

ξ_i η κίνηση του πλεούμενου σώματος (γραμμική ή περιστροφική) κατά τον άξονα i

$\dot{\xi}_i$ η ταχύτητα της κίνησης ξ_i

u, ω, v οι συνιστώσες της ταχύτητας του ρευστού στις τρεις διαστάσεις του χώρου

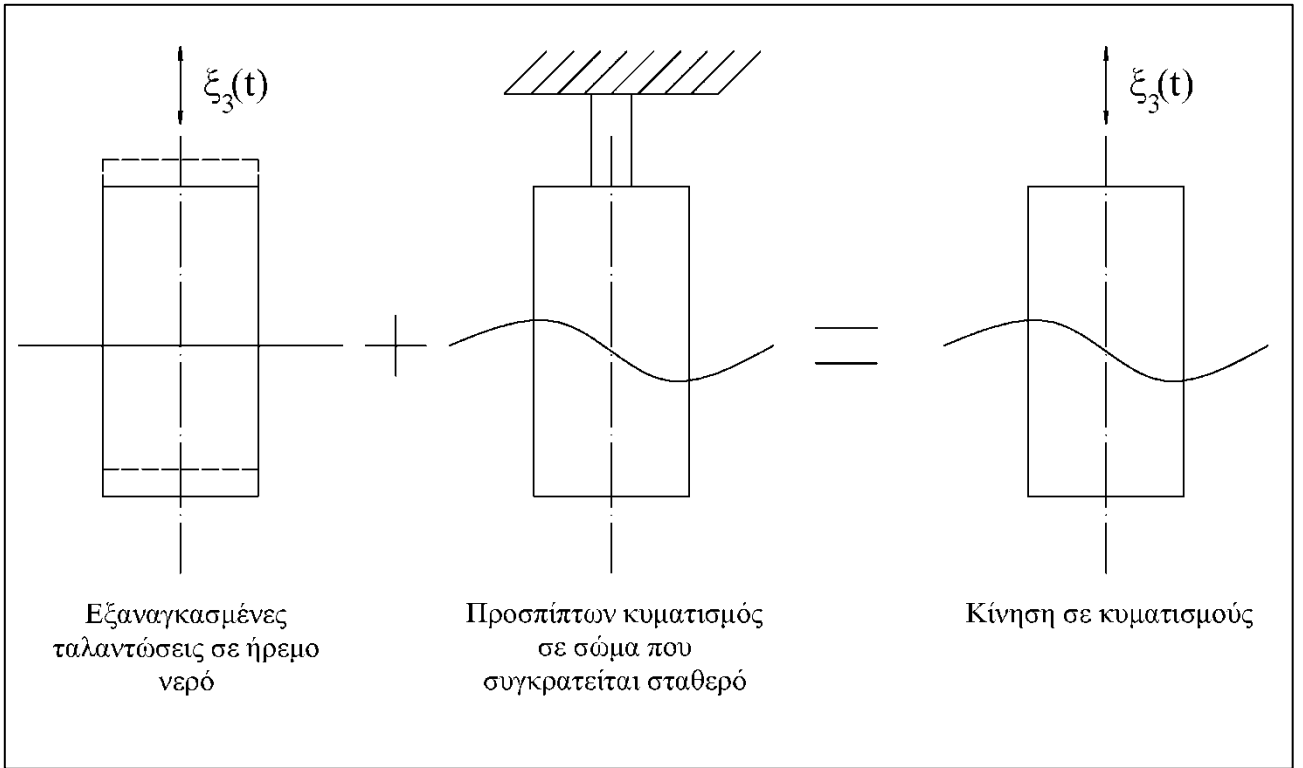
Επίσης θεωρείται πως το ρευστό είναι ασυμπίεστο, ατριβές και αστρόβιλο, προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί η γραμμική θεωρία.



Εικόνα 2.2: Μαθηματική περιγραφή του προβλήματος (Αναπαραγωγή από Πολίτης, 2019)

Παρ' όλα τα παραπάνω όμως, το πρόβλημα των αποκρίσεων παραμένει ακόμα συζευγμένο με τις δυνάμεις διέγερσης. Εκμεταλλευόμενοι όμως την γραμμική φύση του δυναμικού της ροής, μπορεί να πραγματοποιηθεί η απόζευξη των δύο προβλημάτων. (Πολίτης, 2019):

- 1) Το πρόβλημα ακτινοβολίας (*Radiation Problem*), όπου θεωρείται πως το σώμα εκτελεί εξαναγκασμένες ταλαντώσεις σε ήρεμο νερό.
- 2) Το πρόβλημα περίθλασης (*Diffraction Problem*), όπου μελετάται η περίθλαση του κυματισμού όταν προσπίπτει στο σώμα και αυτό κρατείται ακίνητο στην θέση ισορροπίας.



Εικόνα 2.3: Η αποσύνθεση του προβλήματος (Αναπαραγωγή από Πολίτης, 2019)

Έστω η περίπτωση του κυλίνδρου που παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα, ο οποίος εκτελεί ταλαντωτική κίνηση ξ_3 . Το δυναμικό της ροής μπορεί να αποσυντεθεί ως εξής:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \Phi_I(\mathbf{x}, t) + \Phi_D(\mathbf{x}, t) + \Phi_R(\mathbf{x}, t) \quad (2.1.22)$$

όπου $\Phi_I(\mathbf{x}, t)$ το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού

$\Phi_D(\mathbf{x}, t)$ το δυναμικό περίθλασης (*diffraction potential*)

$\Phi_R(\mathbf{x}, t)$ το δυναμικό ακτινοβολίας (*radiation potential*)

Για το δυναμικό του προσπίπτοντος κυματισμού κατά την κατεύθυνση x_2 ισχύει:

$$\Phi_I(\mathbf{x}, t) = -\frac{ag}{\omega} e^{kx_3} \sin(kx_2 - \omega t) \quad (2.1.23)$$

Αρχικά υπολογίζονται οι υδροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα από το ρευστό. Από την εξίσωση *Bernoulli* έχουμε:

$$p(\mathbf{x}, t) = -\rho \frac{\partial \Phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi - \rho g x_3 \quad (2.1.24)$$

Δεδομένου πως ο όρος $\frac{1}{2}\rho\nabla\Phi \cdot \nabla\Phi$ είναι μη γραμμικός ανώτερης τάξης, στα πλαίσια της γραμμικής θεωρίας, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$p(\mathbf{x}, t) = -\rho \frac{\partial\Phi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \rho g x_3 \quad (2.1.25)$$

Τότε, η σχέση (2.1.22), λόγω της (2.1.25) γίνεται:

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x}, t) &= -\rho \frac{\partial(\Phi_I(\mathbf{x}, t) + \Phi_D(\mathbf{x}, t) + \Phi_R(\mathbf{x}, t))}{\partial t} - \rho g x_3 = \\ p(\mathbf{x}, t) &= -\rho \frac{\partial\Phi_I(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \rho \frac{\partial\Phi_D(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \rho \frac{\partial\Phi_R(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \rho g x_3 \end{aligned} \quad (2.1.26)$$

Επί προσθέτως, στον κύλινδρο ασκείται κατακόρυφη δύναμη από το ρευστό ίση με:

$$F_3(t) = \int_B p \eta_3 dS \quad (2.1.27)$$

όπου B η επιφάνεια του πλεούμενου σώματος

η_3 το μοναδιαίο διάνυσμα προς την κατεύθυνση (άξονα) 3

Από την (2.1.26) και (2.1.27), αντικαθιστώντας τον όρο της πίεσης, λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} F_3(t) &= - \int_B \rho \frac{\partial\Phi_I(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \eta_3 dS - \int_B \rho \frac{\partial\Phi_D(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \eta_3 dS - \\ &\quad - \int_B \rho \frac{\partial\Phi_R(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \eta_3 dS - \int_B \rho g x_3 \eta_3 dS \end{aligned} \quad (2.1.28)$$

όπου $- \int_B \rho \frac{\partial\Phi_I(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \eta_3 dS = F_{3I}$: η δύναμη *Froude-Krylov*

$- \int_B \rho \frac{\partial\Phi_D(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \eta_3 dS = F_{3D}$: η δύναμη περίθλασης (*Diffraction Force*)

$- \int_B \rho \frac{\partial\Phi_R(\mathbf{x}, t)}{\partial t} \eta_3 dS = F_{3R}$: η δύναμη ακτινοβολίας (*Radiation Force*)

$- \int_B \rho g x_3 \eta_3 dS = F_{3HS}$: η υδροστατική δύναμη (*Hydrostatic Force*)

Επίσης ορίζονται ως:

$$F_{EF} = F_{3I} + F_{3D} \quad : \text{δύναμη διέγερσης (Excitation Force)}$$

$$F_{HD} = F_{3I} + F_{3D} + F_{3R} \quad : \text{υδροδυναμική δύναμη (Hydrodynamic Force)}$$

Πλέον παρατηρεί κανείς πως οι σχέσεις των δυνάμεων δεν εξαρτώνται από τις κινήσεις του σώματος, δηλαδή δεν είναι συζευγμένες.

Έχοντας υπολογίσει κανείς τις τιμές των δυνάμεων διέγερσης, πλέον μπορεί να υπολογίσει τις αποκρίσεις του πλοίου κάνοντας χρήση της σχέσης:

$$RAO_i = \left| \frac{\check{\xi}_i}{\alpha} \right| = \left| \frac{\check{F}_{EFi}}{[C_{ii} - (M_{ii} + A_{ii})\omega^2] + i\omega B_{ii}} * \frac{1}{\alpha} \right| \quad (2.1.29)$$

όπου α το ύψος του κυματισμού

RAO_i οι αποκρίσεις i του πλεούμενου σώματος για μοναδιαία ανύψωση κύματος

2.2 Η Μέθοδος Συνοριακών Στοιχείων (BEM)

Η μέθοδος των συνοριακών στοιχείων είναι μία μέθοδος προσέγγισης των τιμών μερικών διαφορικών εξισώσεων σε ένα πεδίο προσεγγίζοντας τις τιμές στα όρια του πεδίου. Η BEM είναι γενικότερα πολύ πιο εύκολο να εφαρμοστεί από άλλες μεθόδους οι οποίες απαιτούν την διακριτοποίηση ολόκληρου του πεδίου (*domain methods*) διότι αρχικά, απαιτείται η διακριτοποίηση μόνο του ορίου του πεδίου υπολογισμού, κάτι που οδηγεί σε λιγότερα στοιχεία (*elements*) άρα και μικρότερο χρόνο υπολογισμού. Η ευκολία που προσφέρουν είναι ακόμα πιο εμφανής όταν καλούμαστε να προσεγγίσουμε τιμές σε ένα πεδίο εξωτερικά του συνόρου, όπως για παράδειγμα η ροή γύρω από ένα αντικείμενο (όπως στην συγκεκριμένη περίπτωση) όπου το πεδίο είναι, ουσιαστικά, απείρου μήκους και πλάτους. Σε αυτή την περίπτωση, το άπειρο πεδίο υπολογισμού μοντελοποιείται ως μία σχέση στα άκρα του. (*Kirkup and Yazdani, 2008*). Έχει αποδειχθεί πως ενώ στις ενώ θεωρητικά δεν έχει περιορισμούς στην εφαρμογή της, είναι πιο αποδοτική όταν εφαρμόζεται για την προσέγγιση διαφορικών εξισώσεων που είναι γραμμικές, ελλειπτικές και ομογενείς. (*Politis, 2019*)

Η BEM εφαρμόζεται μέσω από την διακριτοποίηση μίας ολοκληρωτικής εξίσωσης η οποία είναι μαθηματικά ισοδύναμη με την αρχική διαφορική εξίσωση. Η μετατροπή της διαφορικής εξίσωσης η οποία περιγράφει τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο υπολογισμού έχει ως αποτέλεσμα δύο ολοκληρωτικές εξισώσεις, μία η οποία ορίζεται πάνω στο όριο του πεδίου και μία η οποία συσχετίζει τις τιμές στο όριο του πεδίου με τις τιμές σε σημεία εντός του πεδίου υπολογισμού. (*Kirkup and Yazdani, 2008*)

Για την παρουσίαση της μεθόδου συνοριακών στοιχείων, έτσι όπως παρουσιάζεται από τους *Kirkup and Yazdani* και *Politis*, θα χρησιμοποιηθεί η απλούστερη γραμμική ελλειπτική εξίσωση, η εξίσωση του *Laplace* δύο διαστάσεων:

$$\nabla^2 \varphi(\mathbf{p}) = \frac{\partial^2 \varphi(\mathbf{p})}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 \varphi(\mathbf{p})}{\partial^2 y} = 0$$

όπου \mathbf{p} ένα σημείο με συντεταγμένες (x, y) που ανήκει στο σύνορο $\partial\Omega$ που περικλύει το πεδίο ορισμού της εξίσωσης Ω , και $\varphi(\mathbf{p})$ το δυναμικό του πεδίου.

Αρχικά ορίζεται μία οριακή συνθήκη πάνω στο σύνορο του πεδίου. Η οριακή συνθήκη θα είναι τρίτου τύπου ή *Robin*⁵.

$$a(\mathbf{p})\varphi(\mathbf{p}) + b(\mathbf{p}) \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}_p}(\mathbf{p}) = f(\mathbf{p})$$

⁵ Η συνθήκη *Robin* (*Weighted Robin Boundary Condition*) είναι μία μίξη των συνθηκών του *Dirichlet*, όπου απαιτεί συγκεκριμένη τιμή της εξίσωσης στα άκρα, και του *Neumann*, όπου απαιτεί συγκεκριμένη τιμή για την πρώτη παράγωγο της εξίσωσης στα άκρα. Οι δύο τελευταίες συνθήκες μπορούν να εντοπιστούν στην βιβλιογραφία και ως συνθήκες πρώτου και δεύτερου τύπου αντίστοιχα.

όπου $a(p)$, $b(p)$ και $f(p)$ εξισώσεις πραγματικών τιμών που ορίζονται επάνω στο όριο $\partial\Omega$ μόνο, και \mathbf{n}_p το κανονικό⁶ μοναδιαίο διάνυσμα που έχει διεύθυνση εκτός του πεδίου στο σημείο p (που ανήκει στο σύνορο του πεδίου).

Οι δύο παραπάνω σχέσεις, αυτή που ορίζεται μέσα στο πεδίο⁷ (2.2.1) (η σχέση του δυναμικού) και η σχέση που ορίζεται στο όριο του πεδίου Ω (2.2.2), η οποία ουσιαστικά είναι η οριακή συνθήκη του πεδίου, συνθέτουν το πρόβλημα των συνοριακών στοιχείων (*Boundary Value Problem-BVP*). Με την λύση του *BVP* θα μπορούμε να προσεγγίσουμε τις τιμές του φ μέσα στο πεδίο σε οποιοδήποτε σημείο μας ενδιαφέρει.

Το πρώτο βήμα στην ανάπτυξη της μεθόδου των συνοριακών στοιχείων είναι να μετατρέψουμε την μερική διαφορική εξίσωση σε ολοκληρωτική εξίσωση. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, με τον άμεσο και τον έμμεσο τρόπο. Για να πραγματοποιηθεί όμως αυτή η μετατροπή θα πρέπει να γίνει χρήση των συναρτήσεων *Green*, οι οποίες συναντώνται και ως *influence functions*, καθώς περιγράφουν την επιρροή που έχει μία πηγή q πάνω σε ένα σημείο p . Για την εξίσωση *Laplace* δύο διαστάσεων, η σχέση είναι η παρακάτω:

$$G(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = \frac{-1}{2\pi} \ln(|\mathbf{p} - \mathbf{q}|)$$

Επίσης, η εξίσωση *Green* παρουσιάζει την εξής ιδιότητα:

$$\nabla^2 G(\mathbf{p} - \mathbf{q}) = \delta(\mathbf{p} - \mathbf{q})$$

όπου με δ συμβολίζεται η σχέση του *Dirac* (*Dirac Delta Function*).

Η ολοκληρωτική εξίσωση του συνόρου (*Boundary Integral Equation*) που λαμβάνουμε είναι η παρακάτω:

$$\frac{\alpha}{2\pi} f(\mathbf{q}) = \int_{\partial\Omega} G(p, q) [\mathbf{n}_p \cdot \nabla f(p)] ds_x - PV \int_{\partial\Omega} f(\mathbf{p}) [\mathbf{n}_p \cdot \nabla G(\mathbf{p}, \mathbf{q})] ds_x, p \in \partial\Omega$$

όπου ds_x μέρος του $\partial\Omega$, $\alpha = \pi$ για ομαλό (*smooth*) σύνορο.

Προκειμένου να προσεγγίσουμε την παραπάνω ολοκληρωτική σχέση κάνοντας χρήση στοιχείων πάνω στο σύνορο $\partial\Omega$, διακριτοποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{2\pi} f(\mathbf{q}) &= \sum_{i=1}^N \int_{E_i} G(p, q) [\mathbf{n}_p \cdot \nabla f(p)] ds_x - \\ &- PV \sum_{i=1}^N PV \int_{E_i} f(\mathbf{p}) [\mathbf{n}_p \cdot \nabla G(\mathbf{p}, \mathbf{q})] ds_x, p \in \partial\Omega \text{ και } q \in \Omega \end{aligned}$$

⁶ Κανονικό διάνυσμα θεωρείται αυτό που έχει φορά κάθετη στο διάνυσμα που είναι παράλληλο στην εφαπτομένη μίας καμπύλης.

⁷ *Governing partial equation within the domain*

όπου $E_i, i=1, 2, \dots, N$ τα συνοριακά στοιχεία που ανήκουν στο $\partial\Omega$.

Όταν τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για την διακριτοποίηση είναι πρώτου βαθμού (*panels*), τότε η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί και ως:

$$\frac{\alpha}{2\pi} f(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N a_i(q) \frac{\partial f_i}{\partial \mathbf{n}_i} - \sum_{i=1}^N b_i(q) f_i$$

Μετά την λύση της παραπάνω σχέσης, μπορούμε να προσεγγίσουμε την τιμή της σχέσης f σε ένα σημείο \mathbf{q} που ανήκει στο πεδίο Ω .

2.3 Rankine Panel Method

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται εν συντομία η *Rankine Panel Method* που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς από το *SWAN* όπως αυτή παρουσιάζεται από *Sclavounos (1995)* και *Nakos and Sclavounos (1990)*.

Η *Rankine Source Method* εφαρμόστηκε από τους *Nakos and Sclavounos, 1990* σε πρόβλημα σταθερής ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Οι πηγές *Rankine* απαιτούν μία πολύ απλή συνάρτηση *Green* ($1/r$) και μία συνθήκη της ροής στο άπειρο. Όμως, απαιτούν και την διακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας, μαζί με την διακριτοποίηση της γάστρας (*Bertram, 1990*). Η μέθοδος βασίζεται στην δημιουργία γραμμικών σχέσεων που περιγράφουν την ελεύθερη επιφάνεια του νερού και την επαφή του πλεούμενου σώματος με το ρευστό (οριακή συνθήκη πάνω στο πλοίο).

2.3.1 Το πρόβλημα συνοριακών τιμών

Έστω πλοίο που κινείται σε ρευστό ατριβές, αστρόβιλο και ασυμπίεστο, με σταθερή εμπρόσθια ταχύτητα U . Το πεδίο ροής επαληθεύει την εξίσωση του *Laplace*:

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (2.3.1)$$

Πάνω στην επιφάνεια του πλεούμενου σώματος B , η συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού ως προς το κανονικό διάνυσμα στην επιφάνεια της γάστρας \mathbf{n}_p , σε κάθε σημείο, θα πρέπει να είναι ίσο με την ταχύτητα του πλοίου σε εκείνο το σημείο (συνθήκη μη εισχώρησης):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}_p} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}_p + \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}_p \quad (2.3.2)$$

Όσον αφορά την ταχύτητα του πλοίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο, θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η εμπρόσθια ταχύτητα του πλοίου U αλλά και η ταχύτητα σε κάθε σημείο λόγω της ταλαντωτικής του κίνησης \mathbf{v} .

Στην ελεύθερη επιφάνεια, η οποία χαρακτηρίζεται από την ανύψωσή της $z = \eta(x, y, t)$, ισχύει η κινηματική και η δυναμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας αντίστοιχα⁸:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla \Phi) \cdot \nabla \right] \eta = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2.3.3)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \mathbf{U} \cdot \nabla \right] \Phi + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi = -g\eta \quad (2.3.4)$$

⁸ Στην σχέση 2.1.18 παρουσιάζεται η μικτή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας που περιλαμβάνει την κινηματική και την δυναμική συνθήκη.

Εκτός των παραπάνω, από την στιγμή που το ρευστό δεν έχει όρια περιμετρικά (*unbounded*), θα πρέπει να οριστεί και μια κατάλληλη συνθήκη για την συμπεριφορά του στο άπειρο, όμοια με την σχέση (2.1.21).

2.3.2 Συνοριακή Συνθήκη στην Ελεύθερη Επιφάνεια

Όπως έχει προαναφερθεί, θεωρώντας πως η ανύψωση του κύματος είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος, μπορούμε να θεωρήσουμε την συμπεριφορά της ελεύθερης επιφάνειας γραμμική. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να δικαιολογηθεί ακόμα περισσότερο στην περίπτωση όπου το πλοίο είναι λεπτόγραμμο ή / και κινείται με μικρή εμπρόσθια ταχύτητα.

Αρχικά διαχωρίζουμε την ροή Φ σε δύο διαφορετικές ροές:

$$\Phi(\mathbf{x}, t) = \varphi_0(\mathbf{x}) + \varphi_1(\mathbf{x}, t) \quad (2.3.5)$$

Θεωρούμε την βασική (*steady*) ροή $\varphi_0(\mathbf{x})$ (*basis flow*) και το δυναμικό διαταραχής (*unsteady*) $\varphi_1(\mathbf{x})$ (*disturbance flow*).

Θεωρούμε επίσης πως ισχύει:

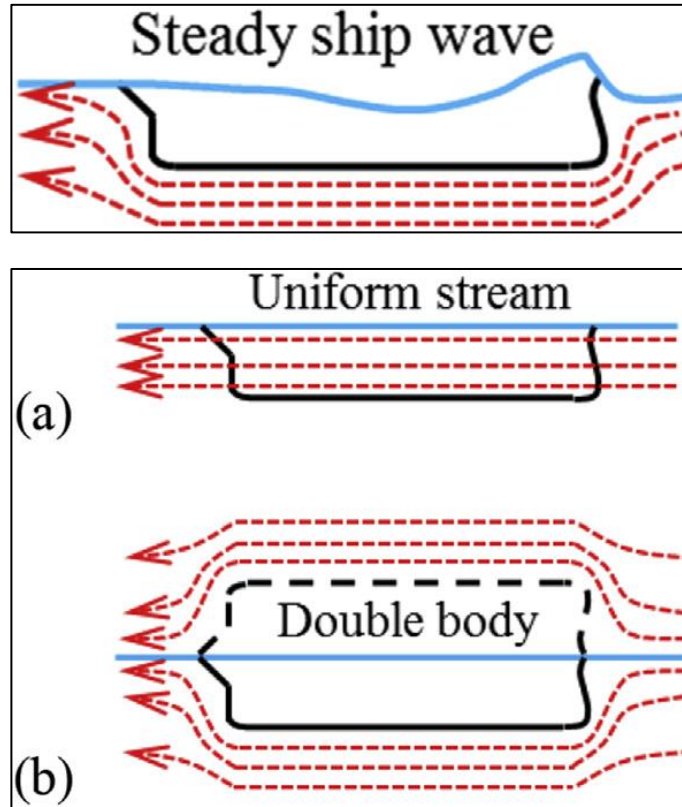
$$|\nabla\varphi_1| \ll |\nabla\varphi_0| \quad (2.3.6)$$

Ομοίως διαχωρίζεται και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 \quad (2.3.7)$$

$$\eta_1 \ll \eta_0 \quad (2.3.8)$$

Παρόλο που διαχωρίσαμε την ροή και την επίδρασή της (την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας) σε δύο διακριτά μέρη, οι παραπάνω σχέσεις δεν έχουν μοναδικές λύσεις. Υπάρχουν δύο συνήθεις τρόποι για να επιτευχθεί η ολοκληρωμένη γραμμικοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας, η γραμμικοποίηση κατά *Neumann-Kelvin* και η *Double-Body*.



Εικόνα 2.4: Γραμμικοποίηση κατά (a) Neumann-Kelvin (uniform stream) και (b) Double-Body (πηγή: Chen et al., 2018)

2.3.2.1 Γραμμικοποίηση κατά Neumann-Kelvin

Η γραμμικοποίηση κατά Neumann-Kelvin ($N-K$) είναι η πιο απλή γιατί θεωρεί πως η βασική ροή φ_0 περιγράφει ομοιόμορφη ροή, οπότε και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας που προκύπτει από αυτή είναι μηδέν ($\eta_0 = 0$). Οπότε οι συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας (2.3.3) και (2.3.4) γίνονται αντίστοιχα:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \mathbf{U} \frac{\partial}{\partial x} \right] \eta_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad z = 0 \quad (2.3.9)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \mathbf{U} \frac{\partial}{\partial x} \right] \varphi_1 = -g\eta_1, \quad z = 0 \quad (2.3.10)$$

Ένα πλεονέκτημα που εμφανίζει η $N-K$ είναι, εκτός από την απλότητά τους, μπορούν να οδηγήσουν σε λύσεις που ονομάζονται *Wave Green Functions (WGF)* σε σταθερή ροή. Η χρήση των *WGF* απαιτεί την διακριτοποίηση μόνο της γάστρας αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για πολύ λεπτόγραμμα πλοία πολύ μικρού πλάτους και βυθίσματος. Για πλοία κανονικής μορφής, προτιμάται ο άλλος τρόπος γραμμικοποίησης, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω:

2.3.2.1 Γραμμικοποίηση κατά *Double-Body*

Κατά την γραμμικοποίηση με *Double Body (D-B)* θεωρούμε πως η βασική ροή (*basis flow*) χαρακτηρίζεται από την ροή γύρω από το σώμα καθώς και από τον αντικατοπτρισμό του ως προς την ίσαλο (Εικόνα). Έτσι, η δυναμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται:

$$\eta_0 = \frac{U}{g} \frac{\partial \varphi_0}{\partial x} - \frac{1}{2g} \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0, \quad z = 0 \quad (2.3.11)$$

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τις σχέσεις (2.3.6) και (2.3.8), για τις συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας έχουμε:

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \eta_1 = \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} \eta_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad z = 0 \quad (2.3.12)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = -g\eta_1 + \left[\mathbf{U} \cdot \nabla \varphi_0 - \frac{1}{2} \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0 \right], \quad z = 0 \quad (2.3.13)$$

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις, επιτυγχάνεται η γραμμικοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας.

2.3.3 Συνοριακή Συνθήκη στο Σώμα

Προκειμένου να διατηρηθούν οι συνοριακές συνθήκες στο σώμα γραμμικές, θεωρούμε πως οι κινήσεις που πραγματοποιεί είναι μικρές, οπότε και όλες οι σχέσεις θεωρούν πως βρίσκεται στην θέση ισορροπίας του.

Καθώς το συνολικό δυναμικό της ροής έχει διασπαστεί σε δύο επί μέρους δυναμικά (σχέση 2.3.5), θεωρείται ότι το κάθε ένα συμπεριφέρεται διαφορετικά στην παρουσία του σώματος μέσα στο ρευστό. Αρχικά το δυναμικό της βασικής ροής φ_0 ακολουθεί ουσιαστικά την εμπρόσθια ταχύτητα του πλοίου \mathbf{U} :

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial \mathbf{n}_p} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{n}_p = u \cdot n_1 \quad (2.3.14)$$

Όπου $\mathbf{n}_p = (n_1, n_2, n_3)$ το κανονικό διάνυσμα πάνω στην επιφάνεια του σώματος

$\mathbf{U} = (u, v, w)$ το διάνυσμα των ταχυτήτων του πλοίου. Αφού θεωρείται πως η ταχύτητα του πλοίου είναι εμπρόσθια (κατά τον άξονα x) τότε η συνιστώσα του διανύσματος που το χαρακτηρίζει είναι η u .

Το δυναμικό διαταραχής φ_1 εμπεριέχει το δυναμικό της διάθλασης (*diffraction*), της ανάκλασης (*radiation*) και του κυματισμού περιβάλλοντος (*incident wave*). Ισχύει:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{n}_p} = \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right) \quad (2.3.15)$$

όπου:

$$(n_4, n_5, n_6) = \mathbf{x} \times \mathbf{n}_p \quad (2.3.16)$$

$$(m_1, m_2, m_3) = (\mathbf{n}_p \cdot \nabla)(\mathbf{U} - \nabla \varphi_0) \quad (2.3.17)$$

$$(m_4, m_5, m_6) = (\mathbf{n}_p \cdot \nabla)[\mathbf{x} \times (\mathbf{U} - \nabla \varphi_0)] \quad (2.3.18)$$

Οι όροι m_j ονομάζονται στην βιβλιογραφία ως *m-terms*, και παρουσιάζονται αναλυτικά από *Ogilvie and Tuck (1969)* κατά την παρουσίαση της *strip method*. Ομοίως στην ίδια εργασία παρουσιάζονται και οι όροι n_j . Παρατηρούμε πως για να υπολογισθούν οι παραπάνω όροι χρειάζεται η δεύτερη παράγωγος του φ_0 , κάτι που δεν είναι εύκολο να υπολογισθεί. Στην περίπτωση όπου ακολουθούνταν το μοντέλο γραμμικοποίησης *N-K*, και θεωρούμε πως $\varphi_0 = 0$, τότε αυτοί οι όροι δεν υφίστανται και οδηγούμαστε σε απλούστερες σχέσεις. Παρόλα αυτά παραμένει το πρόβλημα του *N-K*, πως μας δίνει ακριβή αποτελέσματα μόνο σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις πλοίων. Μια επιτυχία της μεθόδου *SWAN* όμως, σύμφωνα με *Nakos and Sclavounos (1990)* είναι πως η επίλυση των *m-terms* πραγματοποιείται με ακρίβεια.

2.3.4 Αρμονικές Ροές

Όταν θεωρείται πως το πλοίο κινείται σε αρμονικούς κυματισμούς με εμπρόσθια ταχύτητα, τότε το πρόβλημα της ροής είναι διαφορετικό από αυτό που παρουσιάστηκε παραπάνω. Συμβολίζουμε το δυναμικό της ροής διαταραχής φ_1 πλέον ως μιγαδική συνάρτηση (2.3.19), κάτι που θα οδηγήσει και στην ανατύπωση των συνοριακών συνθηκών που εμπεριέχουν παράγωγο ως προς τον χρόνο αντίστοιχα, όπως στην (2.3.20)

$$\varphi_1 = \text{Re}\{\tilde{\varphi} e^{i\omega t}\} \quad (2.3.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = i\omega \quad (2.3.20)$$

θυμίζεται πως ο τελεστής $\tilde{}$ συμβολίζει μιγαδική συνάρτηση.

Όπου πλέον παρουσιάζεται ο όρος της συχνότητας ω , δεν αναφέρεται απλά στην συχνότητα του κυματισμού, αλλά στην συχνότητα συνάντησης του κυματισμού με το σώμα (*encounter frequency*). Για κυματισμό γωνίας β από το σώμα, με θ μοίρες τον έμπρυσμο κυματισμό,

αρχικής συχνότητας ω_0 , που προσπίπτει σε σώμα που κινείται με σταθερή εμπρόσθια ταχύτητα U , η συχνότητα συνάντησης υπολογίζεται ως εξής:

$$\omega = \omega_0 - U \frac{\omega_0^2}{g} \cos(\beta) \quad (2.3.21)$$

Οι παραπάνω σχέσεις βοηθούν όταν μελετάται το πρόβλημα κυματισμών οι οποίοι συμπεριφέρονται, κατά βάση, γραμμικά. Όμως, υπάρχει μια κατηγορία κυματισμών οι οποίοι σχηματίζουν μεγάλη γωνία με το επίπεδο $z=0$ (*steep waves*) οι οποίοι συμπεριφέρονται μη-γραμμικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η καλύτερη προσέγγιση που μπορεί να γίνει είναι η μελέτη του προβλήματος στο πεδίο του χρόνου (*time domain*) σε αντίθεση με τις κλασσικές προσεγγίσεις άλλων μεθόδων που μελετούν τα προβλήματα στο πεδίο των συχνοτήτων (*frequency domain*).

Στην μέθοδο *SWAN*, οι κυματισμοί του περιβάλλοντος (*ambient waves*) μοντελοποιούνται ξεχωριστά από τους κυματισμούς που προκύπτουν λόγω της παρουσίας του σώματος στο ρευστό. Προκειμένου να υπολογιστεί η συμβολή των δύο συστημάτων κυματισμού, η οποία θεωρείται μη-γραμμική, επιστρατεύονται επαναληπτικοί υπολογισμοί. Το πρώτο βήμα για την ανάπτυξη του επαναληπτικού υπολογισμού ονομάζεται “*weak scatterer hypothesis*”, και βασίζεται σε παρατηρήσεις πως οι κυματισμοί που δημιουργούνται λόγω της παρουσίας του πλοίου στο ρευστό είναι πολύ μικρότεροι από τους κυματισμούς του περιβάλλοντος.

Ο προκύπτων κυματισμός ορίζεται ως η βασική ροή (*basis flow*) φ_0 , όπου όμως εδώ θεωρείται εξαρτημένη από τον χρόνο. Η βασική ροή φ_0 οδηγεί σε ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ίση με η_0 , ομοίως με πριν. Η σχέση της βασικής ροής με την ροή διαταραχής φ_1 και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας που προκαλεί η_1 , είναι ομοίως με πριν:

$$|\nabla\varphi_1| \ll |\nabla\varphi_0| \quad (2.3.22)$$

$$\eta_1 \ll \eta_0 \quad (2.3.23)$$

Αντικαθιστώντας στις συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας, οδηγούμαστε σε γραμμικές σχέσεις για το δυναμικό διαταραχής φ_1 το οποίο διαδίδεται πάνω στον κυματισμό που προκαλείται από την βασική ροή ($z = \eta_0$):

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \eta_1 &= \left[\frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} - \left(\frac{\partial}{\partial z} \nabla\varphi_0 \right) \cdot \nabla \eta_0 \right] \eta_1 + \\ &+ \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} - \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \eta_0 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.3.24)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = \left(-g + \left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla \right] \frac{\partial \varphi_0}{\partial z} \right) \eta_1 -$$

$$-\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\mathbf{U} - \nabla\varphi_0) \cdot \nabla\right]\eta_0 - \frac{1}{2}\nabla\varphi_0 \cdot \nabla\varphi_0 - g\eta_0 \quad (2.3.25)$$

Μία πολύ βασική διαφορά με τις σχέσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω για τις συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας, είναι πως οι σχέσεις (2.3.24) και (2.3.25) είναι χρονικά εξαρτώμενες, οπότε και απαιτείται η επαναδιακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας για κάθε χρονική στιγμή που υπολογίζεται.

2.3.5 Η Εφαρμογή της Μεθόδου

Η ολοκληρωτική σχέση του Green

Έστω φ το άγνωστο πεδίο βασικής ροής ή της ροής διαταραχής, S η επιφάνεια των υφάλων του πλοίου στην μέση θέση ταλάντωσής του, και F , η ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Στο πεδίο που εσωκλείεται από το S και το F της ροής της οποίας το δυναμικό επαληθεύει την εξίσωση *Laplace*, ισχύει, σύμφωνα με το θεώρημα του *Green*:

$$G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) = \frac{1}{2\pi|\mathbf{x} - \boldsymbol{\xi}|} \quad (2.3.26)$$

Μέσω της ταυτότητας του *Green* μπορούμε να αναπαραστήσουμε σε ολοκληρωτική μορφή την σχέση μεταξύ της τιμής του φ και της παραγώγου του κατά το κανονικό διάνυσμα πάνω στα F και S :

$$\varphi(\mathbf{x}, t) + \iint_{F+S} \varphi(\boldsymbol{\xi}, t) \frac{\partial G}{\partial n_{\boldsymbol{\xi}}}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} - \iint_{F+S} \frac{\partial \varphi(\boldsymbol{\xi}, t)}{\partial n_{\boldsymbol{\xi}}} G(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) d\boldsymbol{\xi} = 0 \quad (2.3.27)$$

Η ολοκληρωτική σχέση (2.3.27) πλέον μπορεί να λυθεί με μέθοδο συνοριακών στοιχείων.

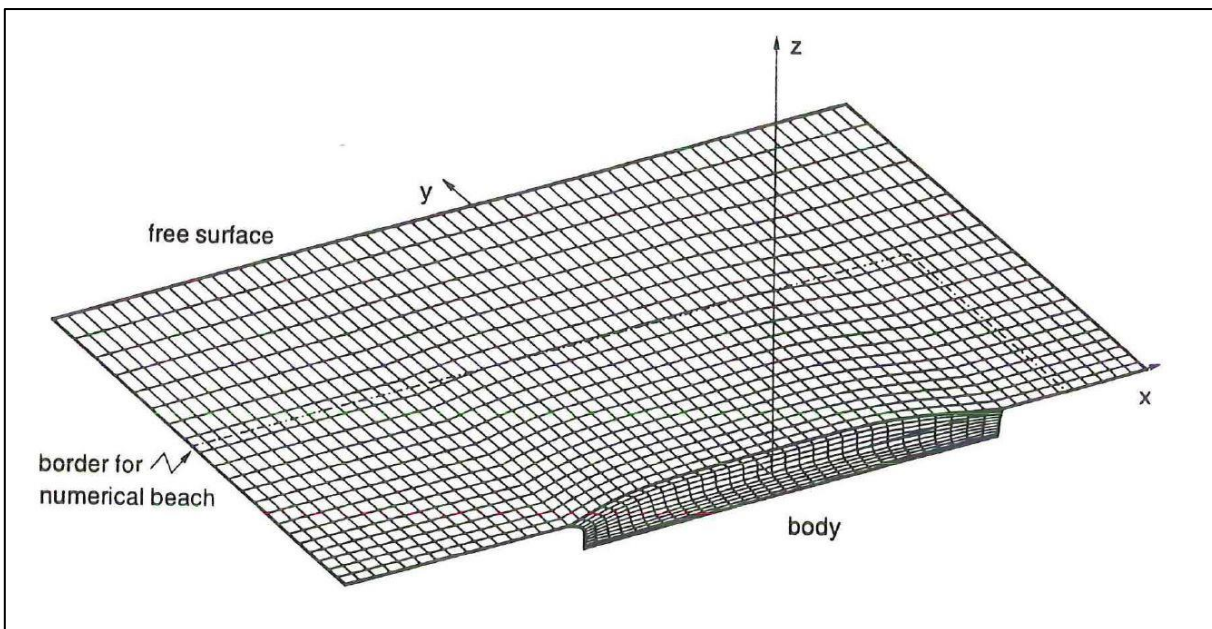
Το πρώτο βήμα για την επίλυση ενός προβλήματος με την χρήση συνοριακών στοιχείων είναι η χωρική διακριτοποίηση. Οι επιφάνειες F και S που αναφέρθηκαν παραπάνω διακριτοποιούνται κάνοντας χρήση τετράπλευρων *panels*. Για κάθε *panel* j , για το δυναμικό της ροής και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας θα ισχύει:

$$\varphi(\mathbf{x}, t) \approx \sum_j (\varphi)_j(t) B_j(\mathbf{x}) \quad (2.3.28)$$

$$\eta(\mathbf{x}, t) \approx \sum_j (\eta)_j(t) B_j(\mathbf{x}) \quad (2.3.29)$$

όπου $B_j(\mathbf{x})$ συνάρτηση βάσης στο *panel* j που παραμένει συνεχής σε κάθε *panel* C^1 .

Η διακριτοποιημένη ολοκληρωτική σχέση λύνεται για όλα τα *panels* με σκοπό την προσέγγιση των αγνώστων ϕ και η . Όμως, αφού τα ϕ και η είναι χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και χρονική διακριτοποίηση. Για την λειτουργία της μεθόδου, απαιτείται να εισαχθεί από τον χρήστη ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης του φαινομένου, καθώς και τα ενδιάμεσα *time steps*.



Εικόνα 2.5: Χωρική διακριτοποίηση της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας (πηγή: Sclavounos, 1995)

Για την ολοκλήρωση της μεθόδου, θα πρέπει να οριστεί μία συνθήκη που να επιβάλει την κατάλληλη συμπεριφορά του ρευστού στα όρια του πεδίου υπολογισμού. Στην μέθοδο *SWAN* οι ερευνητές επέλεξαν να απαιτήσουν, για την σταθερή ροή, μηδενική ανύψωση κυματισμού καθώς και μηδενική γωνία κυματισμού στα όρια του πεδίου που οδηγείται ο κυματισμός, κάτι που ουσιαστικά είναι μια μικτή οριακή συνθήκη τύπου *Robin*. Σε χρονικά μεταβαλλόμενη ροή, όπως για παράδειγμα όταν επιδρά στην επιφάνεια ελεύθερος κυματισμός, θεωρείται ένα σετ από *panels* τα οποία τοποθετούνται περιμετρικά του πεδίου και απορροφούν την ενέργεια του κυματισμού, χάρις μία διαφορετική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας η οποία έχει σχεδιαστεί για αυτό το σκοπό. Στην Εικόνα αυτά τα *panels* παρουσιάζεται ως “*border for numerical beach*”.

2.3.5.1 Ευστάθεια της μεθόδου *SWAN*

Όπως κάθε προσεγγιστική μέθοδος, έτσι και για την *SWAN* ισχύουν κάποιοι περιορισμοί οι οποίοι θα πρέπει να ακολουθούνται προκειμένου να λάβουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Το πρώτο κριτήριο ευστάθειας αφορά την χωρική διακριτοποίηση.

Έστω a το *panel ratio*:

$$a = \frac{h_x}{h_y} \quad (2.3.30)$$

F_h ο αριθμός *Froude* του πλέγματος:

$$F_h = \frac{U}{\sqrt{gh_x}} \quad (2.3.31)$$

και τ η παράμετρος μειωμένης συχνότητας (*reduced frequency parameter*):

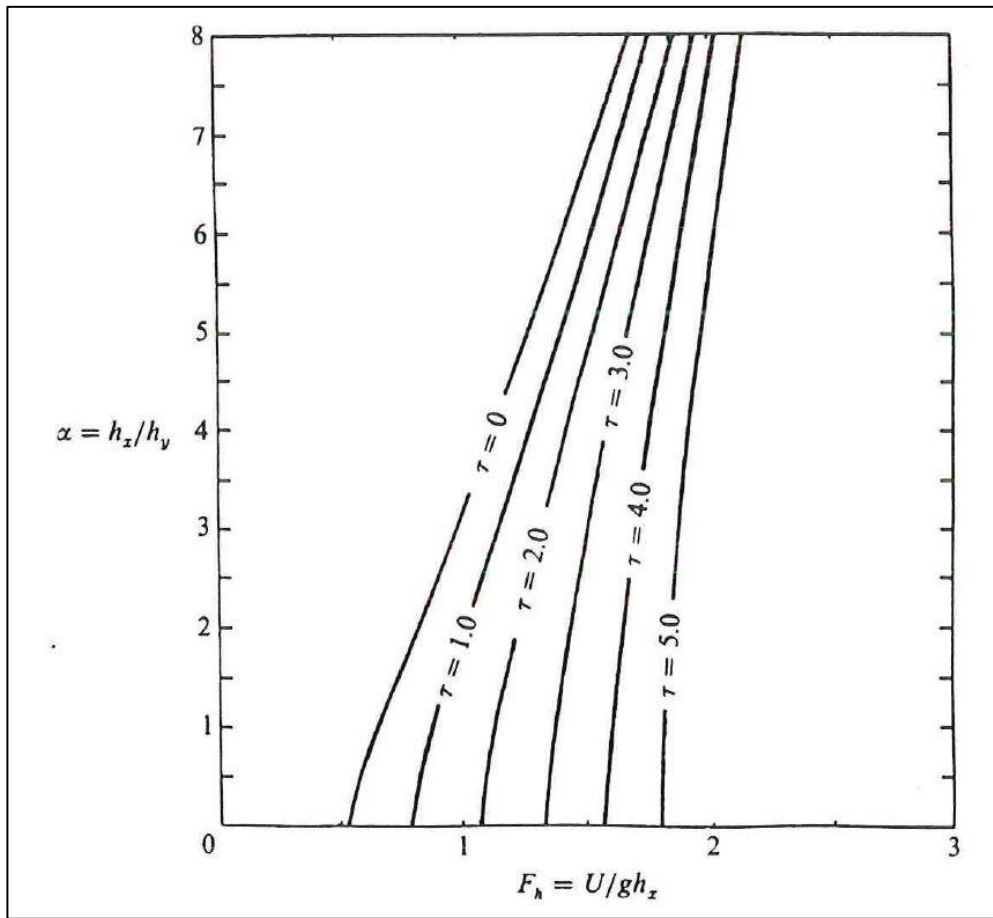
$$\tau = \frac{\omega U}{g} \quad (2.3.32)$$

όπου: h_x και h_y το μήκος του *panel* ως προς την διεύθυνση x και y αντίστοιχα

U η εμπρόσθια ταχύτητα του πλοίου

ω η συχνότητα συνάντησης

Η μέθοδος θα συγκλίνει μόνο όταν το F_h είναι μεγαλύτερο από μία ελάχιστη κρίσιμη τιμή η οποία εξαρτάται από το a και το τ .



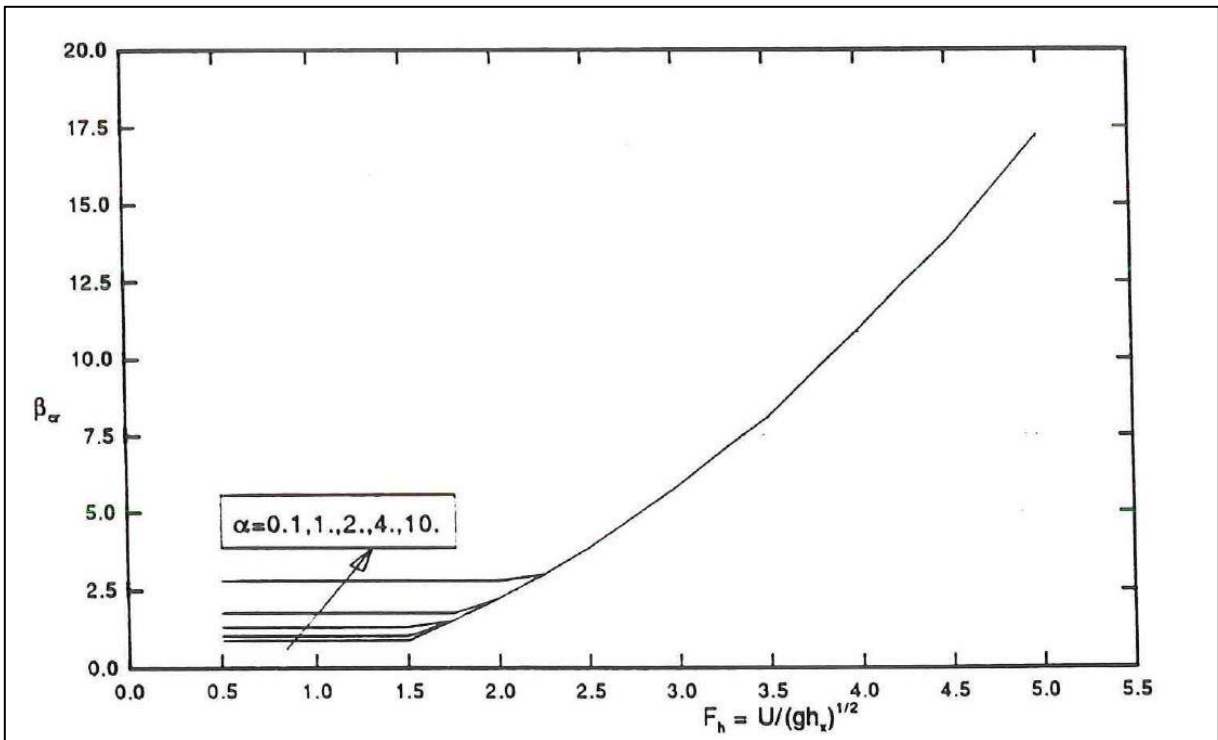
Γράφημα 2.1: Κριτήριο ευστάθειας της μεθόδου SWAN για την σταθερή και την χρονικά εξαρτώμενη ροή (πηγή: Sclavounos, 1995)

Ομοίως υπάρχει και το κριτήριο για την χρονική διακριτοποίηση. Έστω:

$$\beta = \frac{\sqrt{h_x/g}}{\Delta t} \quad (2.3.33)$$

όπου: Δt το χρονικό βήμα (*time step*)

Η επιλογή του χρονικού βήματος θα πρέπει να συμφωνεί με το διάγραμμα παρακάτω σχετικά με την κρίσιμη τιμή του β που εξαρτάται και από τις διαστάσεις του πλέγματος. Θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να βρισκόμαστε όσο το δυνατόν πιο πάνω από την καμπύλη.



Γράφημα 2.2: Κριτήριο για την χρονική διακριτοποίηση (πηγή: Sclavounos, 1995)

Τέλος, έχει παρατηρηθεί πως αν η παράμετρος μειωμένης συχνότητας που παρουσιάστηκε παραπάνω στην σχέση (2.3.32) πλησιάζει την τιμή του 0.25 τότε ίσως οδηγηθούμε σε λανθασμένα αποτελέσματα. όσο η παράμετρος τ παραμένει παραπάνω από την κρίσιμη τιμή των 0.25, τότε η μέθοδος θα λειτουργεί με πολύ καλύτερη ακρίβεια.

2.4 Το Θαλάσσιο Περιβάλλον

Στα προηγούμενα υποκεφάλαια έγινε μία σύντομη αναφορά στην συμπεριφορά ενός σώματος που επιπλέει σε ένα περιβάλλον με κυματισμούς, αλλά με την παραδοχή πως οι κυματισμοί αυτοί είναι απλοί και αρμονικοί. Στην πραγματικότητα όμως απλοί αρμονικοί κυματισμοί δεν συναντώνται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Αντιθέτως, οι κυματισμοί στο πραγματικό θαλάσσιο περιβάλλον μπορούν να αναπαρασταθούν καλύτερα ως μία συμβολή απλών αρμονικών κυματισμών, όπου ο καθένας έχει την δικιά του συχνότητα και το δικό του πλάτος κυματισμού.

Προκειμένου να είναι δυνατόν η μελέτη τέτοιου είδους κυματισμών, έχει πραγματοποιηθεί η ανάπτυξη διαφόρων φασμάτων τα οποία τους περιγράφουν, λαμβάνοντας υπ' όψιν το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσονται κάθε φορά. Σε συνεργασία με τα μετρούμενα μεγέθη που περιγράφουν τον κυματισμό, τα οποία θα παρουσιαστούν συνοπτικά παρακάτω, μπορεί κανείς να δημιουργήσει ένα φάσμα το οποίο αντιπροσωπεύει την κατάσταση της θάλασσας που θέλει να μελετήσει. Πολύ συνοπτικά λοιπόν, θα γίνει παρακάτω μία παρουσίαση των μεγεθών που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση ενός φάσματος κυματισμού, καθώς και ορισμένα εκ των συνηθέστερων φασμάτων που χρησιμοποιούνται.

2.4.1 Περιγραφή ενός Πραγματικού Κυματισμού

Σε μια καταγραφή κυματισμού ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιούνται ορισμένοι όροι για την περιγραφή του, προκειμένου να δώσουν αίσθηση της συχνότητας, του ύψους του, και της μορφής του γενικότερα. Οι ορισμοί που ακολουθούν προέρχονται από την βιβλιογραφική αναφορά Σουκισιάν *et al.*, (2007) και Γεροστάθης, (2019).

«*Η (προσημασμένη) κατακόρυφη απόσταση μίας κορυφής (τοπικού μέγιστου) από την αδιατάρακτη επιφάνεια ονομάζεται πλάτος κορυφής κύματος (ή απλά πλάτος κύματος)*» (Τ Σουκισιάν *et al.*, 2007) Έως τώρα το πλάτος κύματος συμβολίζεται με “*a*”.

«*Η (απόλυτη) κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και της επόμενης κοιλάδας ονομάζεται ύψος κύματος κορυφής-κοιλάδας*». (Τ Σουκισιάν *et al.*, 2007) Ο συνήθης συμβολισμός είναι *H*.

«*Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών υπερβάσεων του επιπέδου ηρεμίας από την συνάρτηση $\eta(t)$ ονομάζεται περίοδος μηδενικής υπέρβασης (zero up-crossing period)*». (Τ Σουκισιάν *et al.*, 2007) Συμβολίζεται ως *T_Z*.

«*Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών (κοιλάδων) της συνάρτησης $\eta(t)$ ονομάζεται περίοδος κορυφών (κοιλάδων) (crest / trough period)*». (Τ Σουκισιάν *et al.*, 2007) Συμβολίζεται ως *T_p*.

«Το (στατιστικό) σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ (significant wave height) ορίζεται ως η μέση τιμή του ενός τρίτου των μεγαλύτερων υψών της καταγραφής ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.» (Γεροστάθης, 2019)

Για το σημαντικό ύψος κύματος ισχύει:

$$H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2.4.1)$$

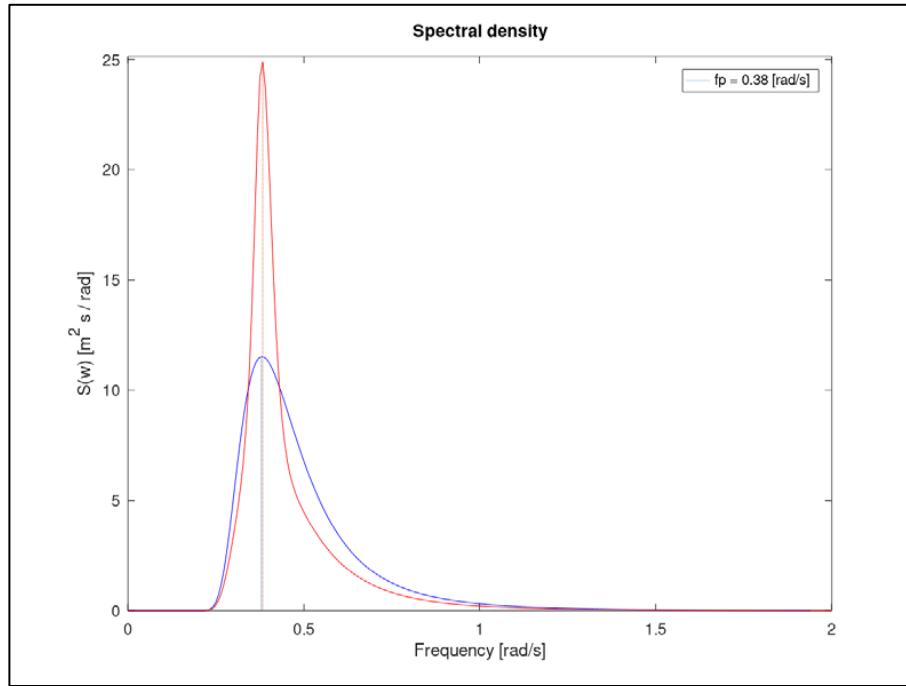
όπου N ο αριθμός κυμάτων σε μία καταγραφή ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας

H_j το ύψος του κάθε κυματισμού

Όταν κανείς διαθέτει ορισμένα από τα παραπάνω στοιχεία για τον κυματισμό, μπορεί να δημιουργήσει ένα φάσμα που να τον περιγράφει, χρησιμοποιώντας ένα από τα τυπικά φάσματα που παρουσιάζονται παρακάτω. Συνήθως, τα στοιχεία που χρειάζεται κανείς για την περιγραφή ενός κυματισμού ως φάσμα, είναι το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος κορυφής. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να βρεθούν από μετρήσεις που έχουν δημοσιευθεί, όπως για παράδειγμα στην βιβλιογραφική αναφορά (Τ Σουκισιάν et al., 2007).

2.4.2 Τυπικά Φάσματα Κυματικής Ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε, τα φάσματα είναι ένας πρακτικός τρόπος για να περιγράψει κανείς την τυχαία συμπεριφορά του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Θεωρώντας τον τυχαίο κυματισμό ως μία συμβολή πολλών μικρότερων κυματισμών διαφορετικών συχνοτήτων, παρουσιάζεται ως ένα γράφημα η ενέργεια που προσδίδεται σε αυτή την συμβολή από κάθε συχνότητα. Αρκετά τέτοια φάσματα έχουν αναπτυχθεί με σκοπό την περιγραφή διάφορων καταστάσεων θάλασσας. Κάποια φάσματα χρειάζονται μόνο μία παράμετρο για να υπολογισθούν (μονοπαραμετρικά φάσματα) ενώ άλλα περισσότερες. Καθώς όμως το κάθε φάσμα εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς, μπορεί κανείς να οδηγηθεί, με τα ίδια δεδομένα, σε δύο πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, αναλόγως ποιο φάσμα θα ακολουθήσει. Ένα τυπικό παράδειγμα παρουσιάζεται στο Γράφημα , όπου παρουσιάζονται δύο διαφορετικά φάσματα που όμως περιγράφουν έναν κυματισμό με όμοια χαρακτηριστικά.



Γράφημα 2.3: Παράδειγμα δύο φασμάτων (μπλε χρώμα - Bretschneider, κόκκινο χρώμα - JONSWAP) για την περιγραφή του ίδιου κυματισμού σημαντικού ύψους κύματος 7 μέτρων και συχνότητας κορυφής 0.38 rad/s.

Παρακάτω θα γίνει μία παρουσίαση των συνηθέστερων κυματικών φασμάτων, όπως αυτά περιγράφονται από την βιβλιογραφική αναφορά Γεροστάθης (2019).

2.4.2.1 Το φάσμα Pierson-Moskowitz

Το φάσμα *Pierson-Moskowitz* χρησιμοποιείται για την περιγραφή πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας του Βορείου Ατλαντικού Ωκεανού. Είναι φάσμα μίας παραμέτρου, δηλαδή για τον ορισμό της χρειάζεται μόνο μία τιμή που περιγράφει τον κυματισμό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, αυτή η τιμή είναι η συχνότητα κορυφής. Η σχέση που το περιγράφει είναι:

$$S(\omega) = 8.1 \cdot 10^{-3} \frac{g^2}{\omega^5} \exp \left\{ -\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \right\} \quad (2.4.2)$$

Όταν χρησιμοποιείται το φάσμα *P-M*, η συχνότητα κορυφής μπορεί να συνδέει με το σημαντικό ύψος κύματος χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$\omega_p = 0.4013 \sqrt{g/H_{1/3}} \quad (2.4.3)$$

όπου: ω_p η συχνότητα κορυφής σε [rad/s]

$H_{1/3}$ το σημαντικό ύψος κύματος

2.4.2.2 Το φάσμα *Bretschneider*

Το φάσμα *Bretschneider* καθιερώθηκε από το δεύτερο *International Ship Structures Congress (ISSC)* που πραγματοποιήθηκε το 1967 και από το 12^ο *International Towing Tank Conference (ITTC)* το 1969. Είναι φάσμα δύο παραμέτρων και μπορεί κανείς να το χρησιμοποιήσει για να περιγράψει διάφορα είδη θάλασσας. Η σχέση που περιγράφει το φάσμα είναι:

$$S(\omega) = \frac{5}{16} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^5 \frac{H_{1/3}^2}{\omega_p} \exp\left\{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right\} \quad (2.4.4)$$

όπου: ω_p η συχνότητα κορυφής σε [rad/s]

$H_{1/3}$ το σημαντικό ύψος κύματος

2.4.2.3 Το φάσμα *JONSWAP*

Το φάσμα *JONSWAP* είναι κατάλληλο για την περιγραφή ρηχών θαλασσών που μπορεί να περιβάλλονται από στεριά. Αναπτύχθηκε από τις μετρήσεις που προέκυψαν κατά το *JOint North Sea WAve Project*, ενώ για εφαρμογές πάνω στην δυναμική συμπεριφορά πλοίου προτάθηκε από το 17^ο *ITTC* ένα μέσο φάσμα. Περιγράφεται από την σχέση:

$$S(\omega) = \frac{320H_{1/3}^2}{T_p} \omega^{-5} \exp\left\{-\frac{1950}{T_p^4} \omega^{-4}\right\} \gamma^\delta \quad (2.4.5)$$

$$\delta = -\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2} \quad (2.4.6)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \omega_p \\ 0.09, & \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.4.7)$$

όπου: ω_p η συχνότητα κορυφής σε [rad/s]

$H_{1/3}$ το σημαντικό ύψος κύματος

$$\gamma = 3.3$$

2.4.3 Εφαρμογές με Φασματικά Μοντέλα

Όταν απαιτείται ο υπολογισμός της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου σε μία συγκεκριμένη κατάσταση θάλασσας η οποία μπορεί να περιγραφεί με ένα φασματικό μοντέλο, τότε ισχύει η σχέση:

$$S_{\xi}(\omega_e) = |RAO_{\xi_i}(\omega_e)|^2 S(\omega_e) \quad (2.4.8)$$

όπου: $S_{\xi_i}(\omega_e)$ η φασματική απόκριση του πλοίου για την συχνότητα συνάντησης

$RAO_{\xi_i}(\omega_e)$ οι αποκρίσεις του πλοίου που έχουν υπολογισθεί για αρμονικούς κυματισμούς συχνότητας συνάντησης ω_e , για την κίνηση ξ_i

$S(\omega_e)$ το φάσμα του κυματισμού για την συχνότητα συνάντησης

Το φάσμα πρέπει να μετατραπεί πριν χρησιμοποιηθεί στην παραπάνω σχέση για να αντιπροσωπεύει τον κυματισμό συνάντησης. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τις σχέσεις:

$$\omega_e = \omega - \left(\frac{\omega^2}{g}\right) U \cdot \cos(\beta) \quad (2.4.9)$$

$$S(\omega_e) = \left|1 - \frac{2\omega}{g} U \cdot \cos(\beta)\right|^{-1} S(\omega) \quad (2.4.10)$$

όπου: U η εμπρόσθια ταχύτητα του πλοίου

β η γωνία συνάντησης του κυματισμού (180 μοίρες οι εμπρόσθιοι κυματισμοί)

ω η αρχική συχνότητα

$S(\omega)$ η τιμή του φάσματος για την αρχική συχνότητα ω

Όταν οι φασματικές αποκρίσεις του πλοίου είναι γνωστές, τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμόν στοιχείων που την περιγράφουν. Αρχικά, η ροπή n τάξης του φάσματος δίνεται από την σχέση:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{\xi_i}(\omega_e) d\omega \quad (2.4.11)$$

από τις ροπές μπορούμε να υπολογίσουμε περαιτέρω μεγέθη, όπως:

- Σημαντικές τιμές διπλάσιου πλάτους απόκρισης (*significant double amplitudes*)

$$\bar{\xi}_i^{1/3} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.4.12)$$

- Μέση κεντροειδής περίοδος κύματος (*energy period*)

$$T_e = 2\pi \frac{m_0}{m_1} \quad (2.4.12)$$

- Μέση Περίοδος μηδενικής υπέρβασης

$$T_Z = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_1}} \quad (2.4.13)$$

- *RMS* τιμές

$$RMS = \sqrt{m_0} \quad (2.4.14)$$

Να σημειωθεί πως ο όρος 2π έχει εισαχθεί στις σχέσεις διότι συνήθως η συχνότητα ω παρουσιάζεται σε τιμές γωνιακής συχνότητας [*rad/s*]. Εάν η συχνότητα δίνεται σε [*Hz*] τότε ο όρος 2π δεν θα ισχύει.

3. Πορεία Υπολογισμών

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία περιγραφή της πορείας υπολογισμών που ακολουθήθηκε καθώς και της επιλογής των παραμέτρων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το SWAN2, το οποίο έχει αναπτυχθεί από την BMC.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για γωνίες πρόσπτωσης των 180 μοιρών (*head*), 135 και 90 μοιρών. Για γωνίες κάτω των 90 μοιρών, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το πρόγραμμα κρίθηκαν αναξιόπιστα.

3.1 Η Γεωμετρία της Γάστρας

Για κάθε ένα πλοίο από τα δύο που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (*Parent Ship*, *NEOPYGOS*), δημιουργήθηκε ένα μοντέλο γεωμετρίας με βάση τις οδηγίες του δημιουργού του λογισμικού. Λαμβάνοντας υπόψη πως η δημιουργία του πλέγματος πραγματοποιείται από το λογισμικό, δημιουργούμε εξ αρχής ένα αρκετά λεπτομερές μοντέλο χρησιμοποιώντας νομείς (*stations*) και κόμβους (*nodes*) πάνω σε κάθε νομέα. Το μοντέλο αναπαριστά την γάστρα κάτω από την ίσαλο, θεωρώντας σαν επιφάνεια του νερού το επίπεδο xy . Εκτός από τους νομείς, στοιχεία θα πρέπει να δοθούν και για την μορφή της πλώρης και της πρύμνης του πλοίου. Αντίστοιχα με τους νομείς, έτσι και εδώ δόθηκαν σημεία πάνω στην *center line* τα οποία αναπαριστούν την γεωμετρία.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο αριθμός των νομέων και των κόμβων ανά νομέα που χρησιμοποιήθηκαν κατά περίπτωση, για την γεωμετρική απεικόνιση:

Vessel	No. Of Stations	No. Of Nodes per Half Station ⁹
Parent Ship	122	11
NEOPYGOS	83	11

Στην περίπτωση του πατρικού πλοίου παρατηρείται πως χρησιμοποιήθηκαν περισσότεροι νομείς για την αναπαράσταση της γεωμετρίας της γάστρας. Αυτό συνέβη καθώς η γεωμετρία της πρύμνης του πατρικού πλοίου είναι πολύ πιο περίπλοκη από του *NEOPYGOS*, έτσι χρειάστηκαν παραπάνω νομείς για την ακριβής αναπαράστασή της. Επίσης να σημειωθεί πως από την μέση του πλοίου (*Station $x=0$*) και μπροστά, τα δύο πλοία μοιράζονται τα ίδια σημεία για την αναπαράσταση της γάστρας.

⁹ Οι κόμβοι που χρησιμοποιούνται αναπαριστούν τον μισό νομέα, λόγω συμμετρίας.

3.2 Το Πλέγμα Υπολογισμού

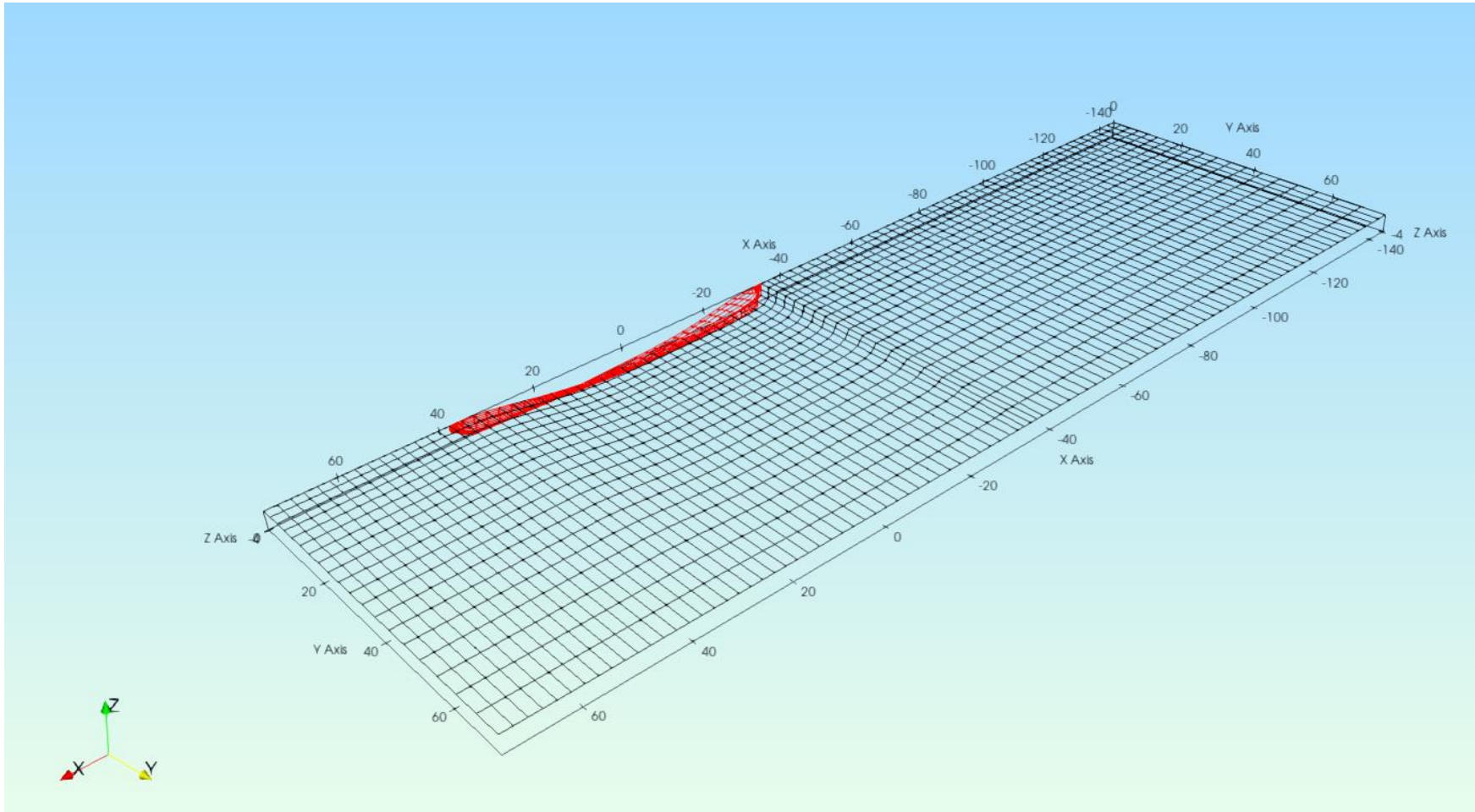
Προκειμένου το λογισμικό να πραγματοποιήσει τους υπολογισμούς, δημιουργεί ένα πλέγμα δύο διαστάσεων τετράπλευρων στοιχείων στην επιφάνεια της γάστρας καθώς και της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας που έχει οριστεί. Ο μέγιστος αριθμός των στοιχείων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση του μισού χωρίου και της μισής γάστρας είναι τρεις χιλιάδες. Αυτό θέτει σοβαρό περιορισμό καθώς προκειμένου να αναπαρασταθεί σωστά η γεωμετρία της πρύμνης υπάρχει ανάγκη για πολλά στοιχεία. Μετά από αρκετές δοκιμές, επιλέχθηκε ο μέγιστος δυνατός αριθμός στοιχείων στην περίπτωση μας. Μεγάλο ρόλο στον αριθμό των στοιχείων παίζει και το μέγεθος του χωρίου, καθώς πρέπει να διακριτοποιηθεί και εκείνο. Για τον καθορισμό των διαστάσεων του χωρίου χρησιμοποιούνται ποσοστά ως προς το μήκος του πλοίου (68 m), τα οποία δίνονται στον πίνακα. Προκύπτουν τα παρακάτω στοιχεία κατά περίπτωση:

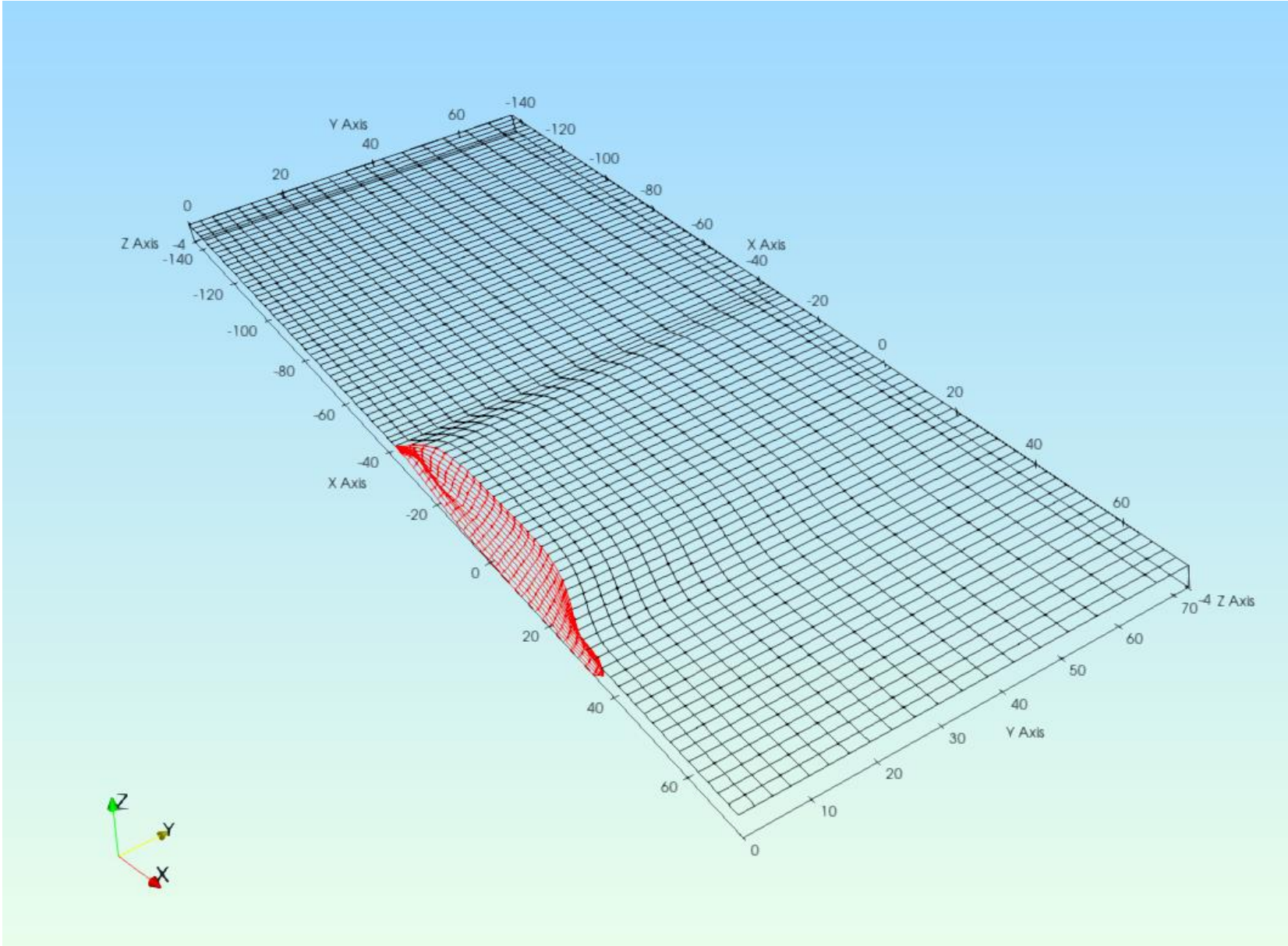
	Parent Ship			NEOPYGOS		
Wave Heading [deg]	180	135	90	180	135	90
No. of Stations	32	30	30	32	30	35
No. of Nodes	13	8	8	13	8	15
FS Distance Fore	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
FS Distance Aft	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
FS Distance Transverse	1	1.2	1.5	1.0	1.2	1
No. of Panels	2436	2303	2567	2436	2303	2864

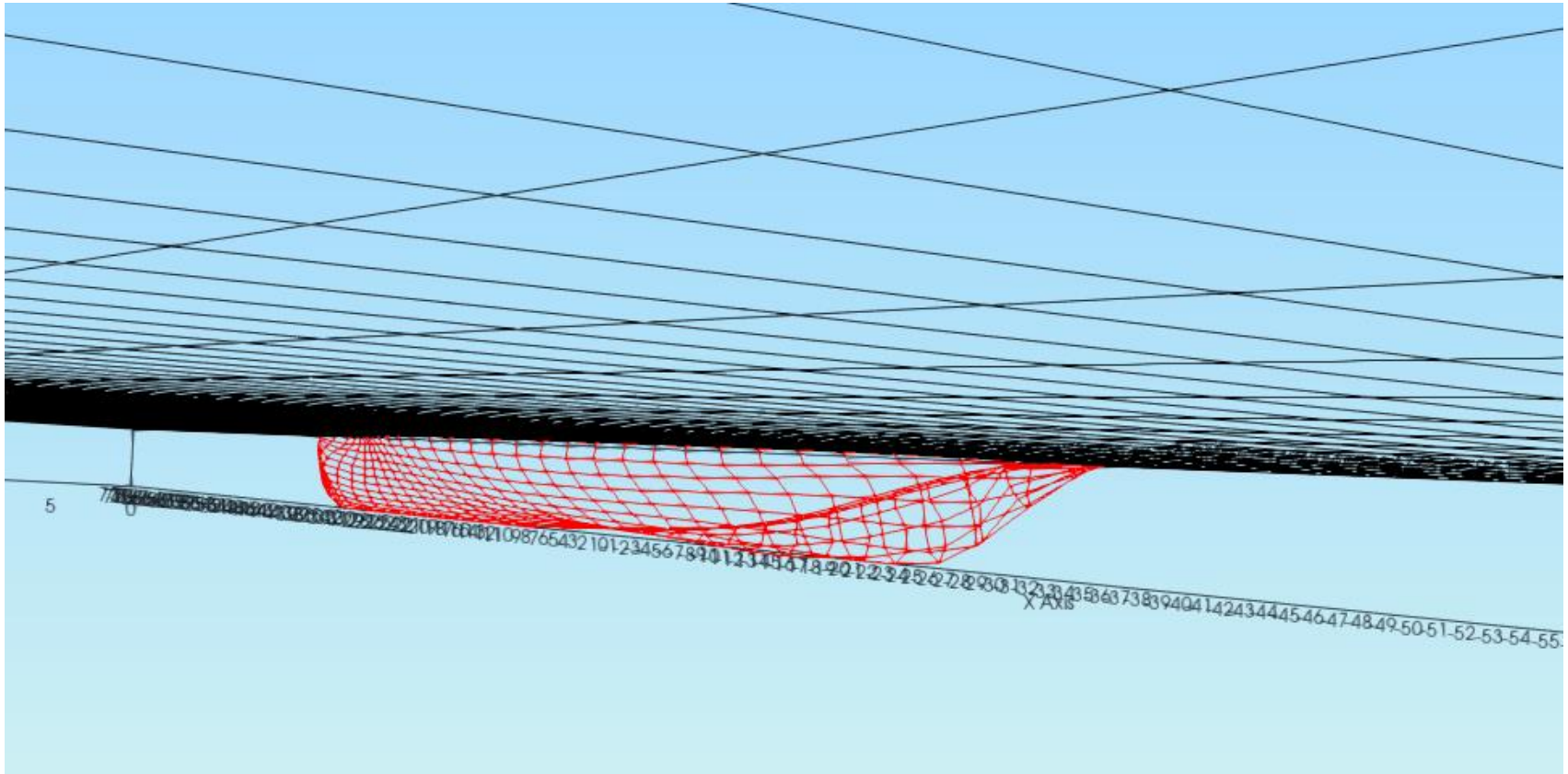
Παρατηρήθηκε κατά την πραγματοποίηση των υπολογισμών, πως το λογισμικό δεν μπορεί να διαχειριστεί καλά την περίπτωση όπου ζητούνταν πάνω από 35 *stations*. Επίσης, αναλόγως την γωνία του προσπίπτοντος κυματισμού, επιλέχθηκε το μέγεθος του χωρίου ανά κατεύθυνση. Όταν το χωρίο ήταν μεγάλο, απαιτούσε μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων, οπότε έπρεπε να μειώσουμε τα στοιχεία της γάστρας.

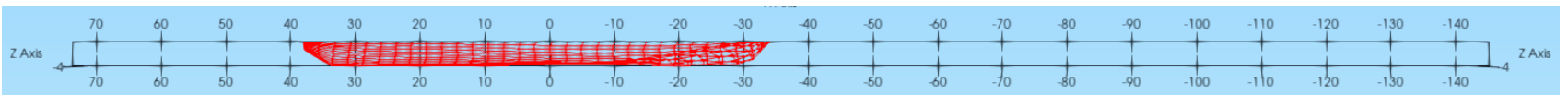
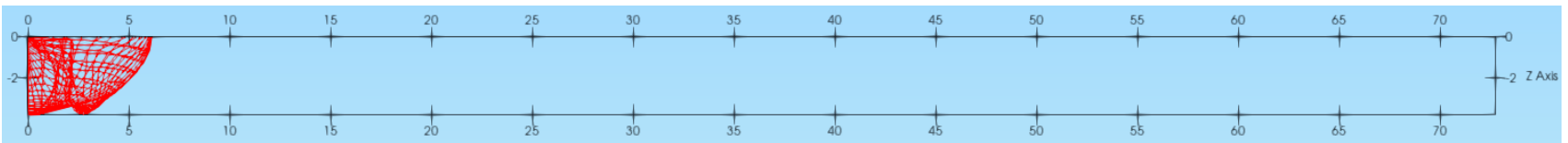
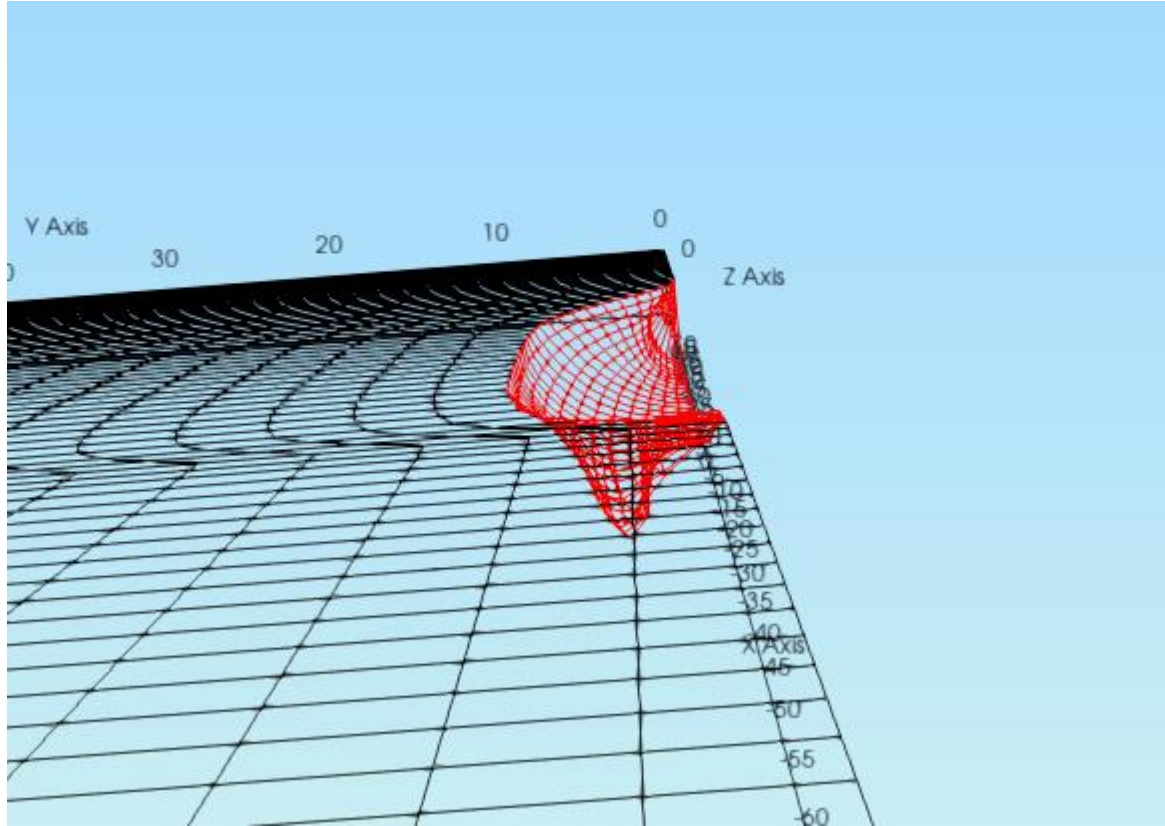
3.2.1 Το Πλέγμα του Πατρικού Πλοίου

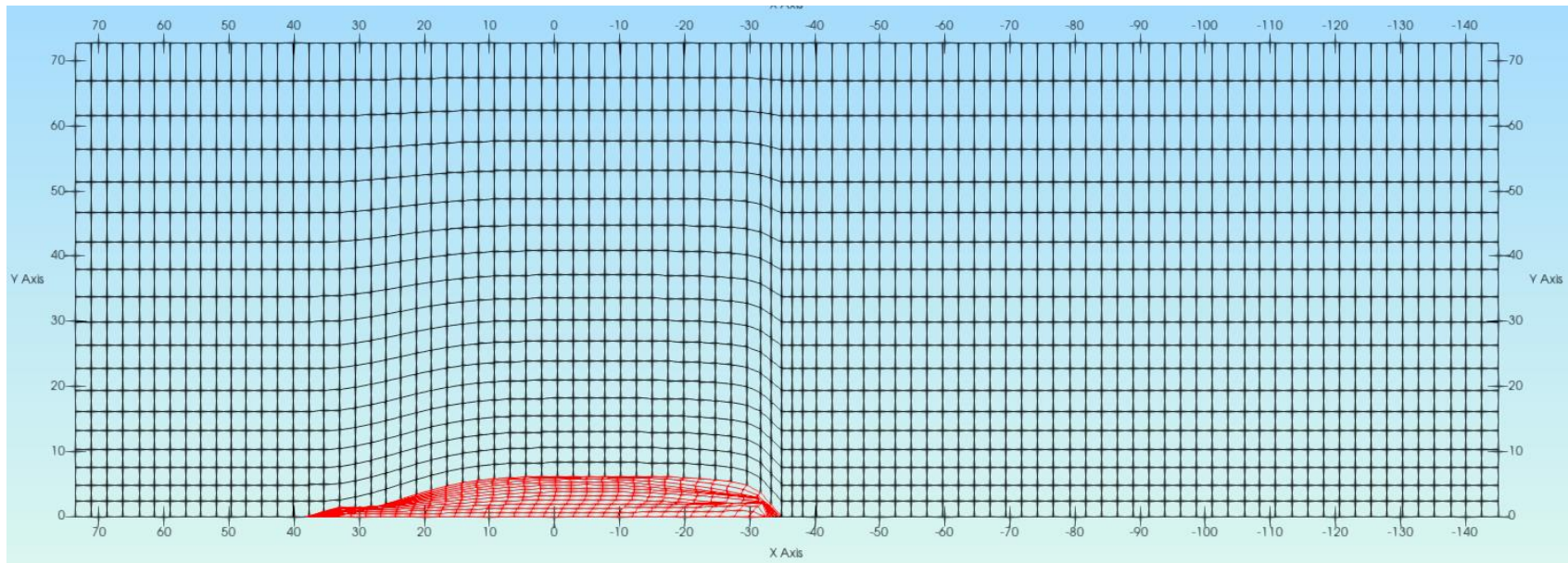
Παρακάτω ακολουθούν εικόνες που παρουσιάζουν το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για το πατρικό πλοίο. Θα πρέπει να σημειωθεί πως καθώς τα χωρία είναι διαφορετικά σε κάθε περίπτωση, όπως εξάλλου αναφέρεται και παραπάνω, το πλέγμα για κάθε γωνία πρόπτωσης αλλάζει. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στο σημείο της γάστρας. Τυπικά παρακάτω θα παρουσιαστεί το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των 180 μοιρών.







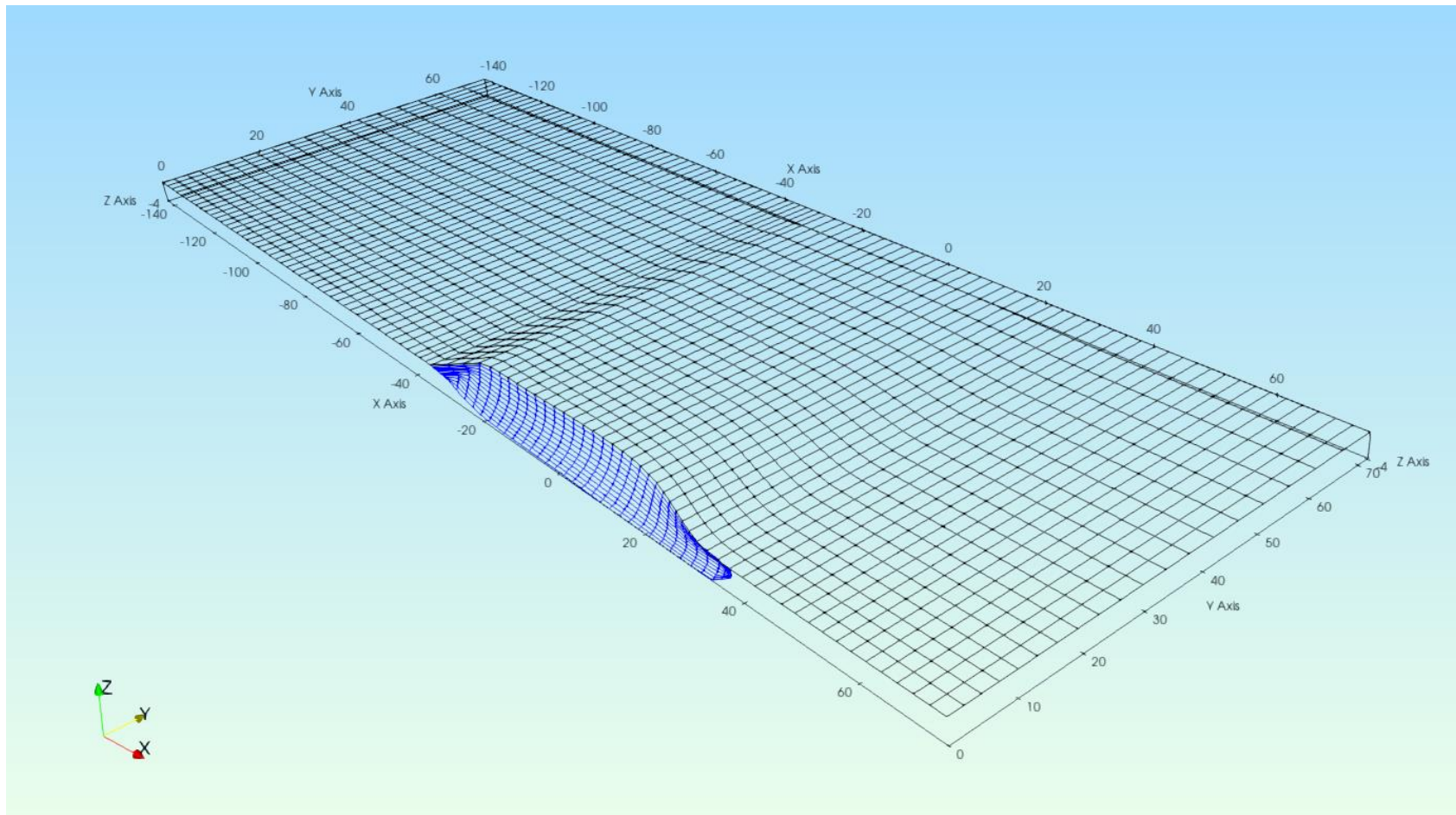


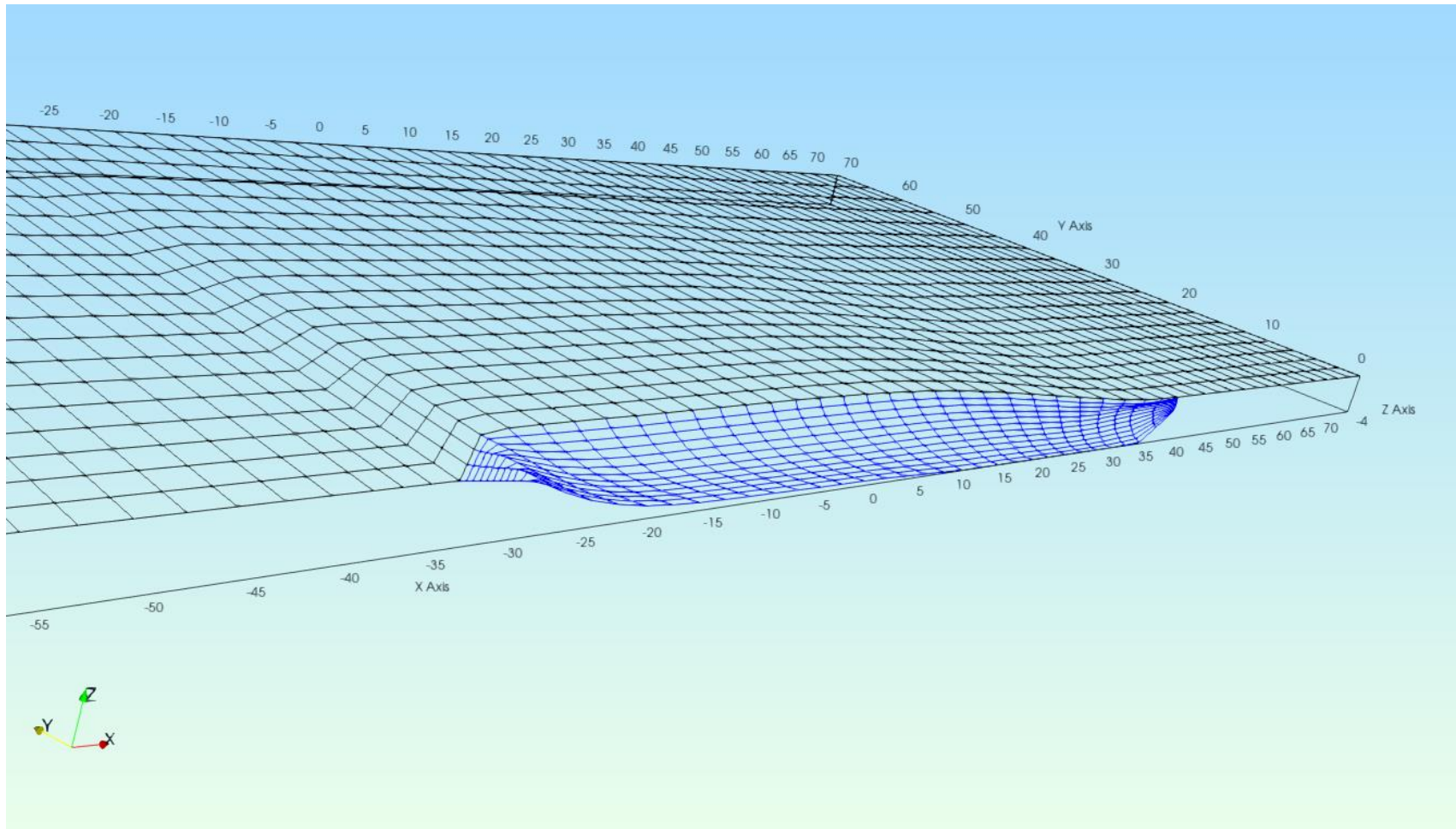


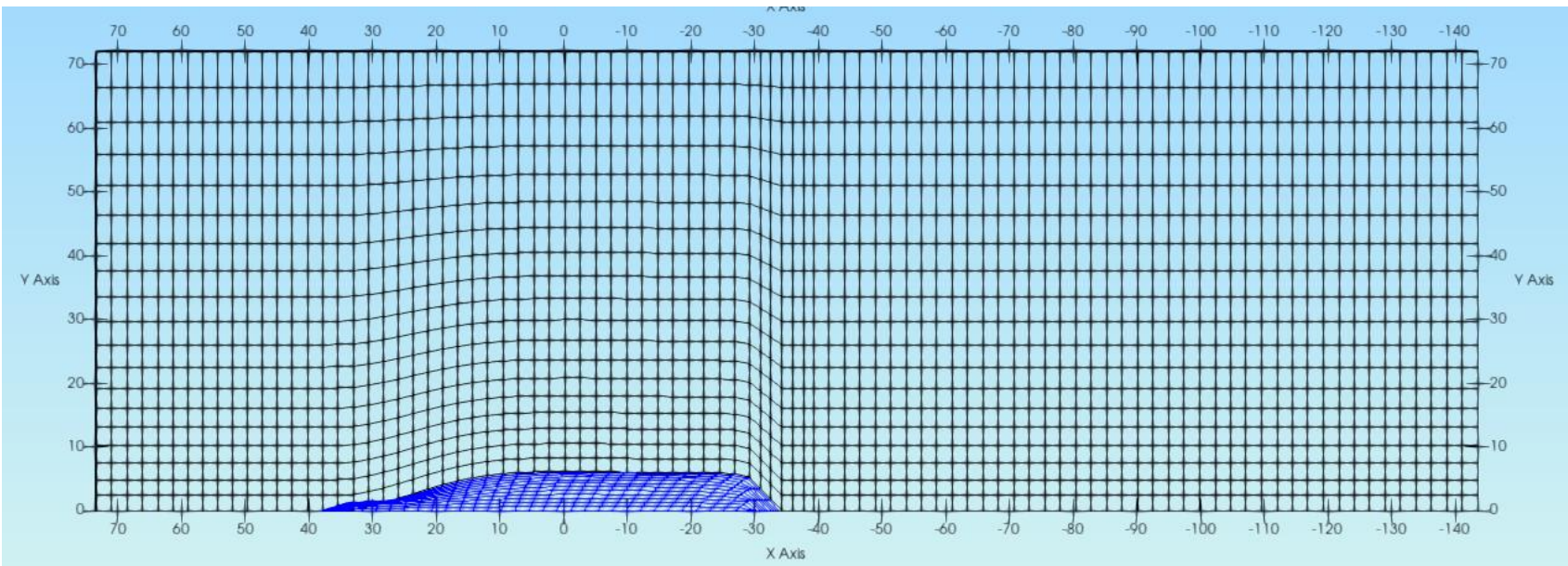
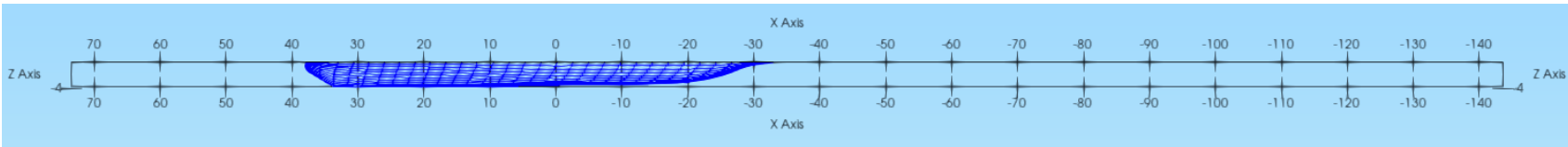
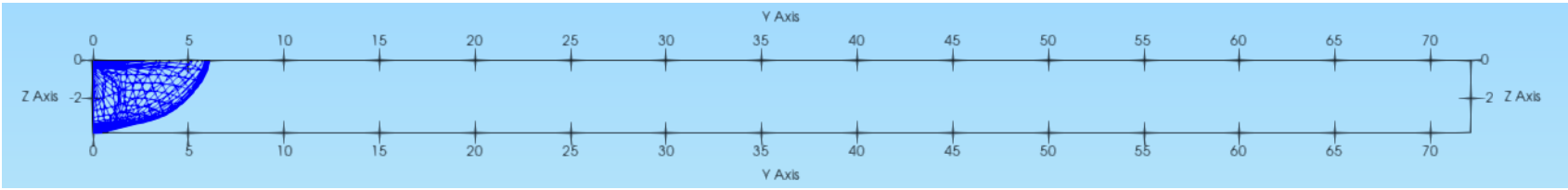
Ομάδα Εικόνων 3.1: Το πλέγμα υπολογισμού για το πατρικό πλοίο, στην γωνία πρόσπτωσης κυματισμού 180 μοιρών

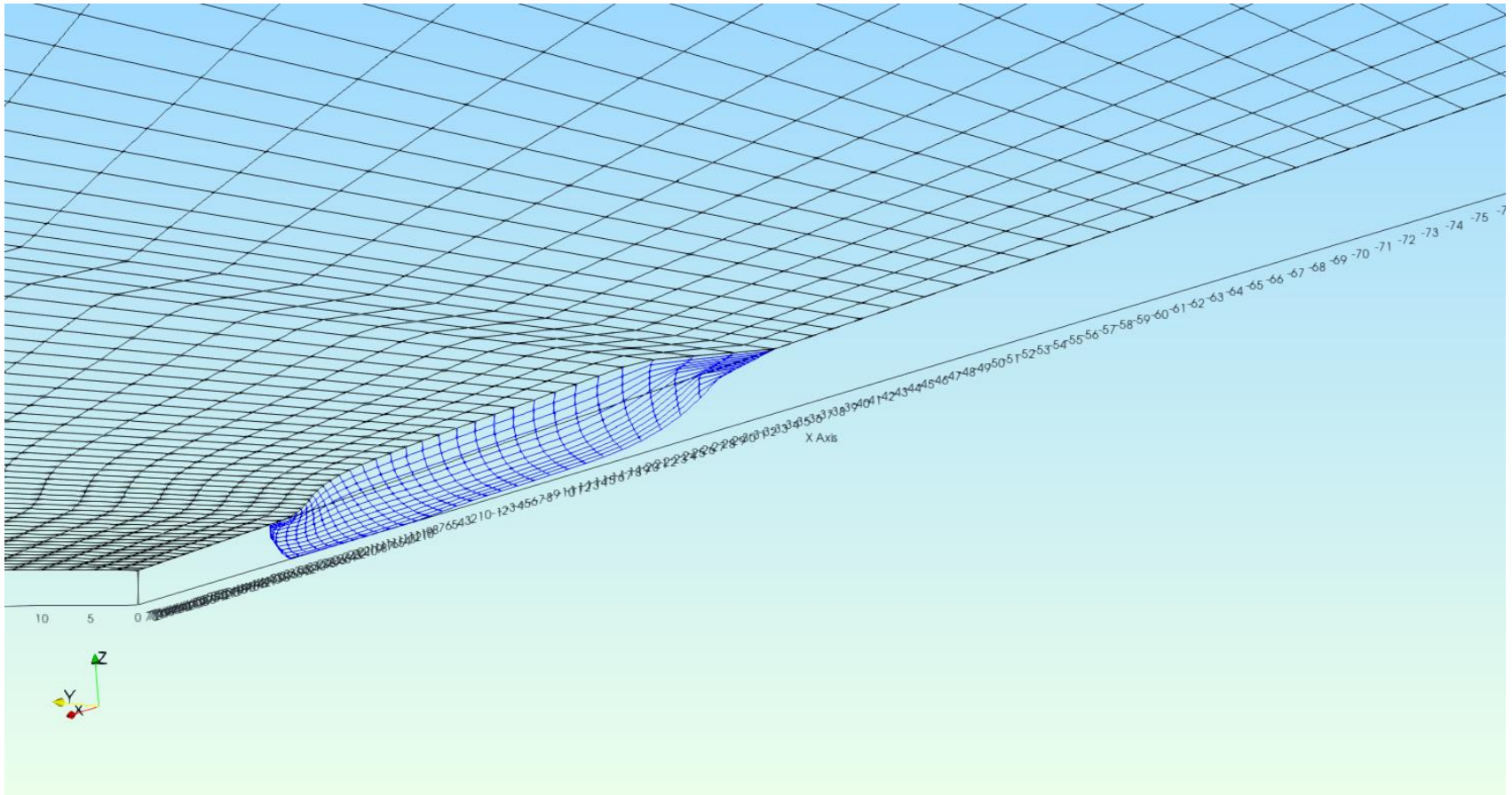
3.2.2 Το Πλέγμα του Πλοίου NEOPYGOS

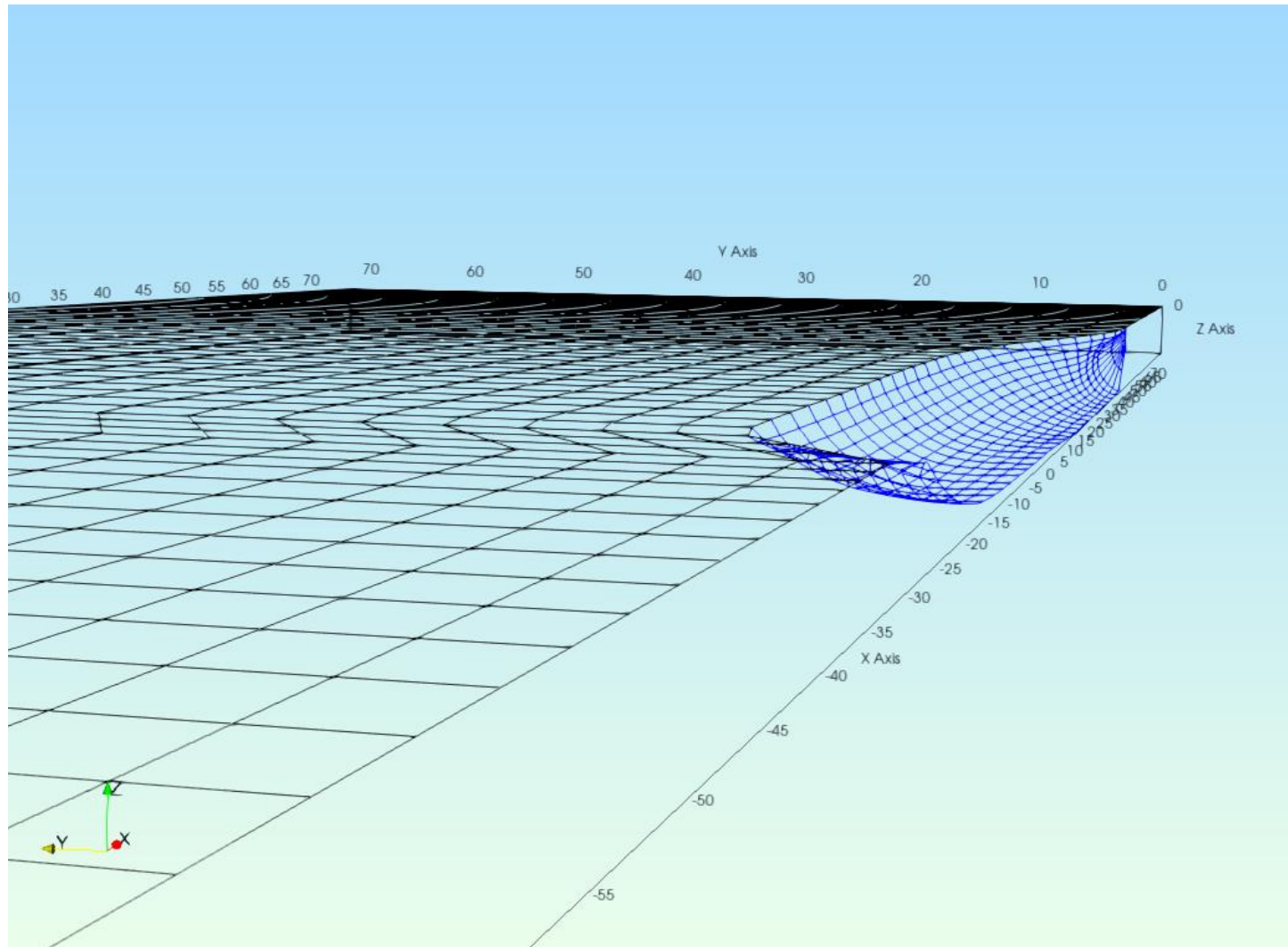
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται το πλέγμα του πλοίου NEOPYGOS που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αποκρίσεων στην γωνία πρόσπτωσης κυματισμού των 180 μοιρών.







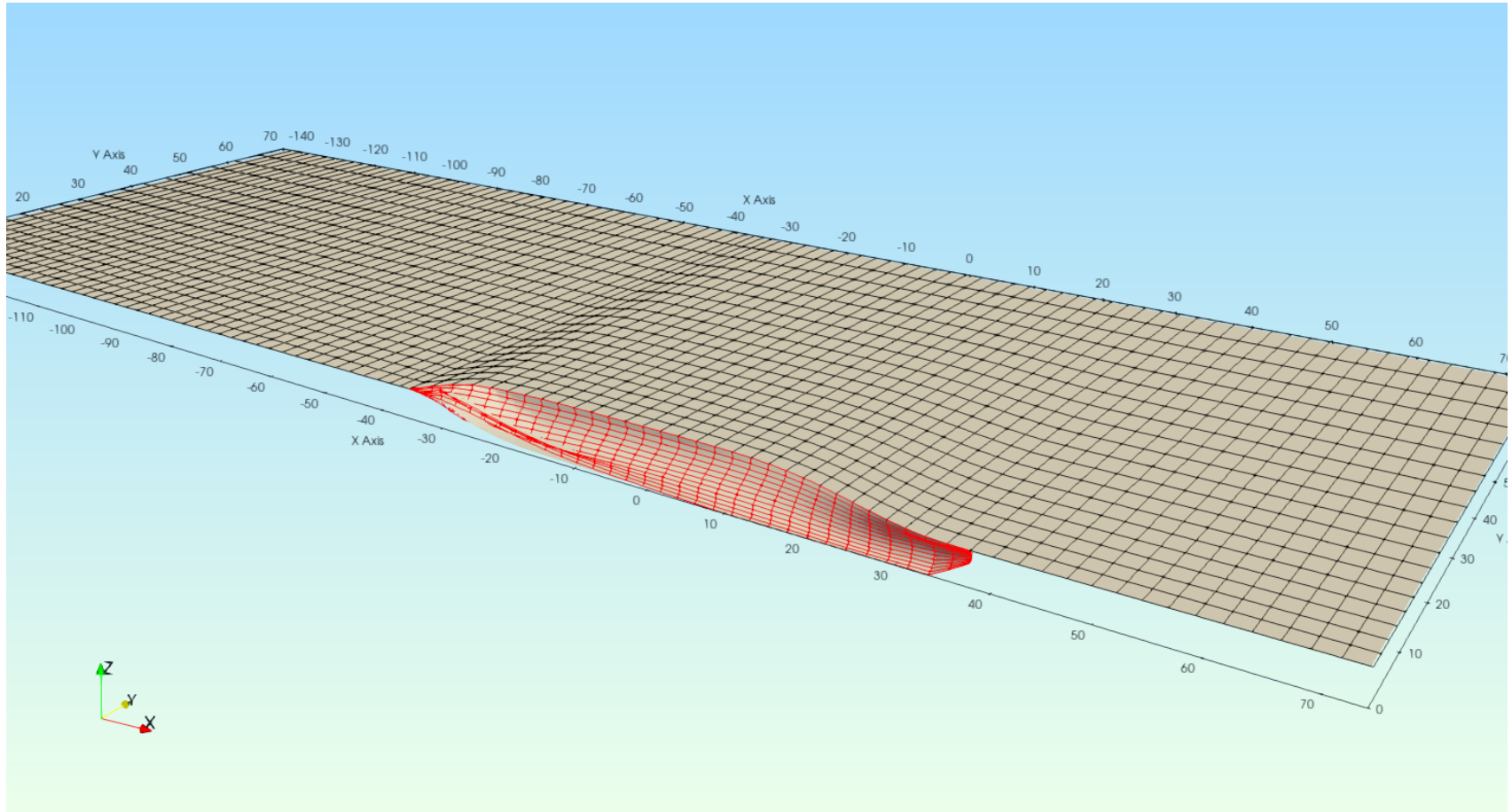


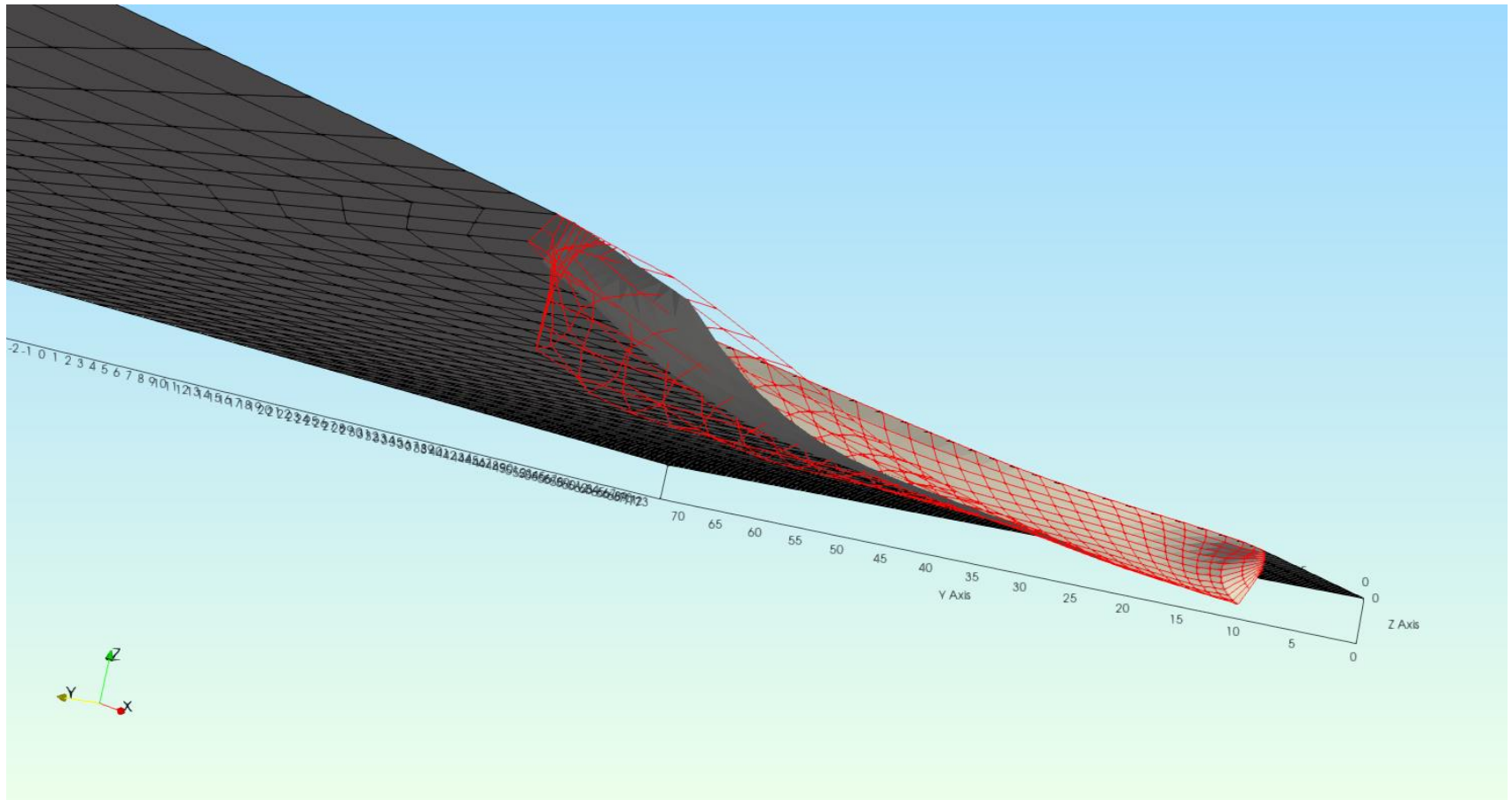


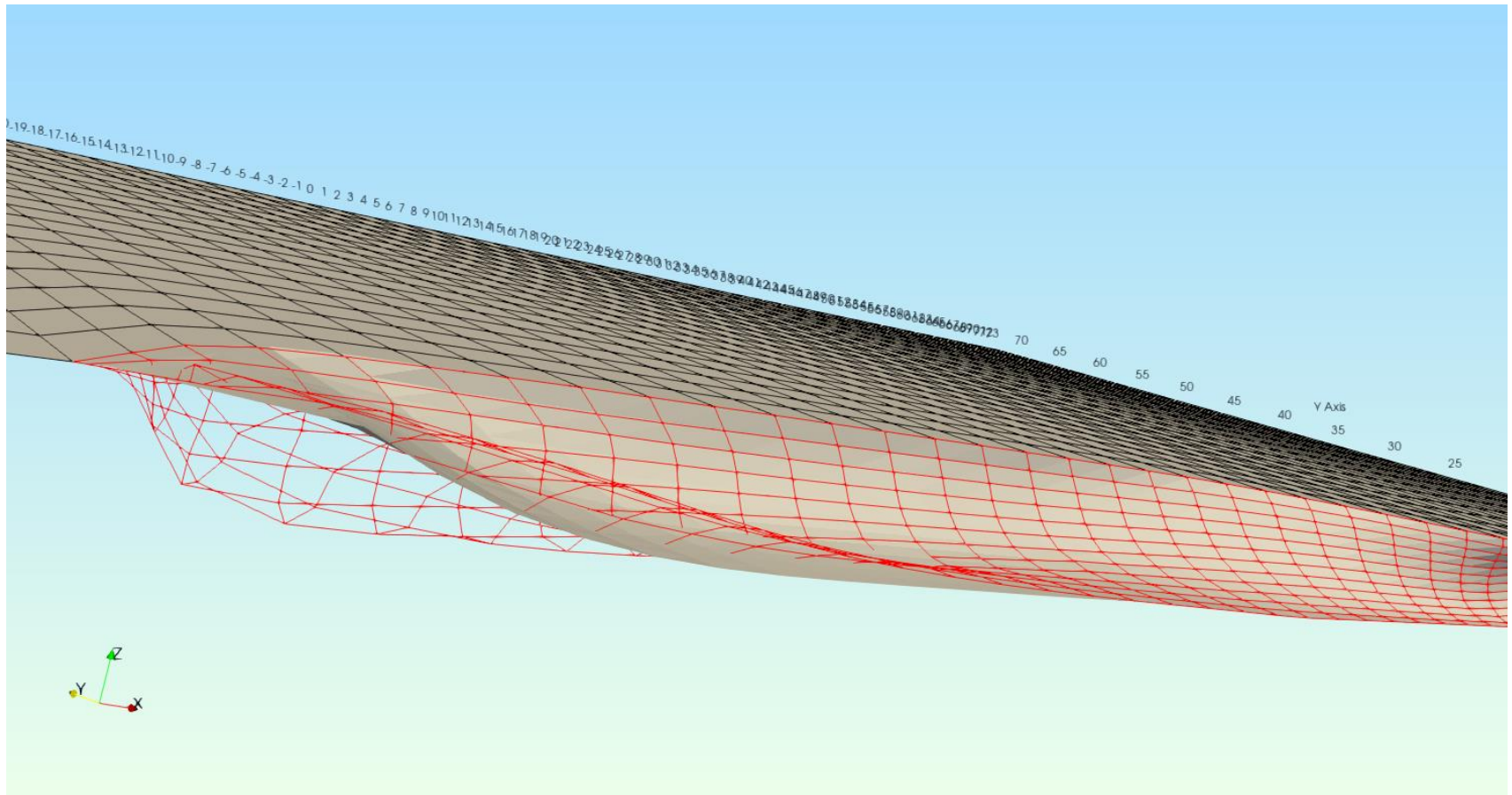
Ομάδα Εικόνων 3.2: Το πλέγμα υπολογισμού για το πλοίο NEOPYGOS, στην γωνία πρόσπτωσης κοματισμού 180 μοιρών

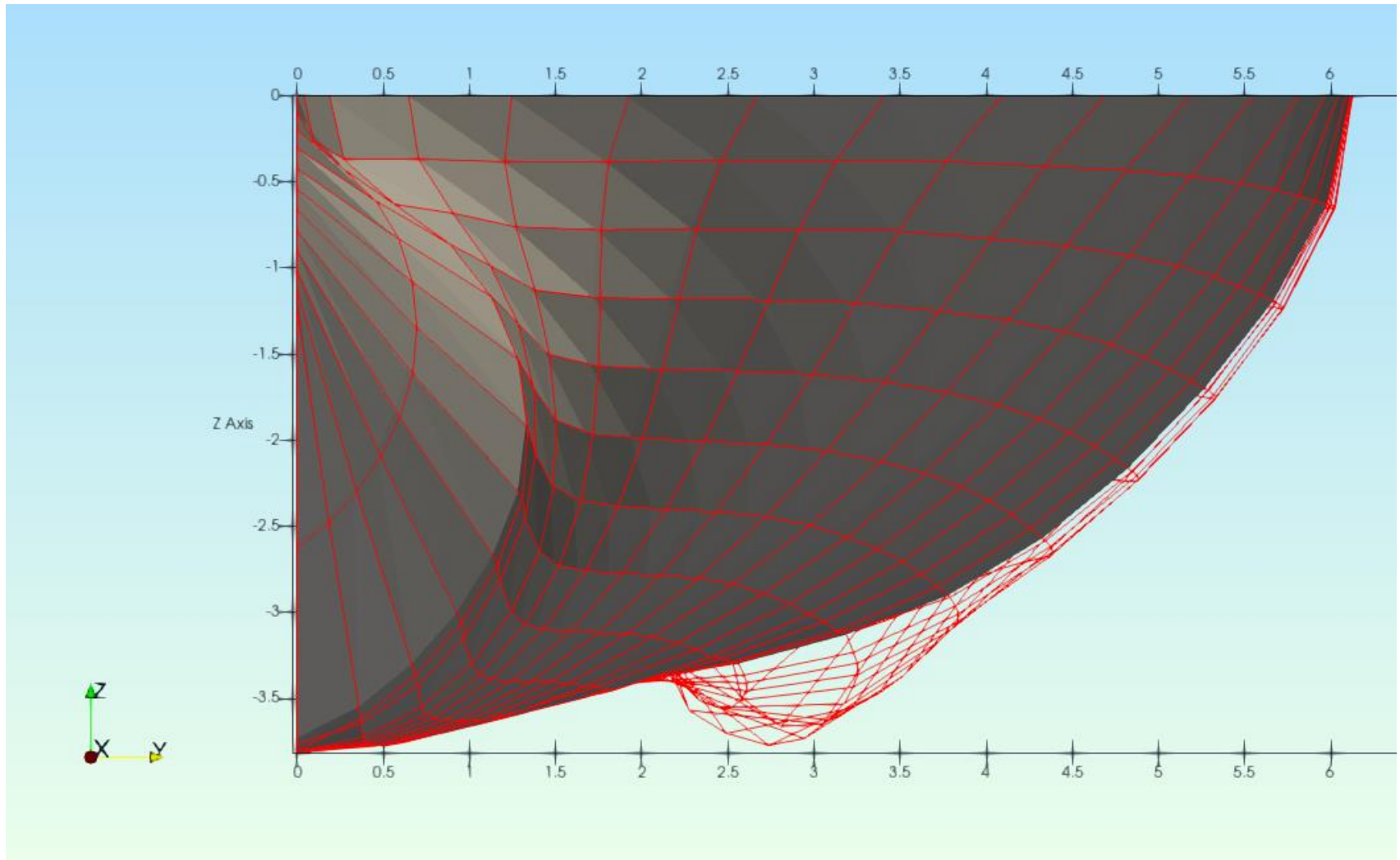
3.2.3 Σύγκριση Γεωμετρίας

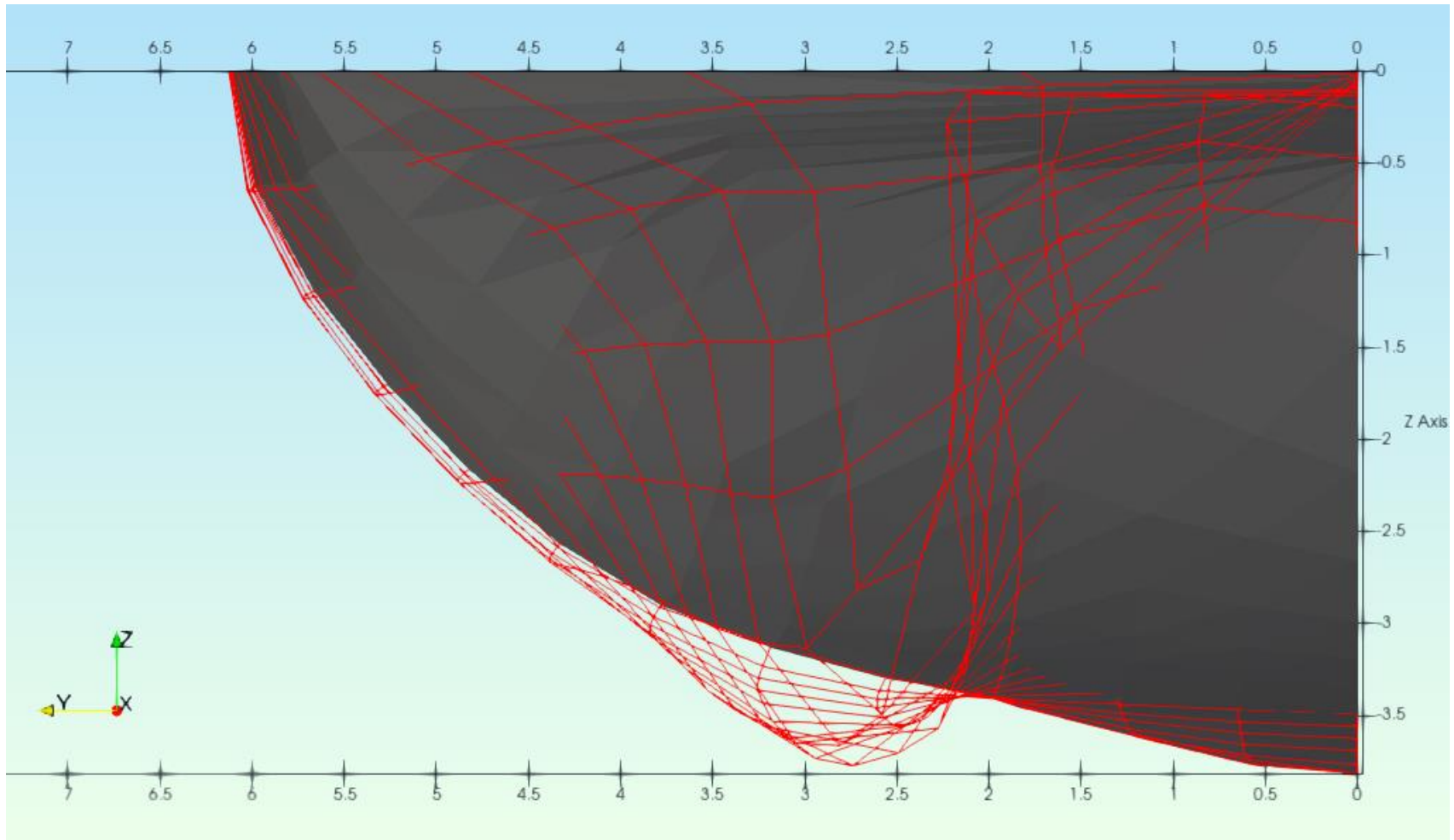
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται και τα δύο πλέγματα, με σκοπό να γίνει σύγκριση της γεωμετρίας τους, και πιο συγκεκριμένα στην μορφή της πρύμνης. Η γάστρα του πατρικού πλοίου παρουσιάζεται με μορφή πλέγματος, ενώ η γάστρα του *NEOPYGOS* παρουσιάζεται σε μορφή επιφάνειας.

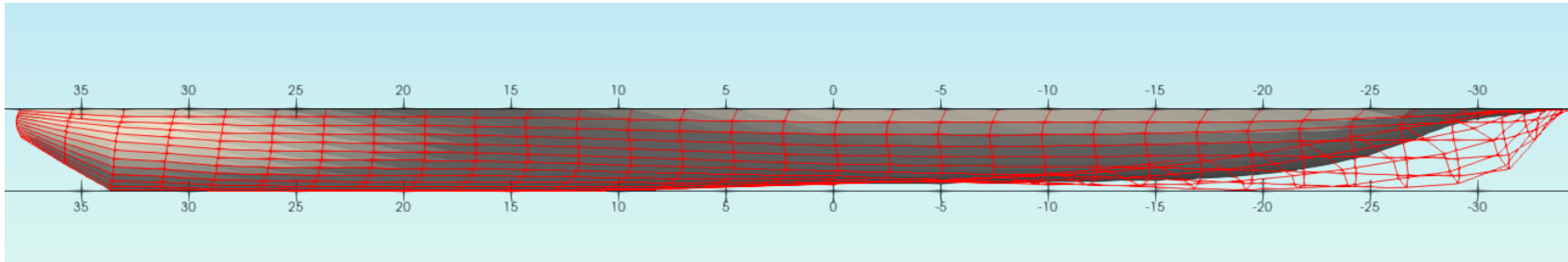












Ομάδα Εικόνων 3.3: Παρουσίαση της διαφοράς της γεωμετρίας της πρύμνης μεταξύ των δύο πλοίων κάνοντας χρήση του πλέγματος τους

Από τις παραπάνω εικόνες είναι πολύ εύκολο να παρατηρήσει κανείς την διαφορά στην μορφή της πρύμνης, καθώς επίσης και το ότι διατηρήθηκε το ίδιο μήκος ισάλου.

3.3 Περίοδοι Υπολογισμού

Υπήρξαν τρεις φάσεις υπολογισμών για κάθε γωνία πρόσπτωσης κυματισμού. Στην πρώτη φάση, για όλες τις επί μέρους περιπτώσεις υπολογίσθηκαν οι περίοδοι κυματισμού από 2 έως 30 sec, με 1 sec βήμα στο πεδίο από 2 έως 12 sec, 2 sec βήμα στο πεδίο από 12 έως 20 sec και 5 sec βήμα στο πεδίο από 20 έως 30 sec. Εν ολίγης, οι τιμές που υπολογίσθηκαν ήταν:

2 sec	3 sec	4 sec	5 sec	6 sec	7 sec	8 sec	9 sec	10 sec
11 sec	12 sec	14 sec	16 sec	18 sec	20 sec	25 sec	30 sec	

Στις επόμενες φάσεις υπολογισμού, παρατηρήθηκε που υπάρχουν κορυφές και σε εκείνο το σημείο υπολογίσθηκαν και ενδιάμεσες τιμές. Τα επί μέρους αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στα παρακάτω κεφάλαια. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί πως το ανώτατο όριο πλήθους περιόδων είναι οι 20 τιμές.

3.4 Χρόνος Προσομοίωσης

Καθώς το λογισμικό πραγματοποιεί υπολογισμούς σε *time domain*, θα πρέπει να δοθεί από τον χρήστη ο χρόνος προσομοίωσης (*simulation time*) καθώς και η χρονική διακριτοποίηση που επιθυμείται. Κατά κανόνα, όσο μεγαλύτερος ο χρόνος προσομοίωσης και όσο μικρότερο το χρονικό βήμα (*time step*) τόσο πιο ακριβή τα αποτελέσματα που λαμβάνονται. Το πρόγραμμα διαθέτει κάποιες *default* τιμές, αλλά δεν χρησιμοποιήθηκαν καθώς θεωρήθηκαν ακατάλληλες. Γενικότερα, το πλέγμα που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και ο αριθμός των χρονικών βημάτων εν τέλει καθορίζουν τον χρόνο που θα χρειαστεί ο υπολογισμός για να πραγματοποιηθεί. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές κατά περίπτωση:

	Parent Ship			NEOPYGOS		
Wave Heading [deg]	180	135	90	180	135	90
Simulation Time [sec]	3000	2000	3000	3000	2000	5000
Time Step [sec]	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02
No. Of Steps	150 x10 ³	40 x10 ³	60 x10 ³	150 x10 ³	40 x10 ³	250 x10 ³

3.5 Μη Ομαλά Αποτελέσματα

Ορισμένα εκ των αποτελεσμάτων που λήφθηκαν κρίθηκαν πως δεν ήταν ομαλά. Συχνά προέκυπταν απειρισμοί ή διακυμάνσεις στις καμπύλες των αποκρίσεων οι οποίες δεν θα έπρεπε να υπάρχουν. Αυτό συνήθως οφείλεται σε υπολογιστικά λάθη του κώδικα ή σε περιπτώσεις που ξεπερνούν το πεδίο λειτουργίας του. Οι τιμές των αποκρίσεων, όπως υπολογίστηκαν από τον κώδικα, παρουσιάζονται στο τέταρτο παράρτημα της εργασίας.

Γενικότερα, τα αποτελέσματα τα οποία θεωρούνται αξιόπιστα και θα παρουσιαστούν, είναι για τιμές λ/L έως 5.878, που αντιστοιχεί σε μέγιστη περίοδο κυματισμού 16 sec και ελάχιστη γωνιακή συχνότητα 0.39 rad/s. Εξάιρεση αποτελούν οι καμπύλες του *Roll*, για τις οποίες παρουσιάζονται όλες οι τιμές που υπολογίστηκαν.

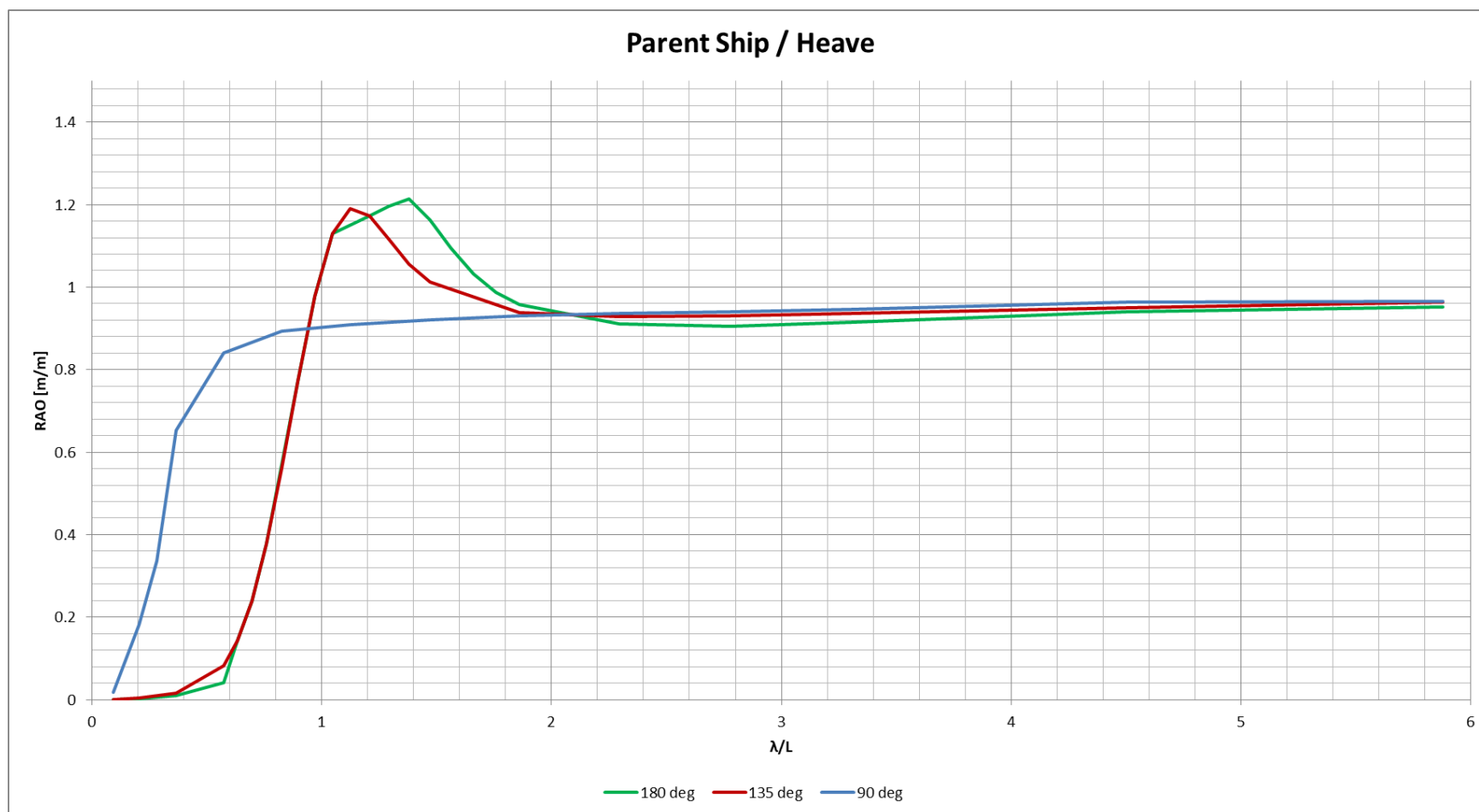
4. Αποτελέσματα των RAOs

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν σχετικά με τις αποκρίσεις των πλοίων σε αρμονικούς κυματισμούς. Στο τέταρτο παράρτημα μπορεί επίσης κάποιος να βρει αναλυτικά σε μορφή γραφημάτων, τα αποτελέσματα μαζί με τις τιμές που δεν λήφθηκαν υπ' όψιν.

Σε κάθε γράφημα παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες των RAOs, όπου χρησιμοποιείται διαφορετικό χρώμα για κάθε γωνία συνάντησης (*encounter angle*). Με πράσινο χρώμα συμβολίζεται η γωνία των 180 μοιρών (μετωπικοί κυματισμοί), με κόκκινο των 135 μοιρών και με μπλε των 90 μοιρών. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί πως ο λόγος λ/L έχει υπολογιστεί ως προς την αρχική συχνότητα του αρμονικού κυματισμού, και όχι ως προς την συχνότητα συνάντησης. Για τις τιμές του *Roll*, δεν παρουσιάζονται σε μορφή γραφήματος οι τιμές για την γωνία πρόσπτωσης των 180 μοιρών, καθώς ήταν όλες μηδενικές.

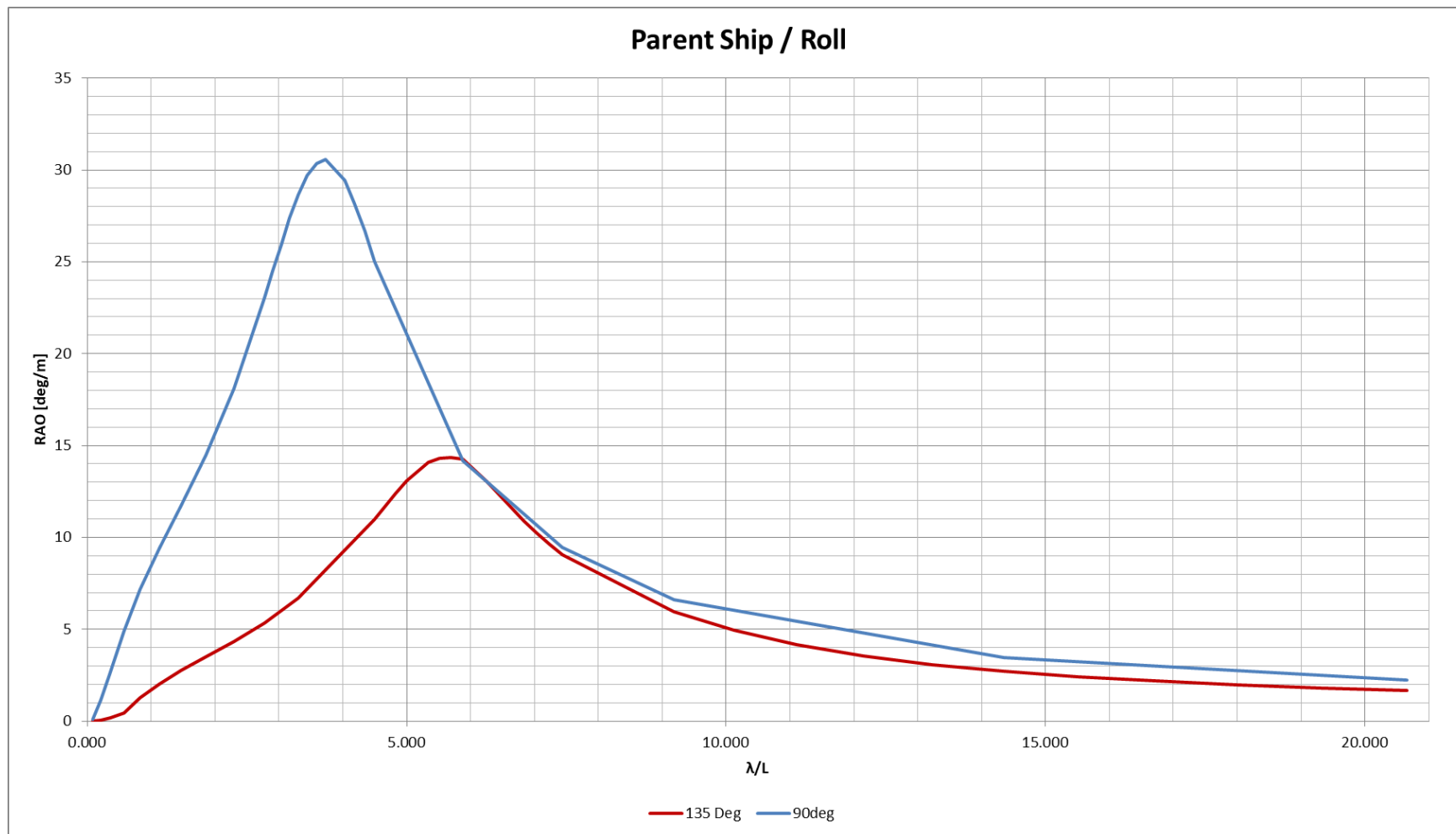
4.1 Πατρικό Πλοίο

4.1.1 Heave RAOs



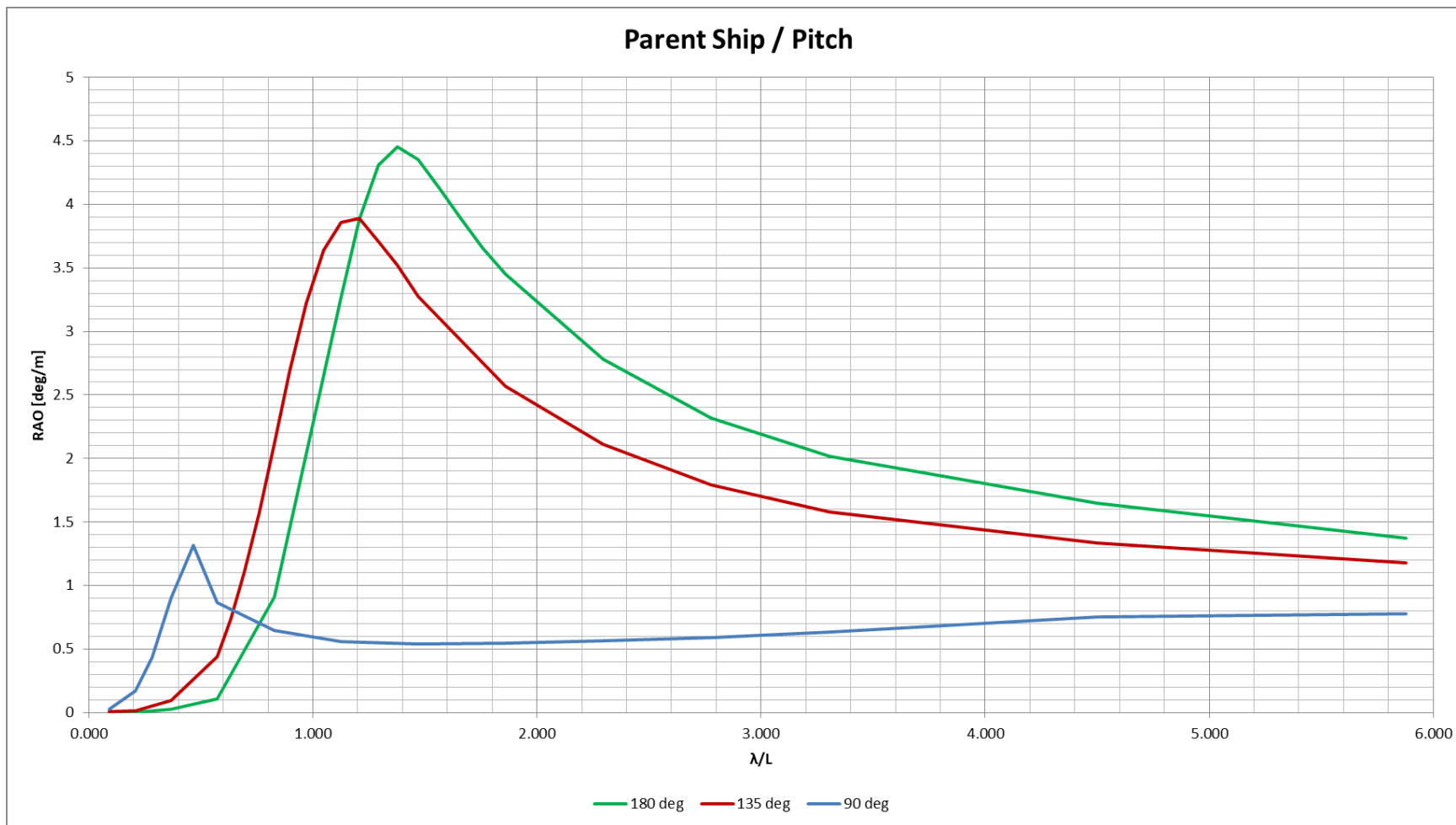
Γράφημα 4.1: Heave RAOs για το Parent Ship, για τις γωνίες συνάντησης των 180, 135 και 90 μοιρών

4.1.2 Roll RAOs



Γράφημα 4.2: Roll RAOs για το Parent Ship, για τις γωνίες συνάντησης των 135 και 90 μοιρών

4.1.3 Pitch RAOs



Γράφημα 4.3: Pitch RAOs για το Parent Ship, για τις γωνίες συνάντησης των 180, 135 και 90 μοιρών

4.1.4 Περιγραφή Αποτελεσμάτων

Στο Γράφημα 4.1: Heave RAOs για το Parent Ship, για τις γωνίες συνάντησης των 180, 135 και 90 μοιρών όπου παρουσιάζεται το *Heave*, η πρώτη παρατήρηση που μπορεί εύκολα να κάνει κάποιος είναι πως ενώ για τις γωνίες πρόσπτωσης των 180 και των 135 μοιρών οι καμπύλες είναι όμοιες, αυτή των 90 μοιρών είναι πολύ διαφορετική. Όχι μόνο λαμβάνουμε γενικότερα μικρότερες τιμές, αλλά σε αντίθεση με τις άλλες δύο, δεν παρουσιάζει μέγιστο (ιδιοσυχνότητα) μέσα στο πλαίσιο των συχνοτήτων που μελετήθηκαν.

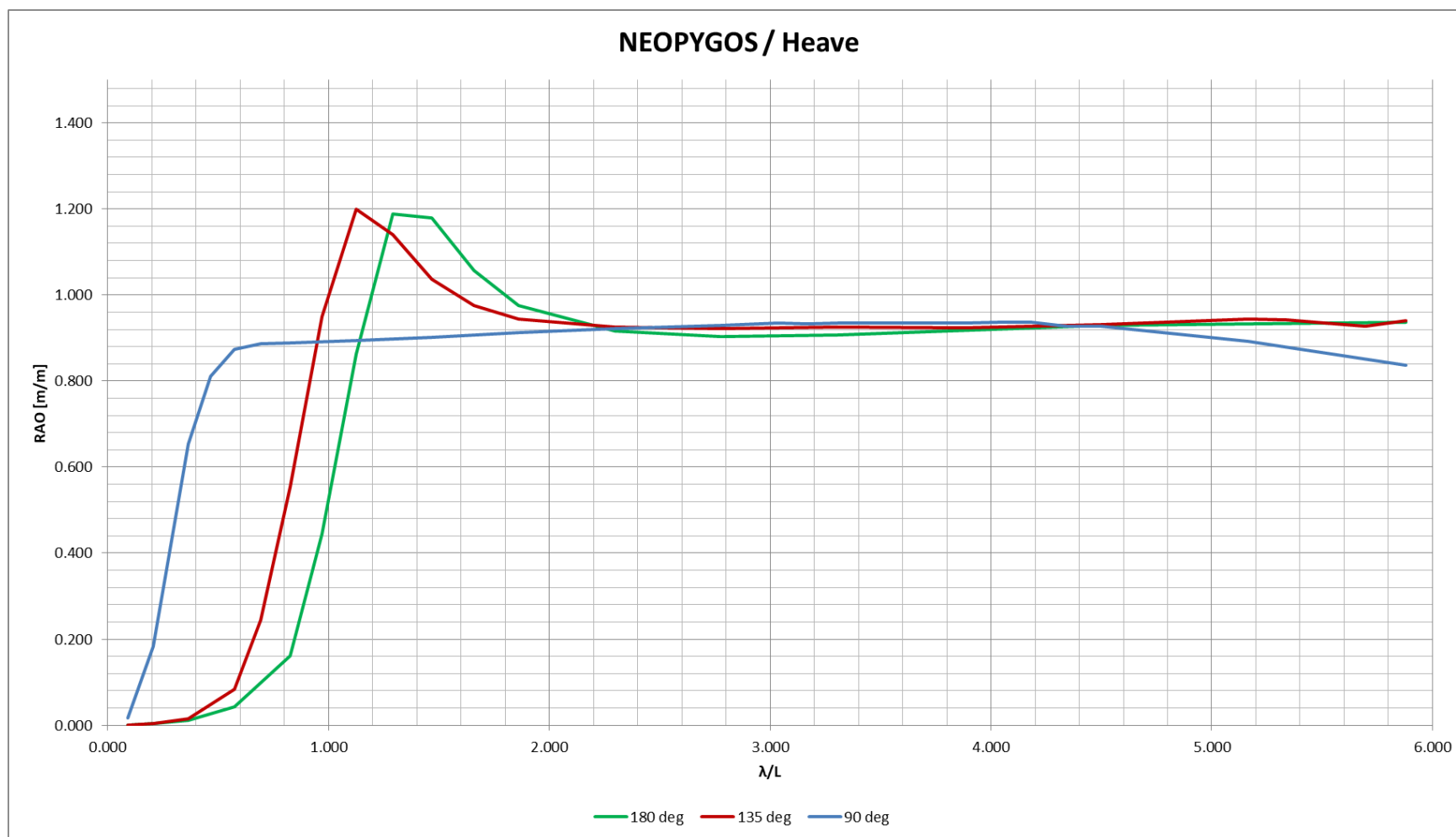
Οι καμπύλες του *Roll*, οι οποίες παρουσιάζονται στο Γράφημα , παρουσιάζουν τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς έχουμε μεγαλύτερες τιμές για την γωνία των 90 μοιρών. Παρατηρούμε δε πως η ιδιοσυχνότητα των 135 μοιρών βρίσκεται σε μεγαλύτερο λόγο λ/L σε σχέση με αυτή των 90 μοιρών, αλλά έχει μικρότερη τιμή απόκρισης.

Σχετικά με το *pitch*, του οποίου οι τιμές παρουσιάζονται στο Γράφημα , παρατηρούμε πως η μορφή των αποτελεσμάτων είναι παρόμοια με αυτή των *heave*, δηλαδή οι τιμές των 135 μοιρών είναι περισσότερο κοντά σε αυτές των 180 μοιρών, απ' ότι των 90. Αντιθέτως όμως με την προαναφερθείσα περίπτωση, σε αυτό το γράφημα είναι εμφανή η θέση που κατέχουν οι 135 μοίρες ανάμεσα στις 180 και στις 90, όντας ενδιάμεσή τους, όπως επίσης και αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως παρουσιάζεται κορυφή στην γωνία συνάντησης των 90 μοιρών.

Ένα γεγονός που παρατηρείται επίσης στις τιμές του *Heave* και του *Pitch*, είναι πως η θέσεις των κορυφών είναι αντιστρόφως ανάλογες με την γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού, όπου για τις 90 μοίρες έχουμε την μικρότερη τιμή λ/L ενώ για τις 180 μοίρες την μεγαλύτερη.

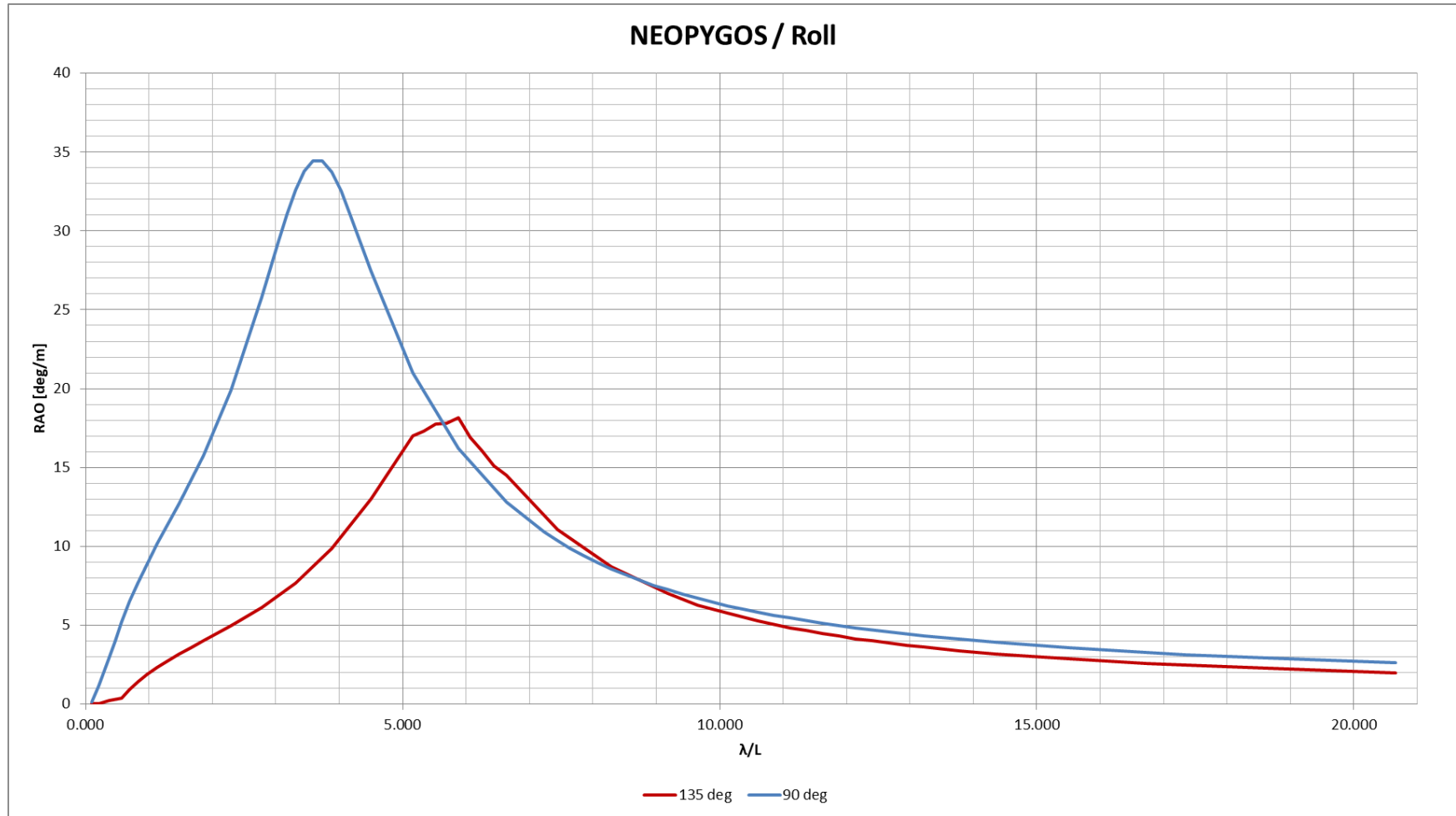
4.2 NEOPYGOS

4.2.1 Heave RAOs



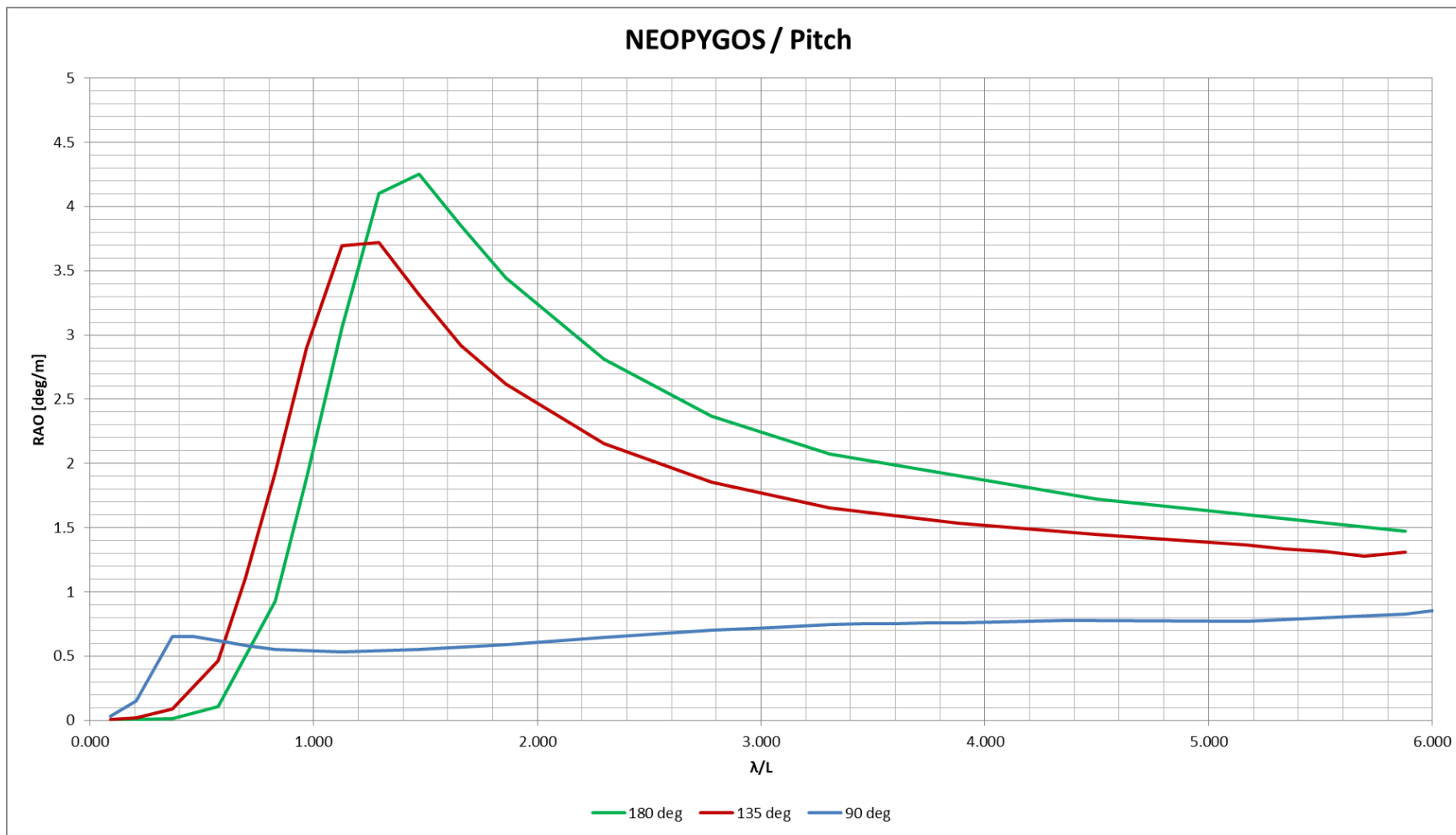
Γράφημα 4.4: Heave RAOs για το πλοίο NEOPYGOS, για τις γωνίες συνάντησης των 180, 135 και 90 μοιρών

4.2.2 Roll RAOs



Γράφημα 4.5: Roll RAOs για το πλοίο NEOPYGOS, για τις γωνίες συνάντησης των 135 και 90 μοιρών

4.2.3 Pitch RAOs



Γράφημα 4.6: Pitch RAOs για το πλοίο NEOPYGOS, για τις γωνίες συνάντησης των 180, 135 και 90 μοιρών

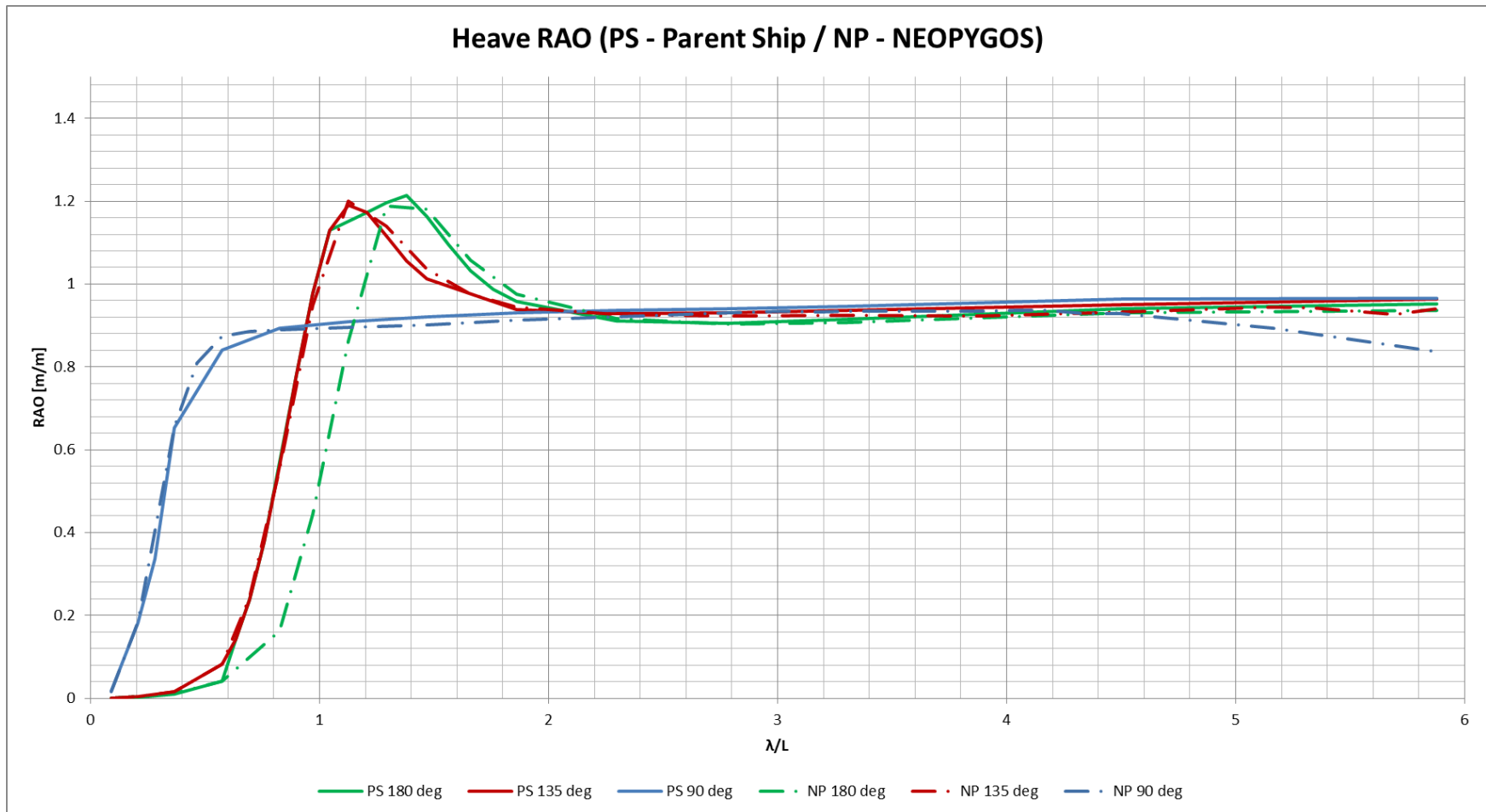
4.2.4 Περιγραφή Αποτελεσμάτων

Σε γενικές γραμμές, οι παρατηρήσεις επί των παραπάνω γραφημάτων είναι οι ίδιες με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς η μορφές των καμπυλών είναι όμοιες. Η μόνη εμφανή διαφορά μεταξύ των δυο περιπτώσεων είναι στις καμπύλες του *heave*, όπου πλέον είναι πιο διακριτή η διαφορά μεταξύ των 180 και 135 μοιρών.

Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί από το Γράφημα , όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το *Pitch*, πως για την γωνία των 90 μοιρών, η κορυφή στην ιδιοσυχνότητα είναι πιο διακριτική, σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του πατρικού πλοίου.

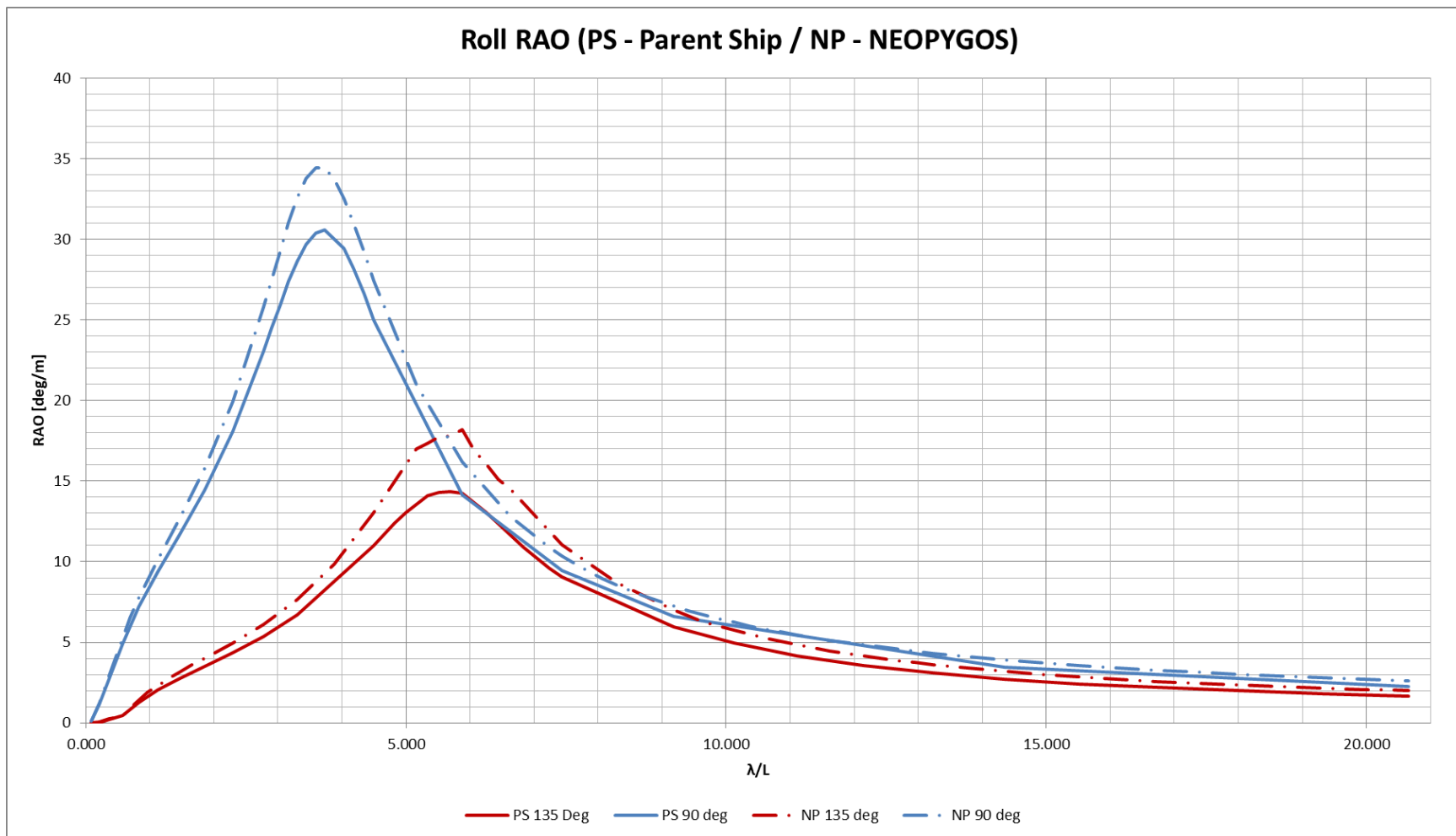
4.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

4.3.1 Heave RAOs



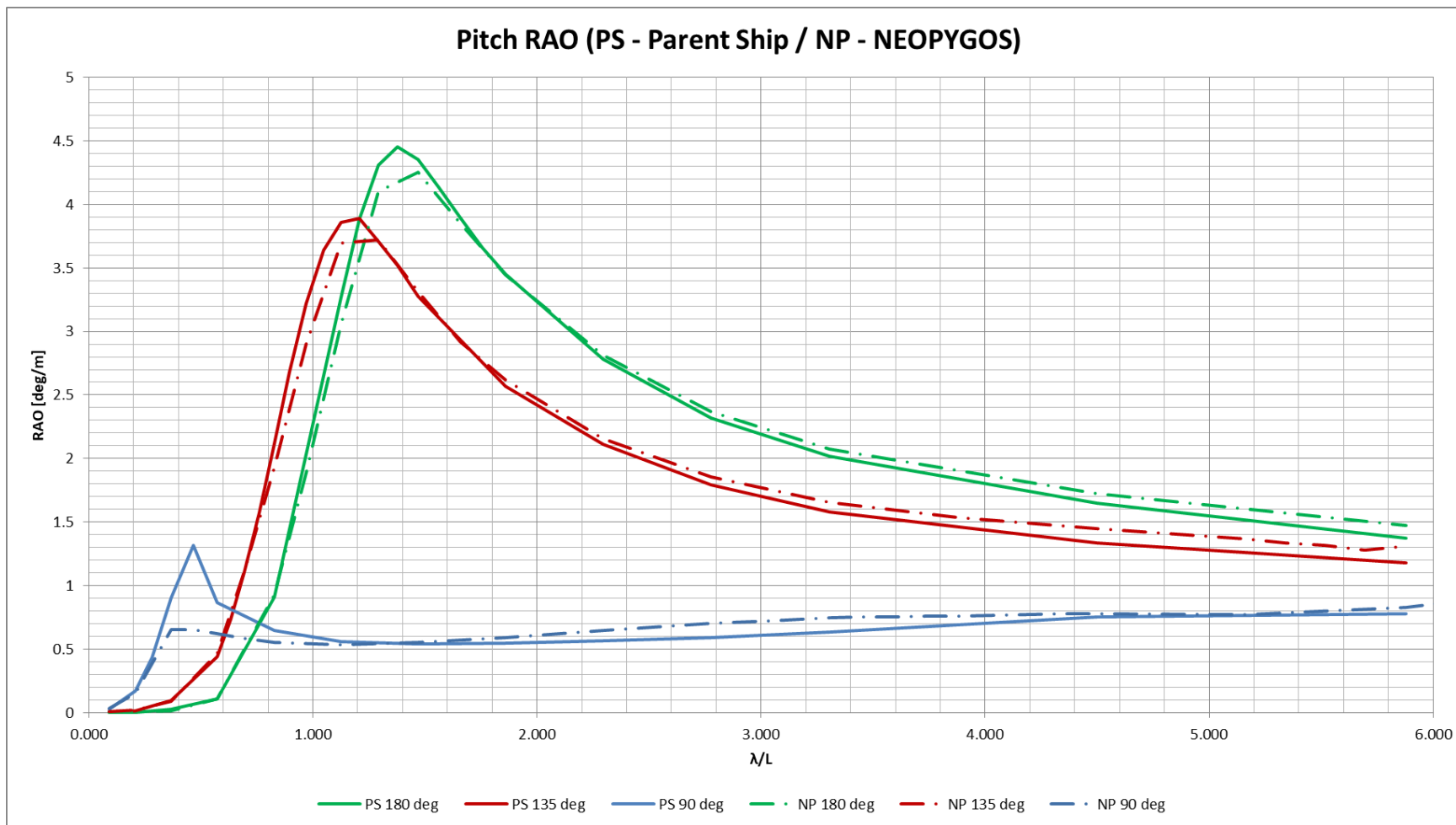
Γράφημα 4.7: Σύγκριση των αποκρίσεων Heave των δύο πλοίων, για τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 180, 135 και 90 μοιρών

4.3.2 Roll RAOs



Γράφημα 4.8: Σύγκριση των αποκρίσεων Roll των δύο πλοίων, για τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 135 και 90 μοιρών

4.3.3 Pitch RAOs



Γράφημα 4.9: Σύγκριση των αποκρίσεων Pitch των δύο πλοίων, για τις γωνίες πρόσπτωσης κυματισμού 180, 135 και 90 μοιρών

4.3.4 Περιγραφή Αποτελεσμάτων

Στην περίπτωση του *Heave*, όπου παρουσιάζεται στο Γράφημα , παρατηρούμε πως οι τιμές είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους, συμπεριλαμβανομένου των μεγίστων τους και των θέσεών τους. Εξάιρεση αποτελούν οι καμπύλες των 135 μοιρών, όπου παρατηρείται μία εμφανή διαφορά για τις τιμές ανάμεσα στους λόγους λ/L από 0.4 έως 1.2.

Για την περίπτωση του *Roll*, όπου παρουσιάζεται στο Γράφημα , παρατηρούμε πως οι καμπύλες έχουν όμοια μορφή, παρόλα αυτά το πλοίο *NEOPYGOS* παρουσιάζει εμφανώς μεγαλύτερες αποκρίσεις. Και σε αυτή την περίπτωση, τα μέγιστα των καμπυλών βρίσκονται στις ίδιες θέσεις λ/L .

Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνουμε και για το *Pitch*. Ενώ και σε αυτή την περίπτωση βλέπουμε πως οι καμπύλες είναι όμοιες, και παρουσιάζουν τα μέγιστά τους στις ίδιες θέσεις λ/L , στις μεγάλες συχνότητες (μικρός λόγος λ/L) το πλοίο *NEOPYGOS* εμφανίζει μικρότερες αποκρίσεις σε σχέση με το πατρικό πλοίο. Αυτή η διαφορά είναι ακόμα πιο εμφανή για την γωνία πρόσπτωσης των 90 μοιρών.

5. Συμπεριφορά των Πλοίων σε Πραγματικούς Κυματισμούς

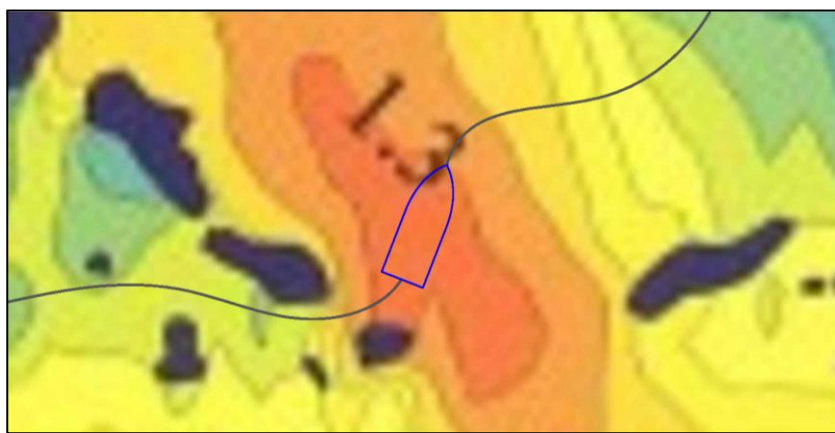
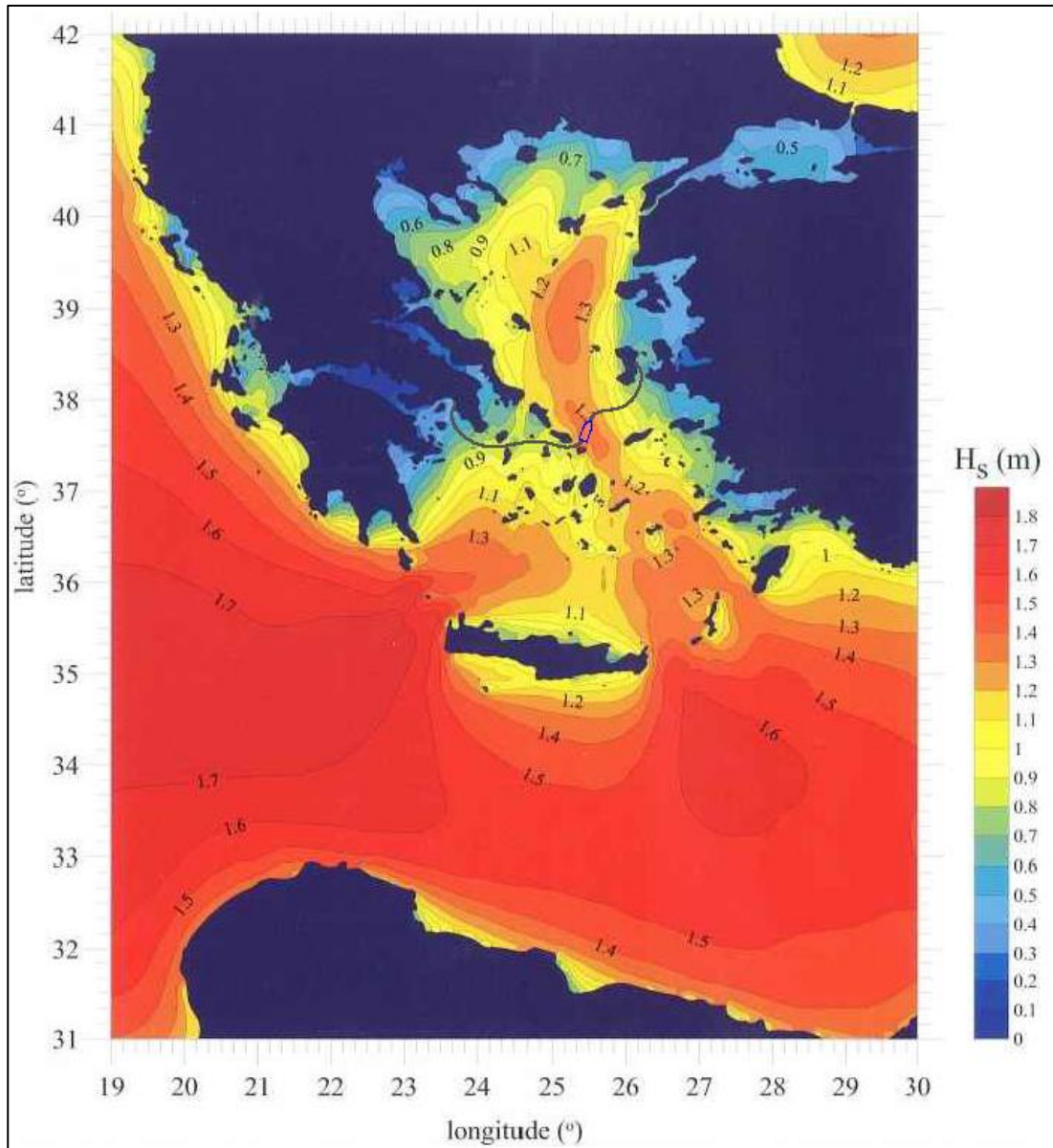
Στο παρόν κεφάλαιο θα υπολογιστούν τα φάσματα των κυματισμών με βάση τα στοιχεία που διαθέτουμε από την βιβλιογραφική αναφορά Σουκισιάν et al., 2007, για την πιο πιθανή περίπτωση κυματισμού.

Προβάλλουμε την διαδρομή που ακολουθεί το πλοίο στους χάρτες που παρουσιάζονται στον Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών (Τ Σουκισιάν et al., 2007). Στις παρακάτω εικόνες μπορεί να δει κανείς το ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής και την κατεύθυνση του ανέμου. Παρατηρείται πως το μεγαλύτερο ύψος κύματος παρουσιάζεται στην περιοχή με συντεταγμένες (37.75, 25.5). Στην συγκεκριμένη θέση, λαμβάνουμε τις εξής πληροφορίες για τον κυματισμό που επικρατεί, από τα ανάλογα γραφήματα:

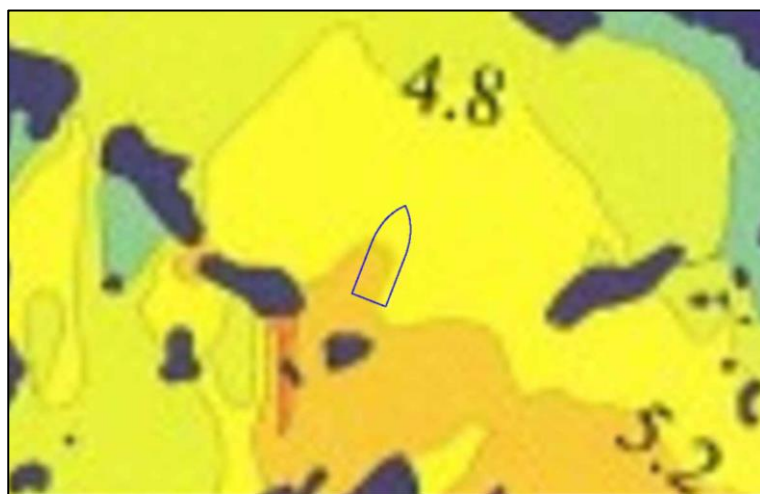
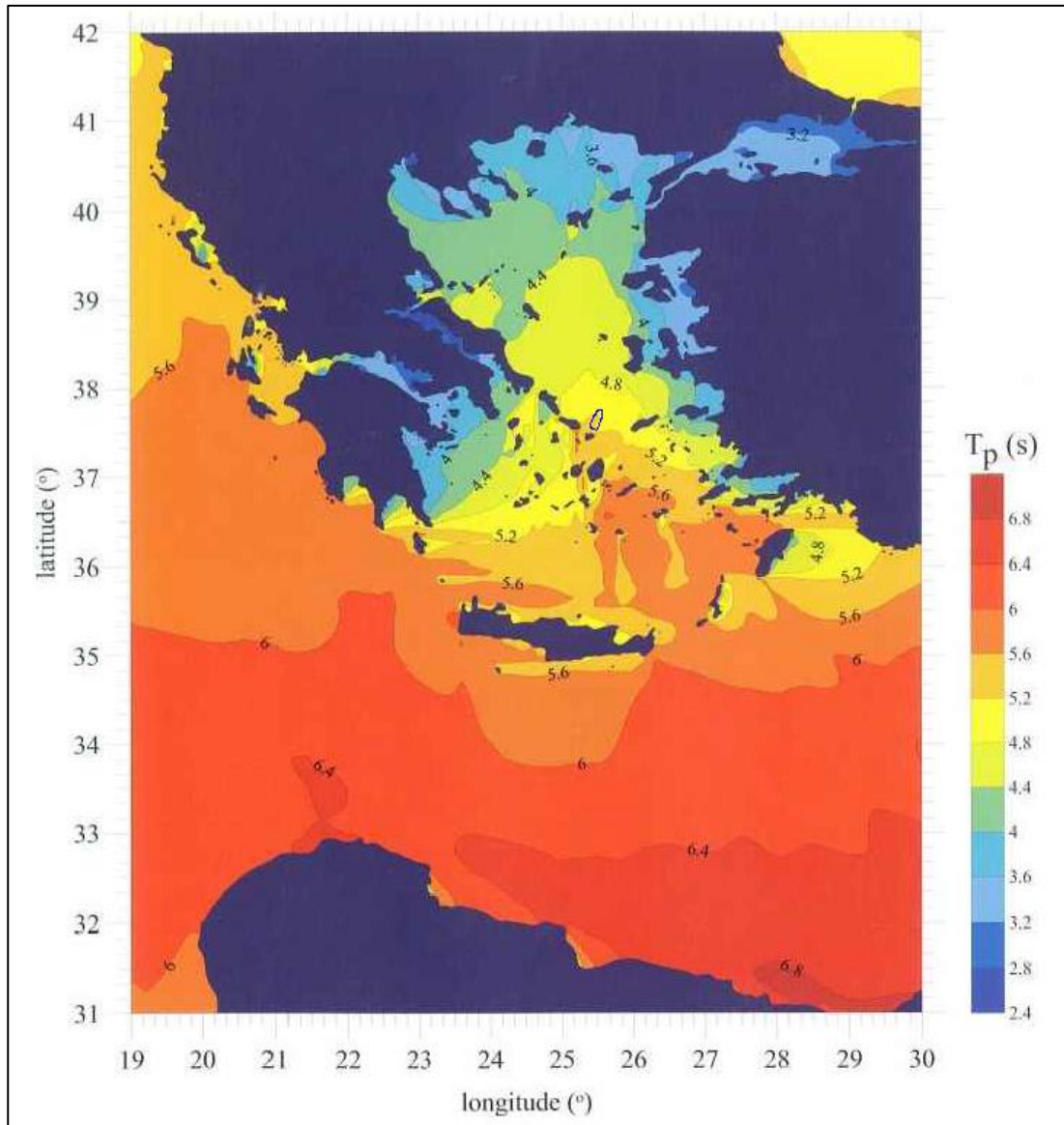
Στοιχείο	Τιμή
Σημαντικό Ύψος Κύματος (H_s)	1.4 m
Περίοδος Κορυφής (T_p)	5.4 sec
Κατεύθυνση Κυματισμού (β)	135 deg

- Σημαντικό Ύψος Κύματος H_s (Εικόνα 5.1): Για το σημαντικό ύψος κύματος, λήφθηκαν υπ' όψιν οι χειμερινές μετρήσεις, καθώς οδηγούν σε μεγαλύτερες τιμές. Η περιοχή βρίσκεται ανάμεσα στις ισοϋψείς των 1.3 και 1.4 μέτρων. Για αυτόν τον λόγο θα ληφθούν ως σημαντικό ύψος κύματος τα 1.4 m.
- Περίοδος κορυφής T_p (Εικόνα 5.2): Για την περίοδο κορυφής θα ληφθεί υπ' όψιν η μέση ετήσια περίοδος κορυφής. Παρατηρούμε από την αντίστοιχη εικόνα πως το σημείο βρίσκεται ανάμεσα στις ισοϋψείς των 5.2 sec και 5.6 sec, οπότε θα ληφθεί ως περίοδος κορυφής τα 5.4 sec, που είναι η μέση τιμή των παραπάνω άκρων.
- Κατεύθυνση Κυματισμού β (Εικόνα 5.3): Λαμβάνοντας υπ' όψιν το πλησιέστερο σημείο μετρήσεων στον χάρτη που παρουσιάζει την πιθανότητα της κάθε κατεύθυνσης σε ετήσιο εύρος, παρατηρούμε πως η κατεύθυνση κυματισμού σε σχέση με το πλοίο είναι οι 135 μοίρες.

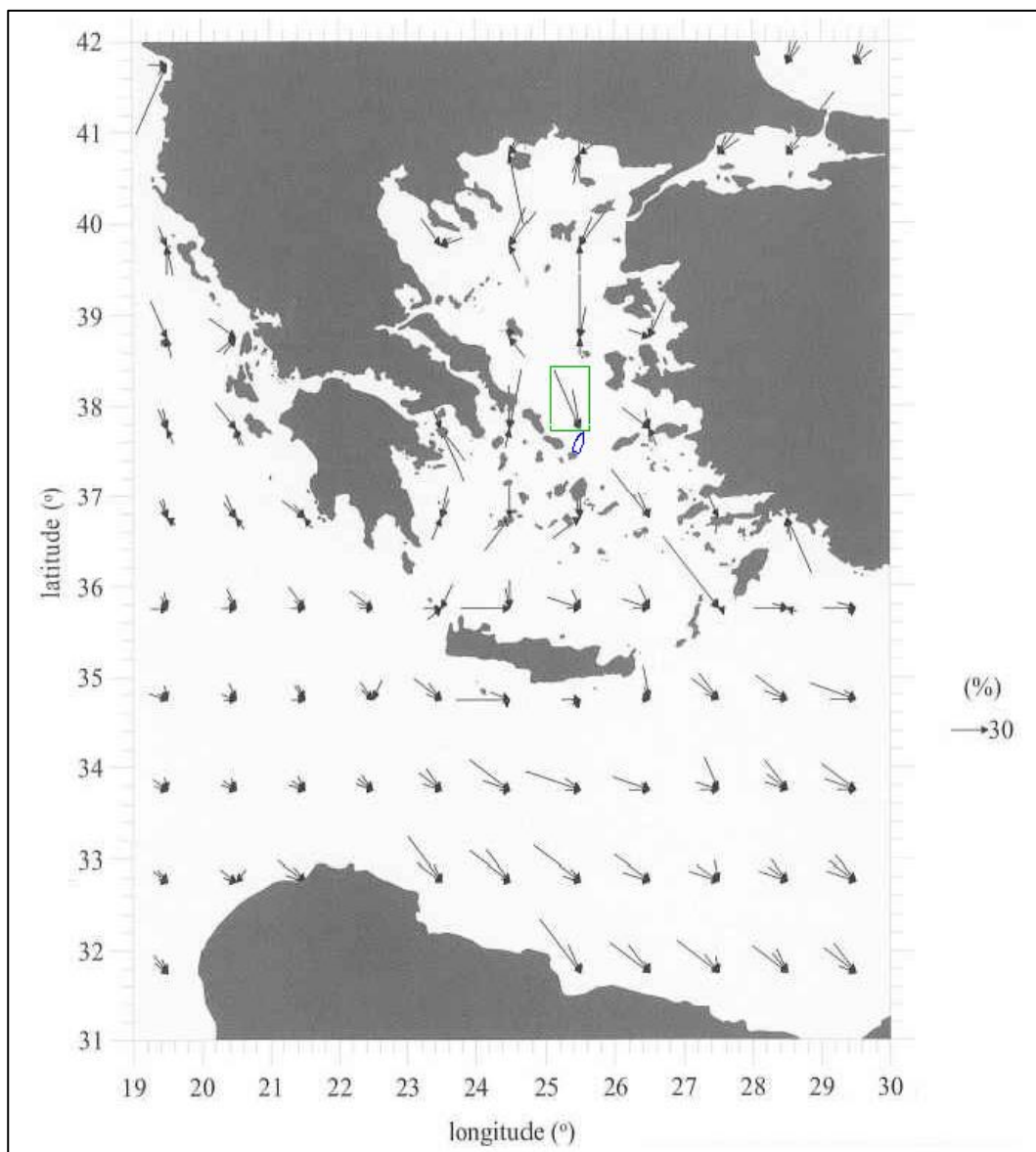
Η ταχύτητα του πλοίου λαμβάνεται ίση με 15 κόμβους (= 7.725 m/s).



Εικόνα 5.1: Η διαδρομή του πλοίου . Ο χάρτης παρουσιάζει τις τιμές του μέσου χειμερινού ύψους κύματος. (Πηγή: Σουκισιάν et al., 2007)



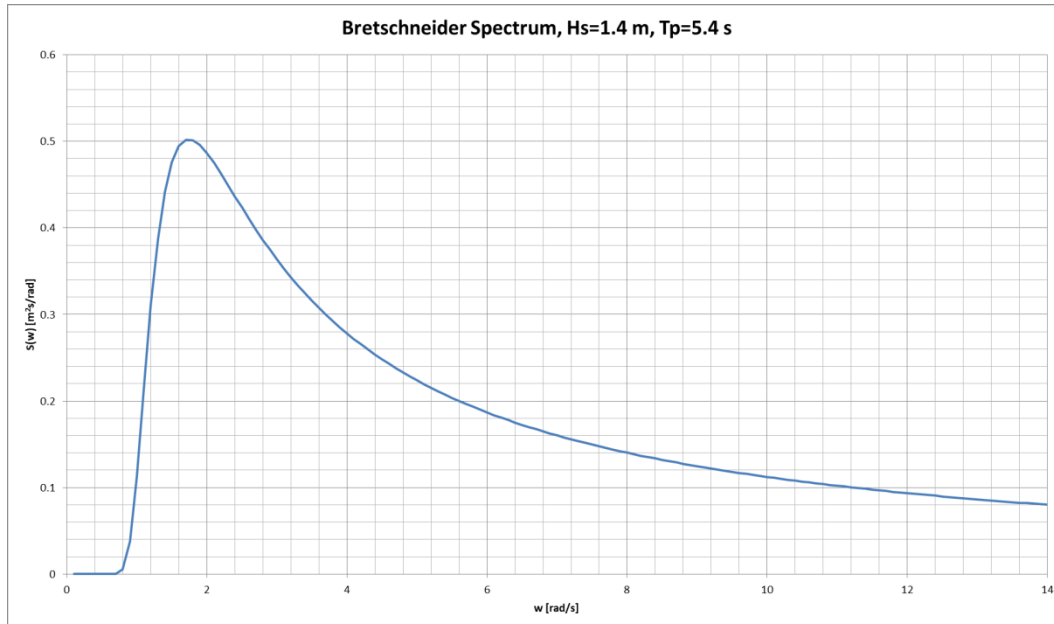
Εικόνα 5.2: Οι μέσες τιμές για την περίοδο κορυφής του κυματισμού σε ετήσιο εύρος μετρήσεων. (Πηγή: Σουκισιάν et al., 2007)



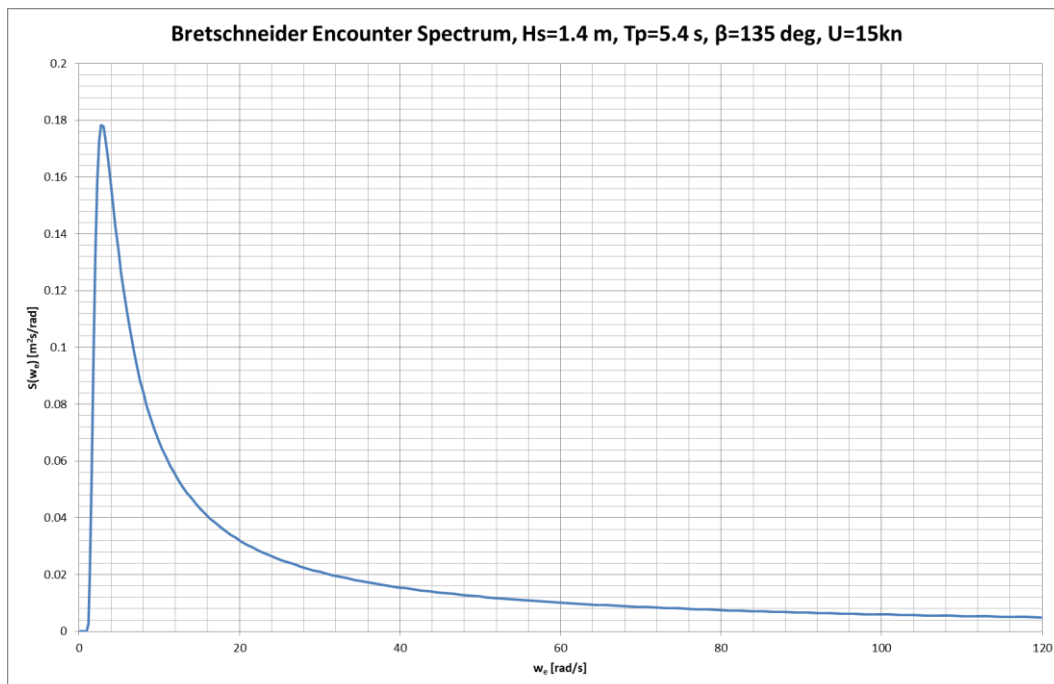
Εικόνα 5.3: Οι πιθανότητες της κατεύθυνσης του κυματισμού σε ετήσιο εύρος μετρήσεων. (Πηγή: Σουγκισιάν *et al.*, 2007)

Για την αναπαράσταση του κυματισμού θα χρησιμοποιηθεί το φάσμα *Bretschneider* το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή διαφόρων ειδών θάλασσας με σχετική ακρίβεια.

Για τα δεδομένα του κυματισμού που λήφθηκαν από τον άτλαντα, το φάσμα κυματισμού είναι το παρακάτω:



Γράφημα 5.1: Φάσμα Bretschneider για την αναμενόμενη κατάσταση θάλασσας



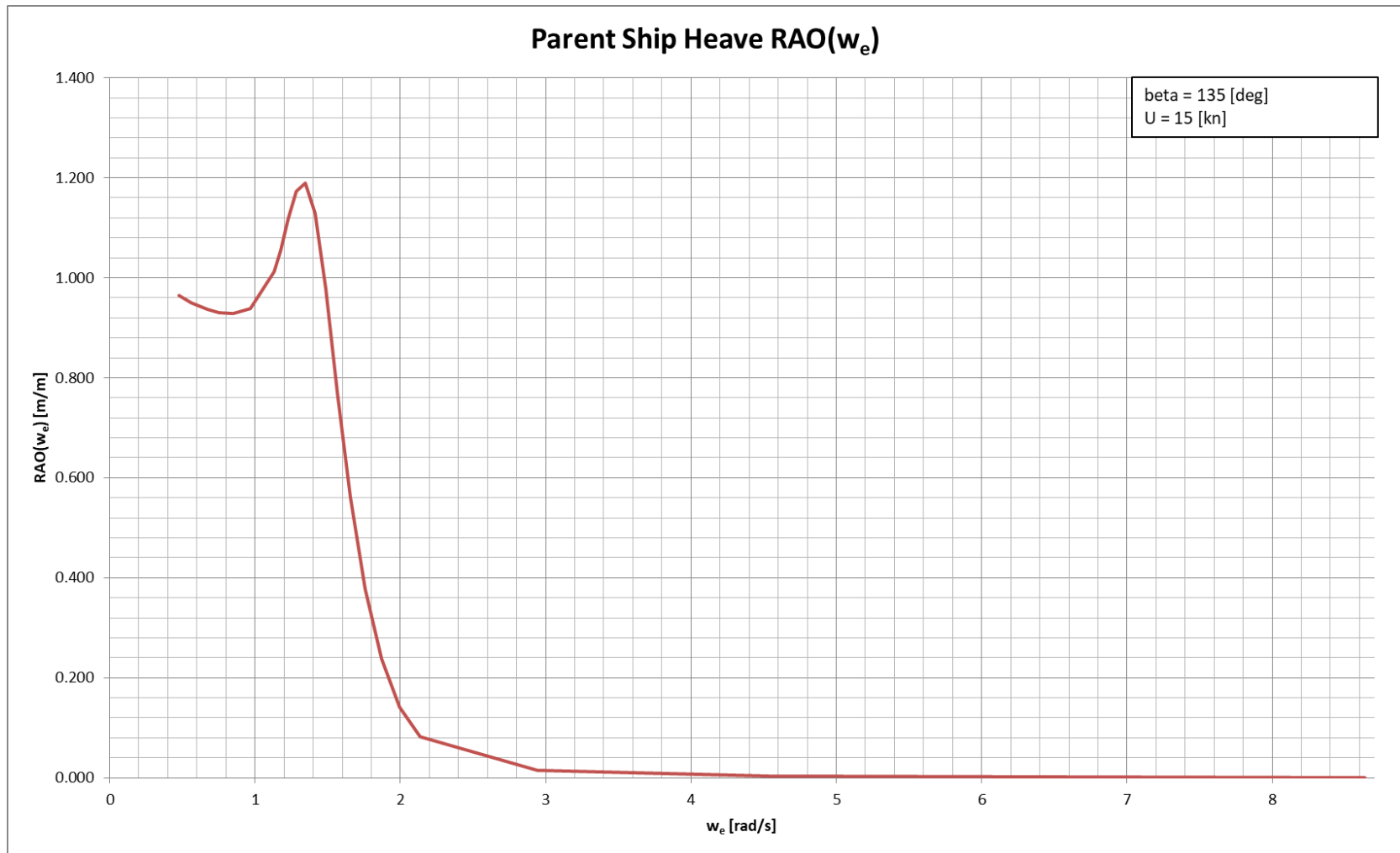
Γράφημα 5.2: Φάσμα Bretschneider για την αναμενόμενη κατάσταση θάλασσας, ως προς την συχνότητα συνάντησης.

Όποιο από τα δύο πλοία παρουσιάζει μικρότερο σημαντικό ύψος απόκρισης στην παραπάνω κατάσταση θάλασσας, θα θεωρηθεί πως είναι και το καλύτερο για την συγκεκριμένη πορεία, όσον αναφορά την άνεση των επιβατών.

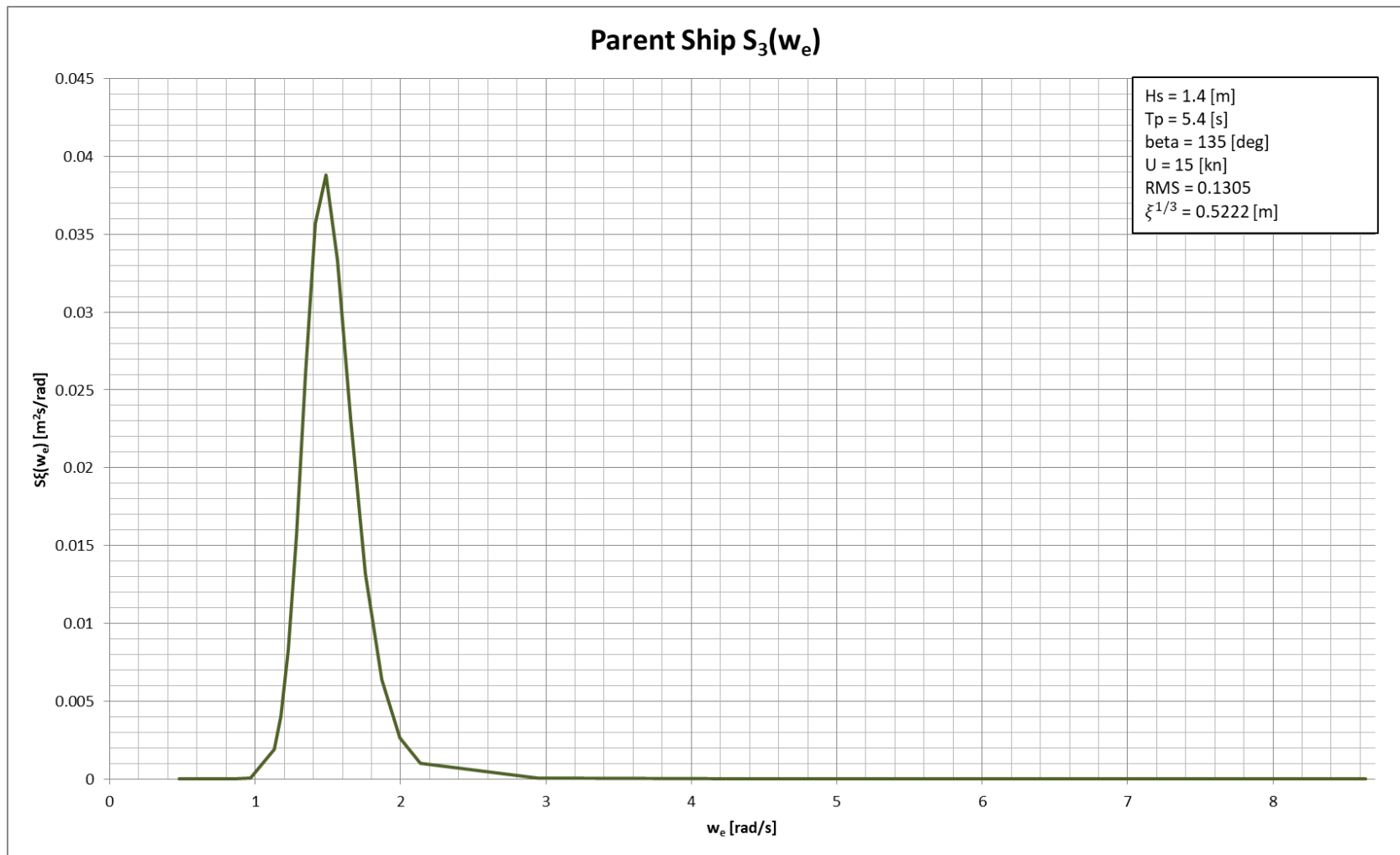
5.1 Πατρικό Πλοίο

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι αποκρίσεις του πατρικού πλοίου κατά την πλεύση του σε θάλασσα που χαρακτηρίζεται από το φάσμα που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει αρχικά να μετατραπούν τα *RAOs* που λάβαμε από το πρόγραμμα αναλόγως ως προς την συχνότητα συνάντησης.

5.1.1 Heave

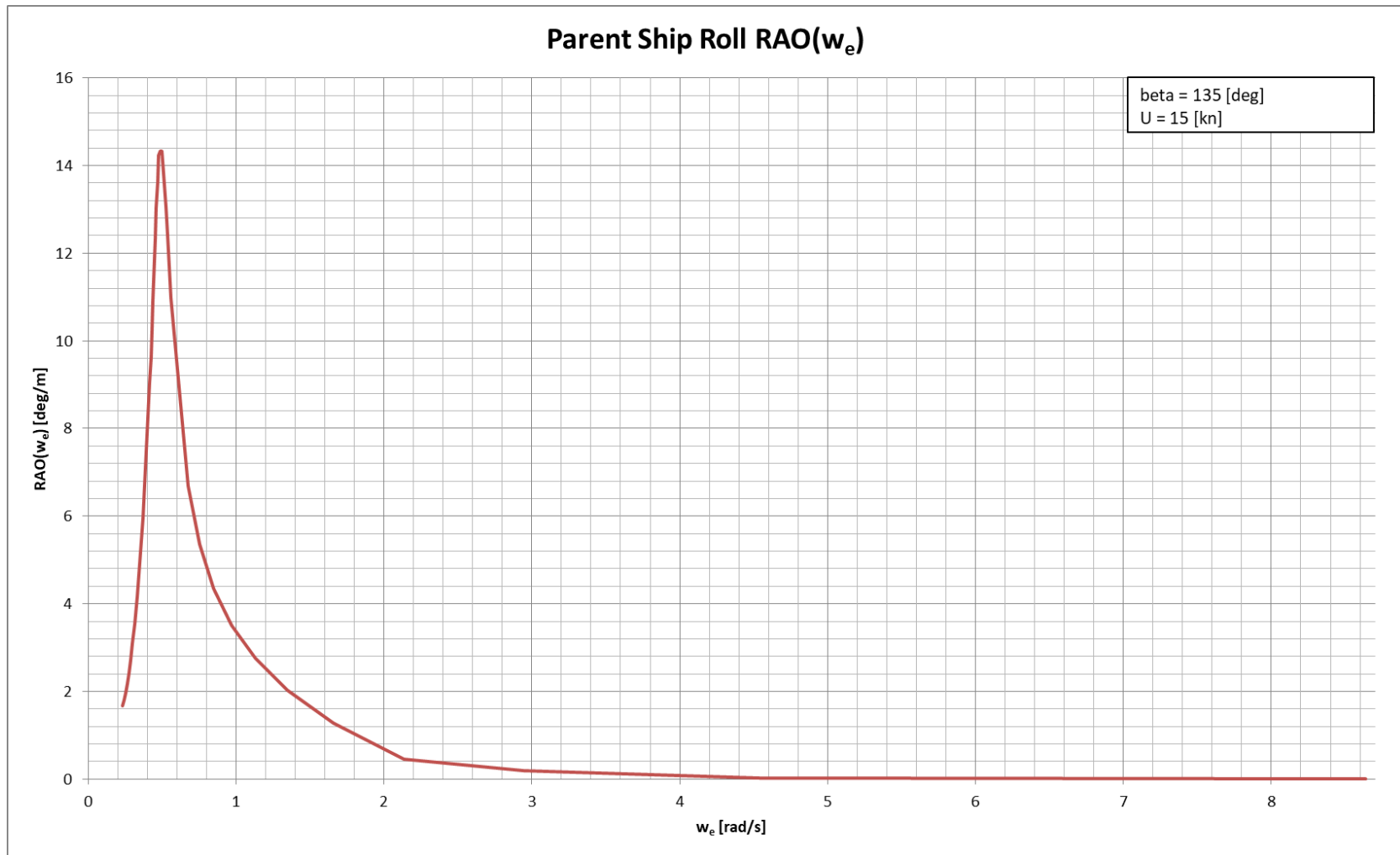


Γράφημα 5.3: Τα Heave RAOs του πατρικού πλοίου εκφρασμένα ως προς την συχνότητα συνάντησης

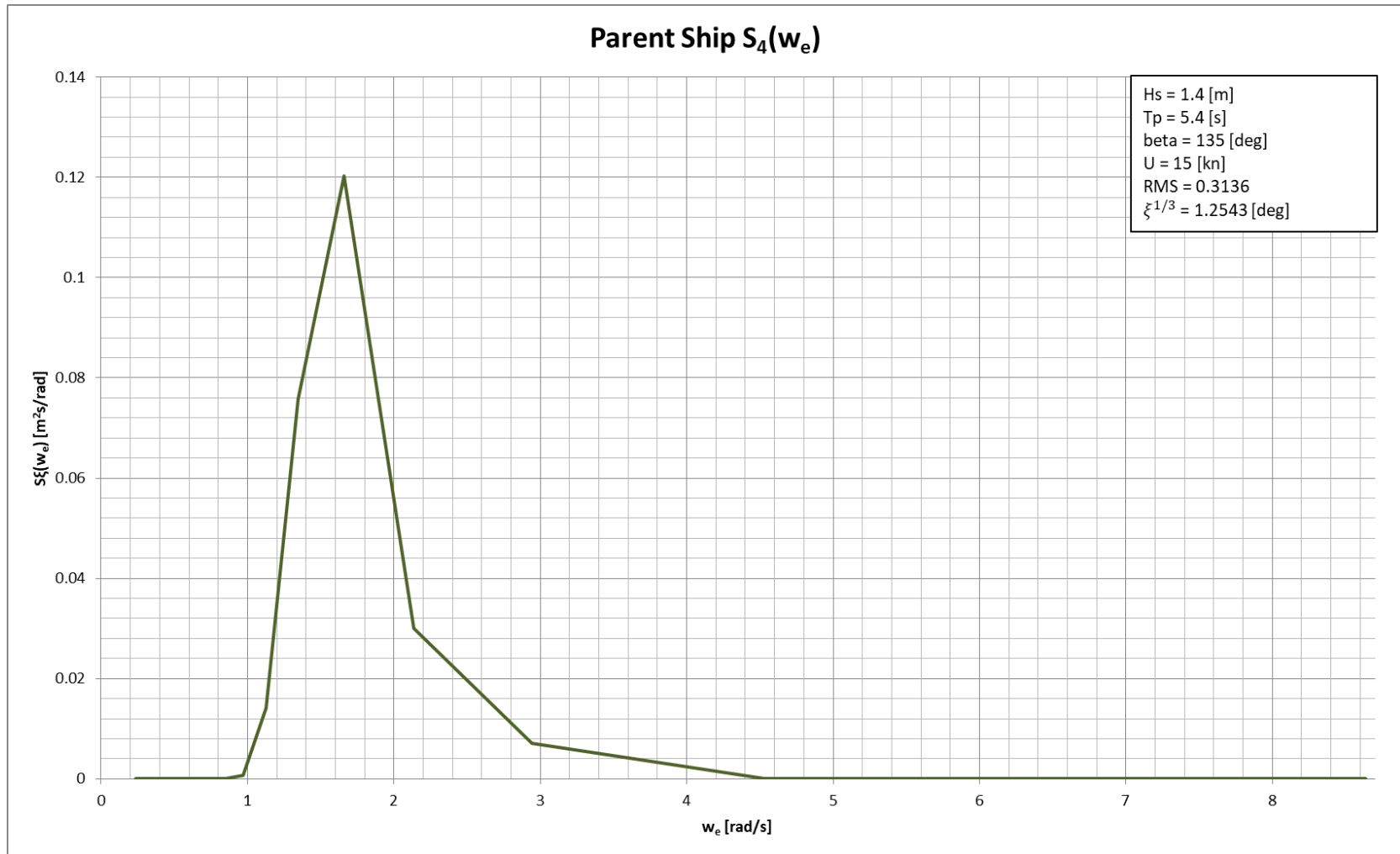


Γράφημα 5.4: Το φάσμα αποκρίσεων Heave του πατρικού πλοίου

5.1.2 Roll

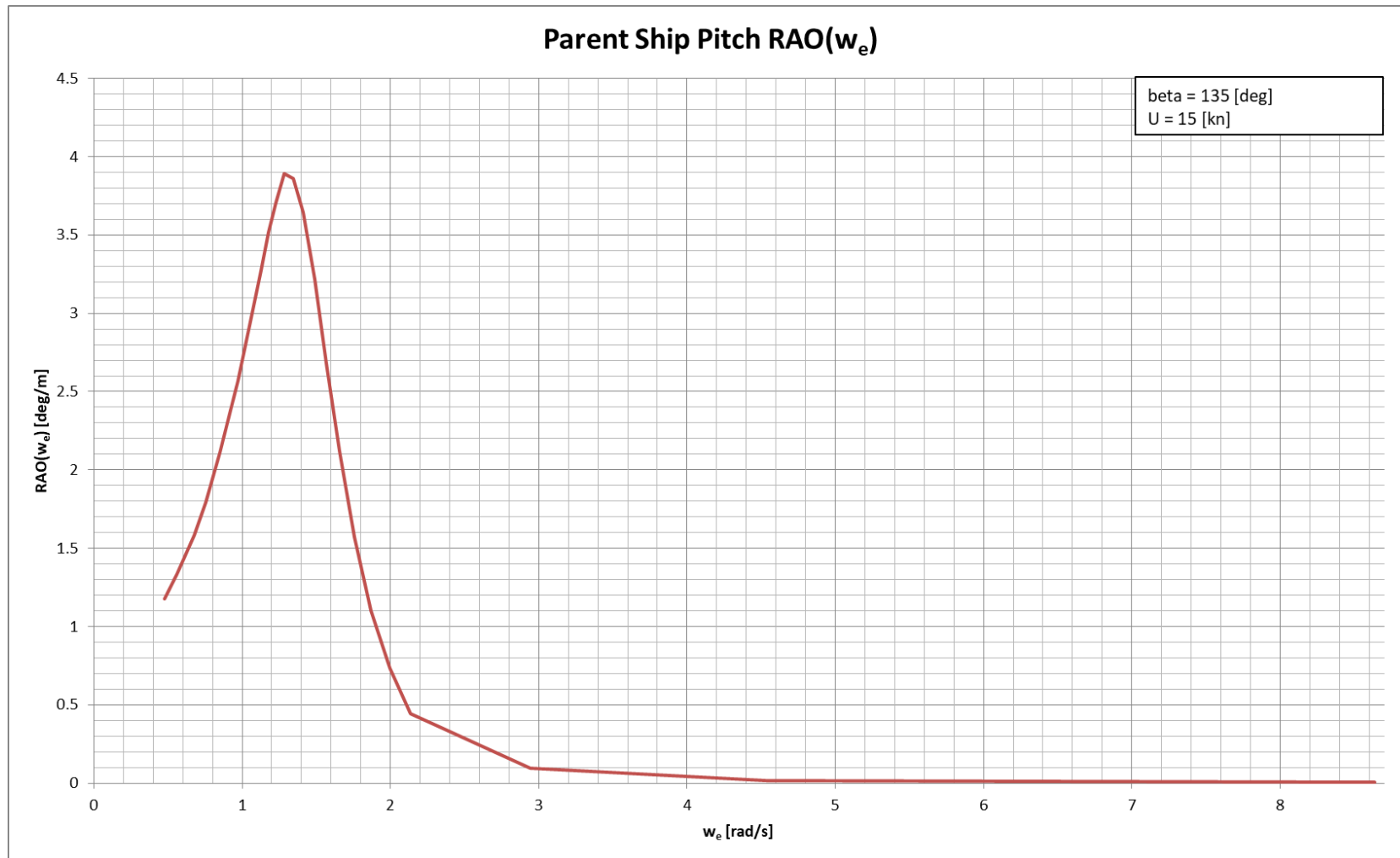


Γράφημα 5.5: Τα Roll RAOs του πατρικού πλοίου εκφρασμένα ως προς την συχνότητα συνάντησης

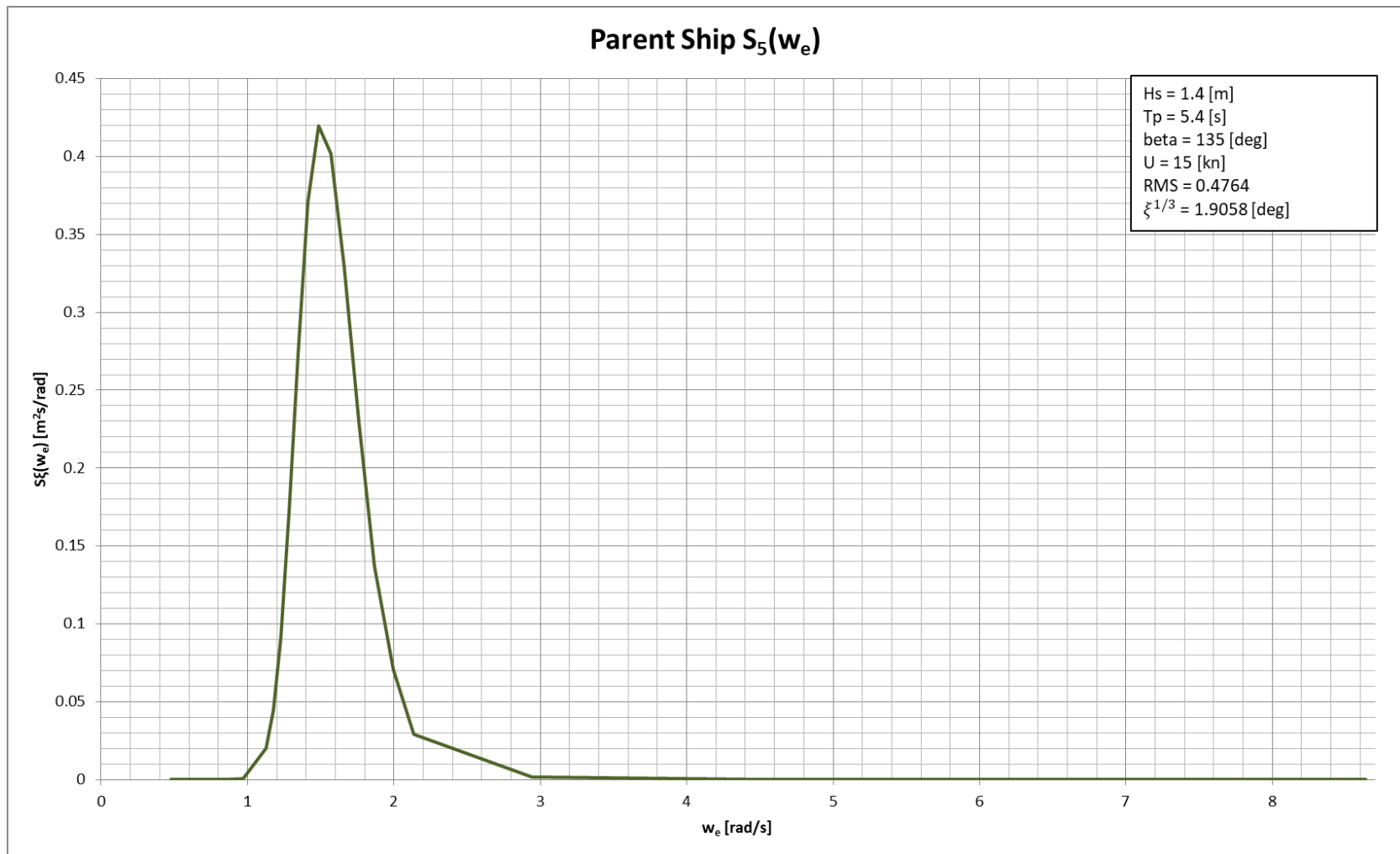


Γράφημα 5.6: Το φάσμα αποκρίσεων Roll του πατρικού πλοίου

5.1.3 Pitch



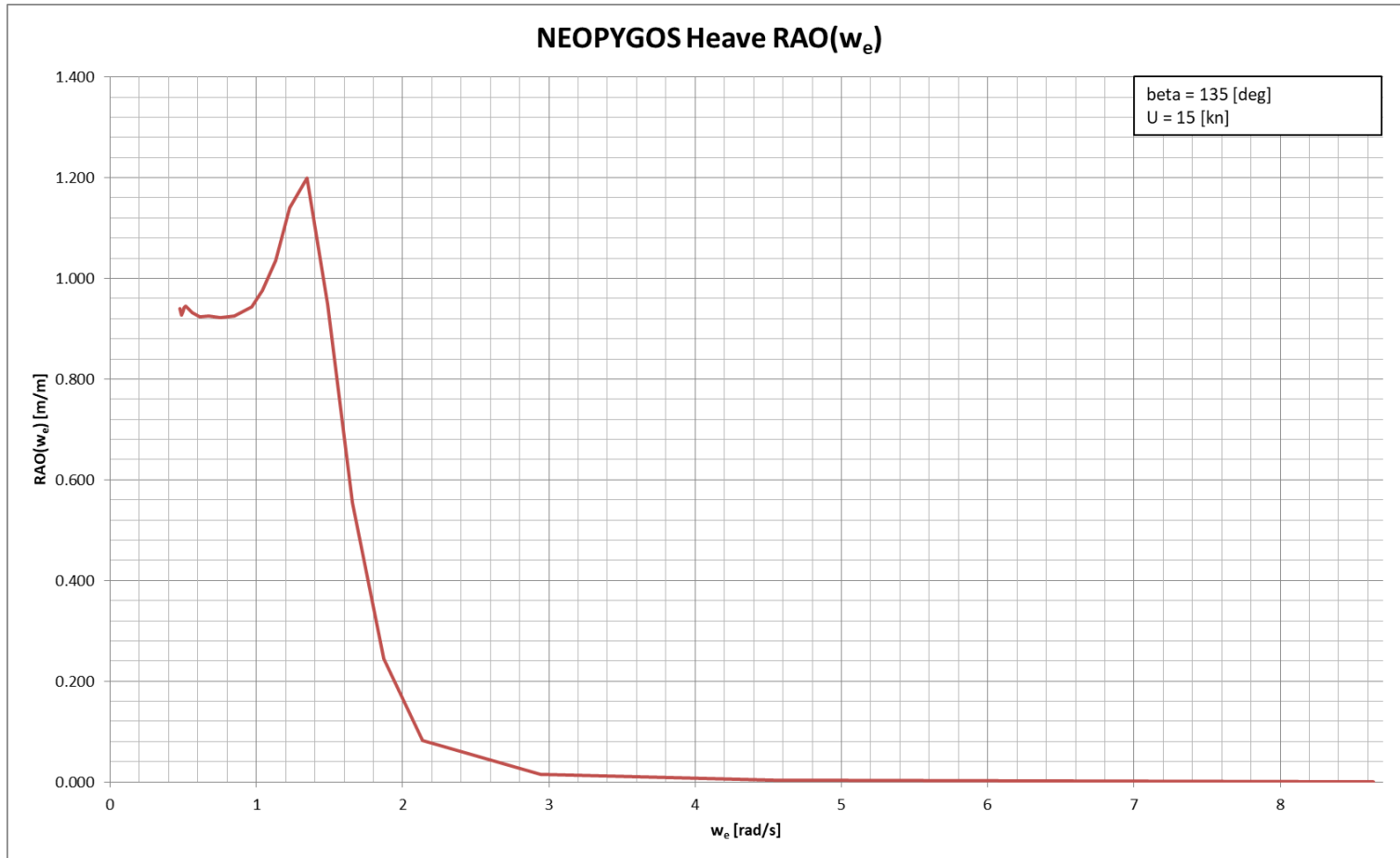
Γράφημα 5.7: Τα Pitch RAOs του πατρικού πλοίου εκφρασμένα ως προς την συχνότητα συνάντησης



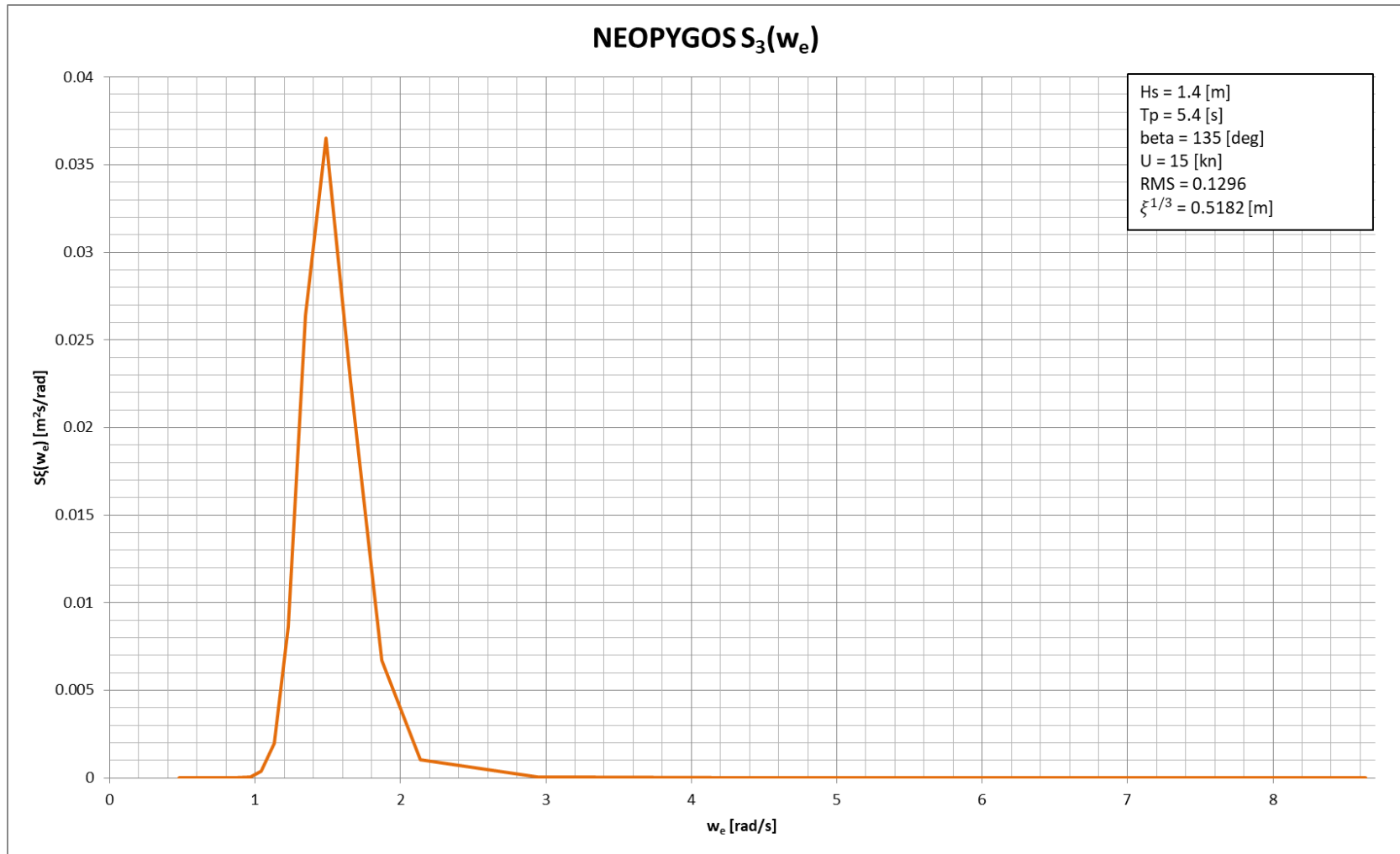
Γράφημα 5.8: Το φάσμα αποκρίσεων Pitch του πατρικού πλοίου

5.2 NEOPYGOS

5.2.1 Heave

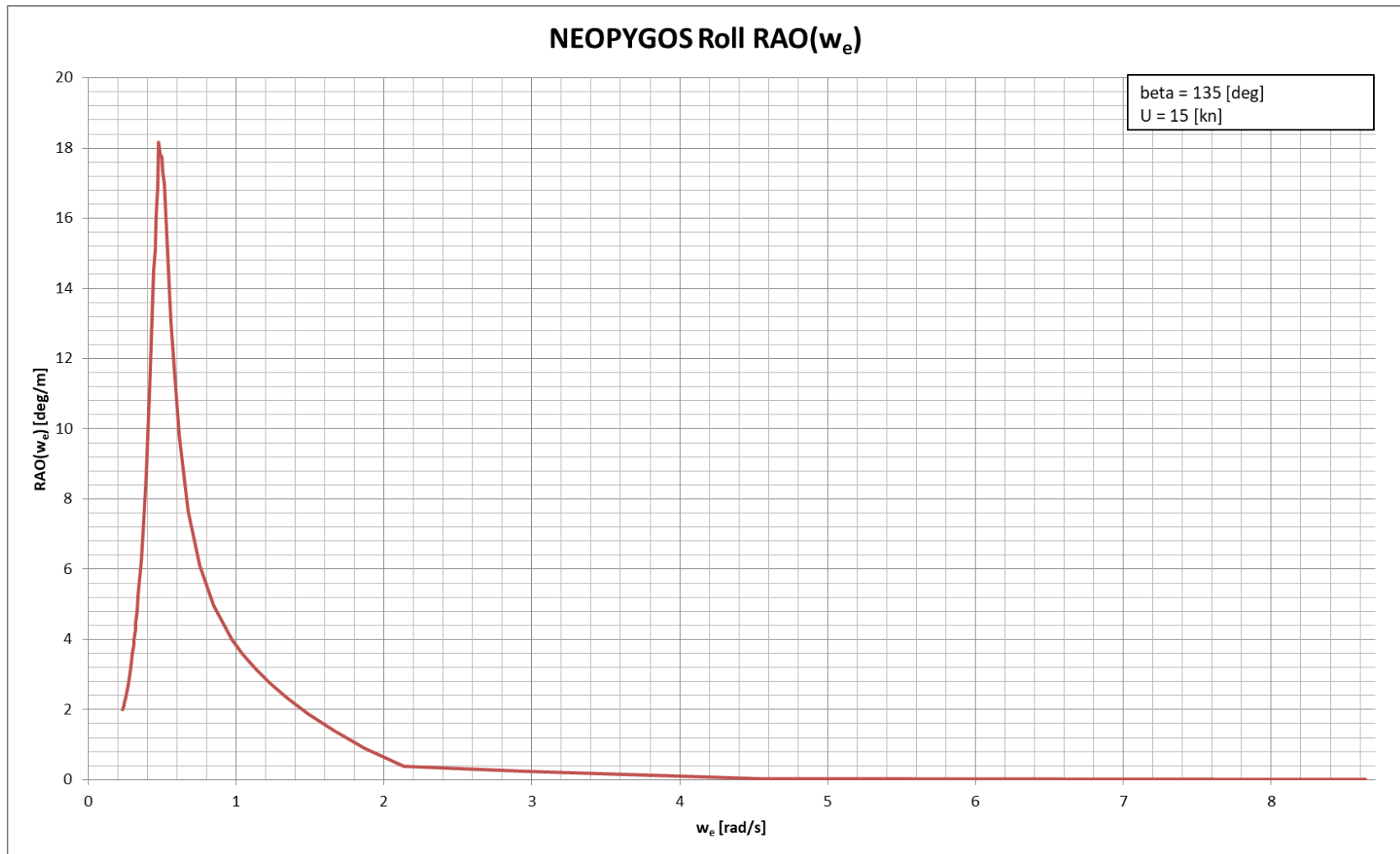


Γράφημα 5.9: Τα Heave RAOs του πλοίου NEOPYGOS εκφρασμένα ως προς την συχνότητα συνάντησης

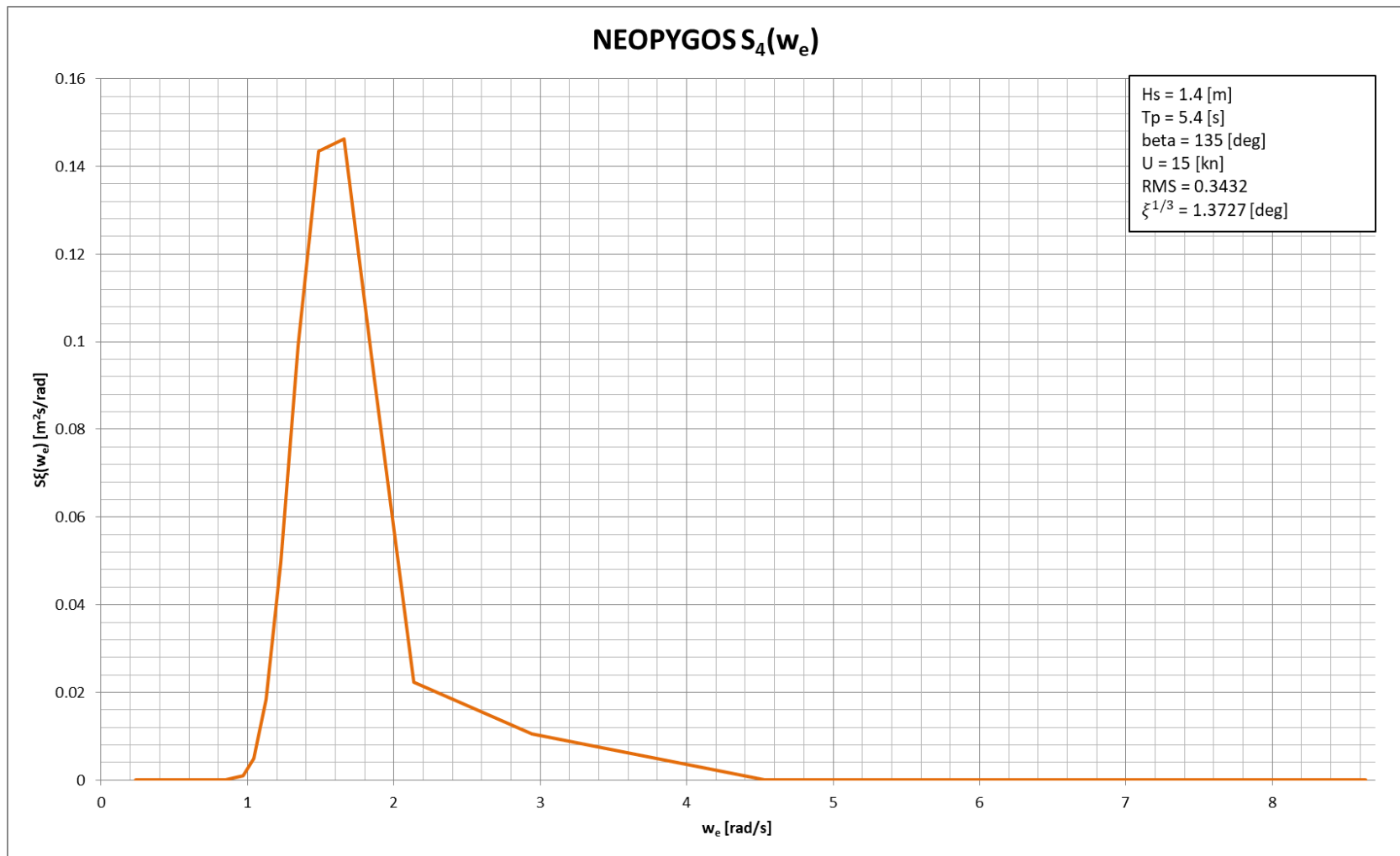


Γράφημα 5.10: Το φάσμα αποκρίσεων Heave του πλοίου NEOPYGOS

5.2.2 Roll

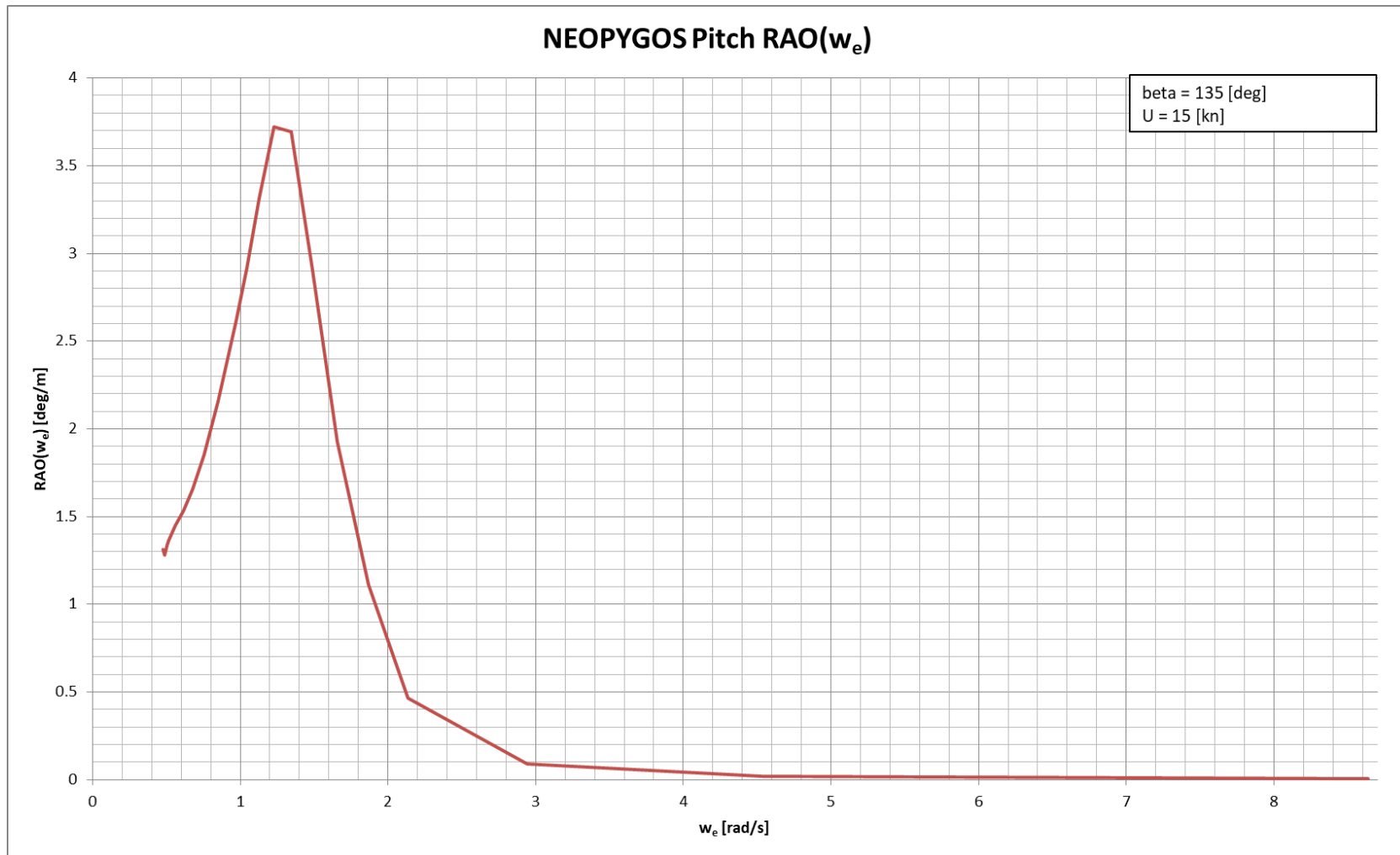


Γράφημα 5.11: Τα Roll RAOs του πλοίου NEOPYGOS εκφρασμένα ως προς την συχνότητα συνάντησης

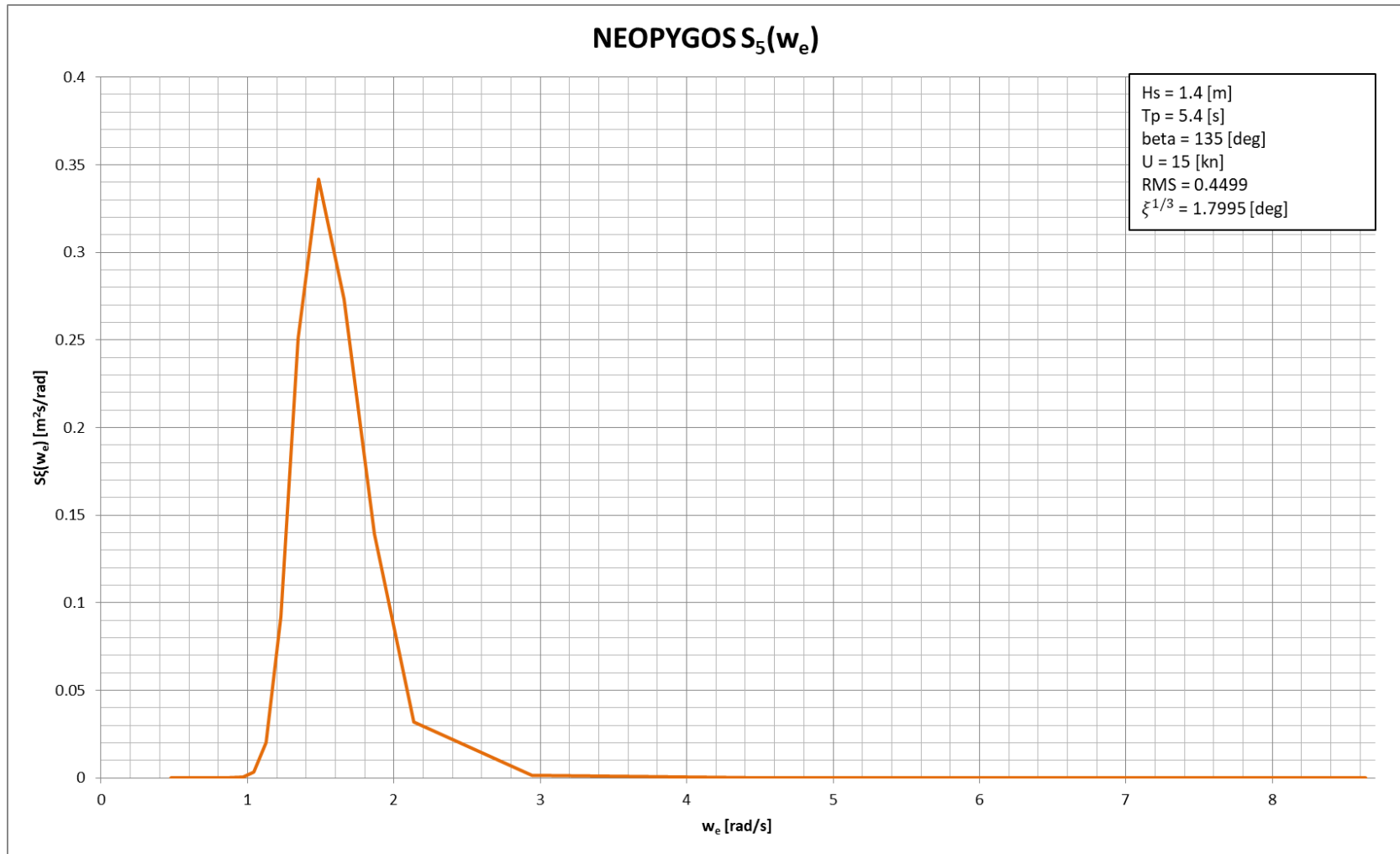


Γράφημα 5.12: Το φάσμα αποκρίσεων Roll του πλοίου NEOPYGOS

5.2.3 Pitch



Γράφημα 5.13: Τα Pitch RAOs του πλοίου NEOPYGOS εκφρασμένα ως προς την συχνότητα συνάντησης



Γράφημα 5.14: Το φάσμα αποκρίσεων Pitch του πλοίου NEOPYGOS

5.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται η κάθε καμπύλη του κάθε πλοίου σε σύγκριση με του άλλου. Επίσης, πριν από τα γραφήματα, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις τιμές *RMS* και τα σημαντικά ύψη αποκρίσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

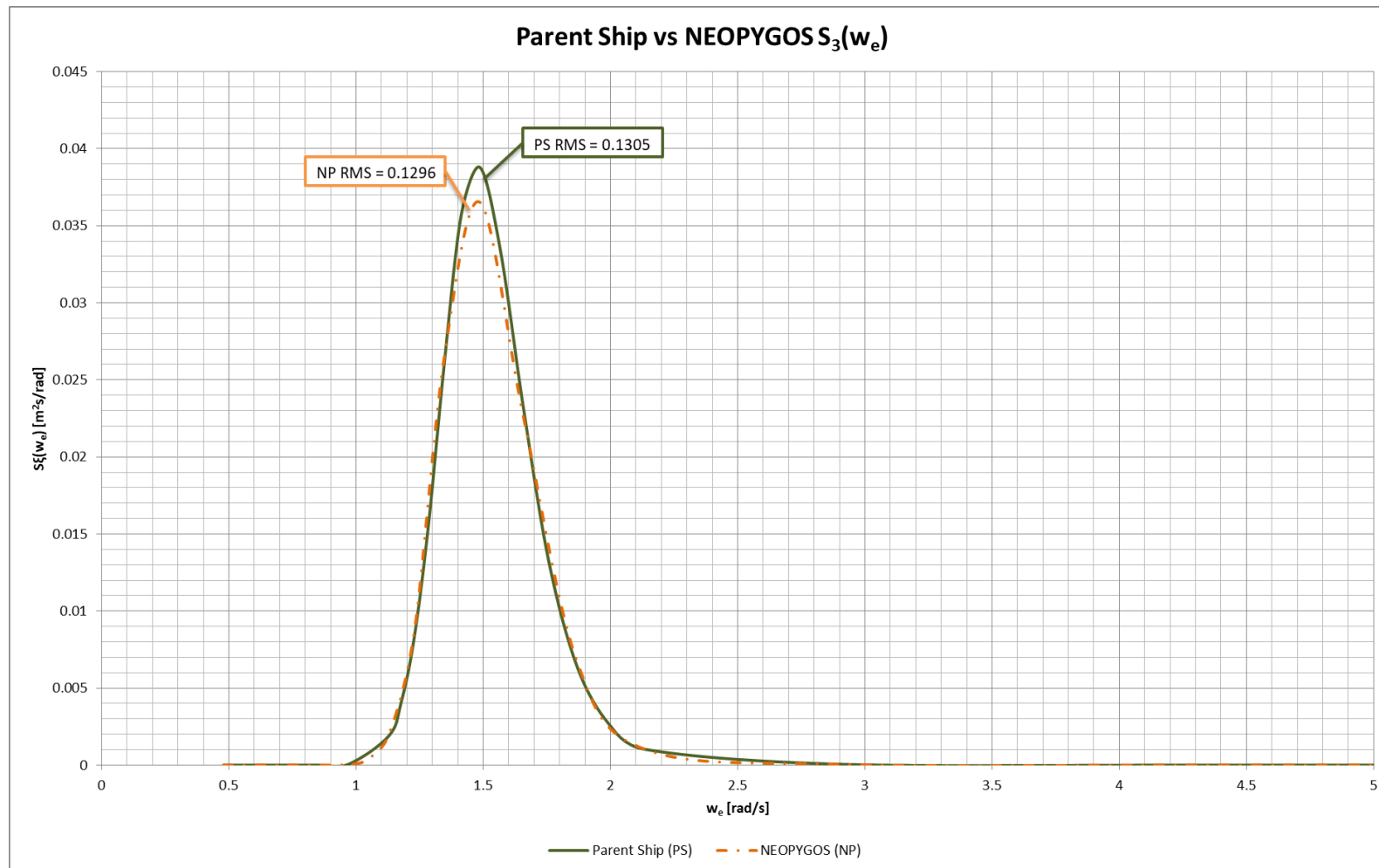
	Translation / Rotation	Αριθμός Γραφήματος	RMS Value	$\xi^{1/3}$
Parent Ship	Heave	5.4	0.1305 [m]	0.5222 [m]
	Roll	5.6	0.3136 [deg]	1.2543 [deg]
	Pitch	5.8	0.4764 [deg]	1.9058 [deg]
NEOPYGOS	Heave	5.10	0.1296 [m]	0.5182 [m]
	Roll	5.12	0.3432 [deg]	1.3727 [deg]
	Pitch	5.14	0.4499 [deg]	1.7995 [deg]

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

Πριν ακόμα εξετάσουμε τα γραφήματα, παρατηρούμε πως για την *roll*, το πατρικό πλοίο συμπεριφέρεται καλύτερα. Αντιθέτως, στην περίπτωση του *heave* και του *pitch*, καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει το πλοίο *NEOPYGOS*.

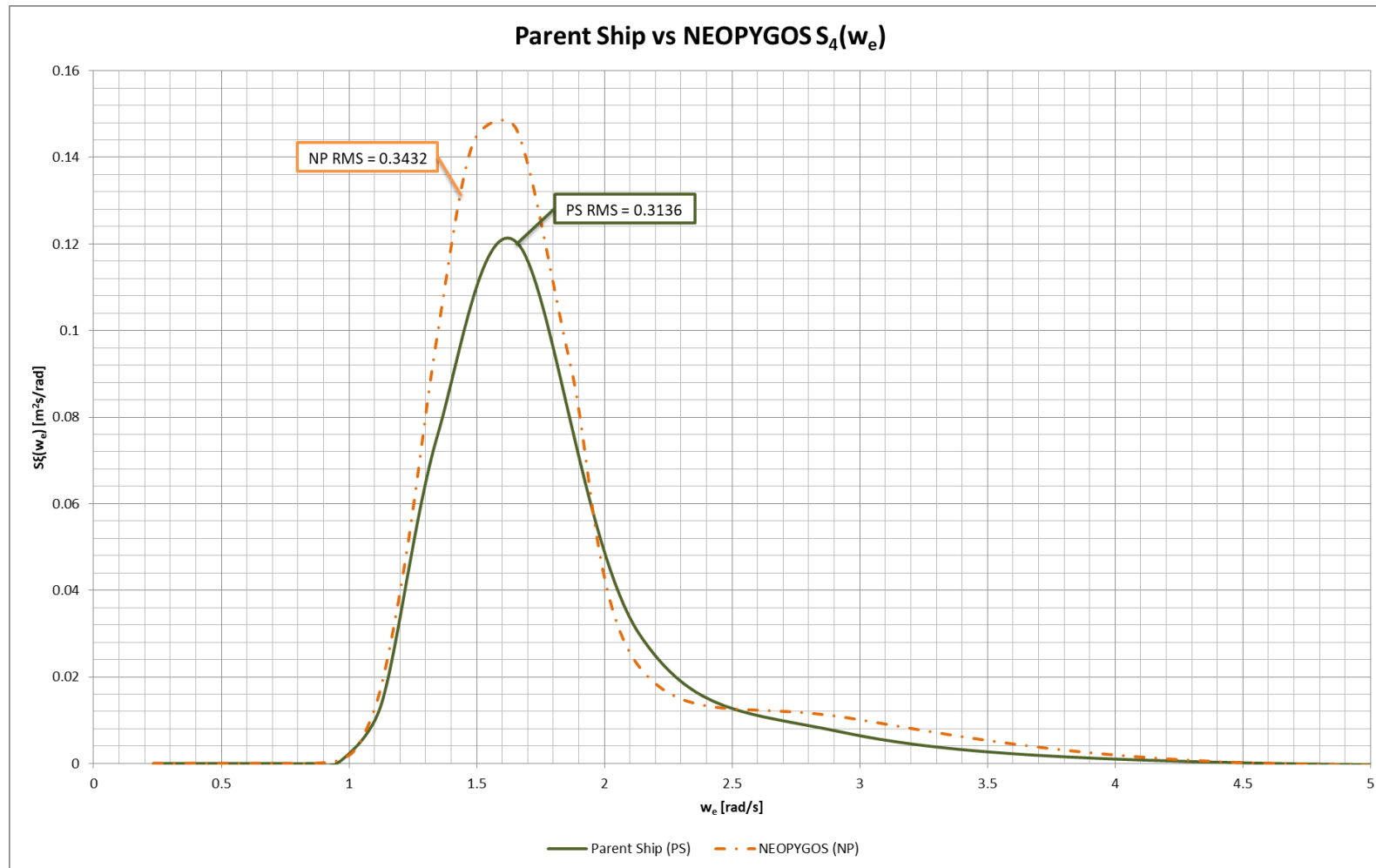
Σημειώνεται επίσης πως τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις σχέσεις (2.4.12) και (2.4.14).

5.3.1 Heave



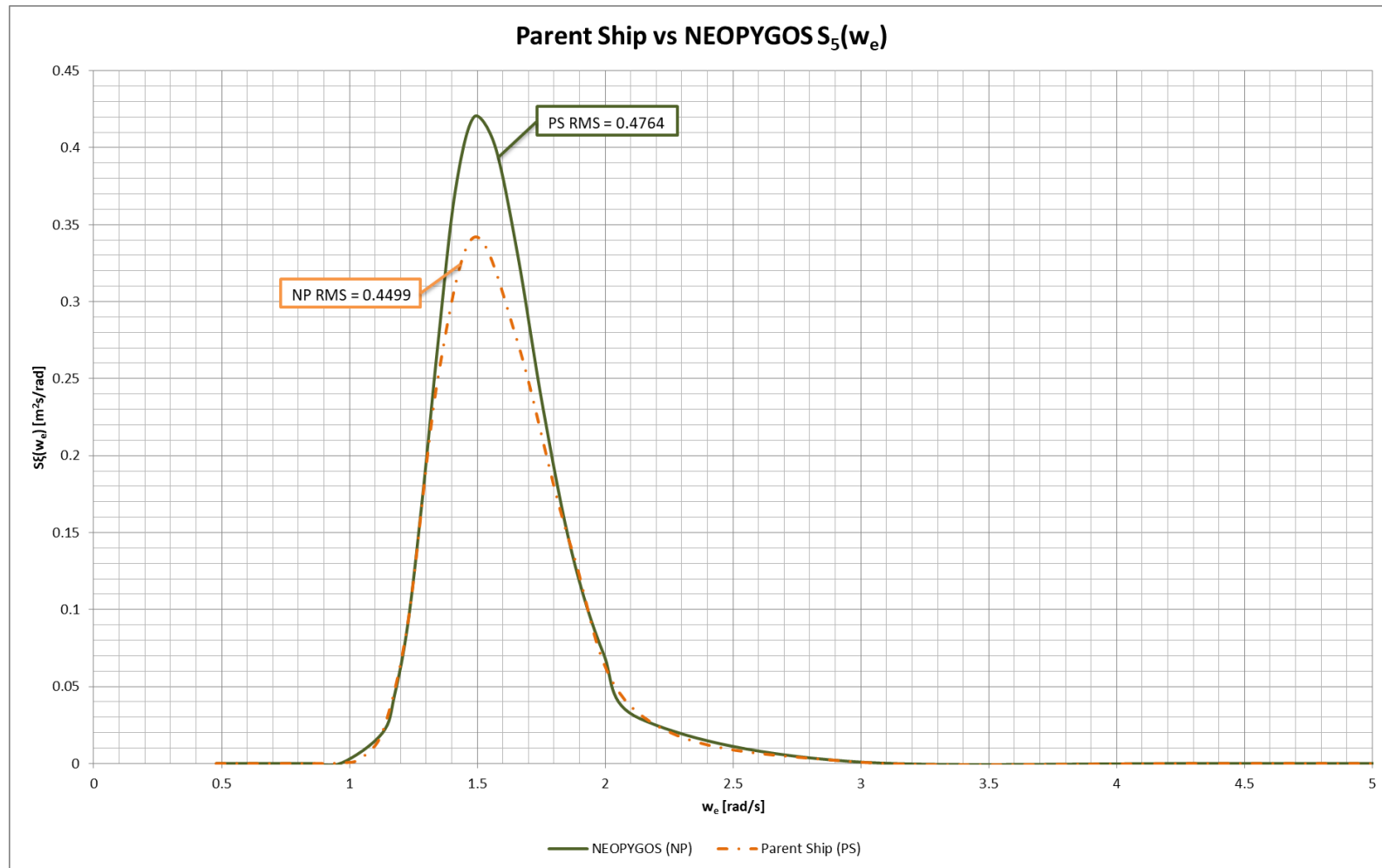
Γράφημα 5.15: Σύγκριση μεταξύ των φασμάτων αποκρίσεων Heave

5.3.2 Roll



Γράφημα 5.16: Σύγκριση μεταξύ των φασμάτων αποκρίσεων Roll

5.3.3 Pitch



Γράφημα 5.17: Σύγκριση μεταξύ των φασμάτων αποκρίσεων Pitch

5.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των παραπάνω γραφημάτων ήταν αναμενόμενα, καθώς είχε γίνει ήδη σύγκριση των τιμών *RMS* στην αρχή του υποκεφαλαίου. Παρόλα αυτά όμως δίνεται η ευκαιρία να παρατηρήσουμε την έκταση της διαφοράς στο πεδίο των συχνοτήτων, κάτι που δεν μπορεί να γίνει μόνο μέσω των τιμών *RMS*. Το γεγονός βέβαια πως τα δύο πλοία εμφανίζουν τις ιδιοσυχνότητές τους σε κοντινές συχνότητες, και με κοντινές μέγιστες τιμές, δεν επιτρέπει την ξεκάθαρη διαφοροποίηση των καμπυλών.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η σχέση των αποκρίσεων που παρουσιάζονται στο νέο πλοίο, σε σχέση με του πατρικού πλοίου.

Translation / Rotation	Parent Ship $\xi^{1/3}$	NEOPYGOS $\xi^{1/3}$	Difference [units]	Difference [%]
Heave	0.5222 [m]	0.5182 [m]	- 0.0040 [m]	- 0.766 %
Roll	1.2543 [deg]	1.3727 [deg]	+ 0.1184 [deg]	+ 9.439 %
Pitch	1.9058 [deg]	1.7995 [deg]	- 0.1063 [deg]	- 5.578 %

Πίνακας 5.2: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Παρατηρούνται τα εξής αποτελέσματα:

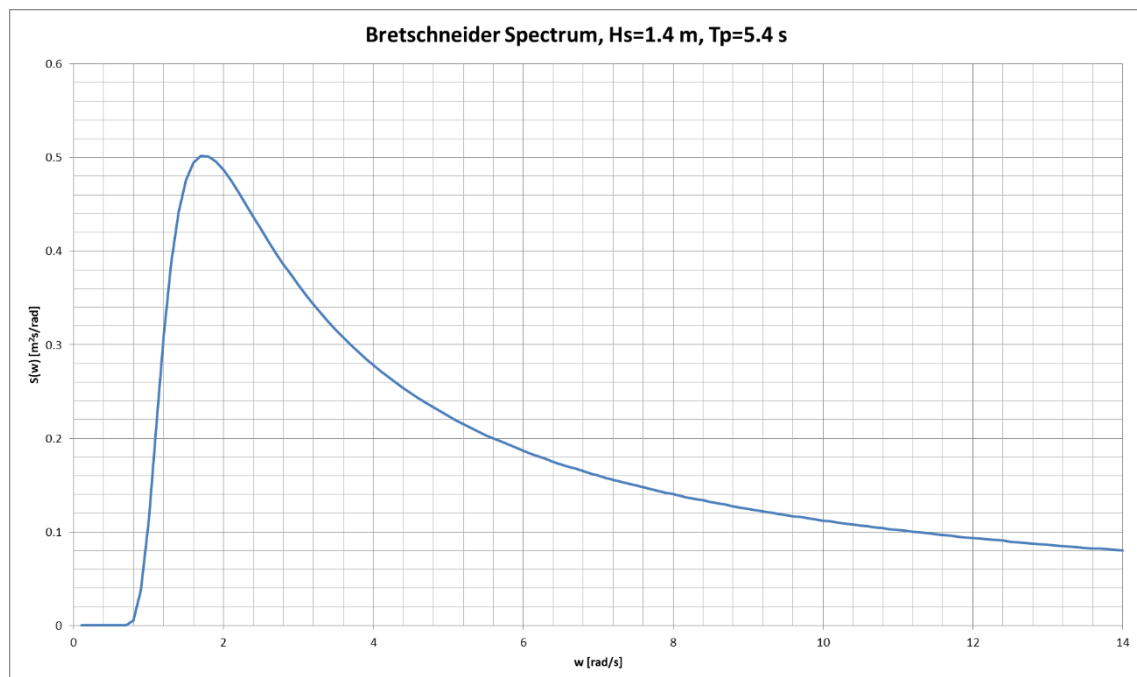
- i. Υπάρχει πολύ μικρή μείωση στην απόκριση *heave*, σε σημείο όπου θα μπορούσε να θεωρηθεί πως είναι η ίδια.
- ii. Το νέο πλοίο παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερο *roll*, της τάξης περίπου 9.5% παραπάνω απ' ότι το πατρικό πλοίο.
- iii. Στην νέα σχεδίαση το *pitch* μειώνεται περίπου 5.5% σε σχέση με το πατρικό πλοίο.

6. Πραγματοποίηση Αποκρίσεων

Στο παρόν κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν οι αποκρίσεις του πλοίου ως προς τον χρόνο, όταν υπόκειται σε κυματισμούς οι οποίοι περιγράφονται από το φάσμα που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 5. Στην συνέχεια, θα πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση των αποκρίσεων, και θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που ληφθούν με τα σημαντικά ύψη αποκρίσεων που υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση των ροπών, στο προηγούμενο κεφάλαιο.

6.1 Διακριτοποίηση Φάσματος

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το φάσμα *Bretschneider* το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση των πραγματικών κυματισμών. Παρατηρούμε πως το φάσμα επεκτείνεται σχεδόν ασυμπτωτικά με τον άξονα των συχνοτήτων για ένα πολύ μεγάλο εύρος, με πάρα πολύ μικρές τιμές, αλλά όχι μηδενικές. Δεδομένου πως το λογισμικό *SWAN2* μπορεί να δεχθεί έως 20 σημεία συχνότητας και πλάτους κυματισμού, θα πρέπει να γίνει σωστή επιλογή των διακριτών σημείων με τα οποία θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός.



Γράφημα 6.1: Το φάσμα κυματισμού Bretschneider για κυματισμό σημαντικού ύψους 1.4 m και περίοδο κορυφής 5.4 s

Η πιο λογική σκέψη είναι πως τα σημεία που ενδιαφέρουν την συγκεκριμένη περίπτωση είναι αυτά στα οποία υπάρχει αλληλοεπικάλυψη των καμπυλών *RAO* και του

φάσματος. Για αυτόν τον λόγο, λαμβάνουμε υπ' όψιν το εύρος περιόδων από 1 sec έως 16 sec, που αντιστοιχεί σε εύρος συχνοτήτων από 0.3927 rad/s έως 6.2832 rad/s.

Στην συνέχεια, για κάθε μία από τις συχνότητες που θα ληφθούν υπ' όψιν μέσα στο εύρος που αναφέρθηκε παραπάνω, θα πρέπει να υπολογιστεί το αντίστοιχο πλάτος κύματος. Ισχύει (Lewis, 1988):

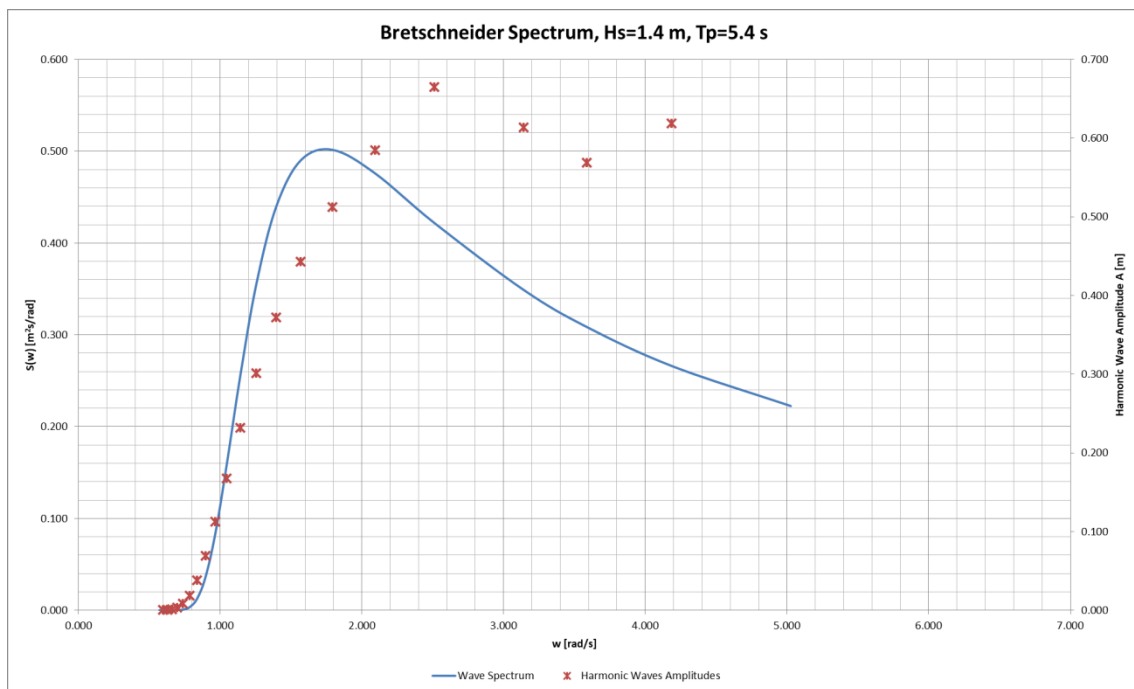
$$\alpha = \sqrt{2 * S(\omega)\delta\omega} \quad (6.1.1)$$

Όπου: α το πλάτος του κυματισμού, σε μέτρα

$S(\omega)$ η τιμή του φάσματος του κυματισμού

$\delta\omega$ το εύρος των συχνοτήτων που συμπεριλαμβάνεται από το α

Καθώς η καμπύλη του φάσματος κυματισμού αναπαριστά άπειρες ενδιάμεσες συχνότητες, και αυτή την στιγμή είναι αναγκαία η διακριτοποίησή της, κάθε πλάτος κυματισμού που θα υπολογίζεται θα αναπαριστά όχι μόνο μία συχνότητα, αλλά ένα εύρος συχνοτήτων. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται το μέρος του φάσματος που θα ληφθεί υπ' όψιν, καθώς και οι τιμές που υπολογίστηκαν για τα πλάτη κυματισμού.

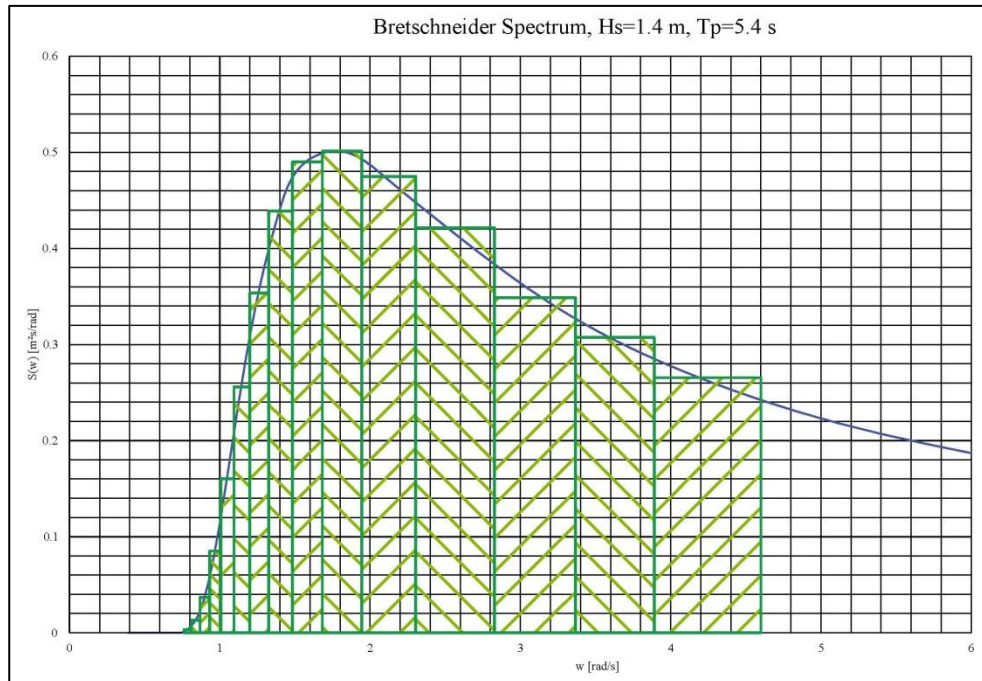


Γράφημα 6.2: Η διακριτοποίηση του εύρους των συχνοτήτων και τα αντίστοιχα πλάτη κυματισμού

Καθώς στο λογισμικό πρέπει να δοθούν 20 περίοδοι κυματισμού, και σε κάθε περίοδο αντιστοιχεί σε ένα εύρος, τότε για την διακριτοποίηση λαμβάνονται υπ' όψιν 22 περίοδοι, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα. Η κάθε περίοδος που παρουσιάζεται, πλην την μέγιστη και την ελάχιστη, αναλαμβάνει την «εκπροσώπηση» του μισού διαστήματος αριστερά και του μισού διαστήματος δεξιά της¹⁰.

T	w	S(w)	dw	A
[s]	[rad/s]	[m ² *s/rad]	[rad/s]	[m]
11.00	0.571	0.000		
10.50	0.598	0.000	0.029	0.00004
10.00	0.628	0.000	0.031	0.00022
9.50	0.661	0.000	0.035	0.00087
9.00	0.698	0.000	0.039	0.00285
8.50	0.739	0.001	0.044	0.00785
8.00	0.785	0.003	0.049	0.01849
7.50	0.838	0.013	0.056	0.03790
7.00	0.898	0.037	0.064	0.06876
6.50	0.967	0.084	0.075	0.11225
6.00	1.047	0.160	0.088	0.16745
5.50	1.142	0.256	0.105	0.23155
5.00	1.257	0.356	0.127	0.30082
4.50	1.396	0.440	0.157	0.37180
4.00	1.571	0.491	0.199	0.44236
3.50	1.795	0.502	0.262	0.51244
3.00	2.094	0.476	0.359	0.58452
2.50	2.513	0.422	0.524	0.66455
2.00	3.142	0.349	0.539	0.61313
1.75	3.590	0.308	0.524	0.56826
1.50	4.189	0.266	0.718	0.61807
1.25	5.027	0.223		

¹⁰ π.χ. Η περίοδος των 6.00 sec εκπροσωπεί το διάστημα από $(6+6.5)/2=6.25$ sec (≈ 1.00531 rad/s) έως $(5.50+6)/2=5.75$ sec (≈ 1.0926 rad/s). Αυτό μας δίνει ένα $\Delta\omega \approx 0.087418 \approx 0.088$ rad/s. Οπότε, η περίοδος των 6.00 sec εκπροσωπεί το διάστημα από 6.25 έως 5.75 sec με $\Delta\omega \approx 0.088$ rad/s και αντίστοιχο πλάτος κυματισμού 0.16745 m.



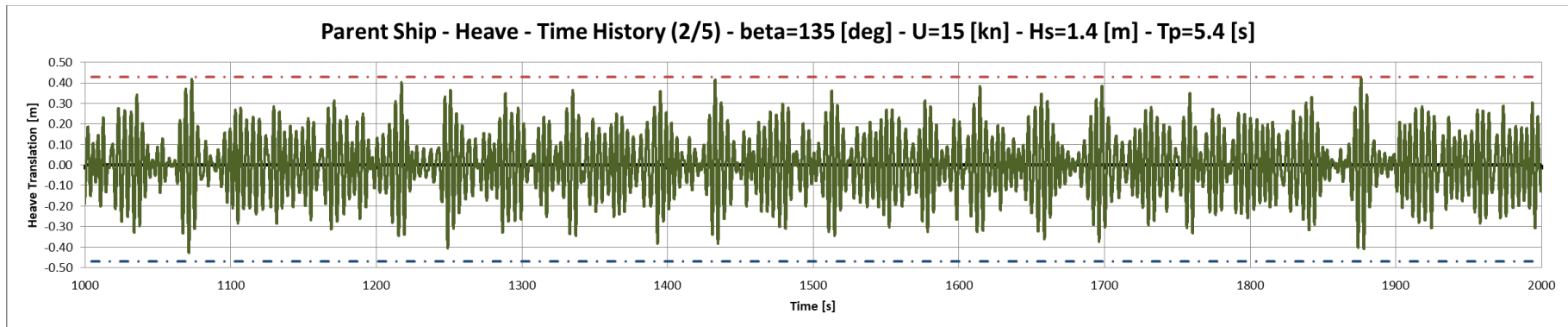
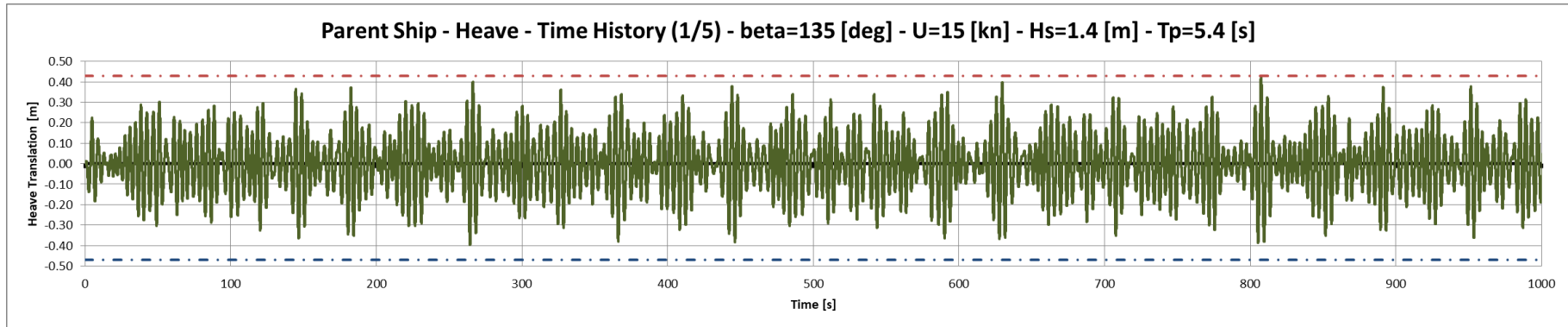
Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως οι συχνότητες οι οποίες αναφέρονται είναι οι συχνότητες του κυματισμού, και όχι συνάντησης.

Τα παραπάνω δεδομένα (αντιστοιχία περιόδου με πλάτος κυματισμού), από την περίοδο των 1.5 sec έως 10.5 sec θα χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό για την αναπαράσταση του φάσματος. Θα πρέπει επίσης να παρατηρηθεί πως η διακριτοποίηση είναι πυκνότερη στην περιοχή της κορυφής του φάσματος. Τέλος, να σημειωθεί πως θα χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα, τα οποία παρουσιάστηκαν παραπάνω, και για τα δύο πλοία.

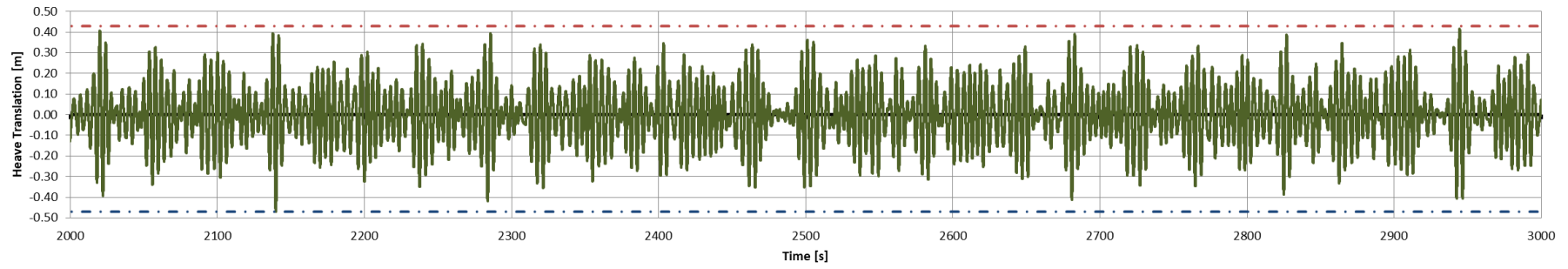
6.2 Πατρικό Πλοίο

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που λάβαμε για τις αποκρίσεις του πατρικού πλοίου. Η προσομοίωση διήρκησε 5000 *sec* (83.3 λεπτά της ώρας), και αποτελέσματα για την θέση του πλοίου λαμβάνονταν κάθε 0.005 *sec*. Αυτό σημαίνει πως από τον υπολογισμό λήφθηκαν 1000000 τιμές για κάθε απόκριση. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι αποκρίσεις σε σχέση με τον χρόνο. Με κόκκινη και μπλε γραμμή στο γράφημα παρουσιάζονται οι ανώτατες και οι ελάχιστες τιμές των αποκρίσεων.

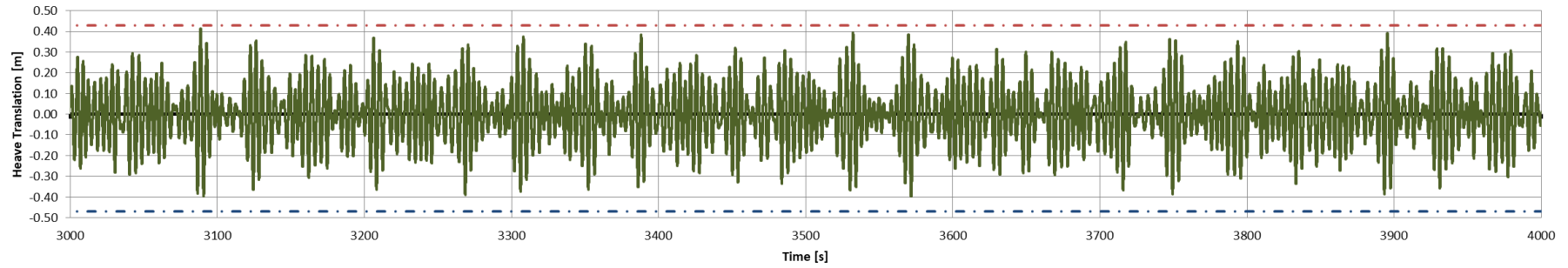
6.2.1 Heave

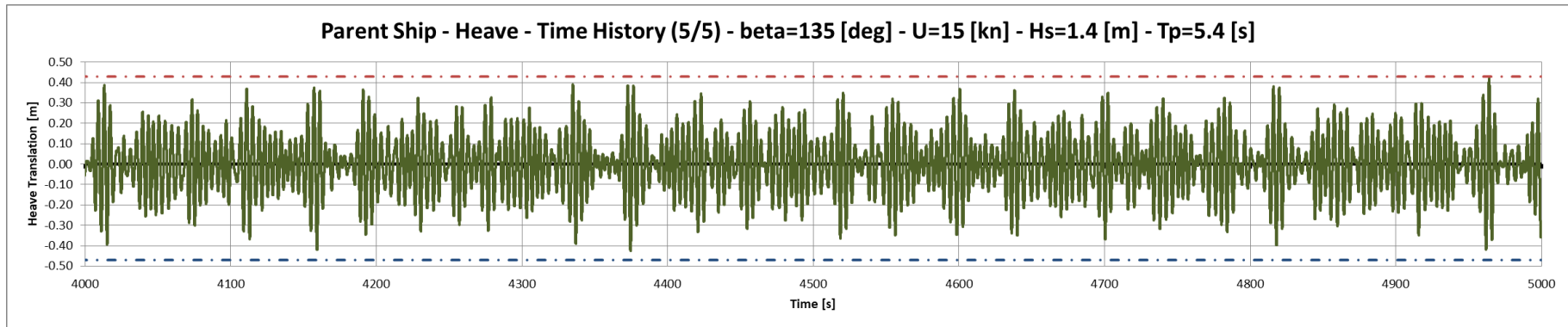


Parent Ship - Heave - Time History (3/5) - beta=135 [deg] - U=15 [kn] - Hs=1.4 [m] - Tp=5.4 [s]



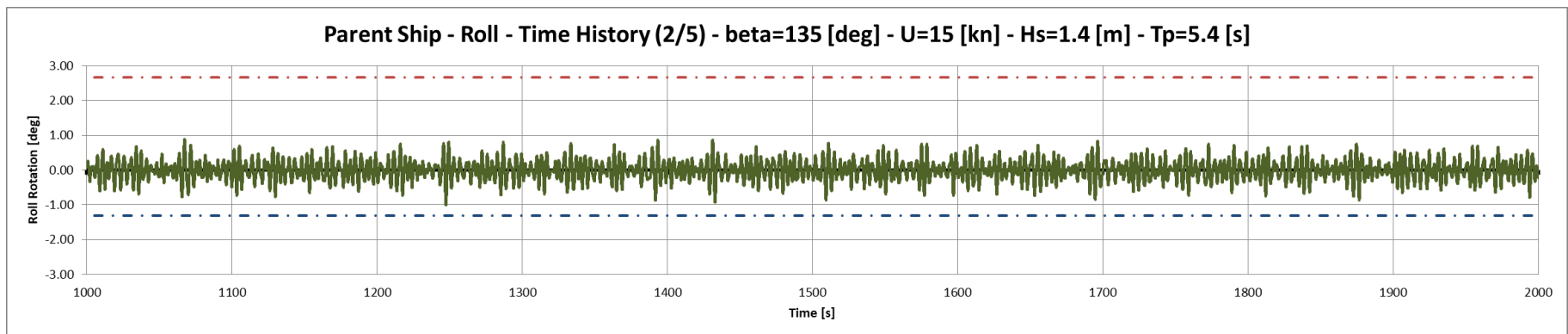
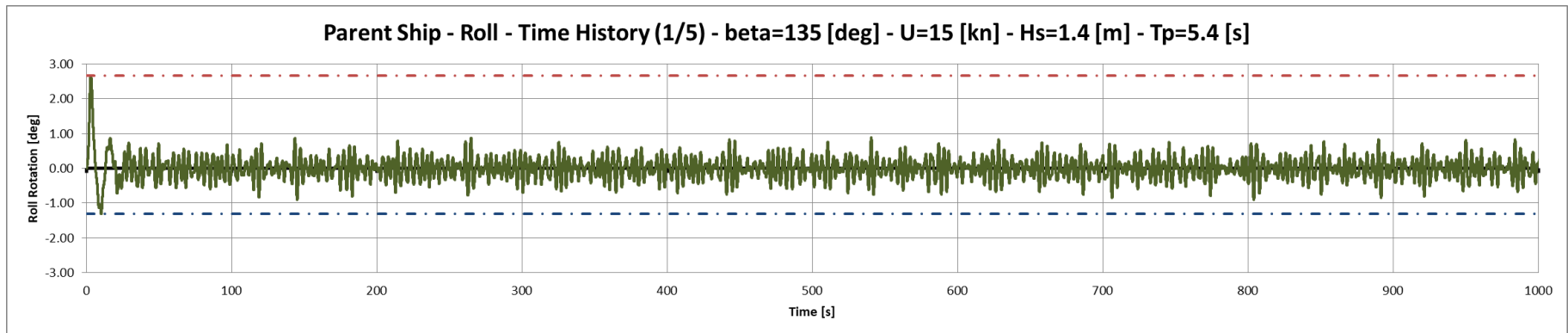
Parent Ship - Heave - Time History (4/5) - beta=135 [deg] - U=15 [kn] - Hs=1.4 [m] - Tp=5.4 [s]

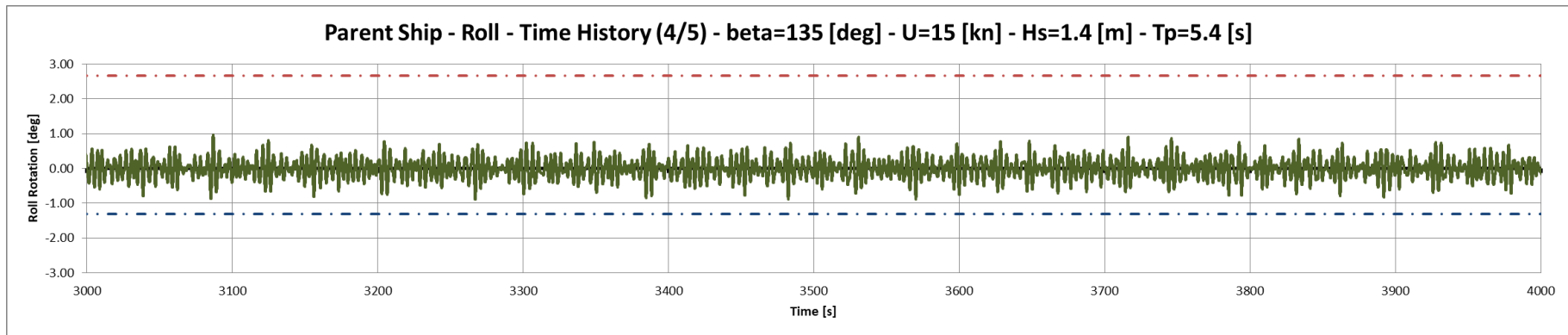
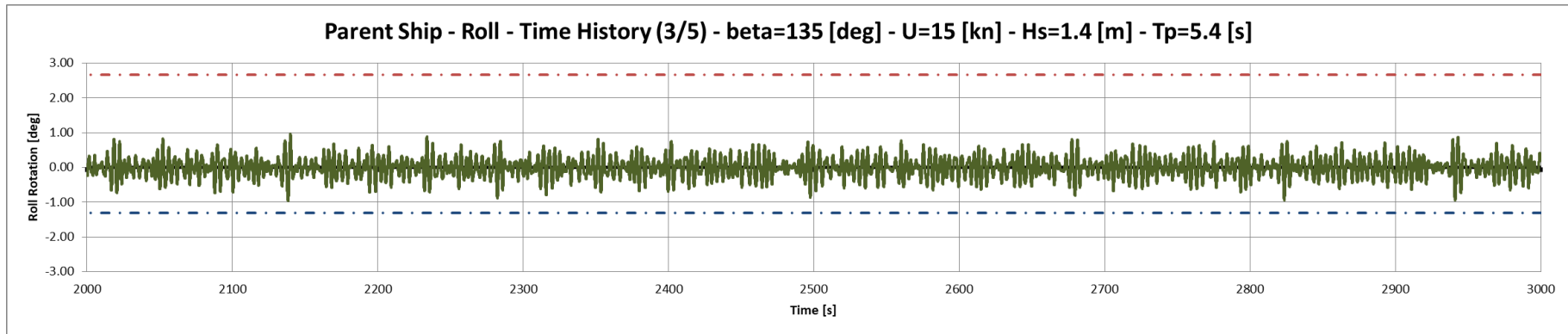


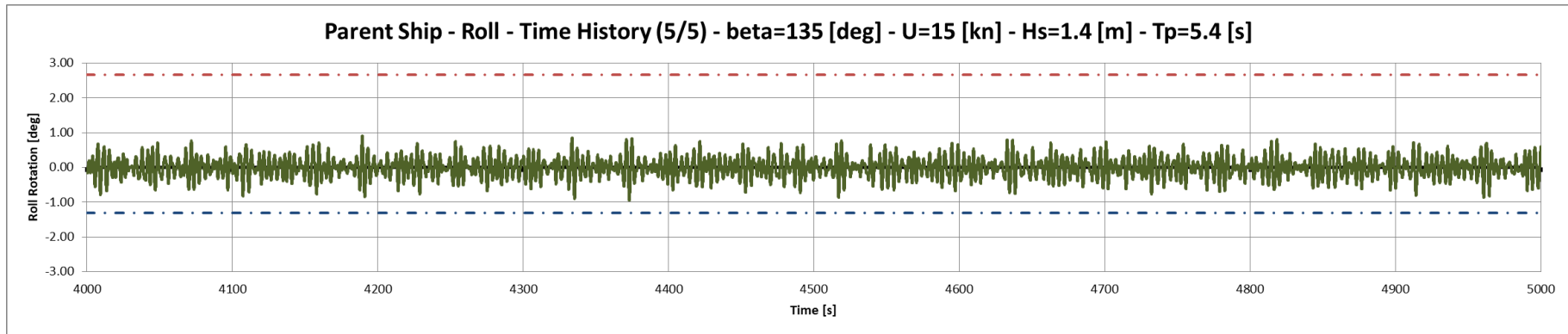


Γράφημα 6.3: Πραγματοποίηση αποκρίσεων Heave για το πατρικό πλοίο

6.2.2 Roll

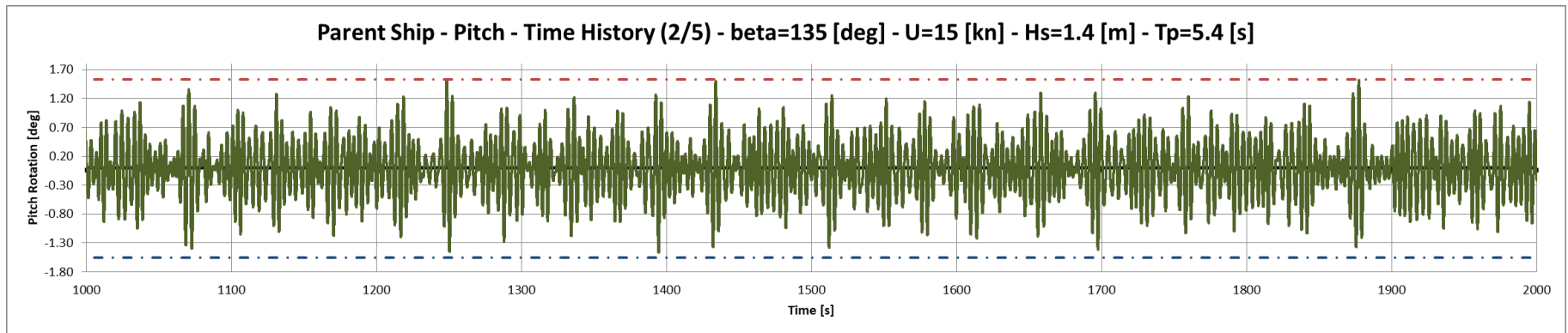
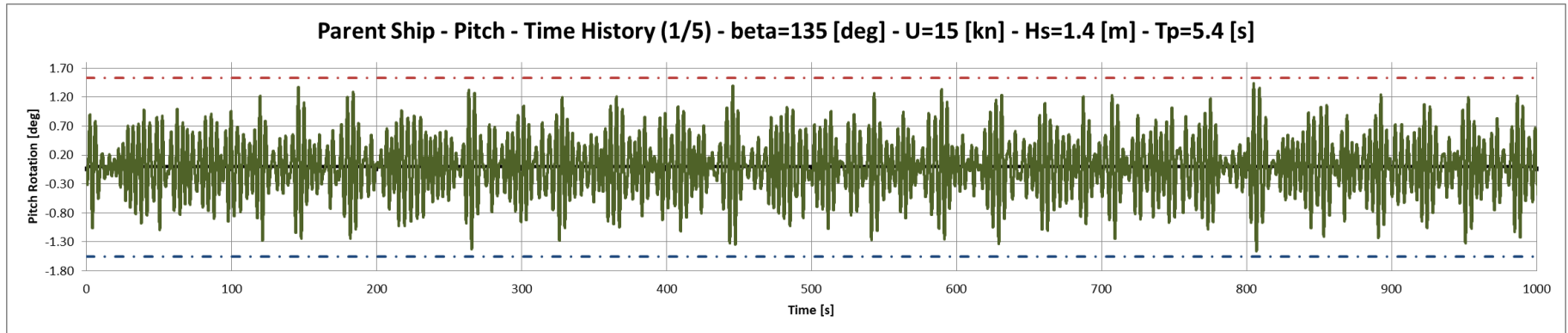




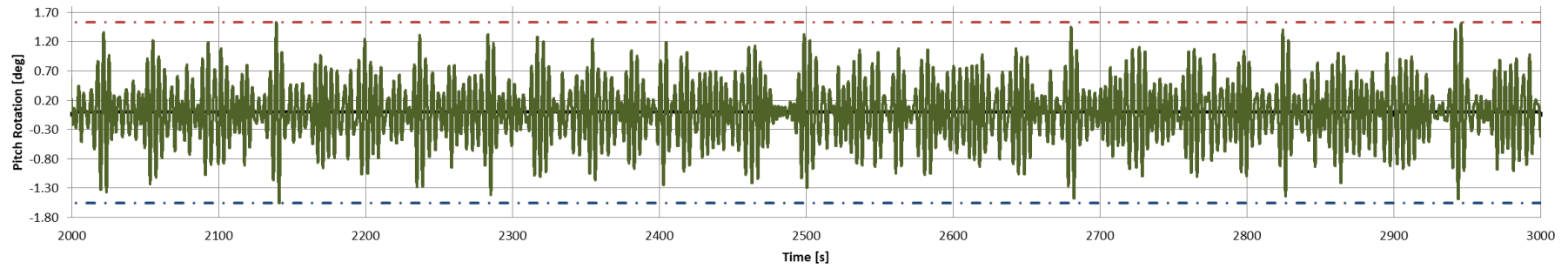


Γράφημα 6.4: Πραγματοποίηση αποκρίσεων Roll για το πατρικό πλοίο

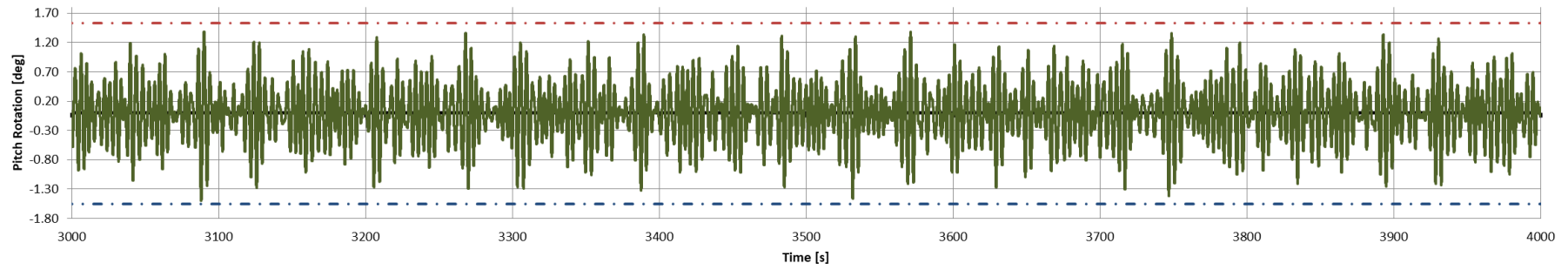
6.2.3 Pitch

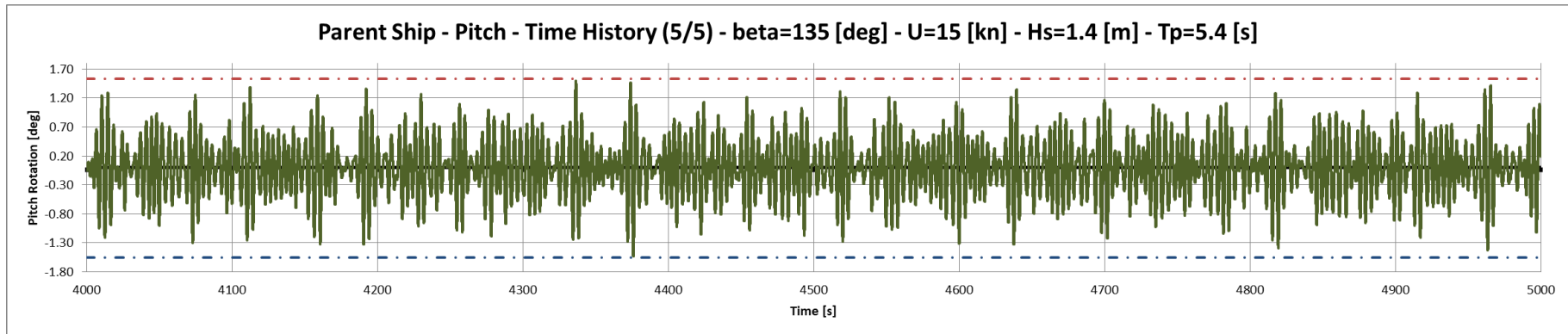


Parent Ship - Pitch - Time History (3/5) - beta=135 [deg] - U=15 [kn] - Hs=1.4 [m] - Tp=5.4 [s]



Parent Ship - Pitch - Time History (4/5) - beta=135 [deg] - U=15 [kn] - Hs=1.4 [m] - Tp=5.4 [s]





Γράφημα 6.5: Πραγματοποίηση αποκρίσεων Pitch για το πατρικό πλοίο

6.2.4 Υπολογισμός Σημαντικού Ύψους Απόκρισης

Από τα δεδομένα του κυματισμού που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι δυνατόν να υπολογιστούν τα σημαντικά ύψη αποκρίσεων. Στην συνέχεια, αυτά θα συγκριθούν με τις τιμές που λαμβάνονται από τον υπολογισμό που κάνει χρήση των ροπών m_0 . Τα τελευταία θα παρουσιάζονται ως «θεωρητικές τιμές».

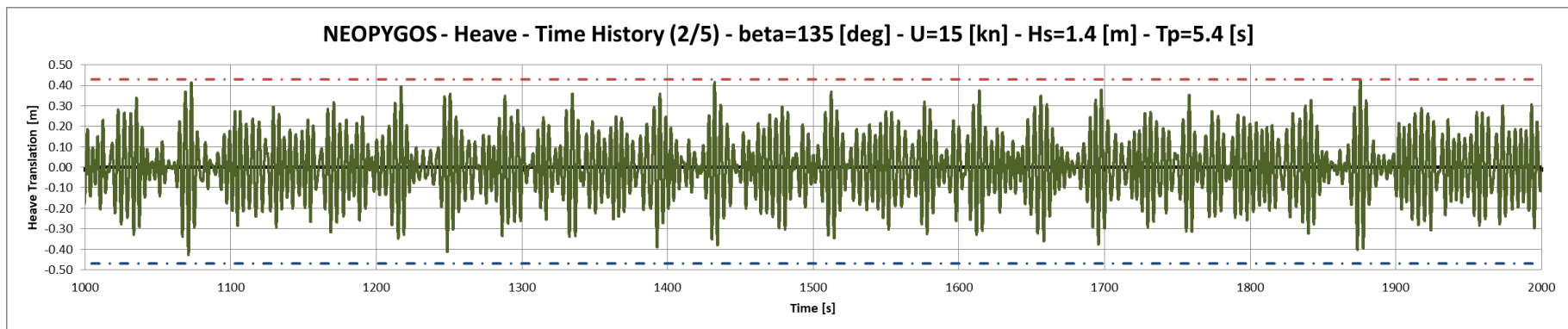
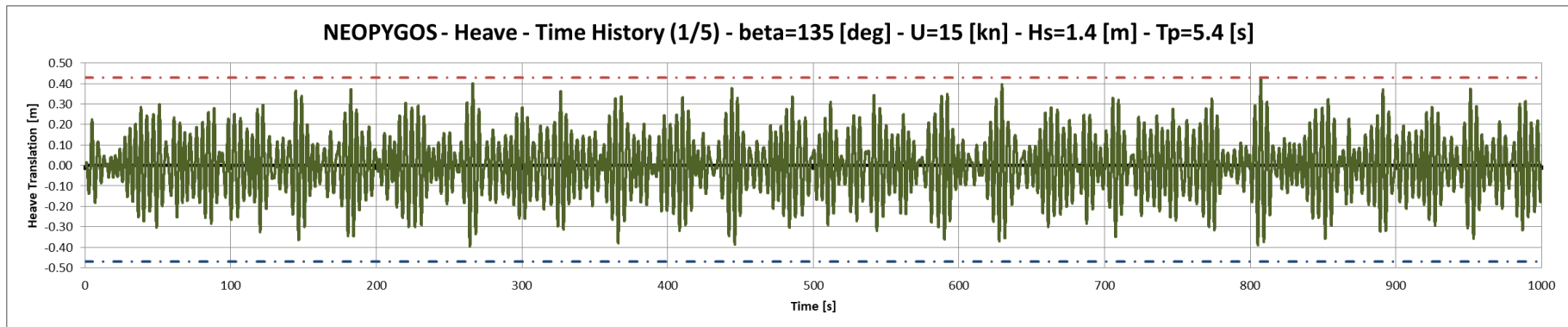
	Translation / Rotation	Theoretical $\xi^{1/3}$	Calculated $\xi^{1/3}$	Diff. %
Parent Ship	Heave	0.5222 [m]	0.53822 [m]	3.07 %
	Roll	1.2543 [deg]	1.0709 [deg]	14.62 %
	Pitch	1.9058 [deg]	1.8070 [deg]	5.184%

Παρατηρούνται μεγάλες σχετικά διαφορές μεταξύ των θεωρητικών και των υπολογισθέντων τιμών. Αυτό συμβαίνει πιθανώς λόγω της διακριτοποίησης του φάσματος και του περιορισμού των 20 συχνοτήτων που έχουμε λόγω του λογισμικού.

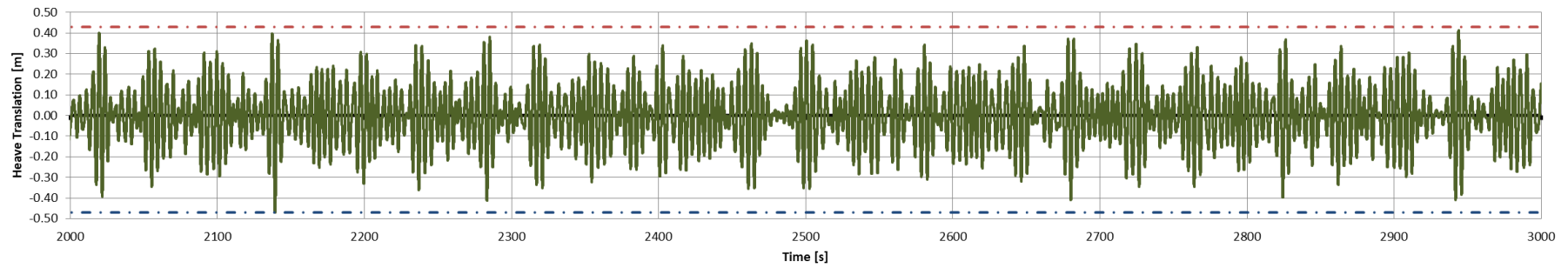
6.3 NEOPYGOS

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που λάβαμε για τις αποκρίσεις του πλοίου “NEOPYGOS”. Η προσομοίωση διήρκησε 5000 *sec* (83.3 λεπτά της ώρας), ομοίως με το πατρικό πλοίο, και αποτελέσματα για την θέση του πλοίου λαμβάνονταν κάθε 0.005 *sec*. Αυτό σημαίνει πως από τον υπολογισμό λήφθηκαν 100000000 τιμές για κάθε απόκριση. Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται οι αποκρίσεις σε σχέση με τον χρόνο. Με κόκκινη και μπλε γραμμή στο γράφημα παρουσιάζονται οι ανώτατες και οι ελάχιστες τιμές των αποκρίσεων.

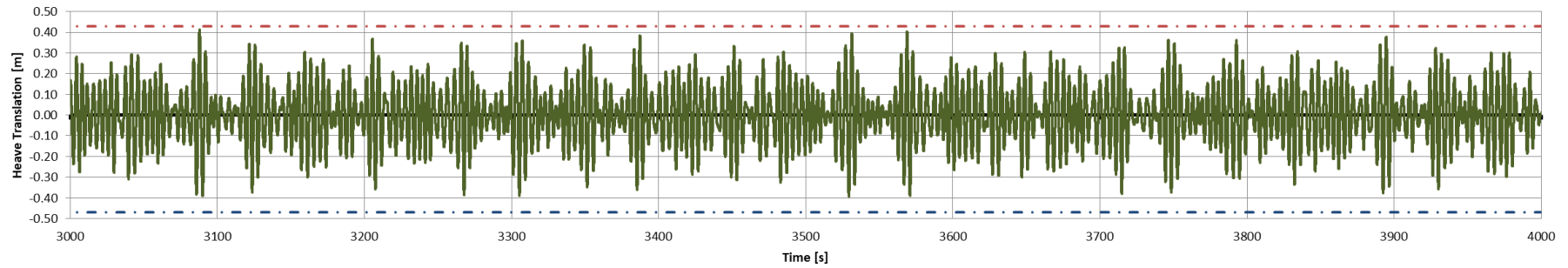
6.3.1 Heave

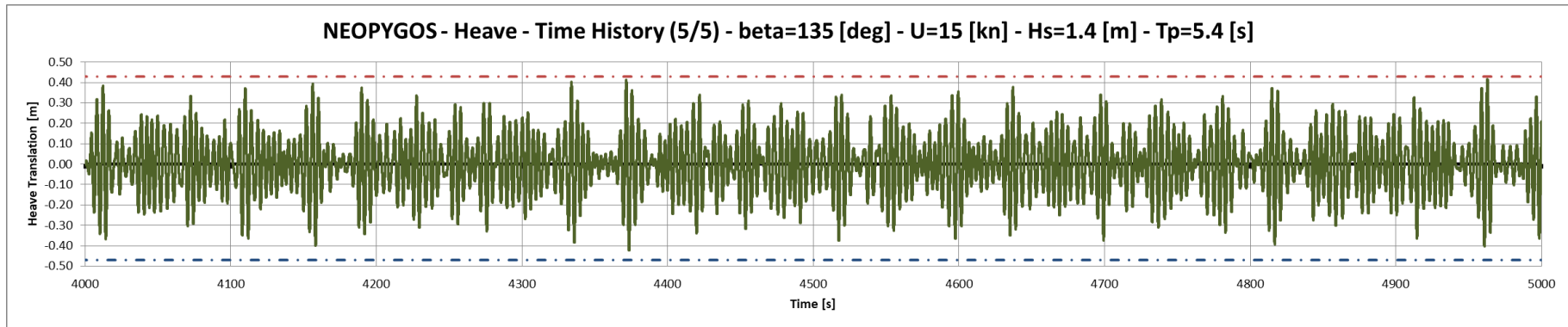


NEOPYGOS - Heave - Time History (3/5) - beta=135 [deg] - U=15 [kn] - Hs=1.4 [m] - Tp=5.4 [s]



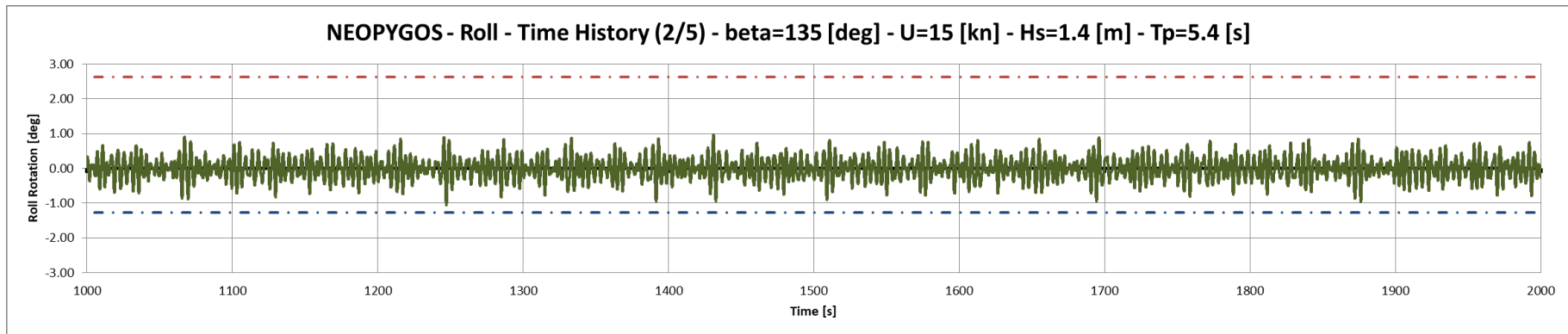
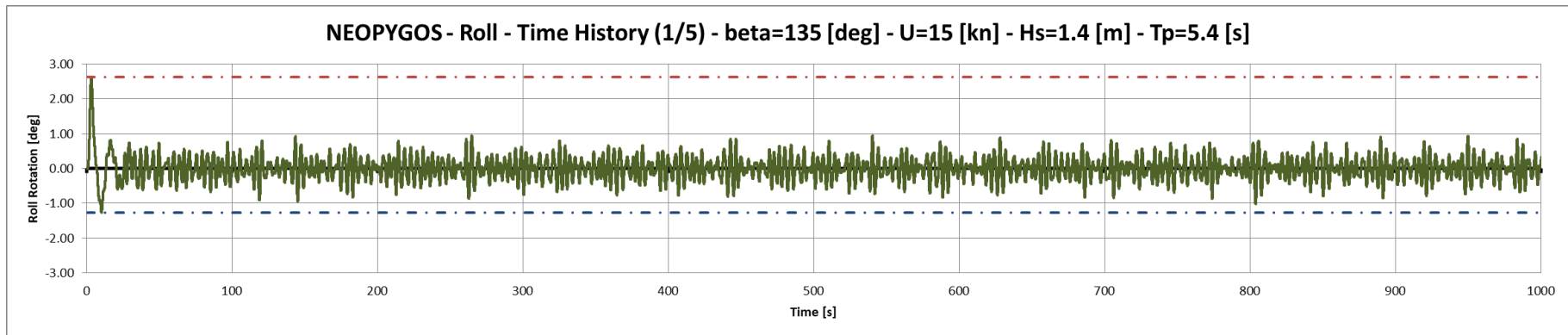
NEOPYGOS - Heave - Time History (4/5) - beta=135 [deg] - U=15 [kn] - Hs=1.4 [m] - Tp=5.4 [s]

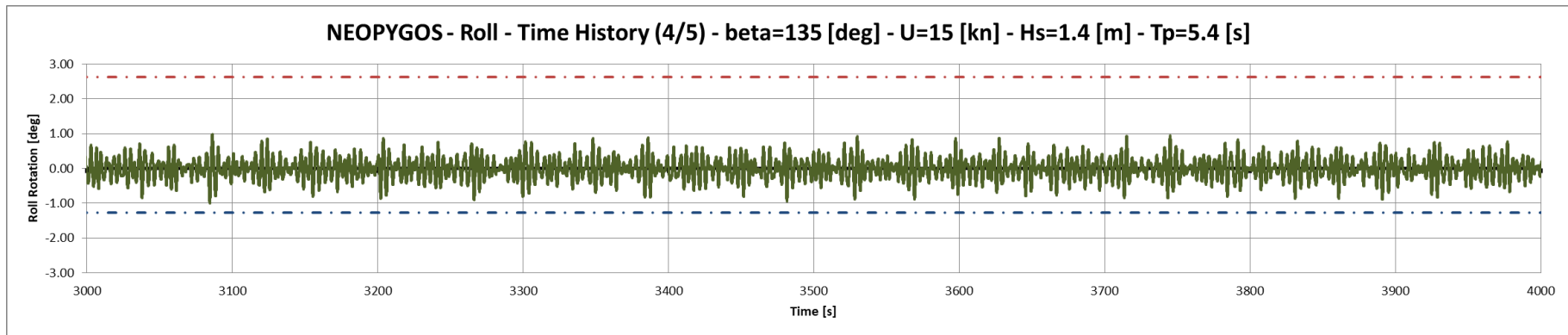
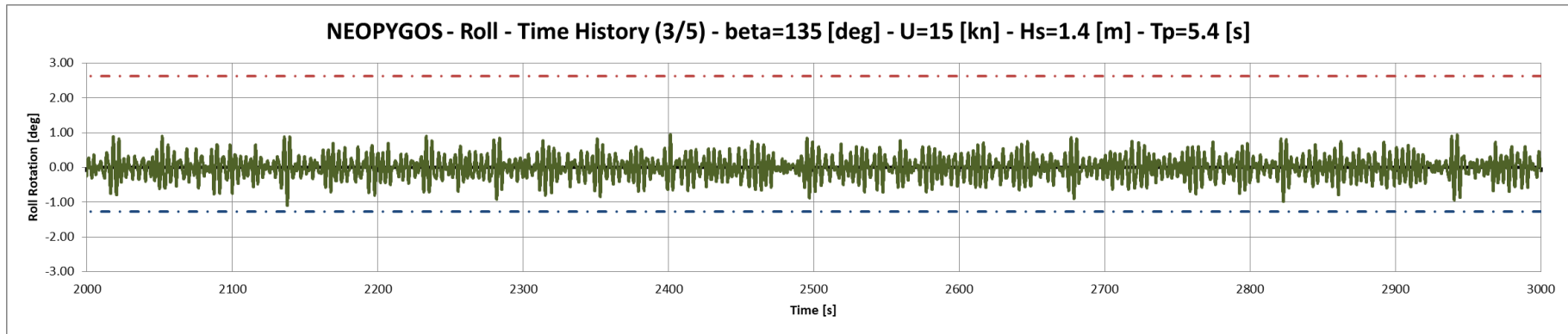


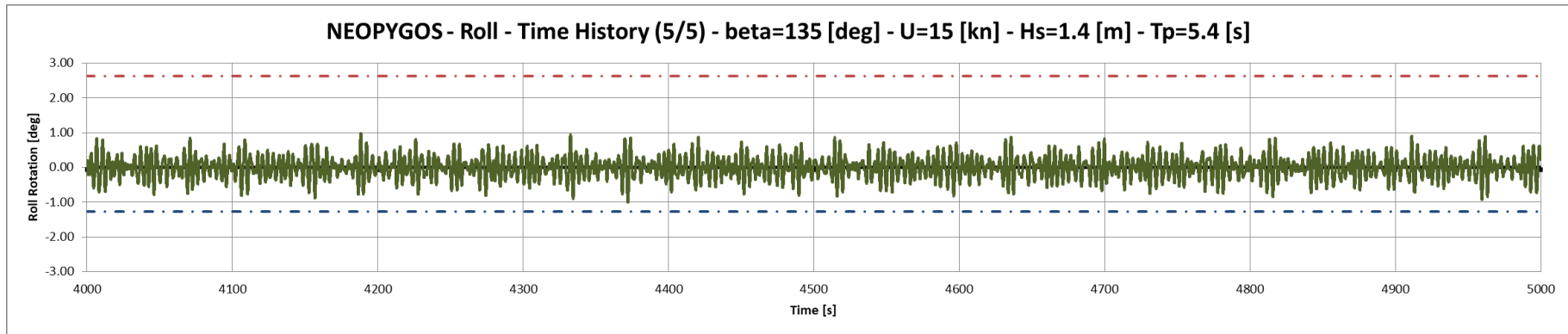


Γράφημα 6.6: Πραγματοποίηση αποκρίσεων Heave για το πλοίο “NEOPYGOS”

6.3.2 Roll

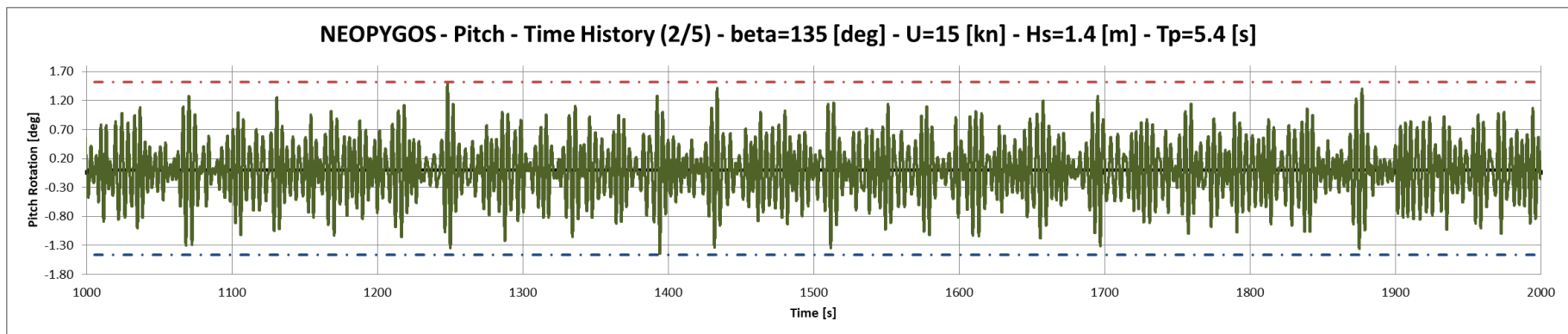
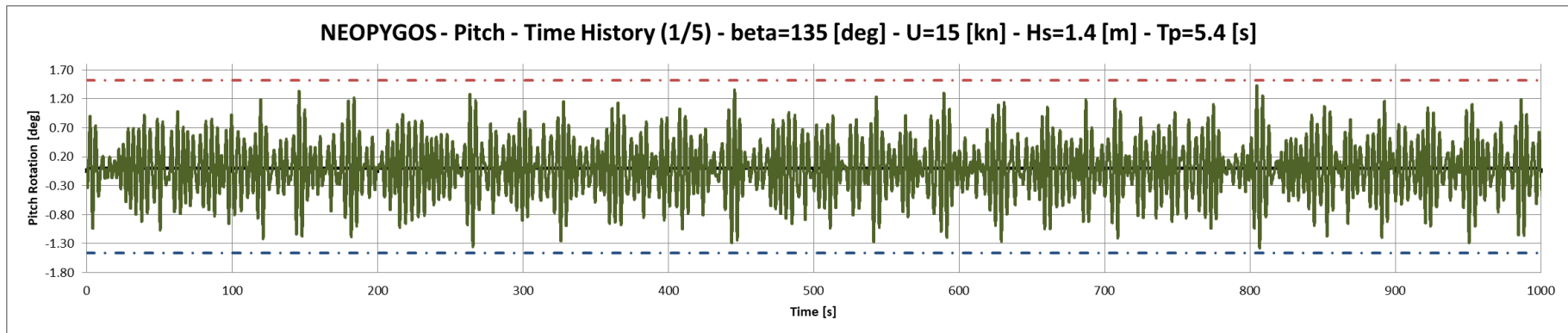


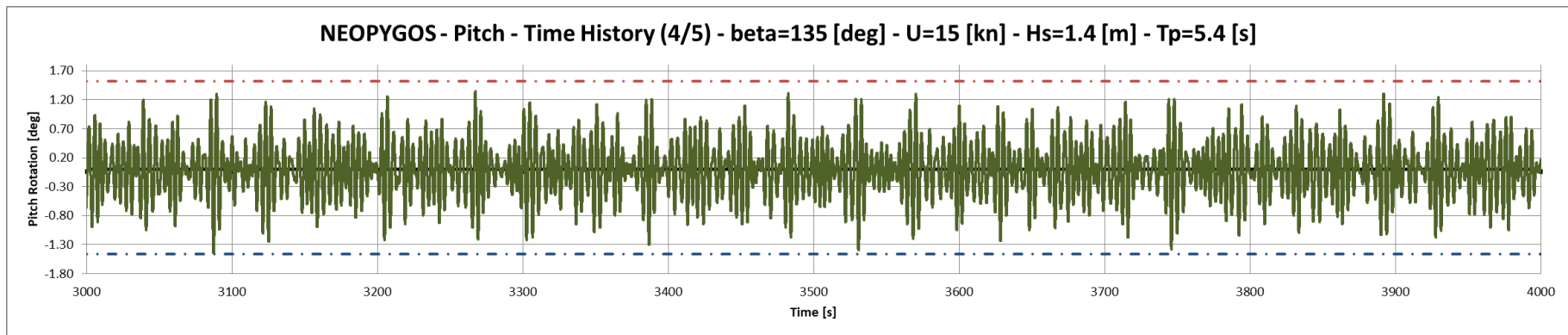
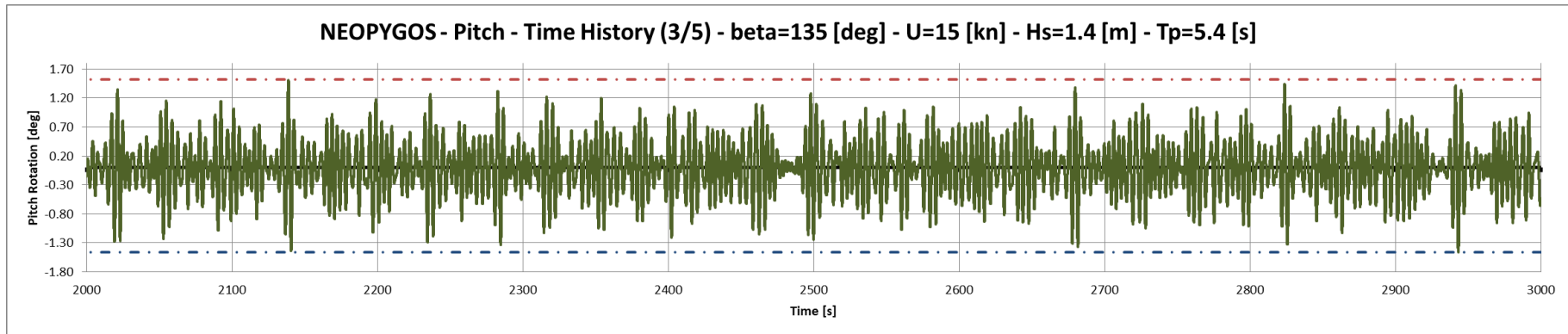


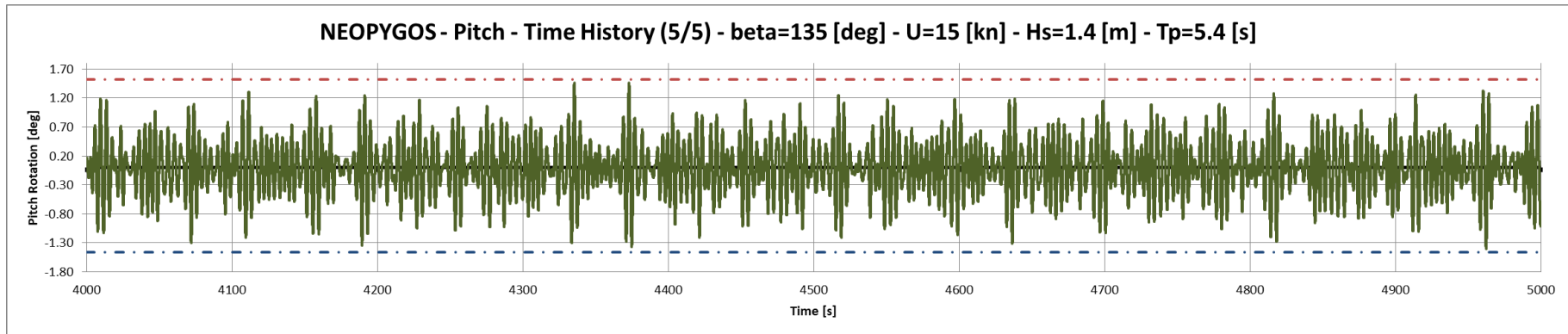


Γράφημα 6.7: Πραγματοποίηση αποκρίσεων Roll για το πλοίο "NEOPYGOS"

6.3.3 Pitch







Γράφημα 6.8: Πραγματοποίηση αποκρίσεων Pitch για το πλοίο “NEOPYGOS”

6.3.4 Υπολογισμός Σημαντικού Ύψους Απόκρισης

Από τα δεδομένα του κυματισμού που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είναι δυνατόν υπολογίζεται το σημαντικό ύψος της κάθε απόκρισης. Ομοίως με πριν, στην συνέχεια συγκρίνονται με τις τιμές που υπολογίστηκαν κάνοντας χρήση των ροπών των φασμάτων απόκρισης.

	Translation / Rotation	Theoretical $\xi^{1/3}$	Calculated $\xi^{1/3}$	Diff. %
NEOPYGOS	Heave	0.5182 [m]	0.53481 [m]	3.205 %
	Roll	1.3727 [deg]	1.1369 [deg]	17.178 %
	Pitch	1.7995 [deg]	1.7174 [deg]	4.562 %

6.4 Σύγκριση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

	Translation / Rotation	Theoretical $\xi^{1/3}$	Calculated $\xi^{1/3}$	Diff. %
Parent Ship	Heave	0.5222 [m]	0.53822 [m]	3.07 %
	Roll	1.2543 [deg]	1.0709 [deg]	14.62 %
	Pitch	1.9058 [deg]	1.8070 [deg]	5.184%
NEOPYGOS	Heave	0.5182 [m]	0.53481 [m]	3.205 %
	Roll	1.3727 [deg]	1.1369 [deg]	17.178 %
	Pitch	1.7995 [deg]	1.7174 [deg]	4.562 %

Όπως και στην περίπτωση του πατρικού πλοίου, και σε αυτή παρουσιάζονται διαφορές μεταξύ των θεωρητικών και των υπολογισμένων τιμών. Παρόλα αυτά μπορούμε να δούμε πως οι διαφορές ανά απόκριση είναι κοντινές, πράγμα που ενισχύει την θεωρία πως παρουσιάζονται λόγω της διακριτοποίησης του φάσματος, καθώς υπενθυμίζεται πως και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το ίδιο φάσμα και παρουσιάστηκε με τον ίδιο τρόπο. Σημειώνεται επίσης πως στην περίπτωση του *roll*, υπάρχει μεγαλύτερη διαφορά απ' ότι στις άλλες δύο κινήσεις.

7. Υπολογισμός Επιταχύνσεων

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η παρουσίαση των επιταχύνσεων που παρουσιάζουν τα δύο πλοία στην θέση της γέφυρας, όπως αυτά υπολογίστηκαν από το λογισμικό SWAN2. Θεωρώντας πως ένας τυπικός παρατηρητής βρίσκεται σε ύψος 1.7 μέτρα πάνω από το κατάστρωμα, και το κατάστρωμα της γέφυρας βρίσκεται 12.15 m πάνω από την *Base Line*, με την θέση του πηδαλιούχου περίπου στον νομέα 90, έχουμε τις παρακάτω αποστάσεις:

- Απόσταση από *midship*: 20.00 m.
- Ύψος από *Waterline*: $12.15\text{ m} - 3.496^{11}\text{ m} + 1.70\text{ m} = 10.354\text{ m}$.

Για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων, θα χρησιμοποιηθεί το φάσμα των αποκρίσεων, το οποίο δόθηκε ως δεδομένο στο λογισμικό με τον τρόπο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι αποκρίσεις του *pitch* και του *heave* θα ληφθούν υπ' όψιν.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία (Πολίτης, 2019) ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις στην περίπτωση όπου χρειάζεται να υπολογισθούν οι κάθετες κινήσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις σε ένα σημείο κάνοντας χρήση της πραγματοποίησης των κινήσεων *heave* και *pitch*:

$$\tilde{\xi}_{VA} = \tilde{\xi}_3 - x_1 \tilde{\xi}_5 \quad (7.1.1)$$

$$\frac{d\tilde{\xi}_{VA}}{dt} = i\omega(\tilde{\xi}_3 - x_1 \tilde{\xi}_5) \quad (7.1.2)$$

$$\frac{d^2\tilde{\xi}_{VA}}{dt^2} = (i\omega)^2 (\tilde{\xi}_3 - x_1 \tilde{\xi}_5) \quad (7.1.3)$$

Οπότε και ισχύει:

$$RAO_{\xi_{VA}} = \left| \frac{\tilde{\xi}_{VA}}{a} \right| = \left| \frac{\tilde{\xi}_3}{a} - \frac{x_1 \tilde{\xi}_5}{a} \right| \quad (7.1.4)$$

$$RAO_{\dot{\xi}_{VA}} = \omega RAO_{\xi_{VA}} \quad (7.1.5)$$

$$RAO_{\ddot{\xi}_{VA}} = \omega^2 RAO_{\xi_{VA}} \quad (7.1.6)$$

¹¹ Το βύθισμα του πλοίου κατά τους υπολογισμούς

7.2 Υπολογισθείσες Επιταχύνσεις

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των κάθετων και των οριζόντιων επιταχύνσεων, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το λογισμικό SWAN2.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε για τα RAOs των επιταχύνσεων για τα δύο πλοία. Στην συνέχεια, στους επόμενους πίνακες, παρουσιάζονται οι τιμές του *RMS* και του σημαντικού ύψους επιτάχυνσης που υπολογίζονται.

<i>Parent Ship</i>				
<i>T</i>	<i>w</i>	<i>Long. Acc</i>	<i>Lat. Acc</i>	<i>Vert. Acc</i>
[s]	[rad/s]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
10.5	0.598	0.161	0.476	1.232
10	0.628	0.195	0.502	0.93
9.5	0.661	0.288	0.524	1.067
9	0.698	0.364	0.549	1.326
8.5	0.739	0.491	0.577	1.674
8	0.785	0.681	0.606	2.246
7.5	0.838	0.985	0.633	3.248
7	0.898	1.343	0.652	4.709
6.5	0.967	1.26	0.655	4.654
6	1.047	1.136	0.625	3.679
5.5	1.142	0.819	0.536	2.329
5	1.257	0.345	0.357	0.982
4.5	1.396	0.073	0.134	0.344
4	1.571	0.194	0.292	0.465
3.5	1.795	0.043	0.205	0.149
3	2.094	0.026	0.095	0.093
2.5	2.513	0.107	0.067	0.226
2	3.142	0.083	0.035	0.134
1.75	3.590	0.099	0.015	0.136
1.5	4.189	0.121	0.119	0.167

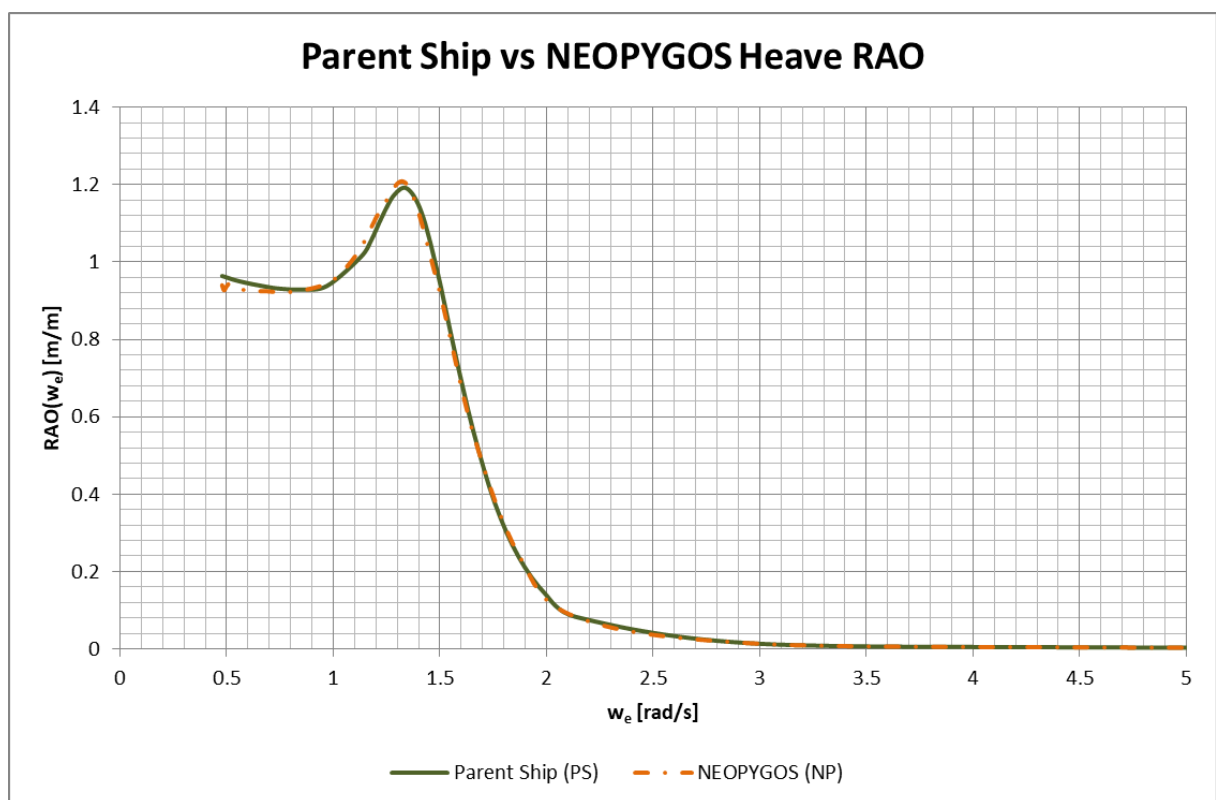
NEOPYGOS				
<i>T</i>	<i>w</i>	<i>Long. Acc</i>	<i>Lat. Acc</i>	<i>Vert. Acc</i>
<i>[s]</i>	<i>[rad/s]</i>	<i>[m/s²]</i>	<i>[m/s²]</i>	<i>[m/s²]</i>
10.5	0.598	0.057	0.533	1.401
10	0.628	0.213	0.562	0.919
9.5	0.661	0.293	0.589	1.098
9	0.698	0.368	0.619	1.357
8.5	0.739	0.497	0.652	1.716
8	0.785	0.686	0.686	2.301
7.5	0.838	0.983	0.717	3.303
7	0.898	1.311	0.737	4.69
6.5	0.967	1.176	0.734	4.482
6	1.047	1.048	0.686	3.463
5.5	1.142	0.81	0.558	2.291
5	1.257	0.369	0.316	1.025
4.5	1.396	0.062	0.103	0.328
4	1.571	0.199	0.355	0.466
3.5	1.795	0.038	0.136	0.128
3	2.094	0.055	0.045	0.107
2.5	2.513	0.128	0.16	0.253
2	3.142	0.088	0.082	0.123
1.75	3.590	0.063	0.099	0.088
1.5	4.189	0.087	0.095	0.122

Point: Bridge	Long. Acc. RMS	Significant Long. Acc. Height
	[m/s²]	[m/s²]
Parent Ship	0.9015 (0.092g)	3.6060 (0.368g)
NEOPYGOS	0.8897 (0.091g)	3.5587 (0.363g)
Difference		1.31%

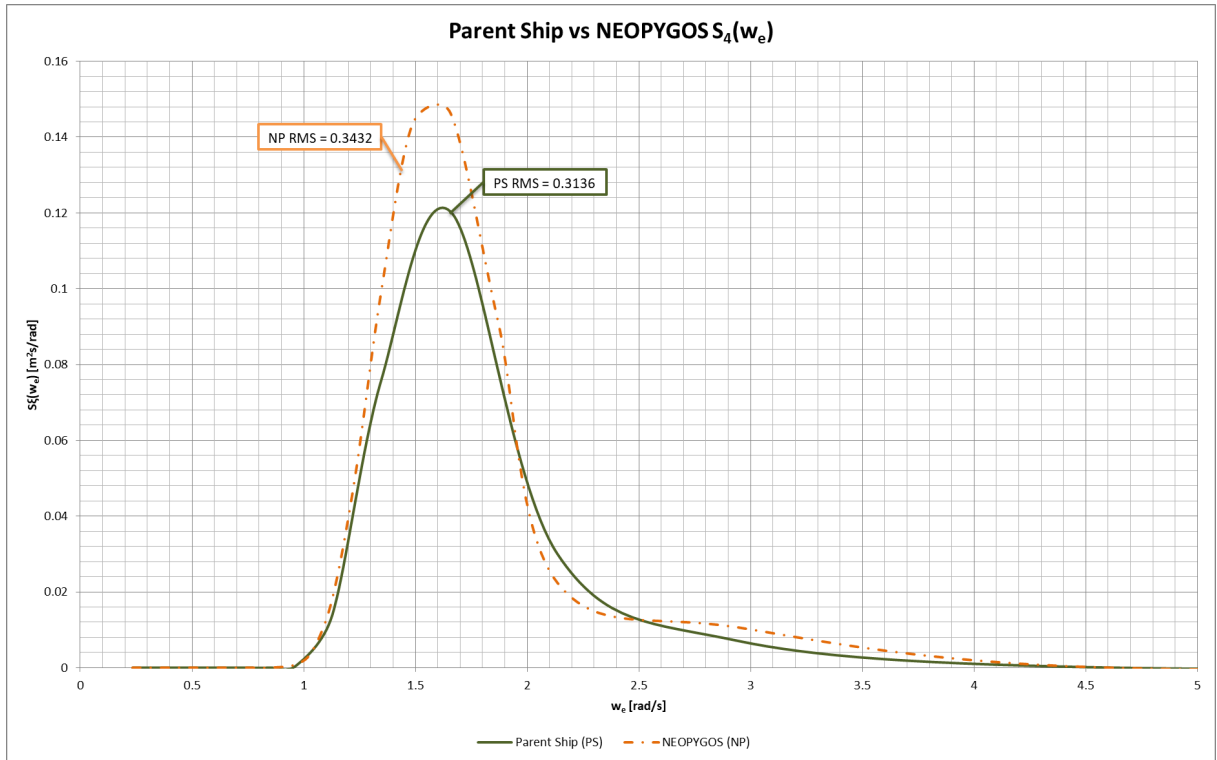
Point: Bridge	Lat. Acc. RMS	Significant Lat. Acc. Height
	[m/s²]	[m/s²]
Parent Ship	0.8155 (0.083g)	3.2618 (0.332g)
NEOPYGOS	0.8837 (0.090g)	3.5349 (0.360g)
Difference		8.37%

Point: Bridge	Vert. Acc. RMS	Significant Vert. Acc. Height
	[m/s²]	[m/s²]
Parent Ship	1.5417 (0.157g)	6.1667 (0.628g)
NEOPYGOS	1.5245 (0.155g)	6.0980 (0.621g)
Difference		1.11%

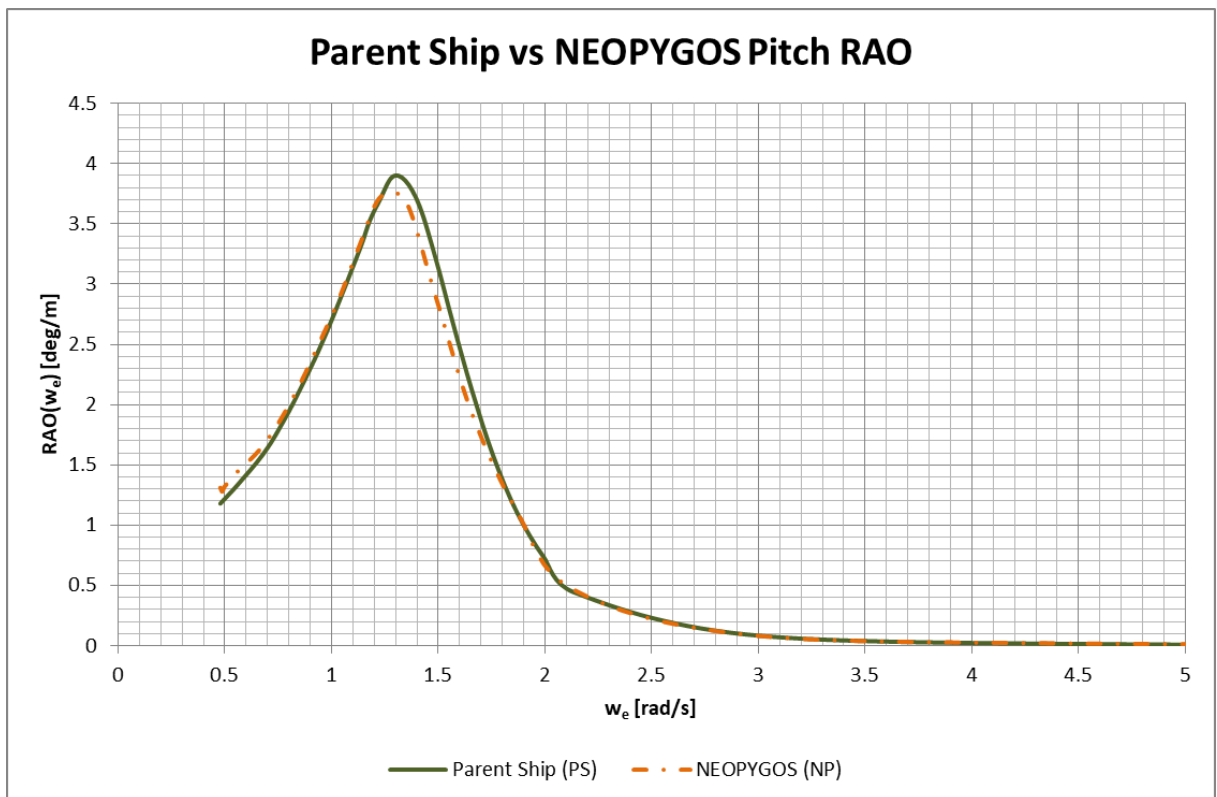
Παρατηρούμε πως η νέα σχεδίαση οδηγεί σε ελαφρώς μικρότερες επιταχύνσεις, πλην της περίπτωσης των εγκάρσιων επιταχύνσεων. Το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο καθώς σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο, το πλοίο *NEOPYGOS* παρουσίαζε μικρότερο *pitch*. Επίσης, το γεγονός πως δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των επιταχύνσεων αποδίδεται στο γεγονός πως οι διαφορές στα *RAOs* των δύο πλοίων είναι αμελητέες, όπως επίσης μπορούμε να δούμε στα γραφήματα 5.15 και 5.17, από το αντίστοιχο κεφάλαιο. Από το γράφημα 5.16 όμως, μπορεί κανείς να παρατηρήσει την διαφορά που ώθησε σε μεγαλύτερες εγκάρσιες ταλαντώσεις στην νέα σχεδίαση, καθώς το *Roll* του νέου πλοίου είναι αισθητά μεγαλύτερο.



Γράφημα 5.15: Σύγκριση των Heave RAO των πλοίων ως προς την συχνότητα συνάντησης



Γράφημα 5.16: Σύγκριση μεταξύ των φασμάτων αποκρίσεων Roll



Γράφημα 7.17: Σύγκριση των Pitch RAO των πλοίων ως προς την συχνότητα συνάντησης

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει επίσης να σημειωθεί πως σύμφωνα με τα κριτήρια που θέτονται από τον *Karppinen* (*Karppinen, 1987*), οι κάθετες επιταχύνσεις και των δύο πλοίων ξεπερνούν τα επιτρεπτά όρια, στην κατάσταση θάλασσας που μελετάται, όπως μπορούμε να δούμε και παρακάτω. Οι εγκάρσιες επιταχύνσεις και το *Roll* βρίσκονται κάτω από τις ανώτερες τιμές. Το πλοίο θεωρείται ως *Merchant Ship/RoRo*.

	Criteria	Parent Ship	NEOPYGOS
Vert. Acc. RMS (Bridge)	0.15g [m/s ²]	0.157g [m/s ²]	0.155g [m/s ²]
Lat. Acc. RMS (Bridge)	0.12g [m/s ²]	0.083g [m/s ²]	0.090g [m/s ²]
Roll RMS ¹²	6.0 [deg]	0.3136 [deg]	0.3432 [deg]

Πίνακας 7.4: Σύγκριση ληφθέντων τιμών με τα κριτήρια που προτείνονται από τον Karppinen

¹² Σύμφωνα με τον πίνακα 5.1 που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5

8. Συμπεράσματα

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που λάβαμε για τις αποκρίσεις των πλοίων σε αρμονικούς κυματισμούς (κεφάλαιο 4), καθώς και τις αποκρίσεις που αναμένεται να παρουσιάσουν τα πλοία στους κυματισμούς που προκύπτουν στην περιοχή όπου σχεδιάστηκαν να ταξιδεύουν (κεφάλαιο 5). Σημαντική παρατήρηση όμως είναι το γεγονός πως παρόλο που οι γάστρες διαφέρουν μεταξύ τους σε σημαντικό βαθμό, τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε για τις αποκρίσεις είναι σχετικά όμοια μεταξύ τους.

Ο κύριος λόγος όπου δεν παρατηρήθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο πλοίων, είναι ότι έχουν τις ίδιες βασικές διαστάσεις. Αυτή την εικασία μπορούμε να την βασίσουμε στις βιβλιογραφικές αναφορές *Tupper, (2004)*, *Cepowska and Cepowski, (2015)*, *Mohsen Khosravi Babadi and Hassan Ghassemi, (2013)* και *Cakici and Aydin, (2014)*. Οι ίδιες αναφορές έχουν αναλυθεί και στο κεφάλαιο 1.3 της εισαγωγής με περαιτέρω σχετικές λεπτομέρειες. Η κοινή γραμμή των παραπάνω αναφορών είναι το γεγονός πως σε ένα πλοίο οι βασικές του διαστάσεις έχουν εξέχον ρόλο στην συμπεριφορά του στους κυματισμούς, σε σημείο όπου ορισμένες εκ αυτών καταφέρνουν να κάνουν ικανοποιητικές προβλέψεις για την συμπεριφορά ενός πλοίου χωρίς να γνωρίζουν λεπτομέρειες της γεωμετρίας της γάστρας.

Το παραπάνω φυσικά γεγονός σημαίνει πως δεν θα μπορούσε κανείς να «διορθώσει» την υδροδυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου χωρίς ευρείας εκτάσεως μετασκευή, παρά μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό, αλλάζοντας ίσως το εκτόπισμά του με αλλαγή του βυθίσματός του.

Ακόμα όμως και λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω στοιχεία, ενδιαφέρον συνεχίζει να προκαλεί η διαφορά που παρατηρείται στην περίπτωση του *Roll*, η οποία και παρουσιάζεται στο Γράφημα 5.16. Είναι λογικό να εικαστεί πως η διαφορά αυτή οφείλεται στην διαφορά της κατανομής του όγκου στα δύο πλοία.

Μπορεί κανείς πολύ εύκολα να παρατηρήσει πως στην πρώτη περίπτωση, αυτή του πατρικού πλοίου, υπάρχει κατανομή όγκου της γάστρας μακριά από την *Center Line* σε αντίθεση με το νέο πλοίο όπου η μορφή της γάστρας στην πρύμνη είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη. Αυτό φυσικά οδηγεί σε μεγαλύτερη ροπή αδράνειας περί τον διαμήκη άξονα x , κάτι που με την σειρά του οδηγεί και σε μικρότερες αποκρίσεις *roll*.

9. Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η υδροδυναμική συμπεριφορά δύο όμοιων πλοίων όπου η γεωμετρία τους διαφέρει μόνο ως προς την μορφή της γάστρας τους. Κατά την πορεία της εργασίας όμως προέκυψαν περαιτέρω ερωτήματα που θα μπορούσαν να μελετηθούν. Το πιο σημαντικό ερώτημα που θα μπορούσε κάποιος να μελετήσει στο μέλλον είναι η συμπεριφορά του πλοίου στους πρυμναίους κυματισμούς, κάτι που δεν κατέστη δυνατόν με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, ενδιαφέρον θα είχε να επεκταθεί η παρούσα μελέτη μελετώντας την επίδραση που έχει ο άνεμος στις κινήσεις *roll*, λόγω των υπερκατασκευών.

Εκτός όμως από τα προβλήματα που αφορούν αποκλειστικά τις αποκρίσεις των πλοίων στους κυματισμούς, ενδιαφέρον επίσης θα παρουσίαζε η μελέτη του νέου πλοίου ως προς την άθικτή του ευστάθεια. Για αυτόν τον λόγο εμπεριέχονται, σε μορφή παραρτήματος, οι τιμές των *cross curves of stability* και τα υδροστατικά του.

Ως γνωστόν, παρόλο που η αλλαγή στην πρύμνη της γάστρας δεν επέφερε σημαντικές διαφορές στις αποκρίσεις του πλοίου στους κυματισμούς, μπορεί να επιφέρει αλλαγές στην ολική του αντίσταση πρόωσης, καθώς αυτή είναι πιο ευαίσθητη σε αλλαγές της μορφολογίας της γάστρας. Ενδιαφέρον λοιπόν θα είχε η μελέτη της αντίστασης των δύο πλοίων, με σκοπό την εύρεση αυτού με την μικρότερη αντίσταση.

Τέλος, φυσικά ενδιαφέρον θα παρουσίαζε και ο υπολογισμός των *RAOs* κάνοντας χρήση διαφορετικού λογισμικού, και σύγκριση των ληφθέντων αποτελεσμάτων με αυτά που υπολογίστηκαν από τον κώδικα *SWAN2*.

10. Βιβλιογραφία

- Bergdahl, L., 2008. Wave-Induced Loads and Ship Motions (No. 2009:1). Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- Bertram, V., 2012. Practical Ship Hydrodynamics. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097150-6.10001-6>
- Bertram, V., 1990. A Rankine Source Method for the Forward-Speed Diffraction Problem (No. 508). Technische Universitat Hamburg, Hamburg.
- Cakici, F., Aydin, M., 2014. Effects of hull form parameters on seakeeping for YFU gulet series with cruiser stern. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 6, 700–714. <https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0206>
- Cepowska, Ż., Cepowski, T., 2015. Seakeeping software for the analysis of a ship's seaworthiness. Scientific Journals of Maritime University of Szczecin 6.
- Cepowski, T., 2012. The prediction of the Motion Sickness Incidence index at the initial design stage. Scientific Journals of Maritime University of Szczecin 4.
- Cepowski, T., 2011. Modelling of sea keeping qualities of open-top container carriers in the preliminary design phase. Polish Maritime Research 18. <https://doi.org/10.2478/v10012-011-0008-9>
- Cepowski, T., 2008. Design Parameters Optimization of ROPAX Ferry Using Seakeeping Characteristics and Additional Wave Resistance. Problemy Eksploatacji 10.
- Chandrasekaran, S., 2015. Dynamic Analysis and Design of Offshore Structures, Ocean Engineering & Oceanography. Springer India, New Delhi. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2277-4>
- Chen, X., Zhu, R., Zhao, J., Zhou, W., Fan, J., 2018. Study on weakly nonlinear motions of ship advancing in waves and influences of steady ship wave. Ocean Engineering 150, 243–257. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.053>
- Cheng, A.H.-D., Cheng, D.T., 2005. Heritage and early history of the boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements 29, 268–302. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2004.12.001>
- Costabel, M., 1987. Principles of boundary element methods. Computer Physics Reports 6, 243–274. [https://doi.org/10.1016/0167-7977\(87\)90014-1](https://doi.org/10.1016/0167-7977(87)90014-1)
- Erickson, L., 1990. Panel Methods - An Introduction.
- Faltinsen, O.M., 2005. Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles 476.

- Faltinsen, O.M., 1971. A Rational Strip Theory of Ship Motions Part II (No. 113).
- Fossen, T.I., 2011. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control: Fossen/Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. <https://doi.org/10.1002/9781119994138>
- Ghaemi, M.H., Olszewski, H., 2017. Total Ship Operability –Review, Concept and Criteria. Polish Maritime Research 24, 74–81. <https://doi.org/10.1515/pomr-2017-0024>
- Hanyok, L.W., 2012, Methods for Calculating Motion Induced Interruptions as Applied to a Space Capsule After Splashdown 102.
- Heinz, A., 2010. A Short Course on Boundary Element Methods.
- Journee, J.M.J., Massie, W.W., 2001. Offshore Hydromecanics.
- Judge, C., 2019, Seakeeping and Manuevering, Annapolis, MD, United States of America.
- Kaklis, P.D., Politis, C.G., Belibassakis, K.A., Ginnis, A.I., Kostas, K.V., Gerostathis, T.P., 2017. Boundary-Element Methods and Wave Loading on Ships, in: Stein, E., de Borst, R., Hughes, T.J.R. (Eds.), Encyclopedia of Computational Mechanics Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, pp. 1–35. <https://doi.org/10.1002/9781119176817.ecm2115>
- Karppinen, T., 1987. Criteria for Seakeeping Performance Prediction.
- Kim, J.-H., Kim, Y., 2014. Time-domain analysis of passenger comfort on cruise ships under motion responses in waves. Proceedings of the IMechE 228, 331–347. <https://doi.org/10.1177/1475090213486890>
- Kim, K.-H., Kim, Y., 2011. Numerical study on added resistance of ships by using a time-domain Rankine panel method. Ocean Engineering 38, 1357–1367. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.04.008>
- Kim, Y., Kim, K.-H., 2007. Numerical stability of Rankine panel method for steady ship waves. Ships and Offshore Structures 2, 299–306. <https://doi.org/10.1080/17445300701423007>
- Kim, Y., Yang, K.-K., Seo, M.-G., 2013, Computational Analysis of Added Resistance in Short Waves 22.
- Kirkup, S., Yazdani, J., 2008. A Gentle Introduction to the Boundary Element Method in Matlab_Freemat (No. AR-08-14). East Lancashire Institute of Higher Education, Lancashire.
- Lee, J.-H., Kim, Y., 2020. Study on steady flow approximation in turning simulation

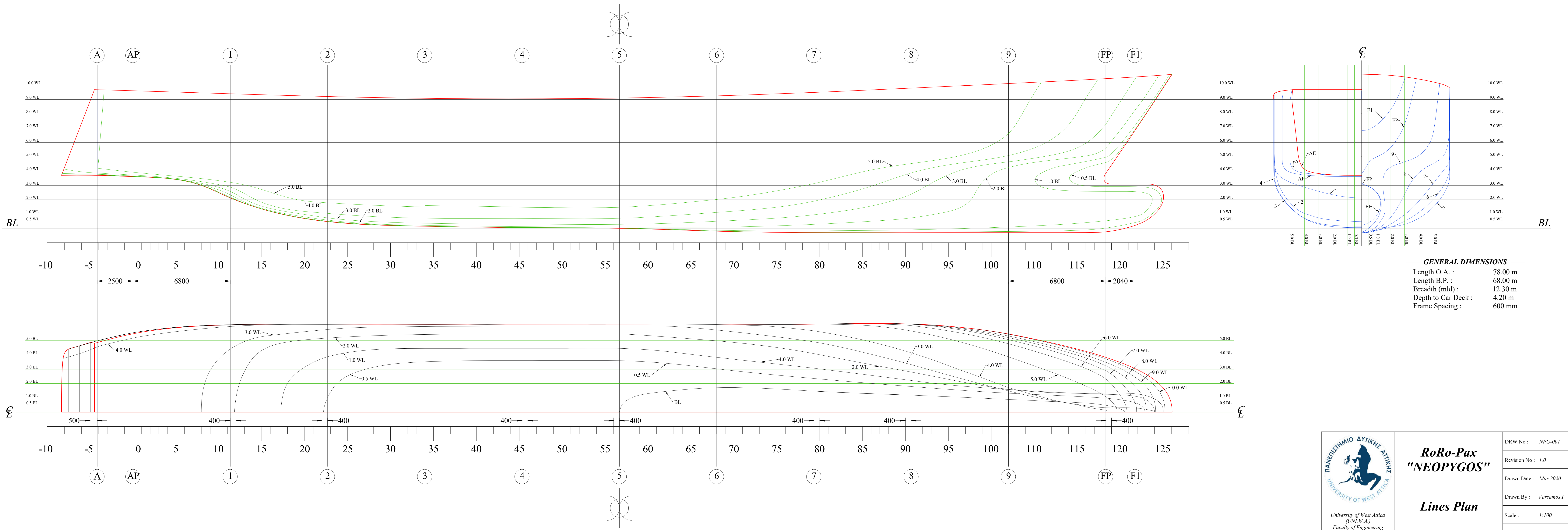
- of ship in waves. *Ocean Engineering* 195, 106645.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106645>
- Lewis, E.V., 2009. Possibilities for reducing Ship Motion at Sea. *Journal of the American Society for Naval Engineers* 70, 653–662.
<https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1958.tb01782.x>
- Lewis, E.V., 1988. *Principles of Naval Architecture Second Revision*. SNAME.
- Li, Z., Ren, H., Liu, R., Li, H., 2017. Time domain Rankine-Green panel method for offshore structures. *J. Ocean Univ. China* 16, 65–73.
<https://doi.org/10.1007/s11802-017-2835-5>
- Mantzaris, D.A., 1998, A Rankine Panel Method as a Tool for the Hydrodynamic Design of Complex Marine Vehicles 150.
- Mazarakos, T.P., Mavrakos, S.A., 2013. Wave–current interaction on a vertical truncated cylinder floating in finite-depth waters. *Proceedings of the IMechE* 227, 243–255. <https://doi.org/10.1177/1475090212454096>
- Mei, T., Candries, M., Lataire, E., Zou, Z., 2020. Numerical Study on Hydrodynamics of Ships with Forward Speed Based on Nonlinear Steady Wave. *JMSE* 8, 106.
<https://doi.org/10.3390/jmse8020106>
- Mei, T.-L., Zhang, T., Candries, M., Lataire, E., Zou, Z.-J., 2020. Comparative study on ship motions in waves based on two time domain boundary element methods. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 111, 9–21.
<https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.013>
- Mohsen Khosravi Babadi, Hassan Ghassemi, 2013. Effect of Hull form Coefficients on the Vessel Sea-Keeping Performance. *Journal of Marine Science and Technology* 21. <https://doi.org/10.6119/JMST-013-0117-2>
- Nakos, D., 1990. *Ship Wave Patterns and Motions by a Three Dimensional Rankine Panel Method*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- Nakos, D., Sclavounos, P., n.d. *Ship Motions by a Three-Dimensional Rankine Panel Method* 20.
- Newman, N., 1992. *Panel Methods in Hydrodynamics*. Presented at the 11th Australasian Fluid Mechanics Conference, Hobart.
- Ogilvie, F., Tuck, E., 1969. Ogilvie and Tuck - 1969 - A Rational Strip Theory of Ship Motions Part I.pdf (No. 013). The University of Michigan, Michigan.
- Perez, T., Blanke, M., 2014. Control of Ship Roll Motion, in: Baillieul, J., Samad, T. (Eds.), *Encyclopedia of Systems and Control*. Springer London, London, pp. 1–8. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5102-9_123-1

- Politis, C.G., 2019. Boundary Element Method - A short review.
- Rajesh Reguram, B., Surendran, S., Lee, S.K., 2016. Application of fin system to reduce pitch motion. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 8, 409–421. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.05.004>
- Rumawas, V., Asbjornslett, B.E., Klockner, C., 2016. Human Factors Evaluation in Ship Design A Case Study on Offshore Supply Vessels in the Norwegian Sea. *Naval Engineers Journal* 128, 81–96.
- Salvesen, N., Tuck, E., Faltinsen, O.M., 1970. Ship Motions and Sea Loads. Presented at the Annual Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME, New York.
- Sclavounos, P.D., 1995, Computation of Wave Ship Interactions, Department of Ocean Engineering, MIT
- Shahjada Tarafder, Md., Suzuki, K., 2008. Numerical calculation of free-surface potential flow around a ship using the modified Rankine source panel method. *Ocean Engineering* 35, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.11.004>
- Skandali, D., 2015, Identification of response amplitude operators for ships, based on full scale measurements, Delft University of Technology
- Smith, T.C., Thomas, W.L., Iii, 1990. A Survey of Ship Motion Reduction Devices. Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA. <https://doi.org/10.21236/ADA229278>
- Tezdogan, T., Incecik, A., Turan, O., 2014. Operability assessment of high speed passenger ships based on human comfort criteria. *Ocean Engineering* 89, 32–52. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.009>
- Tupper, E.C., 2004. Introduction to naval architecture, 4th ed. ed. Elsevier, Butterworth Heinemann, Amsterdam ; Boston.
- Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, 1997. . National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/5870>
- von Graefe, A., Shigunov, V., el Moctar, O., 2013. Rankine Source Method for Ship-Ship Interaction Problems, in: Volume 9: Odd M. Faltinsen Honoring Symposium on Marine Hydrodynamics. Presented at the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Nantes, France, p. V009T12A031. <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10810>
- Wang, J., 2016. Time Domain Simulation of Wave Induced Ship Motions by a Rankine Panel Method. Memorial University of Newfoundland, Newfoundland.

- Wayman, E.N., Sclavounos, P.D., Butterfield, S., Jonkman, J., Musial, W., 2006. Coupled Dynamic Modeling of Floating Wind Turbine Systems, in: Offshore Technology Conference. Presented at the Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA. <https://doi.org/10.4043/18287-MS>
- Zaojian, I.Z., 2006. Ship Manuevering and Seakeeping.
- Zhang, B.-J., Zhang, S.-L., 2019. Research on Ship Design and Optimization Based on Simulation-Based Design (SBD) Technique. Springer Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-8423-2>
- Γεροστάθης, Θ., 2019. Υδροδυναμική Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς.
- Πολίτης, Κ., 2019. Υδροδυναμική Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς.
- Σουκισιάν, Τ., Κορρές, Γ., Παπαδόπουλος, Α., Χατζηγάκη, Τ., Κάλλος, Γ., Αναδρανιστάκης, Ε., 2007. Άτλαντας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών. Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, Αθήνα.

APPENDIX I

*RoRo-Pax “NEOPYGOS”
Lines Plan*



GENERAL DIMENSIONS

Length O.A. :	78.00 m
Length B.P. :	68.00 m
Breadth (mld) :	12.30 m
Depth to Car Deck :	4.20 m
Frame Spacing :	600 mm



**RoRo-Pax
"NEOPYGOS"**

Lines Plan

DRW No :	NPG-001
Revision No :	1.0
Drawn Date :	Mar 2020
Drawn By :	Varsamos I.
Scale :	1:100
Sheet Size :	A0

APPENDIX II

*RoRo-Pax “NEOPYGOS”
Hydrostatic Data*

<i>Draft</i>	<i>Displacement</i>	<i>Volume</i>	<i>Cp</i>	<i>Cb</i>	<i>Cwp</i>	<i>LCB</i>	<i>VCB</i>	<i>LCF</i>	<i>KB</i>	<i>BMt</i>	<i>BML</i>	<i>KMt</i>	<i>KML</i>	<i>TPC</i>	<i>MTc</i>
[m]	[tn]	[m ³]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[Tn/cm]	[tn*m/cm]
0.0	15.49	15.108	0.585	0.319	0.65	51.092	-0.118	48.488	-0.118	3.479	517.906	3.361	517.788	0.897	1.179
0.1	26.89	26.233	0.557	0.287	0.664	48.888	-0.045	44.014	-0.045	4.91	675.356	4.865	675.311	1.377	2.67
0.2	43.13	42.076	0.574	0.266	0.636	46.362	0.029	40.725	0.029	6.084	715.403	6.114	715.432	1.865	4.538
0.3	63.97	62.405	0.612	0.281	0.655	44.154	0.102	38.687	0.102	6.84	667.039	6.942	667.141	2.289	6.276
0.4	88.63	86.472	0.646	0.301	0.673	42.454	0.171	37.53	0.171	7.183	589.372	7.354	589.543	2.633	7.684
0.5	116.4	113.589	0.669	0.32	0.683	41.188	0.238	36.831	0.238	7.23	516.452	7.468	516.69	2.917	8.847
0.6	146.9	143.29	0.687	0.336	0.69	40.23	0.303	36.343	0.303	7.133	456.759	7.436	457.062	3.164	9.872
0.7	179.7	175.27	0.691	0.351	0.695	39.485	0.366	35.964	0.366	6.975	409.123	7.341	409.489	3.387	10.818
0.8	214.5	209.306	0.685	0.363	0.7	38.887	0.429	35.662	0.429	6.798	369.911	7.227	370.339	3.588	11.684
0.9	251.4	245.244	0.681	0.374	0.704	38.394	0.49	35.385	0.49	6.623	338.238	7.113	338.729	3.777	12.522
1.0	290	282.962	0.678	0.384	0.707	37.976	0.552	35.133	0.552	6.457	311.679	7.009	312.231	3.953	13.317
1.1	330.4	322.344	0.676	0.392	0.71	37.615	0.613	34.902	0.613	6.302	288.989	6.914	289.601	4.119	14.071
1.2	372.4	363.289	0.675	0.4	0.712	37.298	0.673	34.692	0.673	6.156	269.209	6.83	269.883	4.274	14.779
1.3	415.8	405.704	0.674	0.406	0.714	37.015	0.734	34.497	0.734	6.02	251.749	6.754	252.482	4.42	15.44
1.4	460.7	449.503	0.674	0.413	0.715	36.761	0.794	34.314	0.794	5.893	236.233	6.687	237.027	4.558	16.06
1.5	507	494.611	0.673	0.418	0.717	36.53	0.854	34.14	0.854	5.771	222.331	6.624	223.185	4.687	16.64
1.6	554.5	540.955	0.673	0.424	0.717	36.318	0.913	33.973	0.913	5.655	209.804	6.568	210.717	4.81	17.182
1.7	603.2	588.473	0.673	0.429	0.718	36.121	0.973	33.812	0.973	5.545	198.372	6.518	199.345	4.926	17.683
1.8	653	637.094	0.673	0.433	0.719	35.938	1.032	33.632	1.032	5.44	188.419	6.472	189.451	5.04	18.193
1.9	704	686.786	0.673	0.437	0.72	35.765	1.091	33.468	1.091	5.34	178.982	6.431	180.073	5.146	18.642
2.0	755.9	737.504	0.674	0.441	0.72	35.601	1.15	33.308	1.15	5.246	170.266	6.397	171.416	5.247	19.056
2.1	808.9	789.187	0.674	0.445	0.721	35.444	1.209	33.122	1.209	5.155	162.602	6.364	163.811	5.347	19.487
2.2	862.9	841.814	0.674	0.449	0.722	35.294	1.268	32.952	1.268	5.069	155.18	6.337	156.448	5.44	19.852
2.3	917.7	895.341	0.675	0.452	0.723	35.148	1.327	32.759	1.327	4.986	148.517	6.313	149.844	5.532	20.223
2.4	973.5	949.714	0.675	0.456	0.724	35.006	1.385	32.577	1.385	4.906	141.963	6.291	143.348	5.616	20.521
2.5	1030	1004.918	0.676	0.459	0.725	34.867	1.444	32.369	1.444	4.83	136.01	6.274	137.454	5.7	20.821
2.6	1087	1060.867	0.677	0.463	0.726	34.731	1.502	32.165	1.502	4.754	129.989	6.256	131.491	5.774	21.027
2.7	1145	1117.554	0.678	0.467	0.727	34.595	1.56	31.95	1.56	4.683	124.107	6.243	125.667	5.843	21.169
2.8	1204	1174.905	0.678	0.47	0.728	34.459	1.619	31.693	1.619	4.612	118.724	6.23	120.342	5.913	21.313
2.9	1264	1232.902	0.68	0.474	0.729	34.323	1.676	31.446	1.676	4.545	113.392	6.221	115.068	5.976	21.385
3.0	1324	1291.524	0.681	0.478	0.731	34.186	1.734	31.195	1.734	4.48	108.161	6.214	109.895	6.034	21.394
3.1	1385	1350.765	0.715	0.505	0.77	34.049	1.792	30.922	1.792	4.417	104.559	6.209	106.351	6.111	21.654
3.2	1446	1410.778	0.716	0.51	0.776	33.913	1.85	30.758	1.85	4.357	102.612	6.206	104.462	6.197	22.214
3.3	1508	1471.687	0.715	0.512	0.781	33.779	1.908	30.579	1.908	4.3	101.46	6.208	103.367	6.294	22.93
3.4	1572	1533.586	0.711	0.514	0.785	33.646	1.966	30.371	1.966	4.248	101.005	6.214	102.971	6.4	23.803

<i>Draft</i>	<i>Displacement</i>	<i>Volume</i>	<i>Cp</i>	<i>Cb</i>	<i>Cwp</i>	<i>LCB</i>	<i>VCB</i>	<i>LCF</i>	<i>KB</i>	<i>BMt</i>	<i>BML</i>	<i>KMt</i>	<i>KML</i>	<i>TPC</i>	<i>MTc</i>
[m]	[tn]	[m ³]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[Tn/cm]	[tn*m/cm]
3.5	1637	1596.78	0.694	0.506	0.783	33.508	2.025	29.875	2.025	4.217	104.005	6.242	106.029	6.577	25.52
3.6	1703	1661.917	0.685	0.503	0.79	33.354	2.084	29.31	2.084	4.193	108.049	6.278	110.133	6.775	27.589
3.7	1772	1729.151	0.641	0.474	0.764	33.183	2.145	28.41	2.145	4.177	116.487	6.323	118.632	7.051	30.921
3.8	1844	1799.511	0.646	0.481	0.793	32.976	2.208	27.567	2.208	4.177	124.589	6.385	126.797	7.322	34.394
3.9	1918	1871.533	0.65	0.488	0.806	32.765	2.271	27.39	2.271	4.144	124.956	6.416	127.227	7.45	35.891
4.0	1993	1944.589	0.655	0.495	0.815	32.564	2.334	27.4	2.334	4.082	123.548	6.417	125.882	7.538	36.898
4.1	2069	2018.456	0.66	0.502	0.823	32.377	2.397	27.492	2.397	4.01	121.782	6.407	124.179	7.614	37.782
4.2	2145	2093.069	0.664	0.509	0.83	32.206	2.46	27.638	2.46	3.935	120.074	6.395	122.534	7.686	38.659
4.3	2223	2168.425	0.669	0.516	0.838	32.05	2.522	27.833	2.522	3.86	118.606	6.382	121.128	7.759	39.592
4.4	2301	2244.552	0.673	0.523	0.847	31.91	2.584	28.077	2.584	3.788	117.517	6.371	120.1	7.837	40.634
4.5	2380	2321.495	0.678	0.53	0.855	31.787	2.646	28.361	2.646	3.718	116.714	6.364	119.36	7.919	41.768
4.6	2459	2399.285	0.682	0.537	0.865	31.679	2.707	28.671	2.707	3.652	116.087	6.359	118.795	8.004	42.963
4.7	2540	2477.932	0.687	0.543	0.874	31.587	2.769	28.989	2.769	3.587	115.482	6.356	118.251	8.087	44.168
4.8	2621	2557.072	0.691	0.55	0.882	31.513	2.83	29.288	2.83	3.522	114.711	6.352	117.541	8.163	45.305
4.9	2703	2636.922	0.695	0.556	0.89	31.451	2.892	29.554	2.892	3.454	113.629	6.345	116.521	8.229	46.314
5.0	2785	2717.405	0.7	0.563	0.896	31.399	2.953	29.784	2.953	3.384	112.272	6.336	115.224	8.286	47.197
5.1	2868	2798.422	0.704	0.569	0.901	31.356	3.013	29.979	3.013	3.313	110.633	6.327	113.646	8.333	47.938
5.2	2952	2879.897	0.708	0.575	0.905	31.32	3.074	30.147	3.074	3.243	108.834	6.317	111.908	8.373	48.58
5.3	3036	2961.766	0.712	0.58	0.908	31.29	3.134	30.295	3.134	3.174	106.937	6.307	110.071	8.407	49.14
5.4	3120	3043.982	0.716	0.586	0.911	31.264	3.194	30.427	3.194	3.105	104.99	6.299	108.184	8.437	49.639
5.5	3205	3126.505	0.72	0.591	0.914	31.243	3.253	30.548	3.253	3.039	103.048	6.292	106.301	8.463	50.097
5.6	3290	3209.311	0.724	0.597	0.916	31.225	3.313	30.66	3.313	2.974	101.115	6.286	104.427	8.487	50.517
5.7	3375	3292.369	0.727	0.602	0.918	31.21	3.372	30.761	3.372	2.91	99.178	6.282	102.55	8.508	50.893
5.8	3460	3375.371	0.731	0.606	0.92	31.201	3.43	30.854	3.43	2.849	97.278	6.279	100.708	8.527	51.239
5.9	3545	3458.509	0.734	0.611	0.921	31.195	3.488	30.941	3.488	2.789	95.409	6.277	98.897	8.543	51.557
6.0	3630	3541.836	0.737	0.616	0.922	31.191	3.546	31.021	3.546	2.732	93.575	6.278	97.121	8.558	51.851

Positive (+) forward
LCF, LCB taken from AP
VCB taken from BL

APPENDIX III

*RoRo-Pax “NEOPYGOS”
Cross Curves Data*

		<i>KN Values</i>																	
<i>Disp [tn]</i>	<i>0 deg</i>	<i>5.0 deg</i>	<i>10.0 deg</i>	<i>15.0 deg</i>	<i>20.0 deg</i>	<i>25.0 deg</i>	<i>30.0 deg</i>	<i>35.0 deg</i>	<i>40.0 deg</i>	<i>45.0 deg</i>	<i>50.0 deg</i>	<i>55.0 deg</i>	<i>60.0 deg</i>	<i>65.0 deg</i>	<i>70.0 deg</i>	<i>75.0 deg</i>	<i>80.0 deg</i>	<i>85.0 deg</i>	<i>90.0 deg</i>
110.0	0	0.643	1.258	1.861	2.471	3.077	3.629	4.046	4.345	4.571	4.745	4.878	4.982	5.066	5.147	5.255	5.47	6.005	6.508
296.3	0	0.608	1.201	1.767	2.305	2.82	3.313	3.777	4.193	4.528	4.788	4.994	5.169	5.331	5.506	5.744	6.04	6.225	6.285
482.6	0	0.58	1.151	1.704	2.231	2.726	3.193	3.639	4.063	4.459	4.8	5.075	5.31	5.53	5.773	6.016	6.162	6.209	6.161
668.9	0	0.563	1.119	1.661	2.181	2.672	3.137	3.58	4.003	4.407	4.787	5.127	5.419	5.694	5.947	6.11	6.18	6.165	6.069
855.3	0	0.552	1.099	1.632	2.147	2.64	3.11	3.556	3.979	4.385	4.777	5.156	5.506	5.812	6.023	6.137	6.166	6.116	5.994
1042.0	0	0.546	1.086	1.614	2.128	2.625	3.099	3.547	3.973	4.382	4.782	5.179	5.569	5.866	6.047	6.133	6.137	6.067	5.931
1228.0	0	0.542	1.078	1.607	2.123	2.621	3.096	3.547	3.977	4.391	4.798	5.208	5.593	5.875	6.041	6.11	6.1	6.02	5.876
1414.0	0	0.541	1.079	1.61	2.126	2.623	3.099	3.553	3.987	4.407	4.822	5.236	5.591	5.854	6.014	6.076	6.059	5.974	5.828
1601.0	0	0.544	1.087	1.618	2.133	2.629	3.105	3.563	4.002	4.429	4.852	5.251	5.576	5.817	5.971	6.034	6.015	5.93	5.785
1787.0	0	0.552	1.095	1.626	2.141	2.638	3.116	3.576	4.021	4.454	4.88	5.254	5.552	5.773	5.918	5.984	5.969	5.886	5.745
1973.0	0	0.557	1.102	1.633	2.149	2.648	3.129	3.593	4.042	4.483	4.899	5.248	5.523	5.727	5.862	5.926	5.92	5.843	5.707
2159.0	0	0.557	1.105	1.638	2.156	2.658	3.143	3.613	4.067	4.511	4.909	5.235	5.491	5.68	5.806	5.868	5.866	5.8	5.671
2346.0	0	0.555	1.105	1.641	2.162	2.667	3.157	3.633	4.095	4.533	4.91	5.217	5.457	5.634	5.752	5.811	5.811	5.753	5.636
2532.0	0	0.554	1.103	1.642	2.167	2.677	3.172	3.653	4.122	4.548	4.904	5.195	5.422	5.589	5.7	5.756	5.757	5.704	5.598
2718.0	0	0.553	1.101	1.643	2.171	2.686	3.186	3.674	4.143	4.554	4.895	5.17	5.386	5.546	5.651	5.705	5.707	5.658	5.559
2905.0	0	0.551	1.099	1.642	2.175	2.694	3.201	3.696	4.157	4.553	4.881	5.145	5.351	5.504	5.605	5.657	5.659	5.615	5.522
3091.0	0	0.55	1.098	1.641	2.178	2.703	3.216	3.714	4.163	4.545	4.863	5.119	5.318	5.464	5.562	5.612	5.616	5.574	5.487
3277.0	0	0.549	1.096	1.641	2.18	2.711	3.23	3.726	4.161	4.532	4.841	5.091	5.286	5.428	5.522	5.571	5.576	5.537	5.455
3464.0	0	0.548	1.095	1.641	2.184	2.719	3.244	3.73	4.153	4.513	4.815	5.061	5.253	5.394	5.486	5.534	5.54	5.503	5.426
3650.0	0	0.548	1.096	1.643	2.187	2.728	3.254	3.728	4.139	4.49	4.786	5.029	5.22	5.361	5.454	5.502	5.508	5.474	5.401

APPENDIX IV

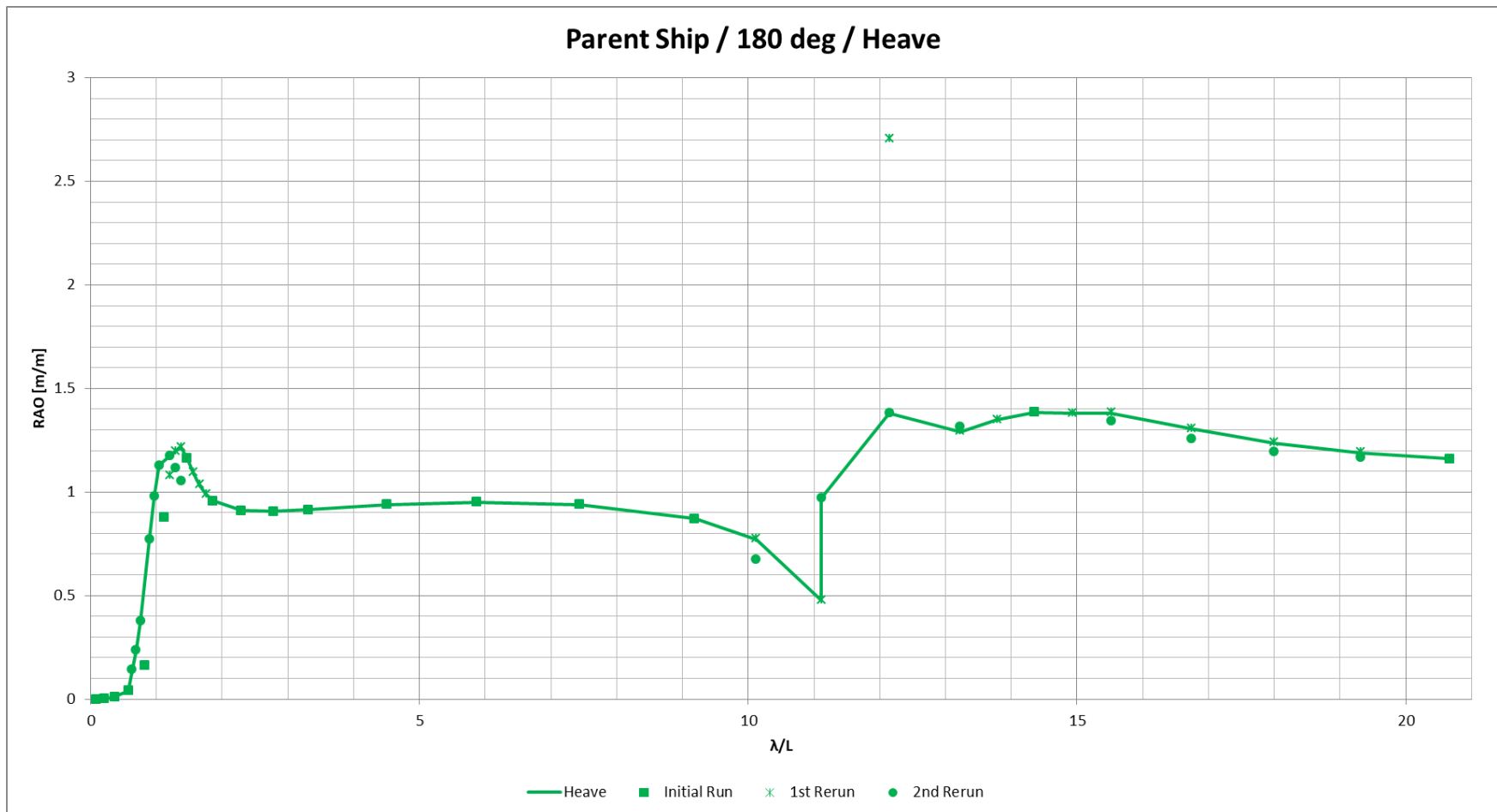
Original Calculations Results

Appendix VII

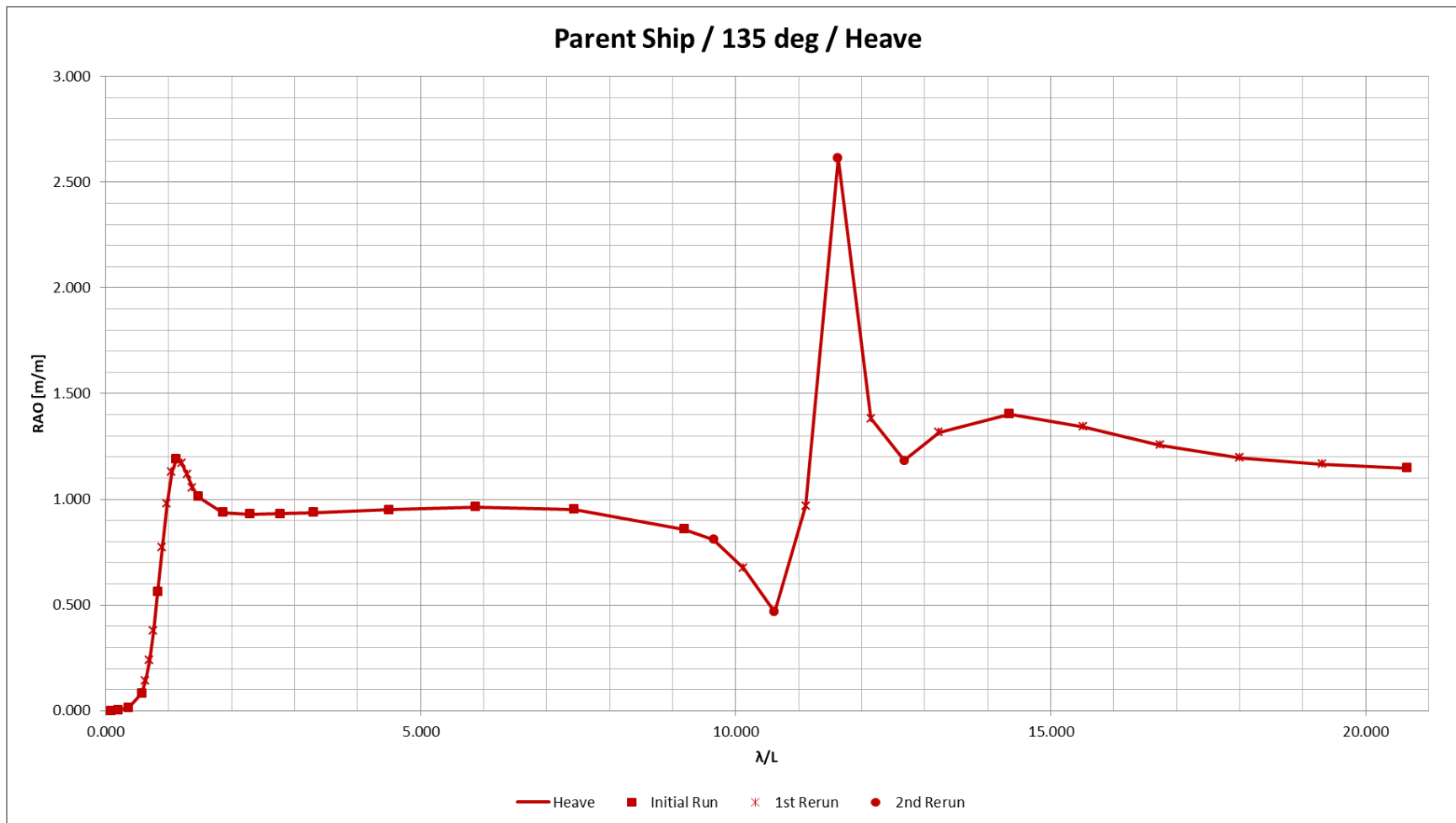
Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αποκρίσεις των δύο πλοίων που μελετήθηκαν, όπως αυτά λήφθηκαν από το λογισμικό *SWAN 2*, χωρίς να έχουν αφαιρεθεί οι μη ομαλές συχνότητες.

A.1. Parent Ship – Heave RAO

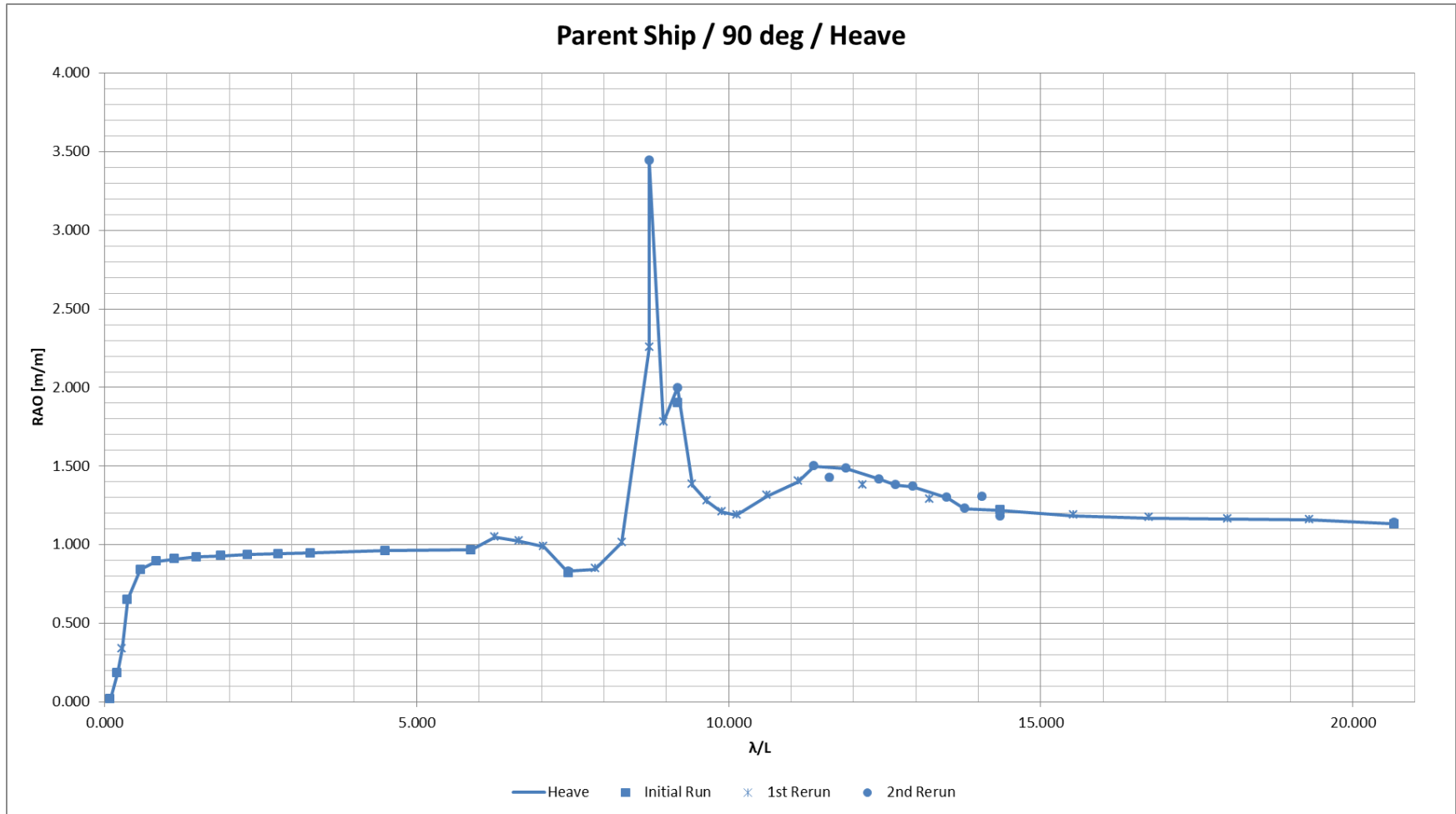
180 Degrees



135 Degrees

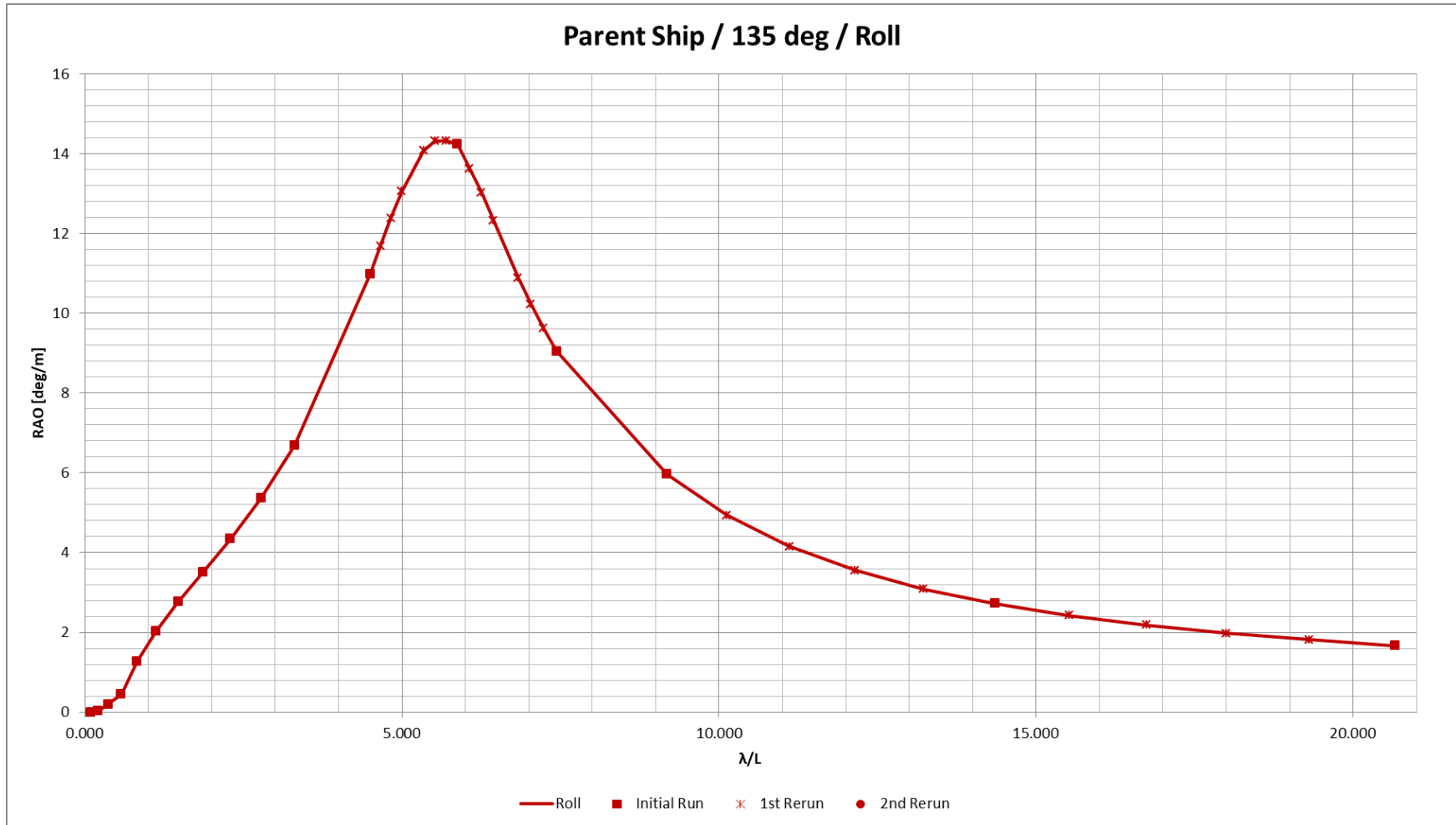


90 Degrees

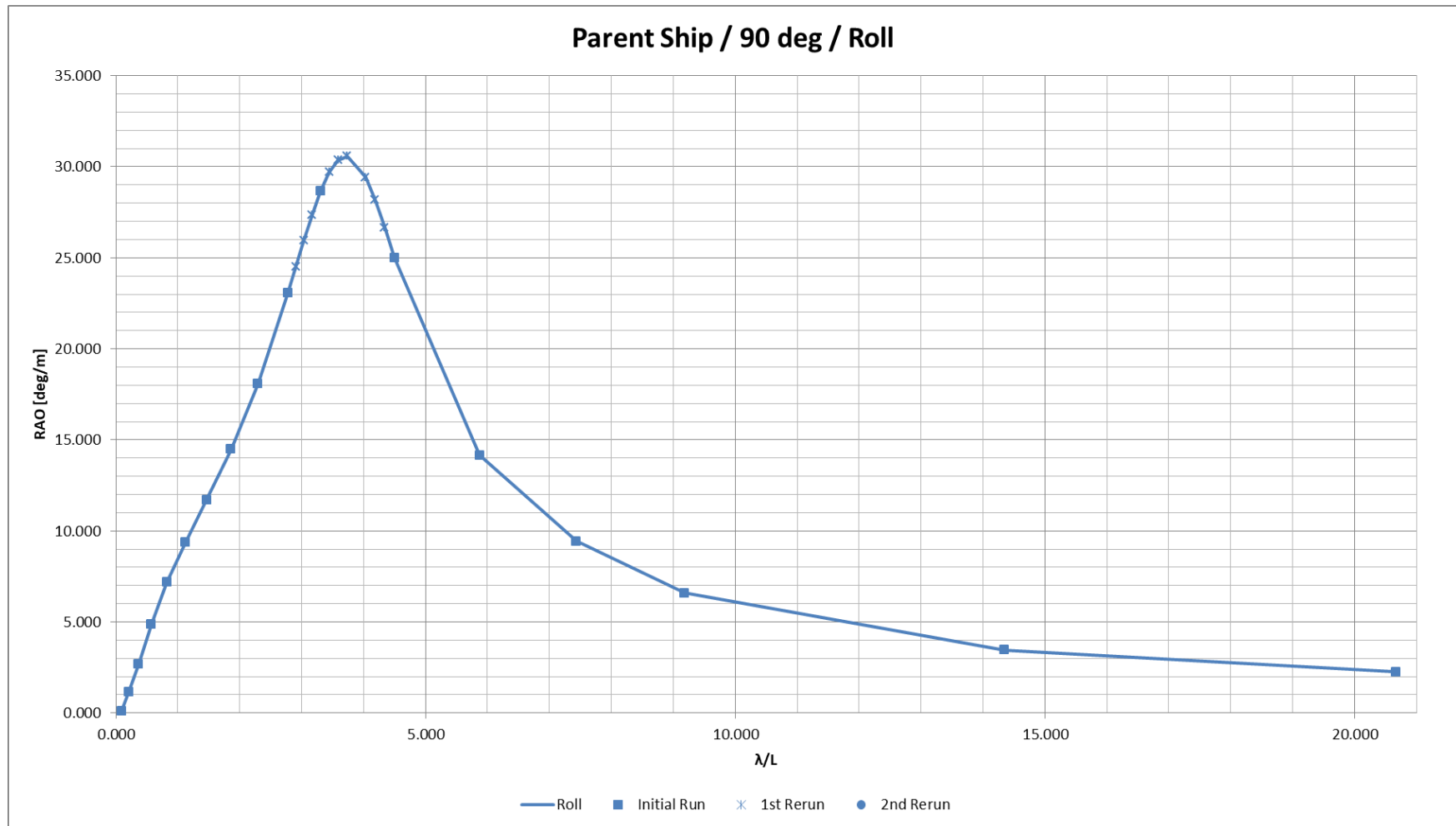


A.2. Parent Ship – Roll RAO

135 Degrees

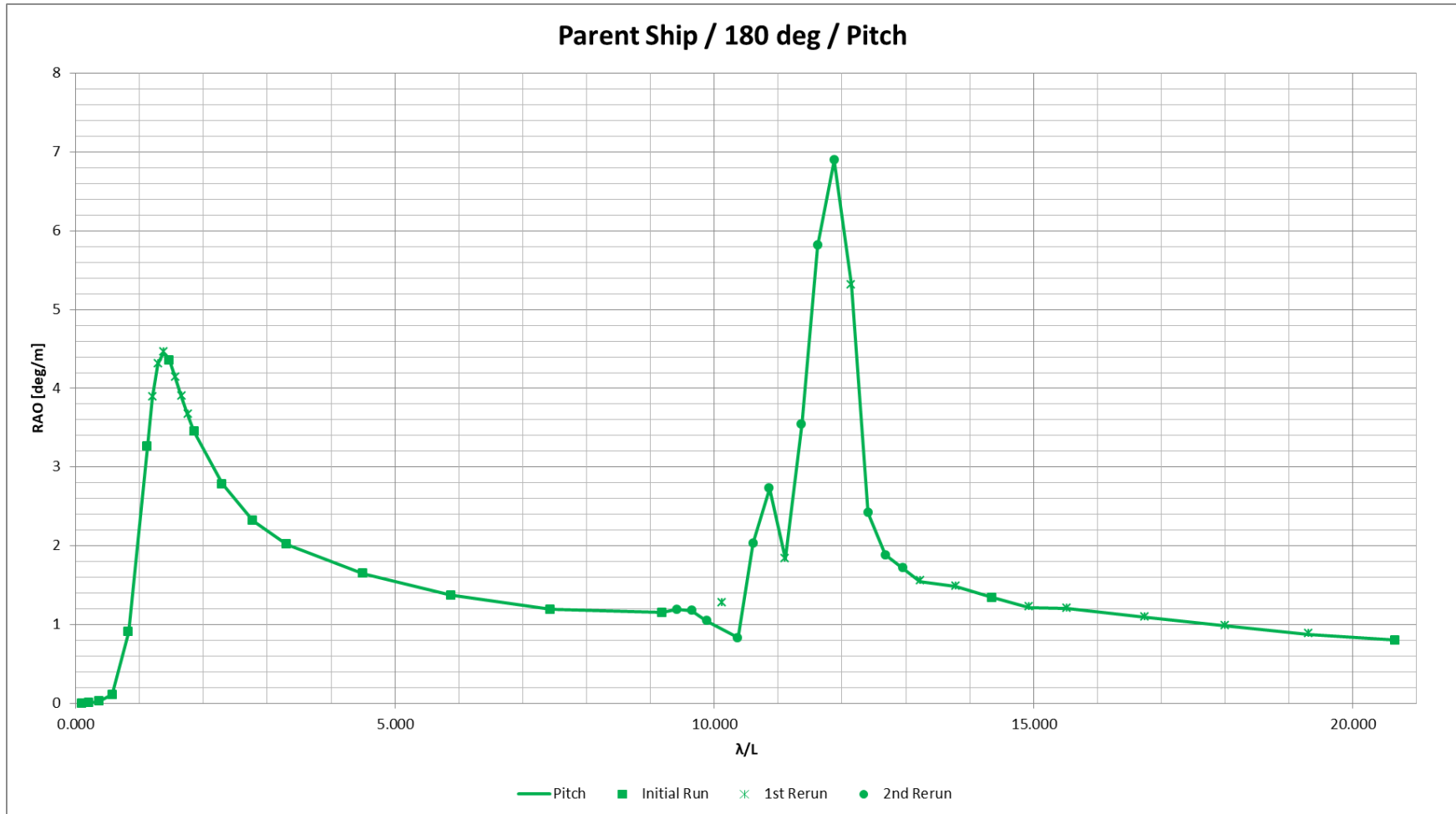


90 Degrees

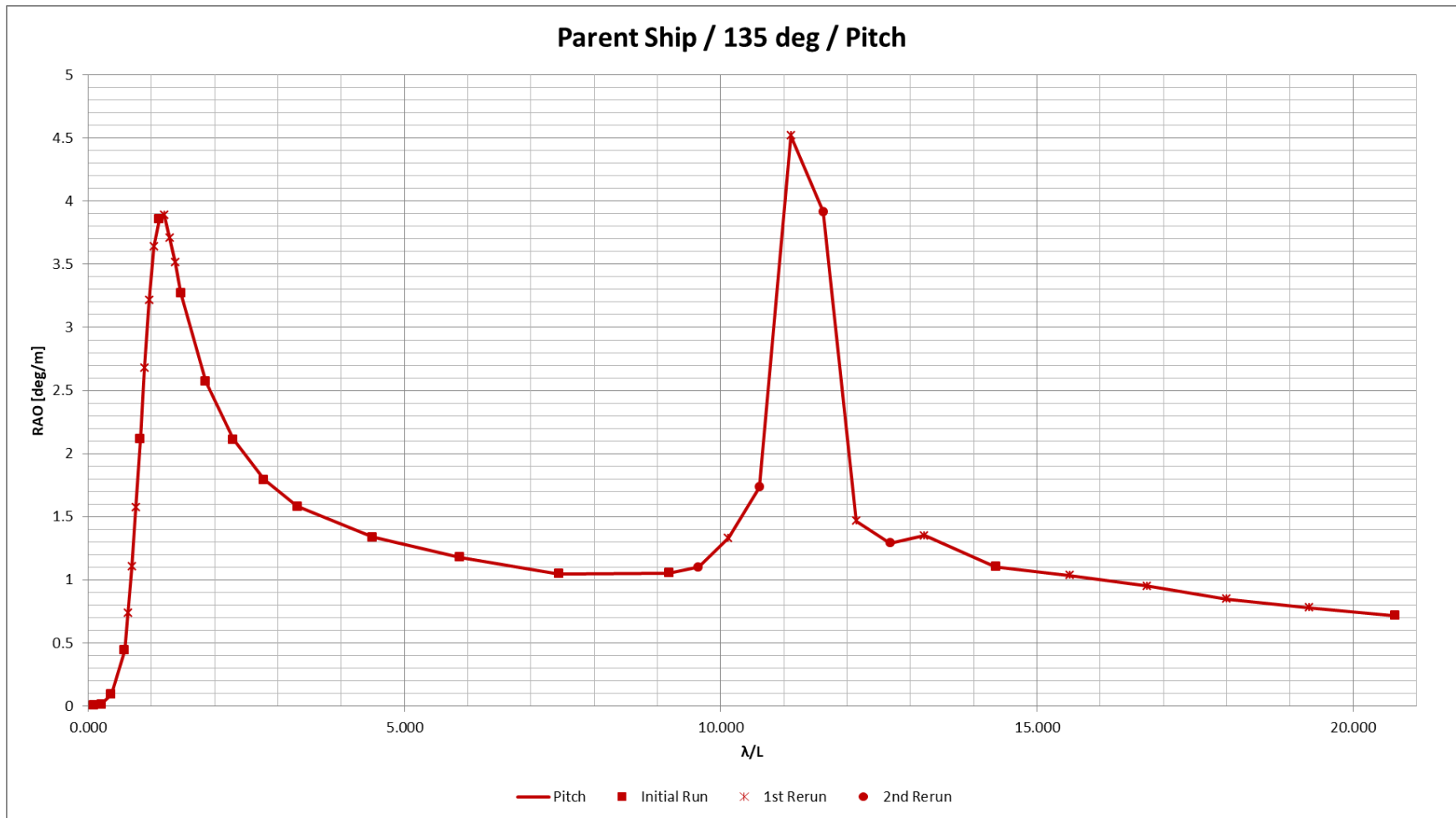


A.3. Parent Ship – Pitch RAO

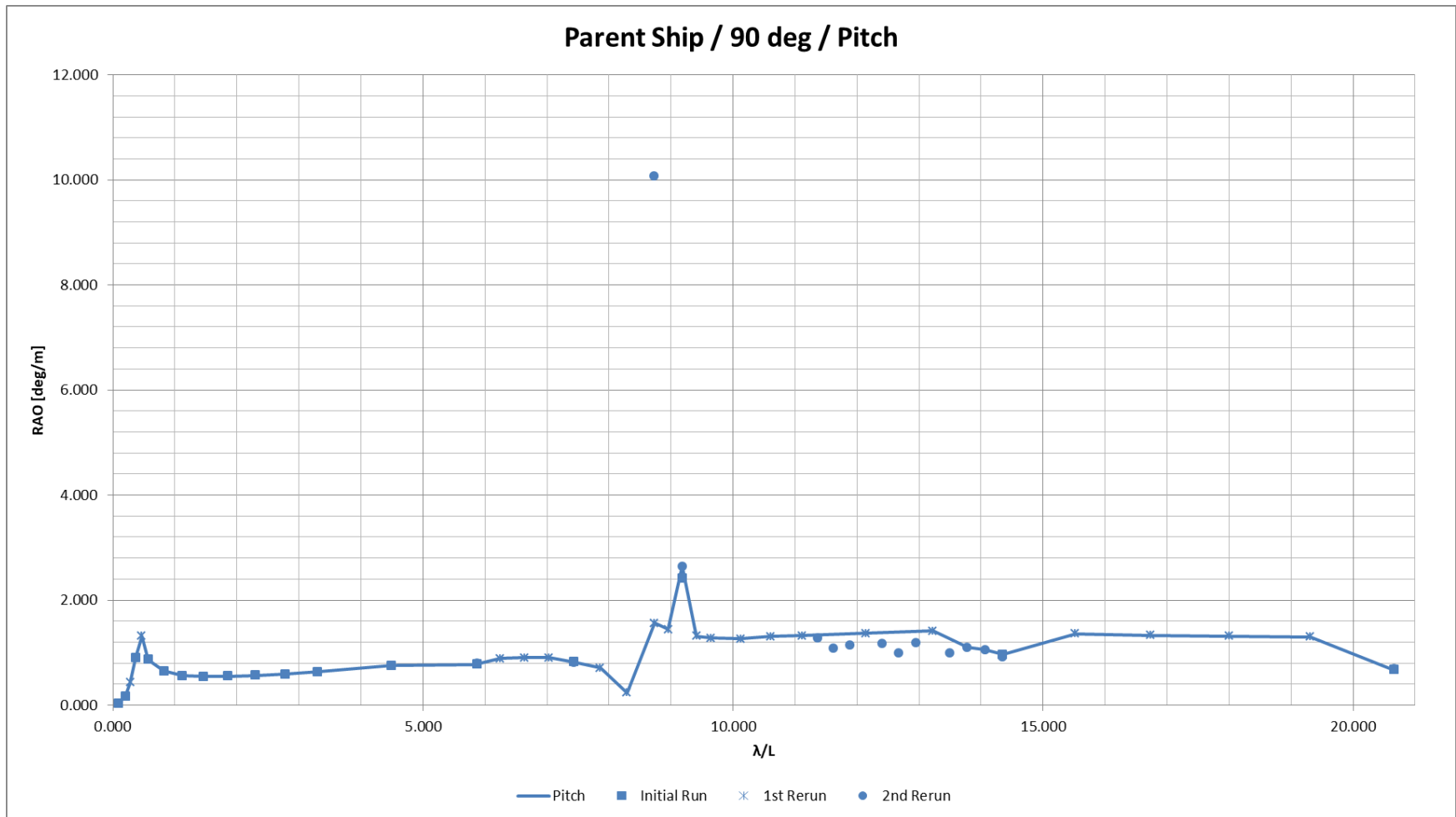
180 Degrees



135 Degrees

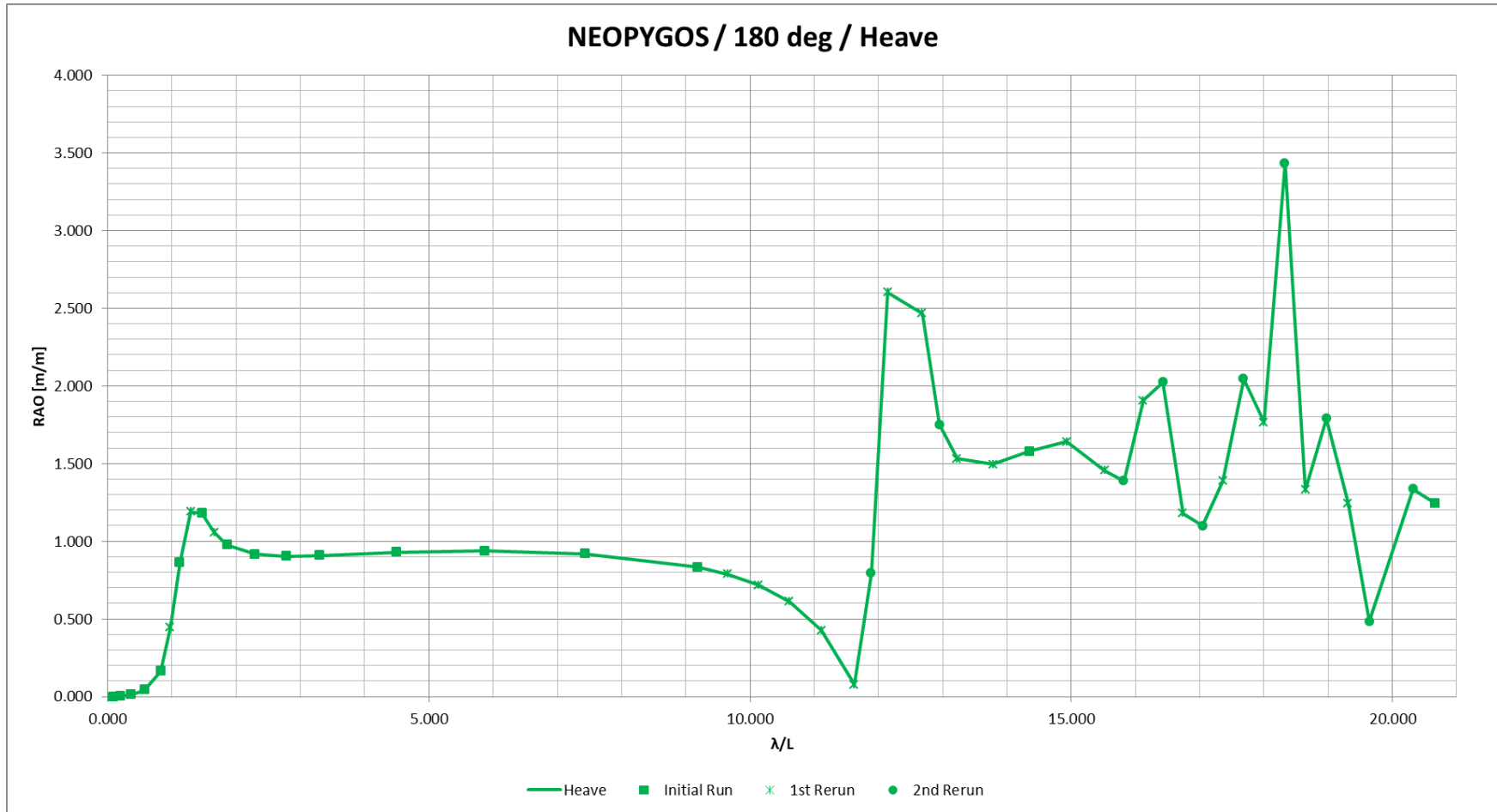


90 Degrees

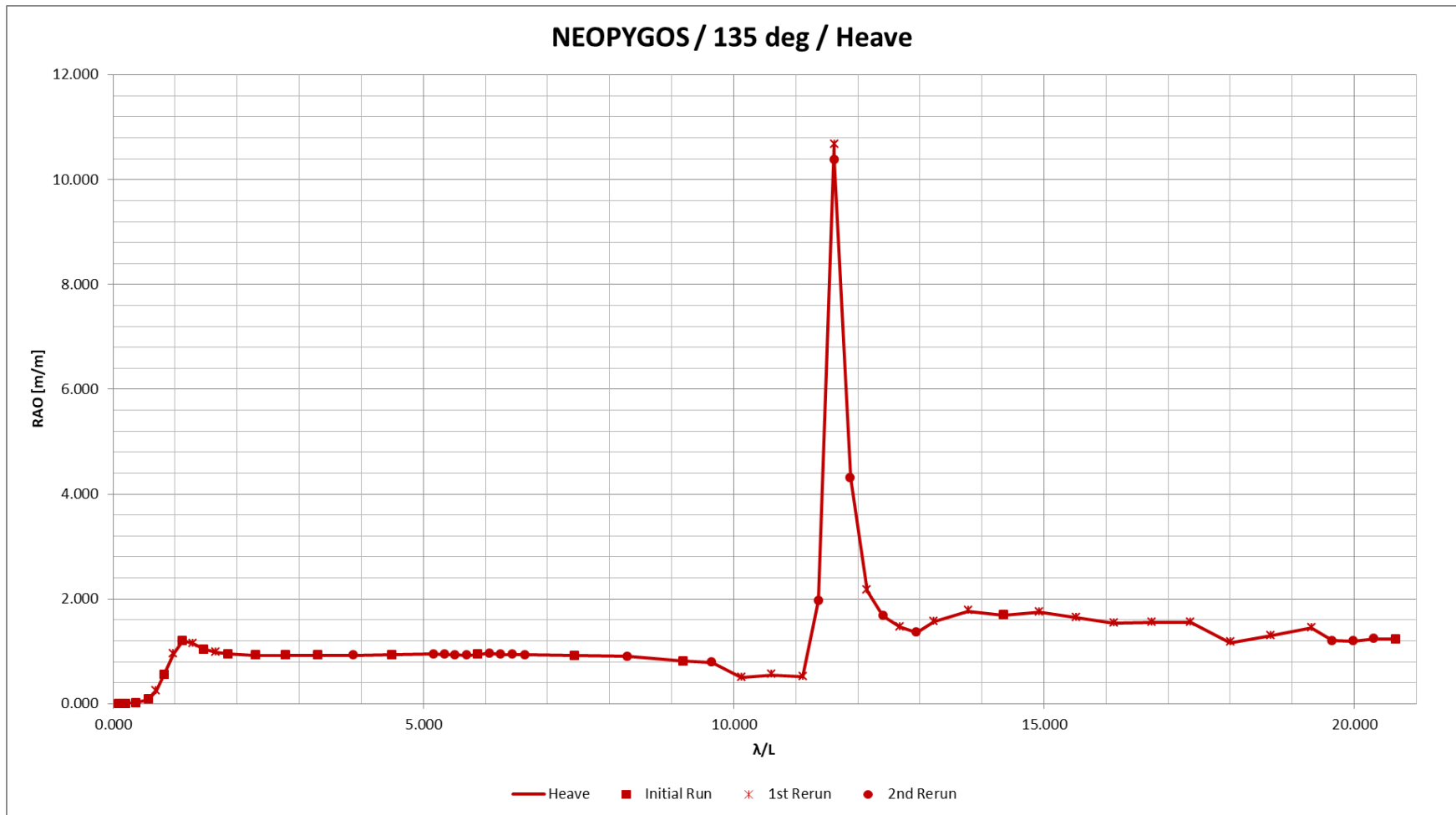


B.1. NEOPYGOS – Heave RAO

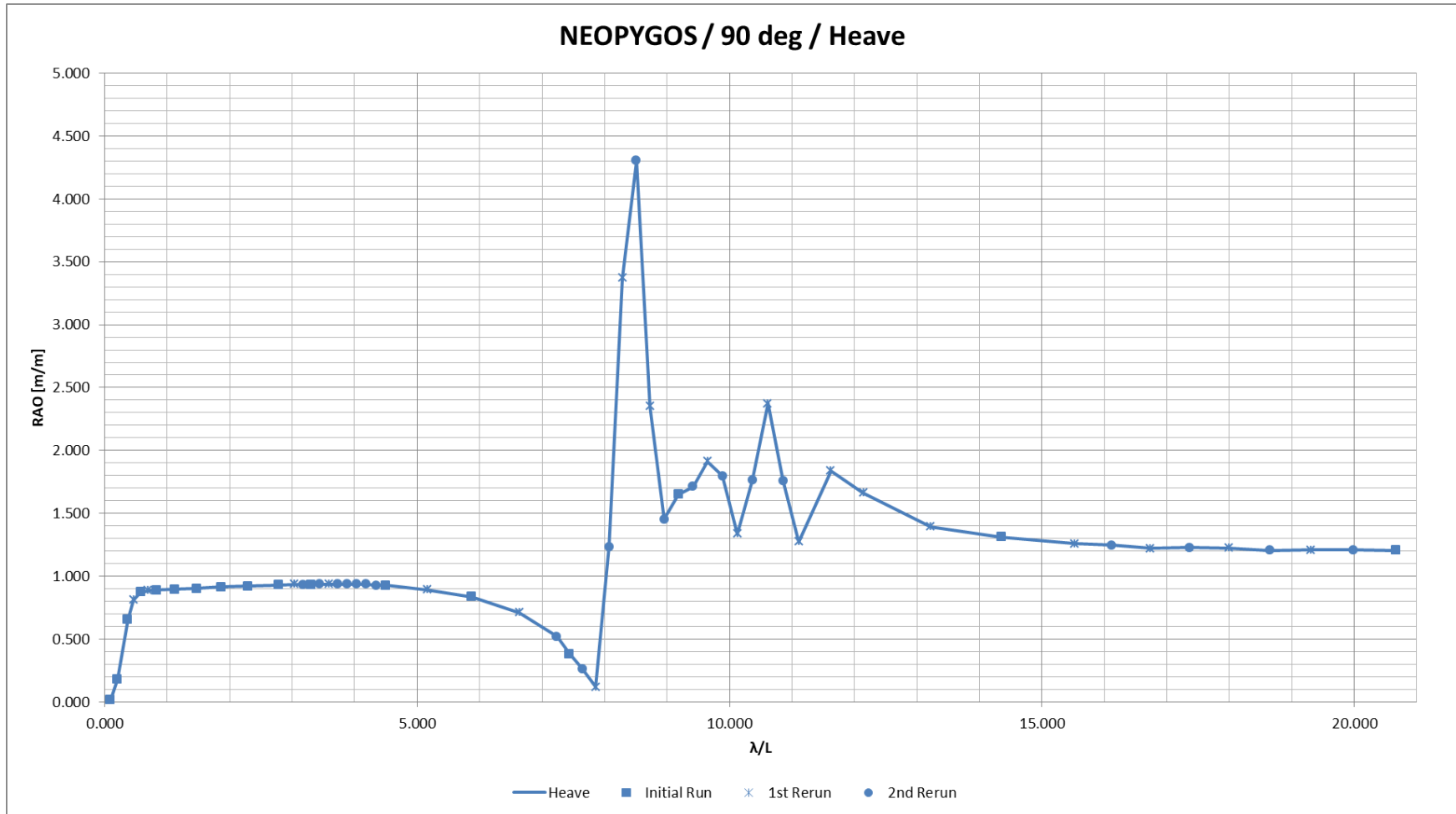
180 Degrees



135 Degrees

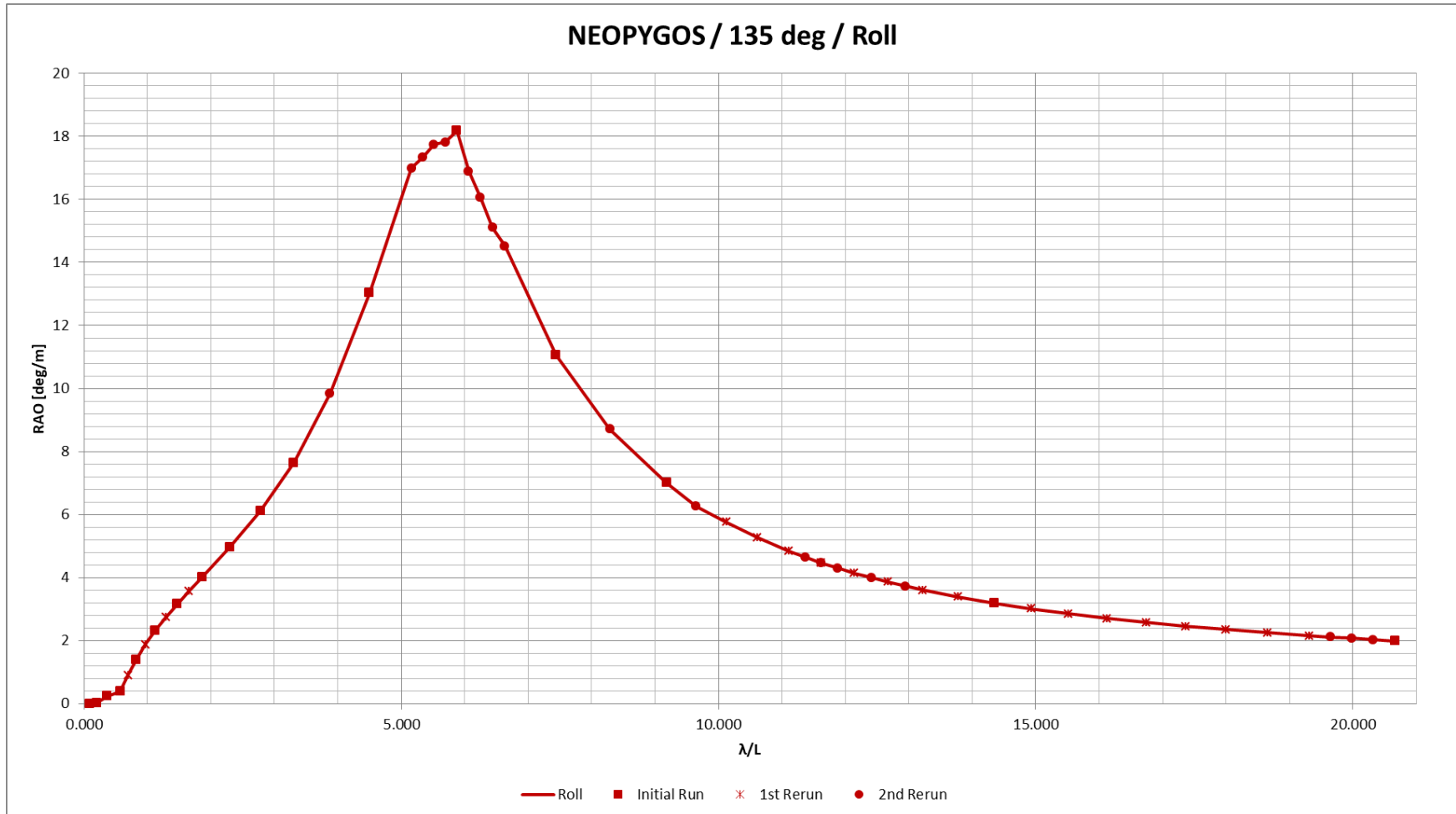


90 Degrees

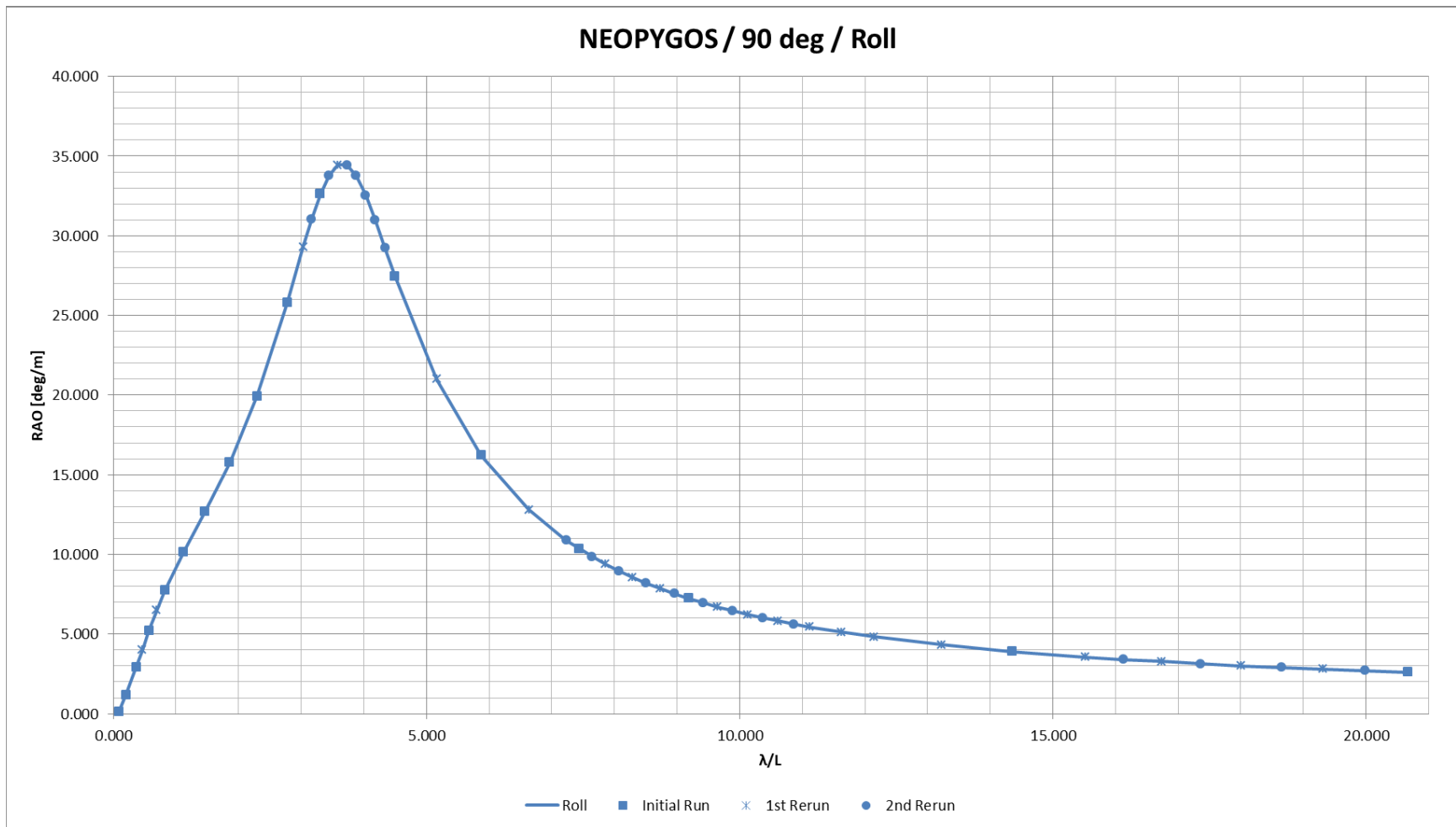


B.2. NEOPYGOS – Roll RAO

135 Degrees

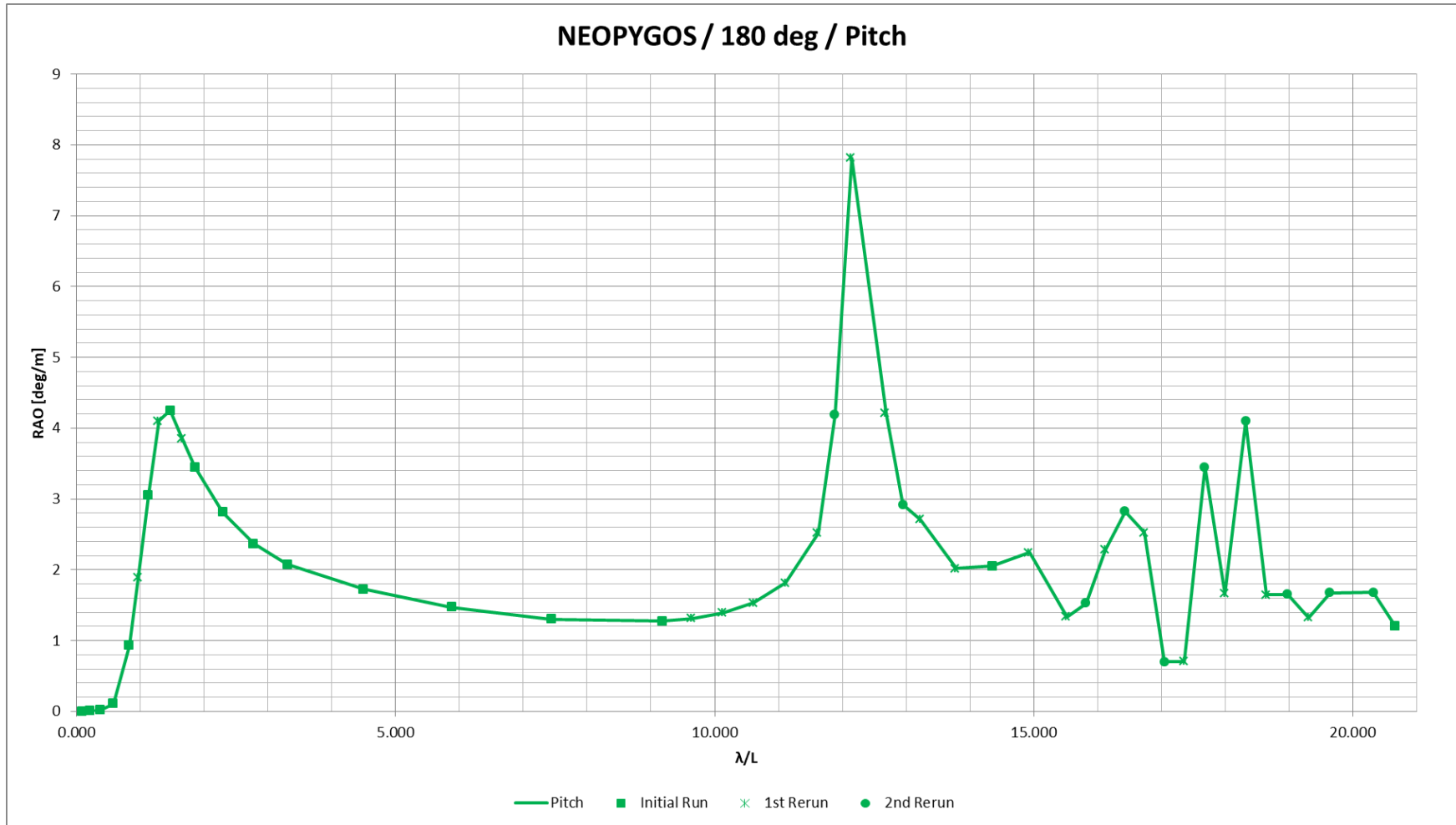


90 Degrees

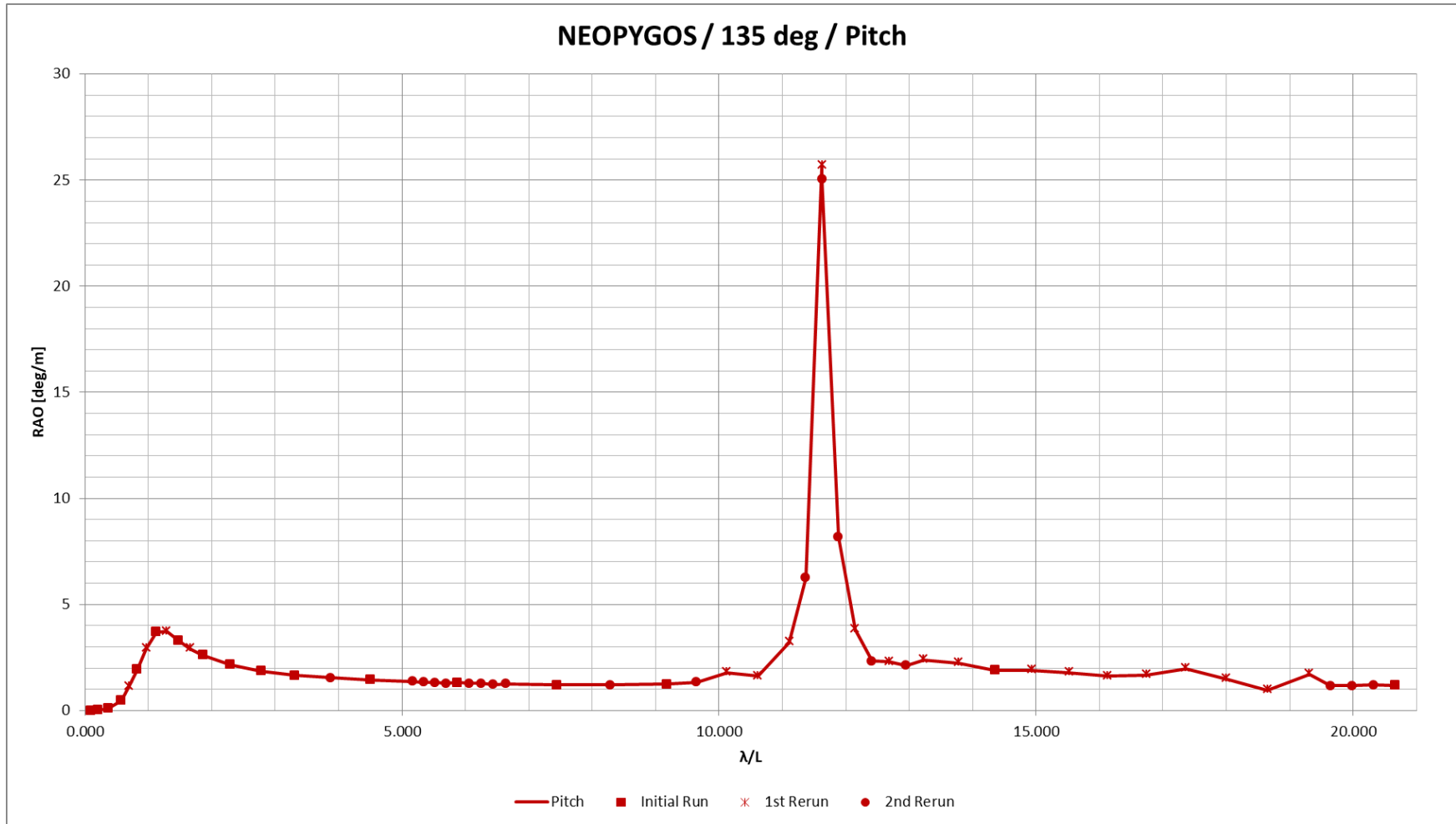


B.3. NEOPYGOS – Pitch RAO

180 Degrees



135 Degrees



90 Degrees

